

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



**CORRELACIÓN ENTRE EL F'C EQUIVALENTE DEL CONCRETO
(ACI 214.4-21) CON LOS CRITERIOS PARA EVALUAR LA
RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN POR MEDIO DE NÚCLEOS DE
CONCRETO (ACI 318-19) Y CON PRUEBAS NO DESTRUCTIVAS.**

POR

JESÚS ANTONIO TORRES PALACIOS

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRÍA EN
CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN**

SEPTIEMBRE DE 2022

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



**CORRELACIÓN ENTRE EL F'C EQUIVALENTE DEL CONCRETO
(ACI 214.4-21) CON LOS CRITERIOS PARA EVALUAR LA
RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN POR MEDIO DE NÚCLEOS DE
CONCRETO (ACI 318-19) Y CON PRUEBAS NO DESTRUCTIVAS.**

POR

JESÚS ANTONIO TORRES PALACIOS

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRÍA EN
CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN**

**DR. ALEJANDRO DURÁN HERRERA
DIRECTOR DE TESIS**

**DR. LUCIO GUILLERMO LÓPEZ YÉPEZ
CO-DIRECTOR DE TESIS**

SEPTIEMBRE DE 2022



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

DR. GERARDO FAJARDO SAN MIGUEL
Subdirector de Estudios de Posgrado e Investigación
Facultad de Ingeniería Civil, UANL
Presente.-

Estimado Dr. Fajardo San Miguel,


Por medio de la presente, hago de su conocimiento que he finalizado la revisión del documento de TESIS, cuyo título es **“CORRELACIÓN ENTRE EL F’C EQUIVALENTE DEL CONCRETO (ACI 214.4-21) CON LOS CRITERIOS PARA EVALUAR LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN POR MEDIO DE NÚCLEOS DE CONCRETO (ACI 318-19) Y CON PRUEBAS NO DESTRUCTIVAS”**, que presenta el ING. JESÚS ANTONIO TORRES PALACIOS, como requisito parcial para obtener el grado de MAESTRO EN CIENCIAS, del programa MAESTRÍA EN CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN.

Por lo anterior, me permito informar a Usted que el documento CUENTA con la calidad y nivel CIENTÍFICO, adecuados para su defensa, por lo que dictamino que este trabajo sea APROBADO.

Asimismo, anexo a este documento el formato de evaluación correspondiente, donde hago saber mis comentarios y observaciones al respecto.

Sin otro particular por el momento, me despido y quedo a sus órdenes para cualquier duda o aclaración que considere pertinente.

Atentamente,
“Alere Flamam Veritatis”
Ciudad Universitaria, 6 de septiembre de 2022


DR. ALEJANDRO DURÁN HERRERA
Evaluador



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
Av. Pedro de Alba S/N Ciudad Universitaria, San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México, C.P. 66455
81 8329 4000 ext. 4060 • www.fic.uanl.mx



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

2022/AGOSTO/30

DR. GERARDO FAJARDO SAN MIGUEL
SUBDIRECTOR DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
PRESENTE.-

Estimado Dr. Fajardo San Miguel,

Por medio de la presente, hago de su conocimiento que he finalizado la revisión del documento de TESIS, cuyo título es "**CORRELACIÓN ENTRE EL F'C EQUIVALENTE DEL CONCRETO (ACI 214.4-21) CON LOS CRITERIOS PARA EVALUAR LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN POR MEDIO DE NÚCLEOS DE CONCRETO (ACI 318-19) Y CON PRUEBAS NO DESTRUCTIVAS**", que presenta el ING. JESÚS ANTONIO TORRES PALACIOS, como requisito parcial para obtener el grado de MAESTRO EN CIENCIAS, del programa MAESTRÍA EN CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN.

Por lo anterior, me permito informar a Usted que el documento CUENTA con la calidad y nivel CIENTÍFICO, adecuados para su defensa, por lo que dictamino que este trabajo sea APROBADO.

Asimismo, anexo a este documento el formato de evaluación correspondiente, donde hago saber mis comentarios y observaciones al respecto.

Sin otro particular por el momento, me despido y quedo a sus órdenes para cualquier duda o aclaración que considere pertinente.

Atentamente,


DR. LUCIO GUILLERMO LÓPEZ YEPEZ

Evaluador



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

Av. Pedro de Alba S/N Ciudad Universitaria, San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México, C.P. 66455
81 8329 4000 ext. 4060 • www.fic.uanl.mx



Ciudad de México, 19 de septiembre 2022.

DR. GERARDO FAJARDO SAN MIGUEL

SUBDIRECTOR DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

PRESENTE

Estimado Dr. Fajardo San Miguel,

Por medio de la presente, hago de su conocimiento que he finalizado la revisión del documento de **TESIS**, cuyo título es **“CORRELACIÓN ENTRE EL F’C EQUIVALENTE DEL CONCRETO (ACI 214.4-21) CON LOS CRITERIOS PARA EVALUAR LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN POR MEDIO DE NÚCLEOS DE CONCRETO (ACI 318-19) Y CON PRUEBAS NO DESTRUCTIVAS”**, que presenta el **ING. JESÚS ANTONIO TORRES PALACIOS**, como requisito parcial para obtener el grado de **MAESTRO EN CIENCIAS**, del programa **MAESTRÍA EN CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN**.

Por lo anterior, me permito informar a Usted que el documento **CUENTA** con la calidad y nivel **CIENTÍFICO**, adecuados para su defensa, por lo que dictaminó que este trabajo sea **APROBADO**.

Asimismo, anexo a este documento el formato de evaluación correspondiente, donde hago saber mis comentarios y observaciones al respecto.

Sin otro particular por el momento, me despido y quedo a sus órdenes para cualquier duda o aclaración que considere pertinente.

Atentamente,

Dr. Esteban Astudillo de la Vega
Evaluador

Construcciones, Ingeniería e Innovación AG2M S.A. de C.V.

www.ag2m.com.mx

tel. 55 10 15 83

Calle López No , Colonia Centro, México, D.F., C.P. 06050



Comprobante de corrección de escritos

ESTUDIANTE PROFESOR

NOMBRE: JESÚS ANTONIO TORRES PALACIOS

TIPO DE DOCUMENTO: ARTÍCULO TESIS PI OTRO

TÍTULO DEL DOCUMENTO A REVISAR:
CORRELACION ENTRE EL f_c' EQUIVALENTE DEL CONCRETO (ACI 214.4-21) CON LOS CRITERIOS PARA EVALUAR LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN POR MEDIO DE NUCLEOS DE CONCRETO (ACI 318-19) Y CON PRUEBAS NO DESTRUCTIVAS.

RECOMENDACIONES ADICIONALES:

REALIZAR LAS CORRECCIONES QUE APAREZCAN EN LA TESIS IMPRESA

*Este documento certifica la corrección DEFINITIVA del trabajo arriba identificado, en los aspectos: ortográfico, metodológico y estilístico.

Nombre y firma de quien corrigió:

Ramón Longoria

Arq. Ramón Longoria Ramírez
Asesor Profesional de Apoyo

Gerardo Fajardo

Dr. Gerardo Fajardo San Miguel

Subdirector de Estudios de Posgrado e Investigación
Ciudad Universitaria, 12 de Agosto de 2022



SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN



**CORRELACIÓN ENTRE EL F'c EQUIVALENTE DEL CONCRETO (ACI 214.4-21)
CON LOS CRITERIOS PARA EVALUAR LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN
POR MEDIO DE NÚCLEOS DE CONCRETO (ACI 318-19) Y CON PRUEBAS NO
DESTRUCTIVAS.**

Aprobación de la tesis:

DR. ALEJANDRO DURÁN HERRERA

NOMBRE Y FIRMA DEL ASESOR

DR. LUCIO GUILLERMO LÓPEZ YÉPEZ

NOMBRE DEL EVALUADOR 1

DR. ESTEBAN ASTUDILLO DE LA VEGA

NOMBRE DEL EVALUADOR 2

DR. GERARDO FAJARDO SAN MIGUEL

SUBDIRECTOR DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

Agradecimientos

Primeramente, quiero presentar mi enorme agradecimiento a Dios, por haberme permitido llegar a esta instancia y de brindarme todo lo necesario para lograr el objetivo y siempre darme las fuerzas para salir adelante.

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento al Dr. Alejandro Durán Herrera, Asesor de mi tesis, por orientarme en el desarrollo de mi formación académica en el programa de posgrado, así como en mi proyecto de investigación. De igual manera al Dr. Lucio Guillermo López Yépez y al Dr. Esteban Astudillo de la Vega, por formar parte del Comité de Tesis, quienes brindaron sus valiosos consejos y recomendaciones para una mejora continua de la investigación desarrollada.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por el apoyo económico para la realización de mis estudios.

Al Dr. Ricardo González Alcorta, director de la Facultad de Ingeniería Civil de la U.A.N.L. y al Dr. Adrián Leonardo Ferriño Fierro, subdirector de vinculación del Instituto de Ingeniería Civil, de la U.A.N.L. por la autorización y facilidades de acceso a las áreas de trabajo del laboratorio de Tecnología del concreto y la obtención del material y equipo para el desarrollo de la fase experimental.

Un agradecimiento a Concretos Tepeyac que, por conducto a los ingenieros Sergio Eduardo Flores Doria y Marcos Balderas Varela, quienes nos donaron el cemento portland ordinario 40R, para el desarrollo de la fase experimental de mi tesis, así como, las muestras de aditivos Mapei n280 y rp190. De igual manera, un agradecimiento a Eucomex S.A. de C.V., que por conducto del LAE. Napoleón Jaime Hernández nos donó el aditivo superfluificante Plastol Pre Cast Plus.

Un fuerte agradecimiento a todo el personal del Departamento de Tecnología del Concreto, FIC, UANL, quienes me facilitaron mi estancia durante mi fase experimental.

A mi familia, por el apoyo moral que siempre me han brindado y a todas las personas que contribuyeron de una forma u otra en la realización de este trabajo.

Dedicatoria

A Dios, por darme vida y salud, las condiciones y las fortalezas necesarias para haber llegado a este punto y nunca dejarme solo, siempre ayudándome a levantarme y seguir adelante hasta lograr el objetivo, dándome los consejos para resolver cada problema.

Quiero hacer una dedicación especial a mis padres, Juan Antonio Torres Galindo y Teresa Isaura Palacios Leal, quienes siempre han sido mis pilares, quienes se han encargado de que nada me falte y siempre me han impulsado a seguir adelante. Sin ellos no sería nada en la vida.

A una persona muy especial en mi vida, la Ing. Erika Sousette Hernández Limas, quien siempre me ha motivado a dar más cada día, para lograr todos mis objetivos y quien siempre ha estado dispuesta a darlo todo para que yo triunfe en la vida y que juntos hemos venido cumpliendo nuestras, metas y vamos por más.

Quiero hacer una dedicación a mis hermanos Juan Angel Torres Palacios y Emerico Torres Palacios por el apoyo brindado, que estuvieron apoyándome en diferentes formas para seguir adelante.

Un agradecimiento por la colaboración en mi fase experimental a los Ingenieros Abdiel Vázquez Pachuca y Abraham Hidalgo Bermúdez, así como al Técnico en pruebas al concreto, José Ángel Chacón Pérez, quienes, más allá de su apoyo en el proyecto, también desarrollaron un importante papel como amigos durante mis estudios de posgrado.

Resumen

La resistencia a la compresión uno de los parámetros clave, no sólo para el diseño de estructuras de concreto y el aseguramiento de la calidad en la producción de este material, sino también para decidir sobre aspectos constructivos como: el tiempo en el que se deberán retirar las cimbras, el tiempo para concluir el curado, y la edad para poner en servicio la obra, entre otros. Para la determinación de la resistencia a la compresión del concreto in situ existe una amplia cantidad de técnicas que pueden ser utilizadas, las cuales suelen catalogarse como pruebas no destructivas o semi-destructivas. El propósito de este estudio es determinar si la estimación de la resistencia a la compresión especificada del concreto ($f'c$), mediante la adopción de los criterios establecidos en el ACI 318-19, a través de núcleos de concreto, podría correlacionarse con los criterios únicos establecidos por el ACI 214.4-21 para la determinación del $f'c$ equivalente, así como generar una correlación entre el $f'c$ equivalente por ACI 214.4-21 con las pruebas no destructivas estudiadas en esta investigación. Lo anterior se llevó a cabo evaluando mezclas de concreto con $f'c$ objetivo de 25, 30, 50 y 70 MPa, a través de núcleos de concreto con diámetros nominales de 7.5 y 10 cm, cilindros estándar de 10 x 20 cm y pruebas no destructivas como martillo de rebote, velocidad de pulso ultrasónico y fuerza de extracción Lok-Test, en edades de 1, 3, 7, 14, 28 y 56 días.

Mediante los resultados que se obtenga mediante las pruebas involucradas, se definieron correlaciones entre el $f'c$ equivalente y los resultados del ACI 318-19, así como con cada ensayo no destructivo involucrado en esta investigación, los cuales presentan tendencias polinómicas y lineales, así como coeficientes de confiabilidad con valores superiores que 0.97.

Índice

CAPÍTULO 1	1
1.1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
1.3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	4
1.3.1. Tecnología del concreto.....	4
1.3.2. Extracción de núcleos de concreto	6
1.3.3. Especificaciones para núcleos de concreto (ACI 214.4-21).....	9
1.3.4. Especificaciones para núcleos de concreto (ACI 318-19).....	26
1.3.5. Cilindros estándar de concreto	29
1.3.6. Martillo de rebote	31
1.3.7. Velocidad de pulso ultrasónico	39
1.3.8. Ensayo de extracción (Lok-Test)	41
CAPÍTULO 2	46
2.1. JUSTIFICACIÓN	46
2.2. HIPÓTESIS	46
2.3. OBJETIVOS	47
2.3.1. Objetivo general.....	47
2.3.2. Objetivos específicos	47
CAPÍTULO 3	48
3.1. MÉTODO EXPERIMENTAL	48
3.2. ETAPA I.- Caracterización de los materiales	51
3.3. ETAPA II.- Diseño de mezclas de referencia	54
3.4. ETAPA III.- Ensayos al concreto	60

3.5. ETAPA IV. ACI 214.4-21 y ACI 318-19	64
3.6. ETAPA V.- Correlaciones.....	72
CAPÍTULO 4	73
4.1. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	73
4.2. ETAPA I.- Caracterización de los materiales	73
4.3. ETAPA II.- Mezclas de concreto	75
4.4. ETAPA III.- Ensayos al concreto en estado endurecido.....	76
4.5. ETAPA IV y V.- ACI 214.4-21, ACI318-19 y Correlaciones.....	99
CAPÍTULO 5	116
5.1. CONCLUSIONES.....	116
CAPÍTULO 6	120
6.1. RECOMENDACIONES	120
CAPÍTULO 7	121
7.1. Referencias bibliográficas	121
CAPÍTULO 8	129
8.1. APÉNDICES.....	129
8.1.1. Apéndice I.....	129
8.1.2. Apéndice II.....	133

Lista de Tablas

Tabla 1. Factores en la interpretación de resultados de núcleos por diferentes códigos.[18].....	9
Tabla 2. Valores críticos ^A (prueba unilateral) para w/s (Relación de radio del intervalo a la desviación estándar de la muestral).....	14
Tabla 3. Magnitud y precisión de los factores de corrección de resistencia para convertir las resistencias de núcleos en resistencias equivalentes en el lugar.	19
Tabla 4. Factores K para límites de tolerancia unilaterales en fractil del 10 por ciento.[32].....	22
Tabla 5. Factores Z. [32].....	23
Tabla 6. Factores T unilaterales.[32].....	23
Tabla 7. Factores de C.	25
Tabla 8. Factores de corrección de la resistencia con base a la relación l/d.[12] .	27
Tabla 9. Ejemplo de resultados de prueba de núcleos de concreto.[37].....	28
Tabla 10. Resultados de f'c adoptando los criterios del ACI 318.[37]	29
Tabla 11. Resumen de resultados de ensayos de resistencia a la compresión y martillo de rebote.[60].....	36
Tabla 12. Datos de ensayos de martillo de rebote vs resistencia a la compresión en cilindros.	37
Tabla 13. Frecuencia natural de los transductores para diferentes longitudes de trayectoria. [64].....	40
Tabla 14. Resumen del coeficiente de variación dentro de la prueba de extracción. [72]	44
Tabla 15. Resistencia a la rotura de núcleos de concreto de 7.5 cm de diámetro a una edad de 14 días de curado.....	66

Tabla 16. f'_c equivalente para evaluar la capacidad estructural de una estructura existente.....	67
Tabla 17. Resultado de los cálculos de las diversas desviaciones estándar aplicadas por el ACI 214.4-21.	68
Tabla 18. Valores del 10 por ciento fractil de los datos de resistencia en el lugar.	68
Tabla 19. Resultados del f'_c equivalente por el método FT y para un NC de 75%.	69
Tabla 20. Límite inferior de la resistencia promedio en el lugar.	70
Tabla 21. Resultados del f'_c equivalente por el método alternativo para un NC de 75% por ACI 214.4-21.	70
Tabla 22. Resultados del f'_c estimado adoptando los criterios del ACI 318-19. ...	71
Tabla 23. Propiedades de los agregados utilizados en la producción del concreto.	73
Tabla 24. Propiedades del cemento Portland utilizado para la producción del concreto.....	74
Tabla 25. Densidades de los diversos aditivos utilizados en la producción del concreto.....	74
Tabla 26. Proporcionamiento de concreto para 1 m ³	75
Tabla 27. Resistencia a la compresión, desviación estándar y coeficiente de variación para los resultados de cilindros de 10x20 cm.	76
Tabla 28. Evolución de la resistencia a la compresión en cilindros de 10x20 cm.	78
Tabla 29. Resistencia a la compresión (rotura), desviación estándar y coeficiente de variación para los resultados de núcleos de 7.5 cm.	80
Tabla 30. Resistencia a la compresión (rotura), desviación estándar y coeficiente de variación para los resultados de núcleos de 10 cm.	81
Tabla 31. Fuerza de extracción, desviación estándar y coeficiente de variación para los resultados de Lok-Test (Pull-out).....	84

Tabla 32. Velocidad de onda, desviación estándar y coeficiente de variación para los resultados de VPU..... 86

Tabla 33. Número de rebote, desviación estándar y coeficiente de variación. 88

Lista de Ilustraciones

Ilustración 1. Sección transversal del concreto endurecido, confeccionado con grava redonda de silicio (izq) y calcáreo triturado (der). La pasta de cemento y agua cubre completamente cada partícula de agregado y llena todos los espacios entre partículas. [3].....	4
Ilustración 2. Ensayo a compresión de cilindro de concreto de 150 x 300 mm.[3]	6
Ilustración 3. Extracción de núcleos en ubicaciones preseleccionadas (izq) y algunos núcleos extraídos (der).[11]	7
Ilustración 4. Error máximo de la media muestral para varios números de especímenes recomendados.	11
Ilustración 5. Muestra conformada por cilindros estándar de concreto de 150 x 300 mm. [40]	29
Ilustración 6. Cabeceo con azufre para cilindros estándar de concreto.[42]	30
Ilustración 7. Prueba de martillo de rebote Schmidt. a Esquema interno del instrumento, 1- resorte de impacto, 2- botón, 3- seguro de la masa, 4- escala, 5- indicador deslizante, 6- masa, 7- resorte de retorno, 8- pistón; b ensayo en las paredes de bloques de un macizo rocoso expuesto.[46].....	32
Ilustración 8. Curvas de calibración del martillo de rebote. [59].....	35
Ilustración 9. Efecto de la precarga en el número de rebote. [55]	39
Ilustración 10. Arreglo de típico de velocidad de pulso ultrasónico.[63]	40
Ilustración 11. Aplicación de la técnica de velocidad de pulso en una estructura de concreto. [60].....	41
Ilustración 12. Funcionamiento de la extracción Pull-out.[67].....	42
Ilustración 13. Comparación de fuerzas pull out para Lok Test y Capo Test de un mismo concreto. [62]	42

Ilustración 14. Planeación de ensayos no destructivos y semi-destructivos al concreto	49
Ilustración 15. Planeación de ensayos no destructivos y semi-destructivos al concreto.....	50
Ilustración 16. Picnómetros utilizados para la determinación de la densidad del agregado fino.	51
Ilustración 17. Picnómetro tipo sifón de 15 cm de diámetro x 30 cm de altura (izquierda) y Picnómetro tipo sifón de 10 cm de diámetro x 35 cm de altura (derecha).[73].....	52
Ilustración 18. Frasco Le Chatelier con cemento y Keroseno para la determinación de la densidad del cemento.....	52
Ilustración 19. Mallas utilizadas para determinar la granulometría del agregado fino (izquierdo) y equipo de cribado mecánico empleado para este ensaye (derecho).	53
Ilustración 20. Determinación del revenimiento para las mezclas de concreto fabricadas en este proyecto.	54
Ilustración 21. Determinación del contenido de aire en el concreto en estado fresco por ASTM C231.....	55
Ilustración 22. Cilindro estándar de concreto de 100 x 200 mm para medir la resistencia a la compresión del concreto.	56
Ilustración 23. Prisma de concreto de 600x300x300 mm para ejecutar pruebas no destructivas.	57
Ilustración 24. Llenado del molde de prismas de concreto en tres capas de similar volumen.....	57
Ilustración 25. Vibrado hacia el concreto en la fabricación del prisma de concreto.	58
Ilustración 26. Distribución de insertos para la prueba de Lok-Test para edades de 14, 28 y 56 días.....	59

Ilustración 27. Distribución de insertos para la prueba de Lok-Test para edades de 1, 3 y 7 días.....	60
Ilustración 28. Cilindro estándar de concreto de 100x200 mm ensayado a compresión.....	61
Ilustración 29. Extracción de núcleos a un prisma de concreto para su ensayo a compresión.....	61
Ilustración 30. Ensayo a compresión de un núcleo de concreto de 7.5 cm.	62
Ilustración 31. Determinación del número de rebote a un cilindro de 150x300 mm precargado a 3 MPa.....	62
Ilustración 32. Ejecución del ensayo Lok-Test (pull-out) a un prisma de concreto.	63
Ilustración 33. Falla correcta en la extracción de inserto por la prueba Lok-Test.	64
Ilustración 34. Métodos de determinación de $f'c$ equivalente por el ACI 214.4-21.[5]	65
Ilustración 35. Correlaciones obtenidas a partir de los resultados de la fase experimental.....	72
Ilustración 36. Granulometría del agregado fino con los límites de ASTM C33... 74	
Ilustración 37. Resistencia a la compresión en cilindros de 10x20 cm para los diferentes $f'c$ objetivos.....	79
Ilustración 38. Resistencia a compresión (rotura) del concreto a través de núcleos de 7.5 y 10 cm.....	82
Ilustración 39. Fuerza de extracción al concreto a través de Lok-Test (pull-out).	85
Ilustración 40. Velocidad de onda en el concreto a través del ensaye VPU.....	87
Ilustración 41. Número de rebote en el concreto a través del ensaye martillo de rebote.....	89

Ilustración 42. Comparación de la resistencia a la compresión en núcleos de 7.5 cm por los diferentes métodos considerados en este proyecto para 25 y 30 MPa.	91
Ilustración 43. Comparación de la resistencia a la compresión en núcleos de 7.5 cm por los diferentes métodos considerados en este proyecto para 50 y 70 MPa.	92
Ilustración 44. Comparación de la resistencia a la compresión en núcleos de 10 cm por los diferentes métodos considerados en este proyecto para 25 y 30 MPa.	94
Ilustración 45. Comparación de la resistencia a la compresión en núcleos de 10 cm por los diferentes métodos considerados en este proyecto para 50 y 70 MPa.	95
Ilustración 46. Comparación de la resistencia a la compresión en núcleos de 7.5 cm y el $f'c$ equivalente para un 25 MPa y un NC de 90%.....	97
Ilustración 47. Comparación de la resistencia a la compresión en núcleos de 10 cm y el $f'c$ equivalente para un 25 MPa y un NC de 90%.	98
Ilustración 48. Correlación entre la resistencia a la rotura de núcleos de concreto de 7.5 cm a 14 días, contra el $f'c$ equivalente a través del método alternativo ACI 214.4-21.	99
Ilustración 49. Correlación entre la resistencia a la rotura de núcleos de concreto de 7.5 cm a 28 días contra el $f'c$ equivalente a través del método alternativo ACI 214.4-21.	100
Ilustración 50. Correlación entre la resistencia a la rotura de núcleos de concreto de 7.5 cm a 56 días contra el $f'c$ equivalente a través del método alternativo ACI 214.4-21.	101
Ilustración 51. Correlación entre la resistencia a la rotura de núcleos de concreto de 10 cm a 14 días, contra el $f'c$ equivalente a través del método alternativo ACI 214.4-21.	102

Ilustración 52. Correlación entre la resistencia a la rotura de núcleos de concreto de 10 cm a 28 días contra el $f'c$ equivalente a través del método alternativo ACI 214.4-21.	103
Ilustración 53. Correlación entre la resistencia a la rotura de núcleos de concreto de 10 cm a 56 días contra el $f'c$ equivalente a través del método alternativo ACI 214.4-21.	103
Ilustración 54. Correlación entre el $f'c$ estimado por ACI 318-19 85% de núcleos de concreto de 7.5 cm a 14 días contra el $f'c$ equivalente a través del método alternativo ACI 214.4-21.	105
Ilustración 55. Correlación entre el $f'c$ estimado por ACI 318-19 85% de núcleos de concreto de 7.5 cm a 28 días contra el $f'c$ equivalente a través del método alternativo ACI 214.4-21.	106
Ilustración 56. Correlación entre el $f'c$ estimado por ACI 318-19 85% de núcleos de concreto de 7.5 cm a 56 días contra el $f'c$ equivalente a través del método alternativo ACI 214.4-21.	106
Ilustración 57. Correlación entre el $f'c$ estimado por ACI 318-19 85% de núcleos de concreto de 10 cm a 14 días contra el $f'c$ equivalente a través del método alternativo ACI 214.4-21.	108
Ilustración 58. Correlación entre el $f'c$ estimado por ACI 318-19 85% de núcleos de concreto de 10 cm a 28 días contra el $f'c$ equivalente a través del método alternativo ACI 214.4-21.	108
Ilustración 59. Correlación entre el $f'c$ estimado por ACI 318-19 85% de núcleos de concreto de 10 cm a 56 días contra el $f'c$ equivalente a través del método alternativo ACI 214.4-21.	109
Ilustración 60. Correlación entre el $f'c$ equivalente en núcleos de concreto de 7.5 cm a través del método alternativo ACI 214.4-21 contra la velocidad de pulso ultrasónico para 25 MPa.	110

Ilustración 61. Correlación entre el f'_c equivalente en núcleos de concreto de 7.5 cm a través del método alternativo ACI 214.4-21, contra la velocidad de pulso para 25 MPa.....	111
Ilustración 62. Correlación entre el f'_c equivalente en núcleos de concreto de 7.5 cm a través del método alternativo ACI 214.4-21, contra el número de rebote para 25 MPa.....	112
Ilustración 63. Correlación entre el f'_c equivalente en núcleos de concreto de 10 cm a través del método alternativo ACI 214.4-21, contra el número de rebote para 25 MPa.....	112
Ilustración 64. Correlación entre el f'_c equivalente en núcleos de concreto de 7.5 cm a través del método alternativo ACI 214.4-21, contra la fuerza para 25 MPa.	114
Ilustración 65. Correlación entre el f'_c equivalente en núcleos de concreto de 10 cm a través del método alternativo ACI 214.4-21, contra la fuerza de extracción para 25 MPa.....	114

CAPÍTULO 1

1.1. INTRODUCCIÓN

Conforme avanza el conocimiento de la tecnología del concreto, se puede conocer lo importante que es tener un mayor control de las propiedades del concreto para maximizar su desempeño y su impacto favorable, en términos de sostenibilidad.

En este sentido, siendo la resistencia a la compresión uno de los parámetros clave, no sólo para el diseño de estructuras de concreto y el aseguramiento de la calidad en la producción del mismo, sino también para decidir sobre aspectos constructivos como: el tiempo en el que se deberán retirar las cimbras, el tiempo para concluir el curado y la edad para poner en servicio la obra, entre otros, cuando se dispone de adecuada información se estará en posición de optimizar el programa de obra y minimizar los retrasos, aspectos que ayudan a construir obras de mayor calidad y de menor impacto ecológico, así como a reducir costos.[1]

En México y Latinoamérica es muy común el uso de probetas cilíndricas para medir y llevar el control de la resistencia a la compresión de un concreto nuevo, mientras que en algunos países de la unión europea se emplean probetas cúbicas.[2]

La necesidad de obtener el f_c del concreto de una estructura in situ suele ser provocada por diversas situaciones, como cuando se desconocen por completo las propiedades de los materiales de fabricación, cuando la estructura se ve sometida a algún fenómeno que puede comprometer su integridad; el cambio de uso de la unidad y la continuidad en la construcción, así como otros escenarios que necesitan del conocimiento de dicha propiedad del concreto.

Para la determinación de la resistencia a la compresión del concreto in situ existe una amplia cantidad de técnicas que pueden ser utilizadas. Algunas de ellas son catalogadas como no destructivas por el motivo de no dejar daño o modificación alguna en el elemento, se pueden mencionar ejemplos como: el martillo de rebote, el índice de madurez y la prueba de ultrasonido, entre otras.

Sin embargo, existen también las pruebas consideradas como semi-destructivas, por los pequeños daños que generan en el elemento ensayado, mas esta alteración no pone en peligro la funcionalidad del elemento y, por nombrar algunos ejemplos, se tiene el método pull-out y la extracción de núcleos de concreto, los cuales en parte se relacionan con las pruebas destructivas, debido a que éstos son ensayados como un cilindro estándar de concreto.

En el ACI 214.4-21 se establecen los procedimientos para conocer el valor de la resistencia especificada a la compresión, a partir de la resistencia obtenida por la extracción de núcleos de concreto. Considerando diversos factores que afectan el comportamiento de los especímenes de concreto obtenidos in situ de los cuales se pueden resaltar el diámetro, la relación l/d, el contenido de humedad, el contenido de acero y el daño generado en el núcleo, además de incluir diversos valores por desviaciones y coeficientes de variación, para hacer más preciso el cálculo de f'_c .

Esta guía muestra dos métodos que pueden emplearse para la interpretación de los resultados, aunque ambos coinciden en un laborioso trabajo, para finalmente determinar un valor de f'_c equivalente del concreto, además, de mostrar distintos niveles de confianza que el calculista debe utilizar para seleccionar y obtener resultados conservadores, dependiendo del grado de importancia que tiene la estructura que se está analizando.

En la práctica es un procedimiento que no se sigue y, en su lugar, para este fin comúnmente se adoptan los criterios establecidos por el ACI 318, debido a la complejidad con la que se trabaja cuando se siguen los parámetros establecidos por el ACI 214.4, mientras que la adopción de los criterios a partir del contenido de las recomendaciones y criterios de aceptación para el concreto estructural, por medio de núcleos de concreto; los cuales sólo consideran dos condiciones de resistencia que van de la mano para obtener un porcentaje de la resistencia especificada. Sin embargo, existen varios investigadores que indican que este procedimiento no es del todo correcto y que, para este fin, se deben seguir los lineamientos planteados en el ACI 214.4-21.

En la mayoría de los casos, la prueba con mayor uso para conocer el valor de la resistencia a la compresión del concreto es el ensaye de cilindros estándar; sin embargo, técnicas como el Pull-out, el método de madurez, la extracción de núcleos y el martillo de rebote suelen arrojar resultados con gran certidumbre, por lo que en esta investigación se busca obtener una estimación del f'_c del concreto por medio de las pruebas anteriormente mencionadas con el objetivo de correlacionarlas y brindar al lector bases para decidir con seguridad cual técnica utilizar cuando se busque el f'_c equivalente del concreto, lo cual sería de gran utilidad debido a la reducción de costos y tiempos, al sustituir la técnica de extracción de núcleos por alguna prueba no destructiva, pero siendo prioridad el poder generar alguna correlación entre los valores del ACI 214.4 contra la adopción del ACI 318.

1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Para edificaciones de concreto que ya tienen tiempo consolidadas es muy común en algún momento de su vida útil recurrir a un análisis de propiedades mecánicas para conocer la seguridad estructural con la que cuenta la obra. Optando en la mayoría de los casos por extraer núcleos de concreto para después de un ensaye conocer el $f'c$ equivalente del material. Y por mencionar algunos ejemplos donde la necesidad de obtención del $f'c$ equivalente se vuelve primordial, se tienen los casos de estudio para estructuras que van a cambiar de uso o aplicación, la construcción de niveles superiores, la reelaboración de planos o la revisión por presencia de deterioro en la obra.

En la actualidad, para estimar la resistencia especificada para el diseño estructural ($f'c$), en la práctica profesional de la construcción con concreto, es muy común adoptar los criterios que fueron establecidos por el ACI 318-19 para evaluar por medio de núcleos o corazones de concreto si la resistencia del concreto es estructuralmente aceptable, a pesar de que el propio ACI proporciona en el ACI 214.4-21 los criterios específicamente establecidos para este fin.

Debido a que no se dispone de estudios que demuestren las variaciones que resultan al evaluar resultados de resistencia a compresión obtenidos por medio de núcleos de concreto, por medio de estos dos criterios (ACI 318-19 y ACI 214.4-21) existen muchas críticas con relación a la confiabilidad de los resultados que se obtienen para el $f'c$, al adoptar los criterios del ACI 318-19.

Por otro lado, existen en el mercado tecnologías que, con base en principios muy específicos y diferentes al ensaye de especímenes a compresión ayudan a estimar con mayor o menor nivel de precisión la resistencia a la compresión, del concreto en el lugar, misma que en ninguno de los casos representa el $f'c$, sino más bien un resultado de resistencia a la ruptura, de las cuales se pueden mencionar el esclerómetro, el índice de madurez y la velocidad de pulso de onda.

Aunque la ejecución de estas pruebas es relativamente sencilla, los resultados que se obtienen por medio de ellas se asocian con la resistencia del concreto a la ruptura y no al $f'c$; por lo cual, en este trabajo también se identifica como un área de oportunidad importante el establecer correlaciones para los resultados obtenidos por medio de estas tecnologías con la resistencia especificada del concreto ($f'c$).

Este parámetro es de gran utilidad en la toma de decisiones como el retiro de cimbras, el funcionamiento de obras de concreto y la suspensión del curado, entre otras. Se busca hacer una correlación entre la prueba de madurez del concreto con las pruebas de extracción.

1.3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

1.3.1. Tecnología del concreto

El concreto es un material compuesto que tiene gran aplicación en el sector de la construcción. Éste se forma a partir de la mezcla de agregados y pasta, ésta última formada por la unión de agua con cemento portland y que, a su vez, sirve para unificar a los agregados en un solo material resultante. [3]

El producto final de la mezcla de estos materiales resulta en un compuesto con características similares a la de una roca, lo cual se logra cuando se llevan a cabo las reacciones de hidratación del cemento con la ayuda del agua. En la Ilustración 1 se puede apreciar una sección transversal de la pasta de cemento que rodea al agregado; claro, esto siempre relacionado con la calidad de los agregados y la pasta fabricada.

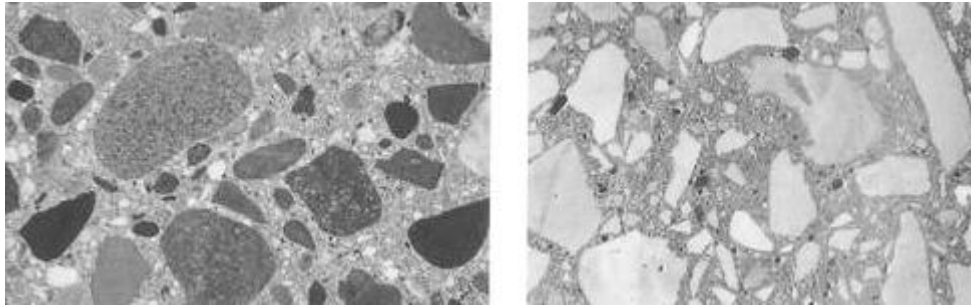


Ilustración 1. Sección transversal del concreto endurecido, confeccionado con grava redonda de silicio (izq) y calceáo triturado (der). La pasta de cemento y agua cubre completamente cada partícula de agregado y llena todos los espacios entre partículas. [3]

Para cualquier grupo de materiales y condiciones de curado, las propiedades de los concretos se ven fuertemente influenciadas por la cantidad de agua adicionada con respecto al cemento. Esto se ha respaldado a través de diversas investigaciones, donde se ha observado que, conforme se disminuye la relación entre el agua y el cemento, se aumentan propiedades como: [3]

- La resistencia mecánica (a compresión y flexión).
- La densificación de la matriz.
- La resistencia a la intemperie.
- La adherencia hacia el acero de refuerzo.
- Reducciones en la contracción y fisuración.
- Reducciones en los cambios de volumen.

La resistencia a la compresión del concreto es comúnmente considerada como la propiedad más significativa.[4]

Con respecto a la resistencia a la compresión en el concreto, se suelen utilizar muchos términos que, de manera general, se puede decir que definen esta propiedad; sin embargo, cada uno de ellos dicta parámetros que los vuelven más puntuales.

A continuación, se presentan definiciones para tener mayor claridad con respecto a la resistencia a la compresión del concreto: [5]

f_c = Resistencia a la compresión de un espécimen cuando se ve sometido a la rotura.

f'_c = Resistencia a la compresión especificada del concreto.

f'_{cr} = Resistencia a la compresión del concreto promedio, requerida (para garantizar que no más de una proporción permisible de ensayos caerá por debajo de la resistencia a la compresión especificada) utilizada como base de selección de la dosificación del concreto.

En el caso del concreto in situ, se suelen utilizar conceptos como: [5]

f'_{ceq} = Resistencia equivalente a la compresión especificada del concreto para el diseño estructural.

f_{core} = Resistencia a la compresión de un núcleo de concreto.

f_{cCL} = Estimación del límite inferior de la media muestral de la resistencia a la compresión equivalente del concreto en el lugar, con el límite de confianza.

$f_{0.10}$ = Resistencia a la compresión del concreto en un 10 percentil de fractura.

Con la finalidad de conocer si la mezcla de concreto producida cumple los requerimientos de resistencia especificada, se suelen realizar pruebas de resistencia a la compresión. Una de las técnicas más utilizadas en América es el empleo de cilindros, los cuales son fallados como se muestra en la Ilustración 2.



Ilustración 2. *Ensayo a compresión de cilindro de concreto de 150 x 300 mm.*[3]

Estos análisis son de gran ayuda cuando se quiere tener control en la estimación de la resistencia del concreto, de igual manera se hace importante para programas de operaciones de construcción, tales como remoción de cimbras, evaluación del curado, o la protección de la estructura. [6]

Los cilindros que se quieran utilizar para la aceptación y control de calidad del concreto se pueden fabricar y curar con base en la normativa ASTM C31, donde se detallan los puntos a seguir para un procedimiento estándar, mientras que para llevar a cabo el ensaye se utiliza la norma ASTM C39, para realizar la prueba mecánica y obtener el resultado de la resistencia a la compresión.

Sin embargo, cuando los resultados obtenidos no son favorables o no terminan por generar la confianza con respecto a la calidad del concreto, se suele acudir de manera inmediata a la extracción de núcleos de concreto para verificar la resistencia a la compresión equivalente in situ se tiene el inconveniente del incremento de costos, al momento de llevar a cabo esta técnica. [7]

1.3.2. Extracción de núcleos de concreto

La extracción y ensayo de núcleos de concreto tiene como función principal la determinación de la resistencia a la compresión del concreto hidráulico de una estructura existente. En general, la extracción de núcleos se lleva a cabo cuando existe una duda razonable de la resistencia, debido a que se tienen bajos resultados de los ensayos durante la construcción, por los síntomas de deterioro en la

estructura o en estructuras antiguas, en donde se necesita obtener más información sobre las condiciones y resistencia del concreto. [8]

La evaluación de la resistencia a la compresión del concreto in situ suele realizarse por medio de la extracción de núcleos de concreto de la estructura (ilustración 3), los cuales después de todo el proceso de obtención y preparación, se someten al ensaye mecánico para determinar la resistencia a la compresión de la probeta. [9] Algunos autores han mencionado que a pesar de que la extracción de núcleos implica un alto costo, tanto económico como de tiempo, este se recompensa con la certidumbre de sus resultados.[10]



Ilustración 3. *Extracción de núcleos en ubicaciones preseleccionadas (izq) y algunos núcleos extraídos (der).*[11]

Sin embargo, también existen ciertas restricciones o recomendaciones que se deben tener en cuenta al momento de llevar a cabo una extracción de núcleos de concreto. Algunos códigos como ASTM y British Standards (BS) recomiendan enfáticamente un diámetro mínimo del núcleo de 100 mm, satisfaciendo la condición de que el diámetro del núcleo sea al menos tres veces mayor que el tamaño máximo de agregado grueso del concreto.[12] [13]

Para casos especiales, algunos estándares permiten diámetros menores que 50 mm, sobre todo cuando se trata de concreto con refuerzo de acero muy denso, que imposibilita la extracción de núcleos de mayor diámetro, sin dañar las barras de acero. [14]

Con respecto a los resultados esperados, se debe tener en cuenta que los resultados de los núcleos de concreto suelen presentar valores por debajo de los que se obtienen a partir de un cilindro estándar. Esto por todos los efectos que se ven involucrados en el proceso de extracción y preparación del espécimen.

Algunas investigaciones han encontrado que los núcleos de concreto para diseños de 25 MPa han presentado el 95% de la resistencia con respecto a lo que presenta un cilindro estándar, mientras que para un concreto de 50 MPa se reporta hasta un 85% para los núcleos de concreto, y que para concreto de ultra alto

comportamiento, con resistencias aproximadas de 120 MPa, el valor encontrado ronda entre 72 y 85%, y esto utilizando núcleos con diámetros de 25 y 100 mm. [15]

Contrario a lo visto en los cilindros de concreto, la variación entre los resultados de núcleos de concreto suele ser mayor al momento de predecir la resistencia a la compresión, para garantizar la aplicación de la prueba en concretos, sobre todo de alta resistencia, se necesita investigación con respecto a los factores de corrección sobre los núcleos.[16]

El Departamento Estructural de Ingeniería, del Politécnico de Torino muestra en una investigación que, en una correlación entre resultados obtenidos de ensaye de núcleos de concreto contra valores de especímenes estándar, presenta líneas con gran tendencia a ser rectas, esto para diferentes diámetros de núcleos. Sin embargo, cabe señalar que, al aumentar el diámetro de la muestra, la correlación mejora. [17]

Conforme ha pasado el tiempo, se han ido generando diferentes manuales que presentan el procedimiento que debe seguirse para determinar de manera correcta la resistencia a la compresión del concreto. Sin embargo, cada uno de ellos presenta diferentes enfoques con respecto a la interpretación de los resultados de la resistencia de los núcleos, e inclusive algunos con muy pocos argumentos.

Además, Shafik Khoury, presenta en una de sus investigaciones que diferentes códigos aplicados a la resistencia del concreto muestran diferentes resultados para sus valores provenientes de núcleos de concreto y esto a causa de la consideración de diferentes parámetros en el proceso de obtención de los resultados, que pueden apreciarse en la Tabla 1 se concluye que el código ACI es el más confiable, siempre que no existe acero dentro del núcleo. [18]

Tabla 1. Factores en la interpretación de resultados de núcleos por diferentes códigos.[18]

Lista	Código/ Estándar	Edición	Factores considerados					
			Relación de aspecto	Diámetro	Refuerzo	Humedad	Daño	Dirección
1	Código Egipcio/ Especificación estándar	2008	✓		✓			✓
2	Código británico / Especificación estándar	2003	✓		✓			✓
3	Instituto America no del Concreto ACI	1998	✓					
		2012	✓	✓		✓	✓	
4	Especificación estándar europea	1998	✓	✓	✓		✓	
		2009	✓		✓			
5	Estándar Japonés	1998	✓					
6	Sociedad del Concreto	1987	✓		✓		✓	✓

Está claro que el enfoque elegido para la evaluación de la resistencia del concreto, a partir de datos de prueba, puede influir en las estimaciones de los niveles de seguridad de las estructuras.[19] Durante esta investigación se estarán analizando los lineamientos dictados tanto por el ACI 214.4-21 como los descritos en el ACI 318-19.

1.3.3. Especificaciones para núcleos de concreto (ACI 214.4-21)

El Comité 214 del ACI ha desarrollado dos métodos para determinar el f'_c equivalente de los núcleos extraídos de estructuras existentes. La versión ACI 214.4 es la encargada de definir los métodos, los cuales están basados en técnicas de análisis estadístico. Tomando en cuenta valores de corrección relacionados con aspectos físicos de las probetas, como el diámetro, la relación l/d, el contenido de humedad, la presencia de acero o el daño generado en la extracción.

Después de obtener un valor de resistencia corregido por lo anteriormente mencionado, se debe realizar un análisis estadístico para determinar las desviaciones existentes en las probetas, así como considerar un porcentaje de error para así, al final, con ambos resultados, llegar a un valor de resistencia equivalente.

Cabe destacar que esta guía está diseñada para obtener el $f'c$ equivalente y no debería ser confundido con la obtención de una resistencia en sitio para la aprobación de un concreto estructural, lo cual se considera en el ACI 318.

Además, de tener en cuenta que el tamaño de la estructura y la sensibilidad de la seguridad estructural a la resistencia del concreto van a definir la cantidad de núcleos necesarios para los ensayos.[20]

1.3.3.1. Evaluación de la capacidad de una estructura existente usando la resistencia in situ.

Para determinar la resistencia a la compresión equivalente in situ, es necesario establecer el tamaño de la muestra y la ubicación de dónde se van a hacer las extracciones. Con respecto a la selección del lugar, se puede apoyar en los ensayos no destructivos, como el martillo de rebote, pull-out (CAPO Test), velocidad de pulso ultrasónico, entre otros, pudiendo apoyarse en ASTM C823, normativa que sirve para hacer un muestreo en el concreto endurecido, pudiendo conocer el aspecto tanto químico como físico o, para este caso, determinar una aproximación de la condición mecánica del material. [21]

Mientras que, para la determinación del tamaño de la muestra de núcleos, el ACI 214.4-21 provee la ecuación 1 que brinda una cantidad de especímenes óptima con base en un porcentaje de error máximo de la media muestral, e . Y un coeficiente de variación estimado para la resistencia in situ, V .

$$n = \left(\frac{2V}{e} \right)^2 \quad (1)$$

n = Número de especímenes recomendado.

V = Coeficiente de variación estimado para la resistencia in situ.

e = Porcentaje de error máximo de la media muestral.

La misma guía presenta también esta ecuación de manera gráfica (ilustración 4) con tres líneas de tendencia propuestas de V .

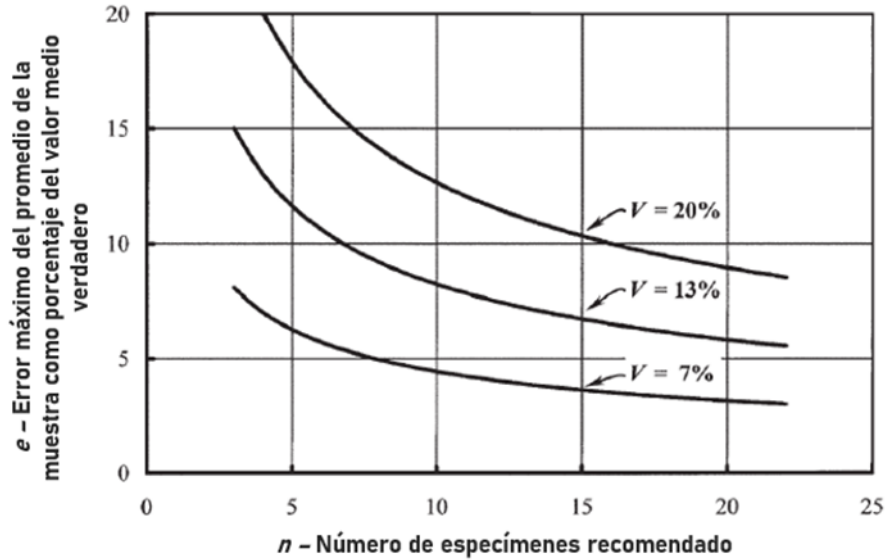


Ilustración 4. Error máximo de la media muestral para varios números de especímenes recomendados.

1.3.3.2. Obtención de especímenes

Las técnicas que se utilizan para la obtención de los núcleos de concreto deben garantizar calidad, principalmente para evitar que se generen daños por el proceso mecánico involucrado. Por esto se vuelve importante cuidar la edad de extracción, para asegurar que el concreto presenta la resistencia y la adherencia suficiente entre el agregado y la pasta de cemento.

Esta guía sugiere seguir los procedimientos descritos en la ASTM C42, donde se detallan el procedimiento y los lineamientos a considerar, para reducir los errores y que la muestra sea en realidad representativa del concreto que se está analizando.

Con respecto a la edad de extracción, la normativa sugiere no obtener núcleos a edades menores que 14 días, a menos, que el concreto tenga la justificación de que cumple las características para no presentar daños después de ser extraído. De la misma manera, se dictan algunas condiciones que deben ser respetadas, como cumplir una relación l/d ideal de 1.9-2.1, un diámetro que sea mayor que 9.5 cm, al igual que evitar la presencia de barras de acero. [22]

Cuando estos aspectos no se pueden cumplir se tendrá que acudir a la modificación de los resultados por factores de corrección, lo cual se busca evitar para minimizar errores. [4]

La extracción de los núcleos de concreto debe realizarse por parte de un operador experimentado que pueda controlar adecuadamente la velocidad de

penetración de la broca; la cual, a su vez, debe estar impregnada por diamante, lubricada constantemente con agua y unida firmemente a la máquina barrenadora. Es importante que esté fijada correctamente, para evitar que existan vibraciones o movimientos oscilatorios, los cuales podrían generar variaciones en la sección del testigo.

1.3.3.3. Preparación de los núcleos

ASTM C 42 presenta el método estándar que se debe dar a un núcleo para llevar al ensaye a compresión, de los cuales simulan la definición de una *Rel. l/d* que se puede obtener con un esmerilado. Posteriormente se hace el recapeo para asegurar una buena transición entre la cara del espécimen con la placa de la máquina de ensaye. Además de cuidar aspectos de perpendicularidad y planicidad con el apoyo de la ASTM C39. [5]

Registrar las dimensiones del espécimen y tomar la medida del peso de éste puede ayudar para obtener un peso volumétrico del material y con esto tener idea de si los resultados son lógicos, porque un peso volumétrico extraño puede ser el culpable de resultados que están alejados del promedio.

La guía del ACI 214.4-21 menciona que cuando no se puede dar una explicación razonable sobre los resultados con grandes variaciones, se puede apoyar en la normativa ASTM E 178, donde se requiere un mínimo de tres especímenes para considerar un resultado como anormal y descartarlo de la muestra de núcleos.

1.3.3.4. ASTM E178.- Tratamiento de valores atípicos

Uno de los problemas en el análisis de datos es manejar los valores atípicos dentro de un grupo de datos. Un valor atípico es una observación con un valor que no parece corresponderse con el resto de los valores en el grupo de datos.

Con frecuencia al observar valores con resultados lejanos al promedio, se suelen preguntar algunos aspectos, ¿Cómo puedo concluir que un valor es atípico? Y ¿Qué debo hacer con ese valor?

Como respuesta a esto, un análisis estadístico sirve para determinar un valor atípico; más no para descartarlo de un grupo de datos. Para esto debe haber una justificación de la causa de ese valor. [23]

Una de las maneras más sencillas para orientarse en si se debe retirar un valor o no, es llegar a dos conclusiones: una tomando en cuenta el valor atípico y otra

donde se descarte y si las conclusiones son diferentes, quizá sea recomendable retirar el valor atípico.

Dos de las técnicas utilizadas con mayor frecuencia para la deducción de valores atípicos son la prueba de Dixon y la de Grubbs. [23]

Esta norma cubre las observaciones de valores atípicos en una muestra y la significancia estadística de éstos. Una observación atípica es un comportamiento de un valor que tiende marcadamente hacia los extremos, alejándose de otros miembros de la muestra. [24]

Siendo más puntuales en los casos analizados por el ACI 214.4-21, podría darse la situación de creer que en algún momento durante el experimento sucedió algo que causó una variación extraña en el lado alto o en el lado bajo, como una mala extracción, un mal corte, un descuido en la condición de humedad o problemas con el recapeo. Es muy poco probable que dos o más de estos eventos pudieran haber ocurrido, siendo uno una variación extraña en el lado alto y la otra una variación extraña en el lado bajo. [24]

1.3.3.5. Criterios recomendados para muestras individuales

1.3.3.5.1. Criterio para dos valores atípicos en lados opuestos de la muestra

Desde este punto de vista, se debería usar el estadístico de la ecuación 2

$$T_n = \frac{x_n - x_{prom}}{s} \quad (2)$$

o el estadístico de la ecuación 3, el que sea mayor.

$$T_1 = \frac{x_{prom} - x_1}{s} \quad (3)$$

Donde T_n y T_1 , son los valores para analizar con el fin de determinar si un dato es un valor atípico.

X_n , es el valor del extremo superior.

X_1 , es el valor del extremo inferior.

X_{prom} , es el valor promedio de la muestra.

S , es la desviación estándar de la muestra.

Si en este caso se usa el punto 0,05 de la tabla 2 como el valor crítico, el verdadero nivel de significancia sería dos veces 0,05 o 0,10. Si se desea un nivel de significación de 0,05 y no de 0,10, en este caso se debe utilizar como valor crítico el punto de 0,025 de la tabla 2.

De lo anterior, si el valor calculado es mayor que el valor tabulado en la tabla se puede catalogar éste como atípico y queda a interpretación del responsable si se va a descartar de la muestra.

Tabla 2. Valores críticos ^A (prueba unilateral) para w/s (Relación de radio del intervalo a la desviación estándar de la muestral)

Número de observaciones, n	10% nivel de significancia	5% nivel de significancia	1% nivel de significancia
3	1.9973	1.9993	2.000
4	2.409	2.429	2.445
5	2.712	2.755	2.803
6	2.949	3.012	3.095
7	3.143	3.222	3.338
8	3.308	3.399	3.543
9	3.449	3.552	3.720
10	3.574	3.689	3.875
11	3.684	3.803	4.011
12	3.782	3.909	4.133
13	3.871	4.005	4.244
14	3.952	4.092	4.344
15	4.025	4.171	4.435
16	4.093	4.244	4.519
17	4.156	4.311	4.597
18	4.214	4.374	4.669
19	4.269	4.433	4.736
20	4.320	4.487	4.799
21	4.368	4.539	4.858
22	4.413	4.587	4.913
23	4.456	4.633	4.965
24	4.497	4.676	5.015
25	4.535	4.717	5.061

26	4.572	4.756	5.106
27	4.607	4.793	5.148
28	4.641	4.829	5.188
29	4.673	4.863	5.226
30	4.704	4.895	5.263
35	4.841	5.040	5.426
40	4.957	5.162	5.561
45	5.057	5.625	5.674
50	5.144	5.356	5.773

^A Cada entrada calculada por 50 000 000 simulaciones.

De esta manera se mejora el tratamiento de los resultados, debido a que el ACI 214.4-21 tiene considerada la desviación estándar con gran impacto para el valor final. Y si no se tiene consideración con los valores atípicos, se calculará una desviación estándar alta, provocando una disminución en la resistencia a la compresión equivalente.

1.3.3.6. Análisis de los datos de resistencia

El ACI 214.4-21 es una de las guías que tratan el tema de la extracción de núcleos de concreto y la interpretación de los resultados obtenidos de pruebas a compresión. Este documento sugiere dos enfoques diferentes para la estimación de un valor equivalente de resistencia in situ, que se utilizará para la evaluación de la capacidad estructural de una estructura existente.

Dado un conjunto n de datos de prueba, el ACI 214.4-21 sugiere corregir estos valores para tener en cuenta sus diferentes condiciones de prueba (diámetro del núcleo, relación de longitud a diámetro, contenido de humedad, daños por perforación, etc.) multiplicando los resultados por factores de corrección de fuerza proporcionados por la propia guía.[9]

El ACI 214.4-21 menciona que se han llevado a cabo considerables investigaciones de las cuales se ha concluido en la propuesta de factores de corrección para tener en cuenta los efectos de los parámetros mencionados en el párrafo anterior. Sin embargo; los factores de corrección que se mencionan en esta publicación no son exactos y quizá no se apliquen de manera universal, debido a que se derivaron empíricamente de conjuntos de datos específicos.

1.3.3.6.1. *Relación longitud/diámetro*

Fue desde el año 1927 cuando en el ASTM C42 se identificó este parámetro como un factor que influye en la resistencia a la compresión del concreto. El comportamiento es similar a cuando se habla de esbeltez en las columnas y es que, en el caso de los núcleos de concreto, una menor relación l/d provoca el soporte a cargas mayores, esto por el confinamiento provocado por las placas de la máquina de ensaye, que restringen la expansión lateral. [25]

Sin embargo, cuando se habla de un valor de Relación l/d igual a 2, entonces se eliminan los efectos anteriores y no es necesaria la corrección por ningún factor.

1.3.3.6.2. *Diámetro*

Para esta consideración se ha encontrado información experimental contradictoria, debido a que se han observado variaciones en la resistencia muy pequeñas cuando se habla de la comparación de núcleos de concreto con diámetros de 10 cm (4 in) y 15 cm (6 in); sin embargo, no se observa lo mismo cuando entran en comparación los resultados de núcleos con 5 cm (2 in) de diámetro. Donde se han reportado valores menores con respecto a núcleos de 10 cm (4 in). [22]

Además, que diámetros menores para los núcleos también generan una mayor variabilidad entre los especímenes de un mismo elemento. [22]

1.3.3.6.3. *Condición de humedad*

Aunque parezca un aspecto simple, la condición de humedad del espécimen tiene un impacto en la resistencia mecánica, ya que con diversas investigaciones se ha determinado que los núcleos que son secados al aire son aproximadamente 10-14 % más resistentes que los que fueron sumergidos en agua. [26]

Tener un núcleo que fue sumergido o curado dentro de agua provoca que el concreto de la superficie del espécimen provoque tensiones auto equilibradas que reducen la resistencia a la compresión del núcleo.[27] Mientras que cuando se tiene un espécimen seco, se generan contracciones que crean una tensión de distribución residual, resultando en el incremento de la resistencia. Aunque, en ambos casos, los cambios de condición de humedad son inicialmente muy rápidos. [26]

Este fenómeno también tiene relación con el tamaño del diámetro, ya que se ha observado que la variación por la condición de humedad es más notable en los especímenes que tienen un diámetro menor. [26]

1.3.3.6.4. *Presencia de acero de refuerzo o alguna otra inclusión*

La presencia de acero de refuerzo se ha considerado como un factor que suele afectar la resistencia del concreto, es por esto por lo que ASTM C42 recomienda cortar los núcleos de tal manera que no incluyan alguna porción de acero, siempre y cuando el espécimen cumpla al menos una *Rel. l/d* de 1.0.[5]

1.3.3.6.5. *Ubicación de la extracción*

Dentro los aspectos básicos para la extracción de núcleos de concreto, se tiene que ASTM C42 dicta que el espécimen debe ser obtenido de manera perpendicular al elemento. Y siempre debe tenerse en cuenta que ubicaciones referentes a la parte inferior suelen arrojar resistencias mayores con respecto a la parte media y superior. [5]

1.3.3.7. ***Procedimiento para muestras de más de tres núcleos***

En la práctica, a menudo se obtienen más de tres núcleos del área en cuestión durante las investigaciones de concreto de baja resistencia. Sin embargo, no existen criterios formales de aceptación para el concreto sospechoso, cuando el número de resistencias de prueba del núcleo excede tres. [5]

Cuando el tamaño de la muestra aumenta, es más sencilla la aprobación de la resistencia del concreto, ya que al tener una mayor cantidad de especímenes mejora el promedio y disminuye la desviación estándar de los resultados. Aunque esto complica la consideración de resultados atípicos, ya que al aumentar el número de testigos se espera que la variación sea más pequeña.

Es aquí donde se vuelve muy conservador decir que todos los especímenes tengan que cumplir individualmente el 75% del $f'c$ esperado del concreto, como lo suele considerar el ACI 318-19.[5]

La guía del ACI 214.4-21 presenta dos métodos para determinar la resistencia equivalente del concreto en el lugar, cuando se tienen más de tres núcleos de concreto. [26]

1.3.3.8. ***Determinación de un $f'c$ equivalente para evaluar la capacidad estructural de una estructura existente***

La determinación de la resistencia de diseño equivalente se lleva a cabo por la sustitución de datos directos en ecuaciones de resistencia convencionales, pero que

consideran factores de reducción; además, de brindar un valor de resistencia equivalente para un décimo percentil inferior.

Los procedimientos descritos en este apartado son sólo apropiados para determinar un f_c equivalente para una estructura existente y no debería ser utilizado para investigar los bajos resultados de resistencia en los cilindros.

Lo primero que se debe hacer es la conversión del valor de rotura del núcleo de concreto, a una resistencia equivalente en el lugar, con la ecuación 4. Y es aquí donde entran los factores de reducción por los aspectos mencionados anteriormente y que pueden obtenerse de la tabla 3.

$$f_c = F_{l/d} F_{dia} F_{mc} F_d f_{core} \quad (4)$$

Donde:

f_c , es la resistencia equivalente en el lugar.

$F_{l/d}$, es el factor de corrección por la relación de esbeltez del núcleo de concreto.

F_{dia} , es un factor de corrección por el diámetro del núcleo de concreto.

F_{mc} , es un factor de corrección por la condición de humedad del núcleo de concreto.

F_d , es un factor de corrección por el daño generado al núcleo de concreto al ser extraído.

f_{core} , es la resistencia a la rotura del núcleo de concreto.

Tabla 3. Magnitud y precisión de los factores de corrección de resistencia para convertir las resistencias de núcleos en resistencias equivalentes en el lugar.

Factor		Valor promedio	Coefficiente de variación V, porcentaje
$F_{l/d}$; relación l/d	Ambiente*	$1 - \{0.130 - \alpha f_{core}\} \left(2 - \frac{1}{d}\right)^2$	$2.5 \left(2 - \frac{1}{d}\right)^2$
	Sumergido 45 horas	$1 - \{0.117 - \alpha f_{core}\} \left(2 - \frac{1}{d}\right)^2$	$2.5 \left(2 - \frac{1}{d}\right)^2$
	Secado al aire γ	$1 - \{0.144 - \alpha f_{core}\} \left(2 - \frac{1}{d}\right)^2$	$2.5 \left(2 - \frac{1}{d}\right)^2$
F_{dia} ; diámetro del núcleo	50 mm (2 in)	1.06	11.8
	100 mm (4 in)	1.00	0
	150 mm (6 in)	0.98	1.8
F_{mc} ; condición de humedad del núcleo	Ambiente*	1.00	2.5
	Sumergido 48 horas	1.09	2.5
	Secado al aire γ	0.96	2.5
F_d ; daño durante la extracción		1.06	2.5
* Constante α $4.3(10^{-4})$ 1 / MPa para f_{core} en MPa			
γ Tratamiento estándar presentado en ASTM C42			

1.3.3.9. Incertidumbre de la resistencia estimada en el lugar

Después de haber convertido las resistencias de los núcleos en resistencias equivalentes en el lugar, se puede dar paso a las técnicas estadísticas, donde la resistencia promedio de la muestra se puede obtener de la ecuación 5.

$$\bar{f}_c = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f_{ci} \quad (5)$$

Donde:

\bar{f}_c , es la resistencia equivalente promedio de la muestra.

n , es el número de especímenes.

f_{ci} , es la resistencia equivalente en el lugar de cada espécimen individualmente.

También se calcula la desviación estándar de la muestra con la ecuación 6. La cual tiende a tener una mejor precisión cuando el tamaño de la muestra aumenta. [28]

$$S_c = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(f_{ci} - \bar{f}_c)^2}{(n-1)}} \quad (6)$$

De donde:

S_c , es la desviación estándar de la muestra.

f_{ci} , es la resistencia equivalente en el lugar de cada espécimen individualmente.

\bar{f}_c , es la resistencia equivalente promedio de la muestra.

n , es el número de especímenes de la muestra.

Además; que la desviación estándar de la resistencia en sitio debido a la naturaleza empírica de los factores de corrección de la resistencia S_a se puede obtener a partir de la Ecuación 7.

$$S_a = f_c \sqrt{V_{l/d}^2 + V_{dia}^2 + V_{mc}^2 + V_d^2} \quad (7)$$

De donde se obtiene que:

S_a , es la desviación estándar de la resistencia en sitio por los factores de corrección.

$V_{l/d}$, es el factor de corrección por l/d del núcleo.

V_{dia} , es el factor de corrección por *el diámetro* del núcleo.

V_{mc} , es el factor de corrección por la *condición de humedad* del núcleo.

V_d , es el factor de corrección por el *daño* que pueda haber sufrido el núcleo durante la extracción.

De la tabla 3 se pueden obtener los valores para los coeficientes de corrección que se presentan en el ACI 214.4-21. Para llevar a cabo el cálculo de lo anterior.

Los coeficientes de variación anteriormente mencionados son los correspondientes a los factores de corrección para la resistencia de los núcleos de concreto. Sin embargo, sólo deben tomarse en cuenta los coeficientes que corresponden a un factor de corrección diferente a 1.0. Resaltando que con respecto a la Relación l/d se debe elegir aquella que sea más reducida, de tal manera que sea “conservadora”.

En esta instancia ya se ha determinado la incertidumbre para las resistencias estimadas in situ, así como, la incertidumbre que se obtuvo al involucrar los factores de corrección para los núcleos de concreto. Por lo tanto, es necesario combinar estas dos incertidumbres, que son independientes, y calcular una desviación estándar general, la cual puede determinarse con la ecuación 8.

$$S_o = \sqrt{S_c^2 + S_a^2} \quad (8)$$

De donde:

S_o , es la desviación estándar general.

S_c , es la desviación estándar para las resistencias estimadas in situ.

S_a , es la desviación estándar involucrando los factores de corrección de resistencia.

1.3.3.10. Porcentaje de resistencia en el lugar inferior a $f'c$

En esta sección se determina la resistencia para asegurar que quede en un percentil de 10 con respecto al $f'c$ de cilindros estándar a una edad de 28 días.

Por lo tanto, varios métodos para convertir las resistencias in situ obtenidas mediante ensayos no destructivos en un $f'c$ equivalente se basan en la estimación del fractil del 10 por ciento de la resistencia in situ. [29]

Una investigación arrojó que el $f'c$ puede representar aproximadamente en un percentil de 13 de la resistencia in situ a 28 días, para muros o columnas; mientras que para vigas y losas el percentil suele ser aproximadamente de 23 de la resistencia in situ, a 28 días. [5]

Esta práctica fue corroborada por un estudio que mostró que $f'c$ representa aproximadamente en un fractil de 13% con relación a la resistencia in situ, a 28 días, en muros y columnas y aproximadamente un fractil de 23% con relación a la resistencia in situ, a 28 días, en vigas y losas. [30]

1.3.3.11. Métodos para determinar la resistencia especificada equivalente

El ACI 214.4-21 ha descrito el percentil de la resistencia en el lugar como el aproximado equivalente de f'_c ; sin embargo, no existe un método universalmente aceptado para determinarlo.

La guía presenta, por su parte, dos métodos para la determinación de la resistencia específica equivalente, los cuales deben adoptar un nivel de confianza deseado.

Con respecto a los niveles de confianza, algunos autores han presentado la propuesta de una elección con respecto al tipo de edificación que se está analizando, partiendo de un 75% para estructuras ordinarias, un 90% para edificios importantes y un 95% para componentes cruciales en plantas de energía nuclear. [31]

Las tablas 4 a 6 dan parámetros, basados en la distribución de resistencia normal, para facilitar el uso de uno de estos tres niveles de confianza en el cálculo de la resistencia especificada equivalente.

Tabla 4. Factores K para límites de tolerancia unilaterales en fractil del 10 por ciento.[32]

n	Nivel de confianza		
	75 %	90%	95%
3	2.50	4.26	6.16
4	2.13	3.19	4.16
5	1.96	2.74	3.41
6	1.86	2.49	3.01
8	1.74	2.22	2.58
10	1.67	2.06	2.36
12	1.62	1.97	2.21
15	1.58	1.87	2.07
18	1.54	1.80	1.97
21	1.52	1.75	1.90
24	1.50	1.71	1.85
27	1.49	1.68	1.81
30	1.48	1.66	1.78

35	1.46	1.62	1.73
40	1.44	1.60	1.70

Nota: n, número de especímenes ensayados

Tabla 5. Factores Z. [32]

Nivel de confianza, porcentaje	Z
75	0.67
90	1.28
95	1.64

Tabla 6. Factores T unilaterales.[32]

n	Nivel de confianza		
	75 %	90%	95%
3	0.82	1.89	2.92
4	0.76	1.64	2.35
5	0.74	1.53	2.13
6	0.73	1.48	2.02
8	0.71	1.41	1.90
10	0.70	1.38	1.83
12	0.70	1.36	1.80
15	0.69	1.34	1.76
18	0.69	1.33	1.74
21	0.69	1.33	1.72
24	0.69	1.32	1.71
30	0.68	1.32	1.70

Nota: n, número de especímenes ensayados

1.3.3.12. Método de Factor de Tolerancia

Se puede utilizar el factor de tolerancia K, el cual trata las incertidumbres de la media de la muestra, así como la desviación estándar, cuando el tamaño de la muestra es pequeño, para estimar un valor fractil.[33]

El 10 por ciento fractil de los datos de resistencia en el lugar $f_{0.10}$ se obtiene de la ecuación 9.

$$f_{0.10} = \bar{f}_c - KS_c \quad (9)$$

De los cuales f_c y S_c fueron obtenidos de las ecuaciones anteriores y el valor de K se obtiene de la tabla 4 dependiendo del valor de confiabilidad que se haya elegido.

Sin embargo, el resultado anterior no tiene en cuenta la incertidumbre provocada por el uso de factores de corrección de resistencia. Esta incertidumbre, que no disminuye a medida que aumenta el número de especímenes, puede explicarse utilizando un factor Z que se muestra en la Tabla 5, que se deriva de la distribución normal estándar. Así, la resistencia equivalente de diseño f'_{ceq} , siguiendo el método del factor de tolerancia, que se obtiene a partir de la Ecuación 10.

$$f'_{ceq} = \bar{f}_c - \sqrt{(KS_c)^2 + (ZS_a)^2} \quad (10)$$

1.3.3.13. Método Alternativo

Se sugiere que el factor de tolerancia en ocasiones puede ser conservador para ser utilizado en la práctica, debido a que los núcleos de concreto suelen sobreestimar la verdadera variabilidad de la resistencia en el lugar.[34]

Y es muy importante resaltar que, por lo tanto, el valor de f'_{ceq} suele ser demasiado bajo, porque el valor de S_c que se utiliza en la ecuación es demasiado alto. Lo que provoca problemas cuando se quieren trabajar resistencias que tienen resultados muy similares a diferentes edades, ya que, si la desviación estándar S_c tiene un valor mayor para una edad tardía (ejemplo 28 días) con respecto a la edad temprana (ejemplo 14 días), podrían obtenerse valores de resistencia equivalente menor, por el grado conservador involucrado en la ecuación. [35]

Para este método, la resistencia especificada equivalente es obtenida a partir de dos ecuaciones. Primero se debe determinar el límite inferior de la resistencia promedio en el lugar, para después obtener el fractil del 10 por ciento de la resistencia en el lugar, que es equivalente a la resistencia especificada.

La estimación del límite inferior de la resistencia media en el lugar f_{CCL} se puede determinar para algún nivel de confianza deseado CL usando la ecuación 11.

$$\overline{f}_{CCL} = \overline{f}_c - \sqrt{\frac{(TS_c)^2}{n} + (ZS_a)^2} \quad (11)$$

El significado de la ecuación es el siguiente, la primera parte de la raíz cuadrada representa el efecto que genera el tamaño de la muestra sobre la incertidumbre de la resistencia promedio en el lugar. Donde el factor T se obtiene de una distribución *t* de student, que depende del nivel de confianza deseado, que se puede encontrar en la Tabla 6.[28]

El segundo término debajo de la raíz cuadrada refleja la incertidumbre atribuible a los factores de corrección de resistencia. Como en el enfoque del factor de tolerancia, depende de un factor Z obtenido de la distribución normal estándar para el nivel de confianza deseado, que se puede encontrar en la tabla 5.

Se sugiere que un nivel de confianza del 90% podría ser conservador para un uso general; sin embargo, un nivel alto de confianza podría ser lo más apropiado si la confiabilidad es sensible a la resistencia del concreto en el lugar.[30]

La resistencia especificada equivalente se obtiene usando f_{CCL} en la ecuación 12.

$$f'_{c_{eq}} = C \overline{f}_{CCL} \quad (12)$$

Suponiendo resistencias in situ normalmente distribuidas, el fractil de resistencia del 10 por ciento deseado se obtiene usando la constante C, donde los valores de C dependen del número de lotes, número de miembros y tipo de construcción, como se muestra en la Tabla 7.

Tabla 7. Factores de C.

Estructura compuesta de:		Un elemento	Varios elementos
Un lote de concreto		0.91	0.89
Varios lotes de concreto	Colado en sitio	0.85	0.83
	Prefabricado	0.88	0.87

1.3.4. Especificaciones para núcleos de concreto (ACI 318-19)

El ACI 318-19 es un código de construcción en el cual se recopila información sobre diferentes temas de este ámbito, proponiendo tanto métodos de diseño como de revisión o evaluación de estructuras. La parte correspondiente al reglamento en este documento cubre el diseño y construcción de concreto estructural en edificaciones y donde sea aplicable en otras construcciones.[36]

Este reglamento se desarrolló por medio de un proceso que fue aprobado por el ANSI y que cubre sistemas estructurales, elementos y conexiones, incluyendo concreto fabricado en la obra, la construcción prefabricada, el concreto simple, la construcción no presforzada y la construcción compuesta. Pero resaltando un tema que cubre el reglamento que es el de interés. Este es el correspondiente a los métodos para evaluar la resistencia del concreto en estructuras existentes.[36]

En el ACI 318-19 se expresa que cuando la resistencia de los cilindros curados en la obra no cumple los valores mínimos establecidos por este código, se deben tomar medidas para mejorar el curado. Si los ensayos adicionales realizados en la obra confirman una posible deficiencia en la resistencia del concreto en la estructura, se pueden requerir ensayos de núcleos para evaluar si la estructura es adecuada.

Además, el ACI 318-19 brinda criterios de aceptación conservadores, competentes de asegurar la capacidad estructural para casi cualquier tipo de construcción.

Los ensayos de núcleos que tengan un promedio del 85 por ciento de la resistencia especificada son realistas. No es realista esperar que los ensayos de núcleos den resistencias iguales al f'_c , ya que las diferencias en el tamaño de las probetas, el grado de compactación y los procedimientos de curado no permiten que se obtengan valores iguales.

Los criterios de aceptación de las resistencias por medio de núcleos se han establecido teniendo en consideración que los núcleos para investigar los resultados de ensayos con baja resistencia usualmente se extraen a edades posteriores a las especificadas para la determinación de f'_c . [20] Para complementar el entendimiento de la interpretación de resultados por este código los cuales son catalogados como conservadores, se añaden las siguientes condiciones:

El concreto de la zona representada por los núcleos se considera estructuralmente adecuado cuando se cumplen (1) y (2):

(1) El promedio de tres núcleos es por lo menos igual al 85 por ciento de f'_c .

(2) Ningún núcleo tiene una resistencia menor que el 75 por ciento de f'_c .

Cuando los núcleos den valores erráticos, se debe permitir extraer núcleos adicionales de la misma zona.

Si los criterios no se cumplen, y si la seguridad estructural permanece en duda, la autoridad competente está facultada para ordenar pruebas de carga o tomar otras medidas, según las circunstancias.[20]

Los procedimientos recomendados para el corte, la prueba y la interpretación de los resultados están totalmente establecidos y documentados por diferentes normas, como ASTM C42.[19]

El ensayo de la resistencia a la compresión del concreto es aplicable durante la evaluación del edificio existente o en curso, mediante la obtención de muestras/especímenes de concreto a través de la extracción de núcleos. La resistencia a la compresión del espécimen se calcula dividiendo la carga máxima alcanzada durante el ensayo, por el área de la sección transversal del espécimen. Los resultados de esta prueba se utilizan como base para el control de calidad de las operaciones de dosificación, mezclado y colocación del concreto, para determinar si cumple las especificaciones de diseño.

Estas muestras de concreto son necesarias para verificar, mediante pruebas de laboratorio, si la resistencia a la compresión del concreto existente que se vierte en el sitio alcanza la resistencia máxima a la compresión a los 28 días. Sin embargo, algunos laboratorios le dan un segundo uso al ACI 318, determinando el f_c a partir de los criterios establecidos [37] donde primero se determinó un valor de resistencia a la compresión a partir de un ensaye mecánico a un núcleo de concreto, para posteriormente multiplicar el resultado por el factor de corrección de relación l/d correspondiente que puede obtenerse de la tabla 8 con base a la información que aparece en la norma ASTM C42.

Tabla 8. Factores de corrección de la resistencia con base a la relación l/d . [12]

Relación de longitud-diámetro (l/d)	Factor de corrección
1.75	0.98
1.50	0.96
1.25	0.93
1.00	0.87

Y en la tabla 9 se puede observar el tratamiento de los resultados hasta esta primera etapa.

Tabla 9. Ejemplo de resultados de prueba de núcleos de concreto.[37]

Especímenes	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Ubicación	Plataforma	Plataforma	Plataforma	1 piso	1 piso	1 piso	2 piso	3 piso	4 piso
fc medido (MPa)	50	51.3	44.6	46.9	52.6	39.6	58.8	49	65.6
l/d	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Factor de corrección	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87
fc corregido (MPa)	43.5	44.6	38.8	40.8	45.8	34.5	51.2	42.6	57.1

Como se establece en el capítulo 7 del ACI 214.4R-03, de acuerdo al ACI 318, el concreto sospechoso se considera adecuado si la resistencia promedio corregida de los tres núcleos excede $0.85f_c'$ y ninguna resistencia individual es menor que $0.75f_c'$. Por lo tanto, para calcular la resistencia a la compresión f_c' para un piso determinado, debe calcularse utilizando las ecuaciones 13 y 14. Donde los valores de $f'_{c_{prom}}$ y $f'_{c_{min}}$ que se aplican en las ecuaciones son los resultados de f_c' corregido que se presenta en la tabla 9, anteriormente mencionada. [37]

$$f'_{c_{eq}} = \frac{f'_{c_{prom}}}{0.85} \quad (13)$$

$$f'_{c_{eq}} = \frac{f'_{c_{min}}}{0.75} \quad (14)$$

Eligiendo al final el resultado que resulte más conservador entre los dos criterios anteriormente adaptados. Sin embargo, cuando se aplica este criterio se tiende a obtener un f_c' equivalente mayor que el resultado obtenido de la aplicación de factores de corrección de los núcleos de concreto. Los resultados se pueden apreciar en la tabla 10.

Tabla 10. Resultados de $f'c$ adoptando los criterios del ACI 318.[37]

Nivel	$f'_{Cprom} / 0.85$	$f'_{Cmin} / 0.75$	$f'c$ a considerar
Plataforma	50.0	52.0	50.0
1 piso	47.5	46.0	46.0
2 piso	60.0	68.0	60.0
3 piso	50.0	57.0	50.0
4 piso	67.0	76.0	67.0

1.3.5. Cilindros estándar de concreto

En la construcción de obras civiles y viales de concreto con base en cemento Portland, se debe de llevar a cabo un programa de control de calidad a través de una serie de ensayos, para garantizar el cumplimiento de las especificaciones técnicas; una de ellas, su resistencia a la compresión.[38]

Cuando se realiza el diseño estructural, el ingeniero estructural utiliza un valor de resistencia a la compresión específico, para ejecutar los diseños de los elementos. Determinado valor queda registrado en los documentos técnicos de la obra. Para esto la empresa encargada de proveer el concreto debe garantizar que el concreto cumple satisfactoriamente el $f'c$ de diseño y, por lo general, se elaboran concretos con resistencias mayores que la que se estableció previamente y, para de esta manera que se minimiza la probabilidad de no cumplir la especificación de resistencia.[39]



Ilustración 5. Muestra conformada por cilindros estándar de concreto de 150 x 300 mm. [40]

Al diseñar una estructura los ingenieros se valen de la resistencia especificada, $f'c$, y especifican el concreto que cumpla el requerimiento de resistencia estipulado en los documentos del contrato del proyecto. La mezcla de concreto se diseña para producir una resistencia promedio superior a la resistencia especificada de manera tal que se pueda minimizar el riesgo de no cumplir la especificación de resistencia.

Los resultados de las pruebas de resistencia a partir de cilindros moldeados (Ilustración 5), se pueden utilizar para fines de control de calidad, aceptación del concreto o para estimar la resistencia del concreto en estructuras, como programar las operaciones de construcción, tales como remoción de cimbras o para evaluar la conveniencia del curado y protección suministrada a la estructura.[39]

Los cilindros que se someten a ensayos para la aceptación o rechazo del concreto se elaboran y curan bajo la normativa ASTM C31, para posteriormente ser evaluados de acuerdo a los requisitos de ASTM C39.

Sin embargo, es importante tener en cuenta ciertas propiedades previas a la fabricación de los cilindros de concreto. Algunas de ellas son la temperatura del concreto, el revenimiento o asentamiento, la cantidad de aire atrapado y la masa unitaria. Debido a que variaciones en los resultados podrían ser producto de alguna anomalía en dichas propiedades.[41]

Para obtener un valor representativo por medio de los cilindros de concreto, es necesario elaborar por lo menos dos pruebas de ensayos de probetas con el mismo método de elaboración y curado y que se sometan a la prueba a la misma edad.

Con el fin de conseguir una distribución uniforme de la carga, generalmente los cilindros se cabecean con mortero de azufre (ASTM C 617), como en la Ilustración 6 o con almohadillas de neopreno (ASTM C 1231). El cabeceo de azufre se debe aplicar como mínimo dos horas antes y preferiblemente un día antes de la prueba.



Ilustración 6. Cabeceo con azufre para cilindros estándar de concreto.[42]

Para cumplir los requerimientos[39] de resistencia de una especificación de proyecto se aplican los siguientes dos criterios de aceptación (3) y (4):

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

(4) *Ninguno de los ensayos de resistencia deberá arrojar un resultado inferior al $f'c$ en más de 3.45 MPa cuando $f'c$ sea menor o igual a 35 MPa, ni ser superior en más de 0.10 $f'c$, cuando $f'c$ sea mayor que 35 MPa.*

En dado caso de que las resistencias de concreto indiquen que no cumplen los requerimientos especificados, es importante realizar un análisis a fondo para determinar si el error se encuentra en la calidad del concreto o si radica en alguno de los numerosos pasos previos a la obtención del valor de $f'c$.

Debido a que, desde la elaboración de las probetas, el traslado, el curado y el cabeceo en caso de ser necesario, son aspectos que pueden generar variaciones en los resultados y que, en todo caso, pudiera existir la posibilidad que el concreto es de calidad y cumple lo requerido.

1.3.6. Martillo de rebote

Hoy en día la aplicación de ensayos no destructivos en la construcción ha crecido fuertemente, sobre todo por ser mínimos los daños generados en la estructura al ser aplicadas estas técnicas, cuidando que no existan repercusiones tanto económicas como mecánicas en los elementos analizados.[43]

El esclerómetro o martillo de rebote de Schmidt, es una herramienta pensada para probar la dureza de las superficies de concreto. Con un funcionamiento basado en el rebote de una masa que va a depender de la dureza contra la que se está realizando el rebote del martillo. Y aún con poca relación entre la dureza del concreto contra el valor generado por el martillo de rebote, se han logrado establecer correlaciones para estimar el $f'c$. [44]

El primer diseño de martillo de rebote o esclerómetro se dio en el año de 1950, cuando con el nombre de Schmidt, se generó la patente de un equipo que permitía medir la dureza del concreto con un valor de rebote "R". Y desde entonces se ha convertido en el procedimiento más utilizado en el nivel mundial, para las pruebas no destructivas al concreto. Teniendo como aplicaciones la estimación de la resistencia a la compresión, la evaluación de la uniformidad del concreto in situ, la delimitación del concreto dañado o de baja calidad, entre otras.[45]

La lectura que se obtiene se denomina valor de rebote Schmidt o simplemente número de rebote y se designa con el símbolo R_i que viene de rebote (rebound del inglés). El valor R_i representa una medida de la elasticidad a la colisión entre dos cuerpos, con la raíz cuadrada de la relación de la altura de rebote h , entre la altura

de caída de la masa H , como se muestra en la Ecuación 18. A esa variable se le denomina también coeficiente de restitución. Los valores de esta variable pueden estar en el intervalo del 1% al 100%, donde las colisiones elásticas perfectas tienen un valor \bar{R} de 100% y las colisiones inelásticas totales un valor de 0%. [46]

$$R = \left(\frac{h}{H}\right)^{1/2} \quad (18)$$

La ilustración 9 muestra el esquema interno del martillo Schmidt(a) y una fotografía de su empleo(b). Este instrumento consiste en una masa de acero cargada por un resorte (i.e. resorte de impacto), que se libera contra un pistón cuando el martillo es presionado contra la superficie de la roca al apretar un botón. Un indicador deslizante indica el rebote de la masa en la escala graduada. Los ensayos se hacen con el empleo de lentes de protección. [46]

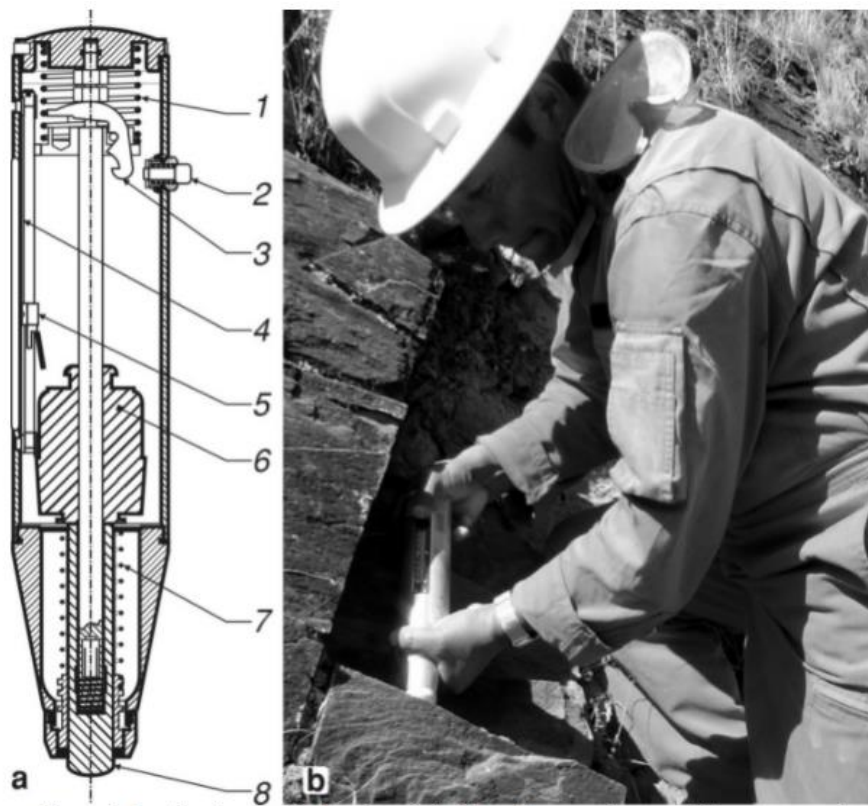


Ilustración 7. Prueba de martillo de rebote Schmidt. **a** Esquema interno del instrumento, 1- resorte de impacto, 2- botón, 3- seguro de la masa, 4- escala, 5- indicador deslizante, 6- masa, 7- resorte de retorno, 8- pistón; **b** ensayo en las paredes de bloques de un macizo rocoso expuesto. [46]

Un pequeño inconveniente en esta herramienta es que suele medir la dureza, pero de la superficie de un concreto; sin embargo, se menciona que los resultados del esclerómetro a diferentes escalas indican la misma tendencia para estructuras de concreto, pero en superficies de yeso la tendencia de la resistencia es menor.[47]

Sin embargo, para convertir un valor de rebote en una estimación de la resistencia a la compresión del concreto, se proporciona una correlación por parte del fabricante del instrumento y debe ser utilizado solamente para dar una indicación de la resistencia relativa del concreto en distintas regiones de la estructura.[48]

Para estimar la resistencia a la compresión de un determinado concreto, es necesario generar una correlación propia entre los valores de rebote de un determinado instrumento y la resistencia a la compresión obtenida a partir de núcleos de concreto.[48]

Del martillo de rebote datan procedimientos de dureza superficial que fueron aplicados hace 130 años; sin embargo, fue hasta los 50's[49] que se le dio el enfoque de estimación de resistencia a la compresión del concreto[50], [51], lo cual provocó gran interés tanto en los científicos como en el campo laboral.[52]

La técnica puede verse influenciadas por diferentes rugosidades de la superficie y provocar que existan variaciones en los resultados del valor de rebote. Es por esto por lo que se debe tener bien controlada la superficie que se va a analizar con la finalidad de eliminar o minimizar dichos efectos. Algunos de los factores que más simulan son los siguientes:

1.3.6.1. *Influencia por carbonatación*

Se ha encontrado, a partir de diversas investigaciones, que la presencia de la carbonatación del concreto, la cual se ve provocada por los productos de hidratación del cemento y la exposición de CO₂, suelen arrojar valores de rebote mayores. La dureza del concreto suele ser diferente en la superficie del concreto con respecto a la dureza en el interior. Y la diferencia entre éstas aumenta a medida que aumenta la carbonatación.[53]

Por lo tanto, es común que se sobreestime la resistencia a la compresión del concreto cuando se hace este ensaye a la edad de 28 días, en concretos que han sido víctimas de este fenómeno, reportándose a edades de entre 28 y 365 días, en donde para 30 valores de rebote se sobreestima en un 40% la resistencia; mientras, que para 45 valores de rebote sólo se sobreestima en un 6%. [53]

1.3.6.2. Influencia por el contenido de humedad

Se ha determinado que la condición de humedad del concreto que se va a analizar tiene un impacto el resultado del valor de rebote. Y según en la bibliografía se ha encontrado que, al aumentar el contenido de humedad con base a un elemento que ha estado seco al aire, se ve una caída en el resultado de entre aproximadamente 20-25%. [54]

1.3.6.3. Esfuerzo interno y rigidez de las probetas

Cuando se aplica el ensaye de martillo de rebote a un cilindro que está precargado hay un factor que interactúa con los resultados y éste es debido a la fuerza que se está aplicando a la probeta. Este aspecto no se había considerado dentro de los parámetros que alteran el resultado de la prueba y es que los números de rebote aumentan en relación que aumenta la fuerza interna, la cual está asociada en el incremento de la carga hacia el espécimen. Aunque, se observó que el incremento es mínimo cuando el esfuerzo de compresión de precarga es aproximadamente el 15% de la resistencia final a la compresión del concreto.[55]

El ACI 228.1R-03, menciona que en la prueba de martillo de rebote en cilindros de concreto debe considerarse una precarga de 3 MPa, para tomar los números de rebote. [56]

1.3.6.4. Influencia por el tamaño del espécimen

Algunas de las razones para colocar este factor como importante es que, en el caso de muestras de menor tamaño, la existencia de un agregado de tamaño 20 mm cerca de la superficie de la muestra afecta el valor de rebote. Se ha observado que la diferencia del valor de rebote para cubos de 100 mm es mucho mayor que la del cubo de 150 mm. [53]

Mientras que in situ los valores de rebote de los miembros de gran tamaño suelen ser más altos que los de los miembros de menor tamaño, debido a que las microfisuras iniciales se inician en miembros de gran tamaño debido al calor de hidratación y al efecto de gradiente térmico, en comparación con miembros de menor tamaño en los edificios.[53]

En los inicios de la técnica como prueba no destructiva en el concreto, se fijó la meta de generar una curva general para determinar la resistencia a compresión del concreto, considerando que los factores anteriormente mencionados generarían un efecto menor e insignificante. Sin embargo, la Ilustración 10 muestra algunas de las

curvas que se graficaron con dichos resultados, demostrando que la variación era considerable y volviendo difícil establecer un comportamiento general.[51], [52], [57], [58]

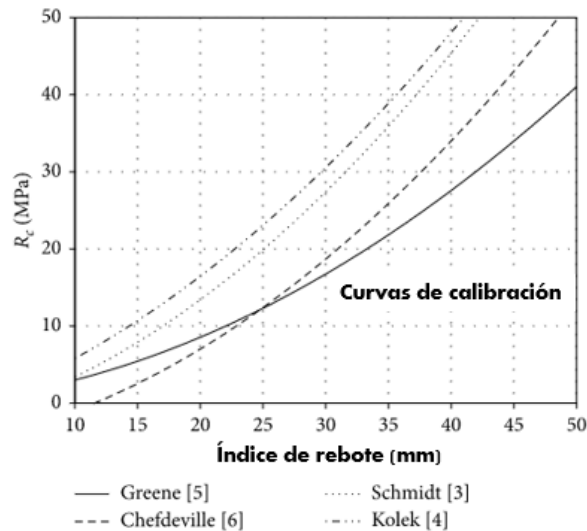


Ilustración 8. Curvas de calibración del martillo de rebote. [59]

En los primeros años, el objetivo era encontrar una curva de calibración universal, confiando en que la contribución de diferentes factores que afectan la prueba, como la madurez del concreto y las condiciones de endurecimiento, la humedad, el acabado de la superficie, la composición del concreto, el tipo de agregado y la dureza, podría ser un problema menor e insignificante. La ilustración 10 muestra algunas de las primeras curvas de calibración [3–6], en las que queda claro que la posibilidad de establecer una única curva de calibración estaba en duda desde el principio.

Se han desarrollado investigaciones en losas para determinar la confiabilidad del martillo de rebote para estimar la resistencia del concreto a edades tempranas de 1 a 3 días, para evaluar el desarrollo de resistencia y determinar el tiempo adecuado para remover el encofrado de los elementos. Para generar la comparación de los resultados también se realizaron ensayos en cilindros estándar y núcleos de concreto. Los resultados se pueden encontrar en la tabla 11. Además de que Facaoaru sugirió el uso del martillo de rebote en conjunto con la velocidad de pulso para aplicaciones in situ. [60][54][61]

Tabla 11. Resumen de resultados de ensayos de resistencia a la compresión y martillo de rebote.[60]

Prueba	n	Promedio			Desviación estándar			Coeficiente de variación (%)		
		1	2	3	1	2	3	1	2	3
		Edad (días)								
		Resistencia compresión de cilindros								
Cilindros 150x300 mm, MPa	3	10.4	17.2	19.2	0.39	0.25	0.14	3.80	1.48	0.73
Cilindros 100x200 mm, MPa	5	9.5	16	18.4	0.53	0.83	0.40	5.58	5.19	2.17
		Resistencia a la compresión de núcleos								
100x200 mm, MPa	3	11.1	16.9	18.3	0.57	0.36	0.17	3.21	3.38	0.92
		Martillo de rebote								
Número de rebote	20	15.1	20.5	22.2	2.49	1.93	2.60	16.4 9	9.43	11.7 4

Sin embargo, se debe tener en cuenta que el ensayo de martillo de rebote no es recomendable para concretos que sufrieron carbonatación, ya que esta prueba suele basarse en la dureza superficial y dicho fenómeno causa un incremento en la densidad del concreto que de alguna manera se ve reflejada en la dureza superficial. Algunos autores han reportado incrementos de hasta el 50% en los resultados del martillo de rebote para concreto carbonatado, con respecto a concreto sano.[62]

Algunos otros autores reportan investigaciones de martillo de rebote trabajando de la siguiente manera, donde el propósito es comparar las resistencias de concreto de los métodos del estudio, para lo cual se tomaron 30 muestras, un mismo tipo de mezcla, que se ha producido de manera consecutiva y en condiciones similares durante los 28 días. [45]

Se realizaron ensayos a compresión de los cilindros de concreto, al igual que se midió el valor de rebote a cada uno de ellos. Para esto el contenido de humedad de las muestras se estableció con un tratamiento similar para todas las probetas, que consistió en un curado sumergido de la muestra, la cual se sacó un día antes de la

falla, es decir para los 28 días, los cilindros estuvieron 27 días sumergidos y se secaron al aire libre durante 1 día, de esta manera.

En los cilindros se marcaron los puntos de impacto tratando de elegir la superficie de prueba de acuerdo con la representatividad del área por evaluar, en función de su alta porosidad o textura rugosa. Mientras que se midieron 20 impactos de manera vertical y cuidando la inclinación de 90°, además, de respetar un mínimo de separación entre golpes de 2.5 cm.

La tabla 13 muestra los 30 valores que se utilizaron para dicho estudio en donde se aprecia la comparación entre la resistencia a la compresión y los números de rebotes obtenidos.

Tabla 12. Datos de ensayos de martillo de rebote vs resistencia a la compresión en cilindros.

Item	Resistencia a la compresión (MPa)	Número de rebote
1	16.68	28.23
2	15.90	27.88
3	16.56	26.45
4	16.27	28.73
5	15.90	26.48
6	15.31	28.83
7	14.43	26.48
8	14.89	28.83
9	16.24	28.68
10	15.46	28.03
11	15.55	29.98
12	15.39	28.53
13	15.29	27.33
14	16.07	27.18
15	15.85	26.60
16	15.48	28.53
17	15.34	27.33
18	15.29	27.18
19	15.06	26.6
20	16.07	28.53
21	15.01	27.63
22	16.25	27.68
23	16.13	28.28

24	15.55	29.95
25	16.64	27.33
26	15.97	29.33
27	16.00	28.18
28	16.69	30.03
29	16.73	30.48
30	19.51	29.68

La forma de la función en las resistencias de la máquina y del esclerómetro resultan ser semejantes. Se obtuvo una buena ecuación entre el rebote dado por el esclerómetro y la resistencia con la máquina a compresión del concreto. Con los resultados obtenidos se puede inferir que el esclerómetro es un dispositivo que estima de una manera óptima la resistencia a compresión, de elementos de concreto. [45]

En otra investigación se llevó la huella de la variación de los resultados cuando se aplican los ensayos con diversos valores de precarga. Para esta situación se precargaron cilindros con valores de 0–10%–20%–30%–50% de la carga final esperada. [55]

De lo anterior se obtuvo que los valores medidos sin ninguna precarga fueron menos que los que se arrojaron de la prueba de cilindros precargados con un 10%. Y recalando que este porcentaje fue el que presentó los valores máximos de rebote de la resistencia a la compresión del concreto, ya que con el resto de porcentaje los valores fueron disminuyendo. [55]

Las diferencias entre los números de rebote para valores de carga del 10 % de la resistencia a la compresión y los números de rebote para valores de carga del 20% al 50 % de la resistencia a la compresión estuvieron entre –1,8 % y –0,3 % para el martillo de rebote Schmidt tipo N y dentro de –2,0 % y –0,2 % para el martillo de rebote Schmidt tipo L. [55] Los resultados se pueden observar en la ilustración 11.

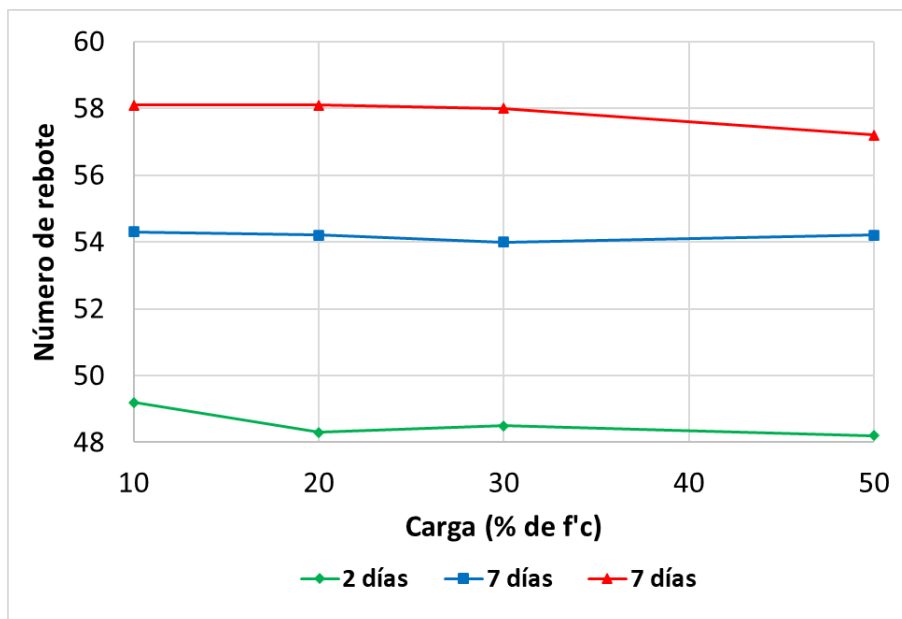


Ilustración 9. Efecto de la precarga en el número de rebote. [55]

1.3.7. Velocidad de pulso ultrasónico

Estimar la resistencia a la compresión del concreto, se ha vuelto imperativo en las estructuras de concreto para un uso previsto después de alcanzar su resistencia de diseño. Buscando en la mayoría de los casos que se lleve a cabo por ensayos no destructivos, sin causar daño al concreto y si es necesario, después de eso, pruebas semi-destructivas.[63] Existe una gran variedad de ensayos no destructivos, como la Velocidad de Pulso Ultrasónico, el Martillo de Rebote, y la Extracción Pull-out, entre otras.

El ensaye de velocidad de pulso tiene como base la generación de un pulso de vibraciones longitudinales que se produce por un transductor y que es transmitido por un emisor hacia la superficie del concreto, donde viaja sufriendo varias reflexiones en los distintos límites de fase del material, hasta llegar a un receptor, teniendo, así como resultado un tiempo de traslado de la onda en una longitud determinada, que permite calcular una velocidad de pulso.

Al obtener el resultado, los transductores convierten las señales eléctricas en vibraciones mecánicas (modo de transmisión) y las vibraciones mecánicas en señales eléctricas (modo de recepción). Una descripción gráfica de este funcionamiento se puede observar en la ilustración 12. [44]

Aspectos como la densidad del concreto, el módulo elástico, la cantidad de huecos, el tipo de agregado, así como el tamaño y contenido, suelen ser los

responsables del comportamiento de viaje de la onda, siendo este ensaye uno de los ideales para encontrar grietas en el concreto, juntas frías y cavidades, así como el tamaño de éstas. [60]

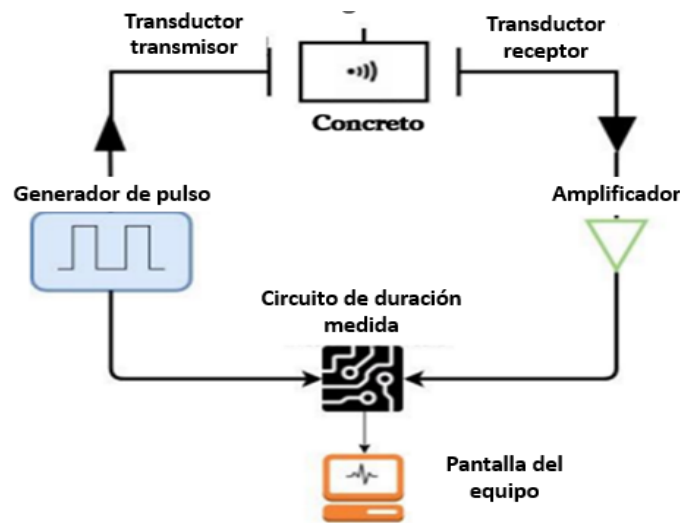


Ilustración 10. Arreglo de típico de velocidad de pulso ultrasónico.[63]

Dependiendo de la aplicación que se les va a dar a los transductores y a las características del concreto, es posible elegir entre diferentes frecuencias del equipo. Se recomienda utilizar transductores de alta frecuencia cuando la longitud del concreto que se va a analizar es corta; llamando alta frecuencia a aquellos que están por encima de 100 kHz, mientras que los transductores de baja frecuencia son mejores para especímenes con grandes longitudes, y catalogando la baja frecuencia como 25 kHz.[63]

Por lo tanto, como se establece en la bibliografía, los intervalos mostrados en la tabla 14 son los intervalos específicos de frecuencias informan mejor al usuario y ahorrarían más tiempo al comenzar con menos intentos de dos o tres frecuencias.[64]

Tabla 13. Frecuencia natural de los transductores para diferentes longitudes de trayectoria. [64]

Longitud de trayectoria (mm)	Frecuencia natural del transductor (kHz)	Min. dimensiones transversales del miembro (mm)
Hasta 500	150	25
500-700	>60	70
700-1500	>40	150
Arriba de 1500	>20	300

Adaptado con los derechos del ACI

Se han realizado diversas investigaciones en las que se ha utilizado el método de velocidad de pulso para estimar la resistencia a la compresión del concreto tanto en elementos in situ como en prefabricados, lo cual conlleva a correlaciones entre la fuerza y la velocidad de pulso, como se puede observar en la ilustración 13.

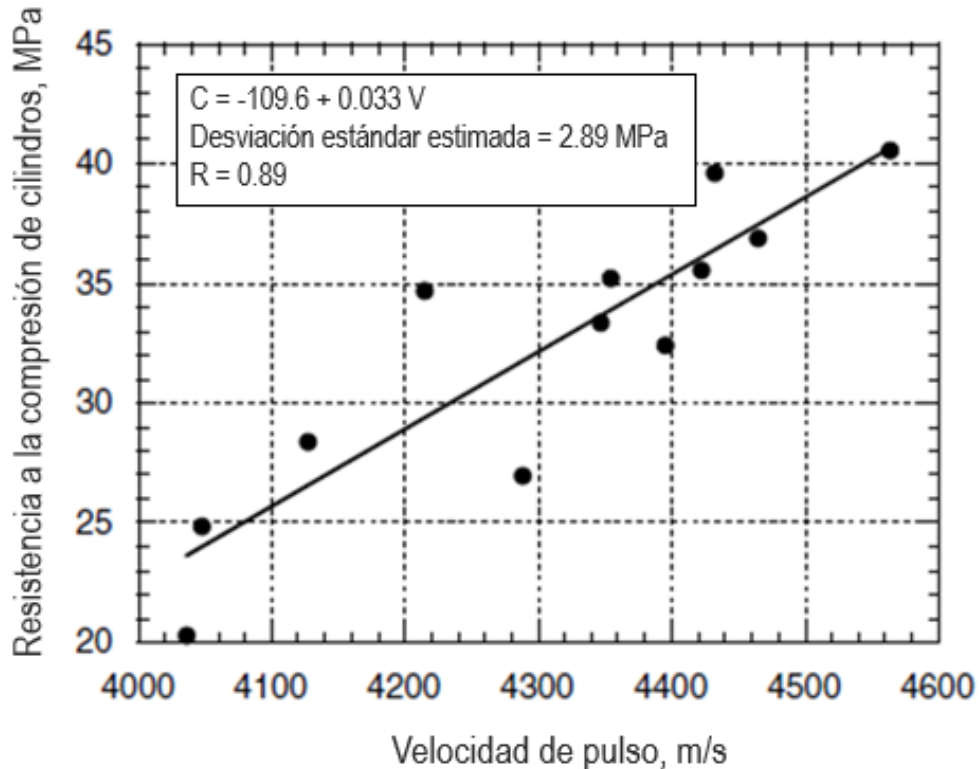


Ilustración 11. Aplicación de la técnica de velocidad de pulso en una estructura de concreto. [60]

1.3.8. Ensayo de extracción (Lok-Test)

Hace ya algunos años, un científico ruso sugirió por primera vez la prueba de extracción del concreto para determinar su resistencia en el lugar. Idea que años más tarde sería ampliamente explorada por los investigadores de la Universidad Técnica de Dinamarca, Kierkegaard-Hansen.[65]

Un método eficaz para la determinación de la resistencia a la compresión del concreto, la cual es catalogada como prueba semi-destructiva y que dentro de sus características resalta la extracción de un inserto que fue embebido en el elemento estructural, como se ve en la ilustración 7, para posteriormente determinar una estimación de la resistencia a la compresión del concreto, basado en la fuerza requerida para la extracción.[66]

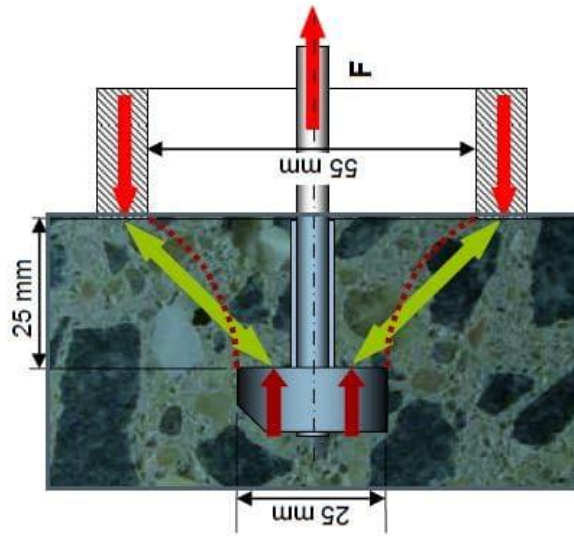


Ilustración 12. Funcionamiento de la extracción Pull-out.[67]

El ensayo de extracción tiene dos variantes, Lok Test y Capo Test, en donde el principio de la técnica es el mismo. Sin embargo, la diferencia se basa en que la variedad Lok Test suele colocar insertos en el concreto fresco, para después ser extraídos y en Capo Test los insertos se colocan en el concreto endurecido, por medio de una perforación generada a través de un taladro especial.

Con respecto a esto, Peterson desarrolló un gran número de ensayos y recopiló los resultados de diferentes investigaciones, para concluir en que ambas técnicas, Lok test y Capo test, presentan los mismos resultados de extracción en un mismo concreto, como se puede observar en la ilustración 8.[62]

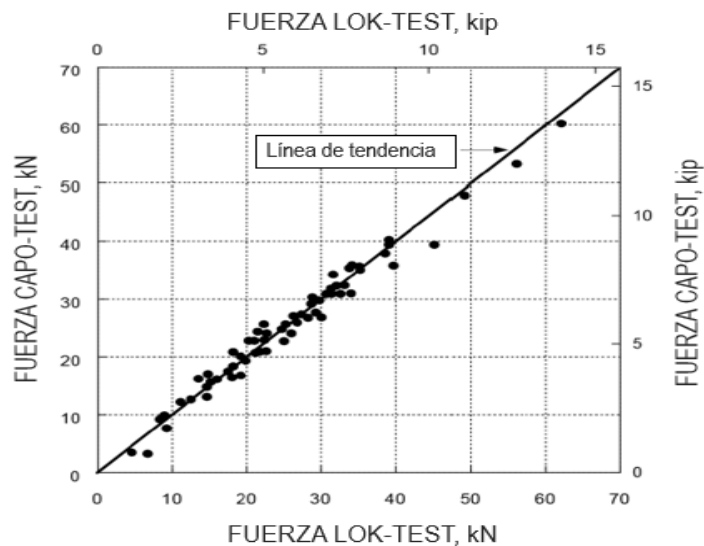


Ilustración 13. Comparación de fuerzas pull out para Lok Test y Capo Test de un mismo concreto. [62]

La extracción Pull-out resulta tener gran eficacia en la estimación de la resistencia del concreto in situ y muy aplicable cuando se busca conocer si la madurez del concreto es suficiente para proseguir los procesos constructivos. Además de que este método no requiere ninguna probeta externa, ya que el ensayo se realiza directamente en el elemento del cual se busca conocer el $f'c$, mientras que el equipo resulta ser fácil de operar y trasladar. [68]

Carino, en 1997, declaró: "La prueba de extracción en el lugar de colado es una de las técnicas más confiables para estimar la resistencia in situ del concreto durante la construcción".[69] Además, la British Cement Association, declaró que se recomienda la prueba de extracción pull out en las edades tempranas del concreto. Y contrario al martillo de rebote, este ensayo no sufre alteraciones considerables en concretos carbonatados. [62]

El funcionamiento de la prueba consiste en un vástago de carga, el cual se conecta al inserto y transmite la fuerza al concreto a través de un anillo de rodamiento, generando una superficie de fractura de forma cónica debido a la geometría de la prueba. El equipo de prueba de extracción mide la fuerza requerida para extraer un inserto de metal que está incrustado en la superficie de concreto.[1]

En 1975 Kierkegaard-Hansen realizó un proyecto de investigación para encontrar la geometría óptima de la prueba de extracción, para ser aplicada en el campo, con equipos simples y fáciles de manejar. Los resultados de las pruebas demostraron que se puede obtener una alta correlación entre la fuerza de extracción máxima y la resistencia a la compresión. [70]

A través de una serie de estudios, Kierkegaard-Hansen estableció la profundidad óptima en la que debería estar el inserto, el diámetro de la cabeza del inserto y el diámetro del anillo del rodamiento, para una correlación óptima con la resistencia a la compresión.

La profundidad de empotramiento óptima del inserto se determinó que era de 25 mm (1 in). En cuanto al diámetro de la cabeza, se concluyó que el diámetro del disco no influyó en el comportamiento de la prueba; por lo tanto, se eligió un diámetro de 25 mm (1 in). Se determinó que el tamaño óptimo del anillo de rodamiento era de 55 mm (2.2 in). Para esta geometría, el ángulo del vértice es igual a 62° . [71]

La variabilidad definida como la dispersión de los resultados obtenidos a partir de una prueba realizada en repetidas ocasiones bajo el mismo personal, equipo y procedimientos. En 1991 el autor Carino publicó que el número de probetas para las pruebas de obtención de resistencia promedio del concreto está basado en la

variabilidad y la certeza buscada, además mencionó que la prueba de extracción ha demostrado ser un método de prueba muy confiable. [69]

A lo largo del tiempo diferentes autores se han introducido en la investigación del método de extracción pull-out para la estimación de la resistencia del concreto y un aspecto importante que se ha estudiado es el coeficiente de variación que esta prueba presenta. Dentro del trabajo de los diferentes investigadores se encuentran diferentes parámetros estudiados en el concreto, como las características de los agregados, los ángulos de vértice y la profundidad de empotramiento, entre otros.

Los resultados mencionados se muestran en la tabla 11. Estos valores promedio representan coeficientes de variación que van desde 4 hasta 15%, con un valor promedio de 8%. Dicho valor se confirma en ASTM C 900 (2001). [72]

Tabla 14. Resumen del coeficiente de variación dentro de la prueba de extracción. [72]

							Coef. de variación (CV)
Autores	Áng. aprox.°	Prof. de embebido (mm)	Tamaño máximo del agregado	Tipo de agregado	Tamaño de la muestra	Rango (%)	Promedio (%)
Malhotra & Carrete (1980)	67	53	19	Caliza	3	2.3-6.3	3.9
Malhotra (1975)	67	53	25	Grava de río	2	0.9-14.3	5.3
Bickley (1982)	62	25	10	Sin registro	8	3.2-5.3	4.1
Khoo (1982)	70	25	20	Granito	6	1.9-11.8	6.9
Carrete & Malhotra (1984)	62	25	19	Caliza	10	5.2-14.9	8.8
Keiller (1982)	62	25	20	Caliza	6	7.3-31	14.8
	70	25	19	Grava río	11	4.6-14.4	10.2
Stone, Reeve & Carino (1986)	70	25	19	Caliza	11	6.3-146	9.2
	70	25	19	Agregado ligero	11	1.4-8.2	6
	54	25	19	Grava río	11	4.3-15.9	10
Bocca (1984)	67	30	12	Grava	24	2.8-6.1	4.3

Claus German en una recopilación de trabajos de 20 años de experiencia, informó que desde 1970 hasta 1995, se ha ejecutado un total de 28 correlaciones principales para investigar la estabilidad de la relación entre la fuerza de extracción y la resistencia del cilindro encontrada por Kierkegaard-Hansen.

Las correlaciones cubren un total de 4,362 pruebas de Lok-Test y 3,124 pruebas de compresión de muestras estándar. Los parámetros investigados fueron: Tipo de cemento, relación a/c, edad, diferentes condiciones de curado, contenidos de aire, aditivos y cenizas volantes, así como forma, tipo y tamaño del agregado (hasta Tamaño de agregado máximo de 40 mm).

Sólo para el uso de agregados livianos, se encontró una correlación diferente. Para el concreto con agregado de peso normal aplican las ecuaciones 15 y 16, mientras que para el agregado ligero está la ecuación 17.

$$C = -1.11 + 1.19P \quad (15)$$

$$C = 1.12P1.00 \quad (16)$$

$$C = 0.69F1.12 \quad (17)$$

CAPÍTULO 2

2.1. JUSTIFICACIÓN

En el sector de la construcción, hoy en día frecuentemente se acude a la extracción de núcleos de concreto para conocer la resistencia a la compresión de elementos estructurales colados in situ como para la reelaboración de planos, la necesidad de construir niveles nuevos, la revisión por presencia de deterioro en la obra o para el cambio de aplicación del lugar. Sin embargo, los usuarios suelen emplear diferentes métodos para la estimación del $f'c$, siendo el ACI 318-19 y ACI 214.4-21, las más concurridos, por la gran organización que respalda estos códigos, a pesar de que cada uno tiene un objetivo diferente.

La determinación de un valor hacia el coeficiente de variación que existe entre los diferentes métodos va a propiciar al usuario la seguridad en la certeza de los resultados obtenidos bajo las indicaciones de cada código. Exponiendo si el método dictado por el ACI 318-19 es adecuado para la determinación del $f'c$ específico del concreto evaluado a través de una extracción de núcleos o si solo es eficaz en la clasificación del concreto como apto para ser catalogado estructuralmente aceptable.

Los resultados de esta investigación pueden mostrar un segundo objetivo del código ACI 318-19 (contenido referente a la estimación del $f'c$ por núcleos) o puede descartar esta función por altas variaciones.

Además de difundir la alta certeza existente en los métodos semi-destructivos y no destructivos para la estimación del $f'c$ del concreto, como la extracción pull-out, el esclerómetro y la velocidad de pulso de onda, de donde se generarán correlaciones de los resultados obtenidos de $f'c$ por dichos métodos, con respecto a los resultados obtenidos con la extracción de núcleos. El empleo de estos métodos puede agilizar los tiempos en los procesos de construcción y reducir los costos económicos por la sencillez de su aplicación.

2.2. HIPÓTESIS

La estimación de la resistencia a la compresión especificada ($f'c$) del concreto, mediante la adopción de los criterios establecidos en el ACI 318-19, para la evaluación del cumplimiento de la resistencia a la compresión del concreto, mediante núcleos de concreto, se podrán correlacionar con los resultados obtenidos mediante los únicos criterios establecidos por el ACI (ACI 214.4-21), para determinar el $f'c$ equivalente del concreto y esta correlación podrá ser utilizada, en la práctica para este fin. Los resultados de pruebas no destructivas, como el martillo

de rebote, la velocidad de pulso ultrasónico y las pruebas de extracción Lok-Test (pull-out), también podrán ser correlacionados con el ACI 214.4-21, que resultarán de mucha utilidad para estimar el f'_c correspondiente a partir de resultados de pruebas no destructivas/semi-destructivas en el lugar.

2.3. OBJETIVOS

2.3.1. Objetivo general

Establecer correlaciones a partir de los valores del f'_c estimado, mediante la adopción de los criterios del ACI 318-19, para la evaluación del concreto mediante núcleos, martillo de rebote, velocidad de pulso ultrasónico y pruebas de extracción Lok-Test (pull-out), con los resultados del f'_c equivalente, mediante los únicos criterios establecidos para este fin, con base en resultados de resistencia a la compresión, obtenidos a partir de núcleos de concreto y evaluados conforme al ACI 214.4-21.

2.3.2. Objetivos específicos

- Evaluar el f'_c de núcleos de concreto (diámetros 7.5 y 10 cm) extraídos de diferentes niveles de resistencia a la compresión (25, 30, 50 y 70 MPa) a diferentes edades (14, 28 y 56 días), bajo los criterios establecidos por ACI 214.4-21 y ACI 318-19, sometidos a curado estándar.
- Correlacionar los valores de f'_c equivalente obtenidos en núcleos de concreto (diámetro 7.5 y 10 cm) por el ACI 214.4-21 para diferentes niveles de resistencia (25, 30, 40 y 70 MPa), Vs los valores de resistencia obtenidos a partir de ensayos no destructivos.
- Evaluar los datos obtenidos a partir de la determinación del f'_c equivalente del concreto a diferentes edades de ensayo (14, 28 y 56 días), para diferentes niveles de resistencia (25, 30, 50, 70 MPa), bajo condiciones de curado estándar, Vs los valores de resistencia a la rotura obtenidos a partir de núcleos de 7.5 y 10 cm.

CAPÍTULO 3

3.1. MÉTODO EXPERIMENTAL

Para este proyecto se trabajó con una variable en el concreto, la cual corresponde al f'_c del mismo, en donde se plantearon 4 resistencias (25, 30, 50 y 70 MPa), basadas en la mayor demanda en la industria del concreto, Las cuales fueron monitoreadas por pruebas no destructivas y semi-destructivas, como la extracción Pull-out (Lok Test), esclerómetro (martillo de rebote), velocidad de pulso ultrasónico y extracción de núcleos de concreto, así también se llevó un control con base en cilindros estándar de concreto.

Para la producción del concreto con el cual se trabajó en esta investigación se fabricó con los materiales que se enuncian a continuación, al igual también se menciona la fuente de procedencia de cada uno de ellos.

- *Cemento Portland Ordinario 40R*, marca CEMEX planta Monterrey, N.L.
- *Agregado fino*, arena caliza No. 4, procedente de la zona metropolitana de Mty, N.L.
- *Agregado grueso*, grava tipo caliza con TMA de 19 mm, procedente de la zona metropolitana de Mty, N.L.
- *Mapefluid N280*, aditivo reductor de agua de alto rango y retardante (ASTM C494 Tipo G).
- *Mapeplast RP190*, aditivo reductor de agua de medio rango y retardante (ASTM C494 Tipo D).
- *Plastol precast plus*, aditivo reductor de agua de alto rango base policarboxilato (ASTM C494 Tipo A y F).
- *Eucon W.O. Plus*, aditivo líquido para concreto que inhibe temporalmente la hidratación del cemento.

En la ilustración 14 se describen de manera gráfica las etapas que se evaluaron como parte del método experimental, las cuales se dividen en 5, desde la caracterización de los materiales, hasta la generación de las correlaciones con los resultados obtenidos de los ensayos aplicados en el proyecto. De tal manera, en cada etapa se listan los ensayos que se aplicarán y la normativa bajo la cual se rige.

En la ilustración 15 se aprecia el número de especímenes que se van a ensayar por cada tipo de ensayo y las edades correspondientes.

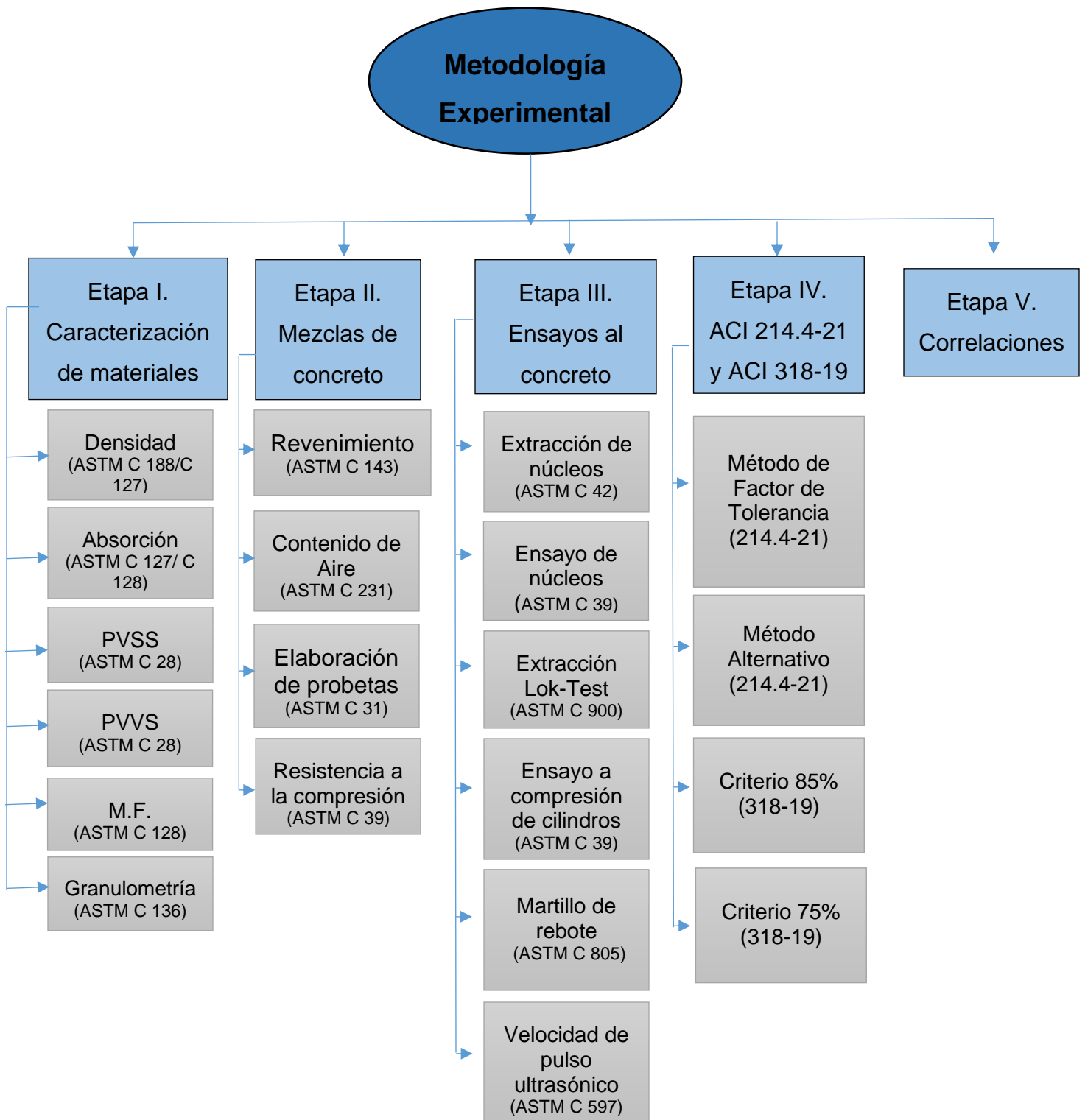


Ilustración 14. Planeación de ensayos no destructivos y semi-destructivos al concreto



Ilustración 15. Planeación de ensayos no destructivos y semi-destructivos al concreto.

3.2. ETAPA I.- Caracterización de los materiales

Primeramente, se realizó la caracterización del ingrediente del concreto como individual, para conocer las propiedades más importantes y revisar su cumplimiento de las especificaciones.

3.2.1. Densidad

Se llevó a cabo la determinación de la densidad de los agregados calizos utilizados en la producción del concreto, siguiendo la norma ASTM C127 que especifica el procedimiento adecuado.

Por parte del agregado fino, después de haber hecho un muestreo y poner el material durante 24 horas en agua para una saturación, y posteriormente haberlo llevado a una condición de saturado superficialmente seco, se utilizó el picnómetro que se observa en la ilustración 16, como parte del equipo para encontrar la densidad.



Ilustración 16. Picnómetros utilizados para la determinación de la densidad del agregado fino.

Mientras que, para el agregado grueso, también se determinó la densidad por el picnómetro adecuado para el tamaño máximo de agregado que se está analizando, el cual para este caso corresponde a 19 mm. En la ilustración 17 se observa un modelo de picnómetro similar al empleado en este proyecto.



Ilustración 17. *Picnómetro tipo sifón de 15 cm de diámetro x 30 cm de altura (izquierda) y Picnómetro tipo sifón de 10 cm de diámetro x 35 cm de altura (derecha).[73]*

La densidad del cemento se llevó a cabo por ASTM C188, utilizando el frasco Le Chatelier (ilustración 18), siguiendo el método del volumen desplazado, donde se colocan 64 gramos de cemento en el frasco con Keroseno para después determinar la densidad en función de la masa del cemento y el volumen desplazado que genera esta misma.



Ilustración 18. *Frasco Le Chatelier con cemento y Keroseno para la determinación de la densidad del cemento.*

3.2.2. Absorción

Con base en lo descrito en ASTM C127 y C128, se obtuvieron los valores correspondientes a las absorciones de los agregados, determinando un peso de estado saturado superficialmente seco, para después compararlo con un peso

seco después de haber sido sometidos durante 24 horas a un horno a una temperatura de 110°C.

3.2.3. *Peso volumétrico varillado seco y peso volumétrico seco suelto*

Para encontrar esta propiedad de los agregados gruesos, primero se seleccionó un recipiente de tamaño correspondiente al TMA de 19 mm. Para después llenarlo en tres capas, compactando cada una con 25 golpes con la punta de una varilla semiesférica y de diámetro de 5/8" y, finalmente, midiendo el peso para determinar el PVVS con respecto al volumen del recipiente.

Mientras que para la obtención del PVSS se llenó el mismo recipiente en una sola capa y sin ningún tipo de compactación y, finalmente, se hizo el cálculo de peso sobre volumen.

3.2.4. *Granulometría*

Para los agregados, tanto grueso como fino, se graficó una curva granulométrica, con los resultados obtenidos después haber sido sometido el material a un cribado por las mallas que dicta ASTM C136 (ilustración 19) y esto a un tiempo de 10 minutos en el equipo ROTAP, siendo el tiempo máximo que recomienda la norma para evitar erosión en los materiales.



Ilustración 19. *Mallas utilizadas para determinar la granulometría del agregado fino (izquierdo) y equipo de cribado mecánico empleado para este ensaye (derecho).*

3.3. ETAPA II.- Diseño de mezclas de referencia

Para llevar a cabo la caracterización del concreto tanto en estado fresco como en estado endurecido, fue necesario fijar 4 resistencias de concreto, las cuales son 25, 30, 50 y 70 MPa, que, a su vez, fueron diseñadas a través del método de volúmenes absolutos, por medio de sus pesos secos.

Los materiales utilizados para la fabricación del concreto fueron: cemento portland ordinario 40R, agregado fino tipo caliza No.4, agregado grueso tipo caliza con TMA de 19 mm, y los aditivos variaron dependiendo del nivel de resistencia deseado, donde para 25, 30 y 50 MPa se fabricaron concretos con aditivos reductores de agua, de la marca Mapei.

Mientras que para la resistencia de 70 MPa se utilizó un superfluidificante Plastol Pre Cast Plus, acompañado de un estabilizador de trabajabilidad WO Plus, ambos de la marca Eucomex. El cambio de aditivo fue debido al alto consumo de cemento utilizado para alcanzar dicha resistencia, el cual provocaba un aditivo de alto rango que pudiera interactuar de manera eficaz.

3.3.1. Revenimiento

Para llevar un control en la calidad del concreto producido para la parte experimental de la investigación, se aplicó el ensaye de revenimiento al concreto en estado fresco por medio de ASTM C143 (ilustración 20). Revisando que los concretos no solo cumplan con la resistencia especificada, sino que también tengan una trabajabilidad adecuada y que sean representativos de un compuesto con aplicación en la industria de la construcción.



Ilustración 20. *Determinación del revenimiento para las mezclas de concreto fabricadas en este proyecto.*

El ensayo se llevó a cabo para todas las mezclas de concreto que se produjeron durante la fase experimental y se ejecutó al instante de producir el concreto, con la prevención de la pérdida de consistencia que se da conforme transcurre el tiempo y avanza el fraguado.

3.3.2. Contenido de aire

El contenido de aire se llevó a cabo por el método de presión, establecido en la ASTM C231, ya que se considera en estas condiciones más accesible y sencillo. Teniendo en cuenta que el concreto analizado cumple con las características necesarias para aplicar este método, de donde se puede resaltar el tamaño máximo de agregado y que los agregados no son porosos o ligeros. En la ilustración 21 se anexa el equipo para obtener dicha propiedad del concreto en estado fresco.



Ilustración 21. *Determinación del contenido de aire en el concreto en estado fresco por ASTM C231.*

3.3.3. Resistencia a la compresión

Después de haber producido el concreto, se elaboraron cilindros estándar con dimensiones de 100 x 200 mm y posteriormente se curaron siguiendo lo descrito en la ASTM C31. Y se llevó un control del desarrollo de resistencia, midiendo a edades de 3, 7 y 28 días, a través de ensayos mecánicos a compresión, conforme lo descrito en ASTM C39. Esto con la finalidad de definir las resistencias de 25, 30, 50 y 70 MPa.

3.3.4. Elaboración de probetas

3.3.4.1. Resistencia a la compresión

Se fabricaron cilindros estándar de concreto, con dimensiones de 100 x 200 mm, con base en lo indicado en ASTM C31 (ilustración 22). Para cada edad de los diferentes tipos de resistencia se elaboraron 3 cilindros, los cuales también se curaron con el procedimiento estándar indicado por esta norma. Esto para llevar un control de la resistencia a la compresión del concreto, por los métodos convencionales.



Ilustración 22. Cilindro estándar de concreto de 100 x 200 mm para medir la resistencia a la compresión del concreto.

3.3.4.2. Núcleos de concreto

Para extraer núcleos de concreto se fabricaron 6 prismas con dimensiones de 600x300x150 mm (ilustración 23), de los cuales se extrajeron núcleos de 100 y 75 mm, sin ningún orden fijo. Esto para hacer más representativos los resultados de los especímenes. Para cada dimensión se extrajeron 8 núcleos, los cuales tenían como característica cumplir con una longitud que asegurara una relación l/d de 2, después del corte de los extremos y el cabeceo.



Ilustración 23. Prisma de concreto de 600x300x300 mm para ejecutar pruebas no destructivas.

El colado de los prismas se llevó a cabo en tres capas de aproximadamente igual volumen cada una de ellas (ilustración 24).



Ilustración 24. Llenado del molde de prismas de concreto en tres capas de similar volumen.

Las capas se vibraron en 7 puntos de toda la sección transversal (ilustración 25), cuidando que el vibrador penetrara toda la capa, y cuando aplica también penetrar 25 mm la capa anterior.



Ilustración 25. *Vibrado hacia el concreto en la fabricación del prisma de concreto.*

Mientras que para cada capa también se golpeó el molde alrededor con un mazo de goma, para buscar que escapara el aire atrapado a causa del llenado del espécimen. El número de golpes fue de un total de 24, distribuidos en las 4 caras del prisma. Finalmente se realizó un enrasado y un acabado con llana para posteriormente cubrirlos de aspectos como la evaporación o contaminación.

Ya cumplido el tiempo de fraguado final, se desmoldaron los prismas para llevarlos al cuarto de curado, donde se mantuvieron hasta la fecha del ensaye, a una temperatura de $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ y a una H.R. de 95%.

3.3.4.3. Martillo de rebote

Para medir el martillo de rebote en el concreto, se fabricaron dos cilindros compañeros estándar de dimensiones de 150x300 mm, los cuales se curaron con ASTM C31. [74] El martillo utilizado es un equipo Tipo N de la marca Proceq y con un número de serie SH01-009-0043 y calibrado en 60 ± 2 .

3.3.4.4. Velocidad de pulso ultrasónico

En esta prueba no destructiva se utilizaron 3 cilindros de 100x200 mm, para cada edad de medición, los cuales fueron fabricados y curados con base a ASTM

C31. El equipo es de la marca Pundit Lab, la serie PL02-006-0326 y calibrado en 25.4 μ s.

3.3.4.5. *Extracción Pull out (Lok-Test)*

El equipo utilizado en la determinación de la fuerza de extracción es un gato de la marca Germann instruments, inc.

Con la finalidad de llevar a cabo la prueba de extracción en la versión Lok-Test, se dejaron embebidos los insertos en el concreto cuando se coló en las cimbras. Para economizar el uso del material y tener una mejor relación de los resultados entre las pruebas, se aplicaron los insertos en la parte inferior de los prismas destinados para la extracción de núcleos.

Para cada de edad de ensaye y por mezcla se colocaron 5 insertos, distribuidos en la cara inferior del prisma (ilustración 26), cuidando que la distancia libre entre insertos fuera de 10 cm como mínimo, aspecto descrito por diferentes autores.[67], [75]



Ilustración 26. *Distribución de insertos para la prueba de Lok-Test para edades de 14, 28 y 56 días.*

Es importante recalcar que para esta prueba, en específico, se fabricó un prisma extra por cada resistencia diferente; esto para colocar 15 insertos, los cuales cubren las edades de ensayo de 1, 3 y 7 días (ilustración 27). Cabe mencionar que el procedimiento de fabricación del prisma es idéntico al de los prismas destinados para la extracción de núcleos.



Ilustración 27. *Distribución de insertos para la prueba de Lok-Test para edades de 1, 3 y 7 días.*

3.4. ETAPA III.- Ensayos al concreto

En esta fase del proyecto se describe el método y los puntos importantes aplicados para recabar los resultados que muestran las propiedades del concreto. Prácticamente, se cubren tanto los ensayos no destructivos, los semi-destructivos y los destructivos.

3.4.1. Rotura de cilindros estándar

Para llevar un control en la calidad del concreto producido para la fase experimental, se ensayaron tres cilindros de concreto por edad para a partir de ahí definir un valor promedio que vendría a significar una resistencia a la rotura.

Primeramente, se aplicó un cabeceo de azufre a los especímenes con base a lo descrito en ASTM C617, esto con la finalidad de asegurar una perpendicularidad y una planicidad adecuada para una buena distribución de la carga sobre el cilindro.[76] Mientras que, la norma a seguir para el ensayo mecánico fue la ASTM C39, para controlar aspectos como la velocidad de ensayo y la expresión de resultados. En la ilustración 28 se aprecia un cilindro de concreto fallado a partir de un ensaye a compresión. [77]



Ilustración 28. Cilindro estándar de concreto de 100x200 mm ensayado a compresión.

3.4.2. Núcleos de concreto

Se extrajeron 8 núcleos de concreto por cada edad y por cada diámetro como se observa en la ilustración 29. Estos especímenes se llevaron a la sierra para llevar a cabo un corte en húmedo, donde se retiraron los extremos, buscando una relación de longitud-diámetro de 2. Posteriormente se dejaron los especímenes entre 15-30 minutos de secado al aire, para eliminar la humedad superficial y, dado esto, se guardaron durante 7 días en recipientes herméticos, no absorbentes, con la finalidad de mantener la misma humedad interna hasta el día del ensayo.



Ilustración 29. Extracción de núcleos a un prisma de concreto para su ensayo a compresión.

Para el ensayo se aplicó un cabeceo siguiendo ASTM C617 y ya con estas caras se determinó la longitud total para el cálculo de la relación l/d. Y finalmente ser ensayados con ASTM C39 (ilustración 30).[76], [77]



Ilustración 30. *Ensayo a compresión de un núcleo de concreto de 7.5 cm.*

3.4.3. Martillo de rebote

Los cilindros se cabecearon con azufre y se ensayaron con la peculiaridad de ser precargados a 3 MPa para de ahí tomar sobre la circunferencia del cilindro 10 valores de número de rebote, como se observa en la ilustración 31. La precarga se realizó bajo la indicación del ACI 228.1R-03.[56]



Ilustración 31. *Determinación del número de rebote a un cilindro de 150x300 mm precargado a 3 MPa.*

3.4.4. Velocidad de pulso ultrasónico

Para realizar el ensayo primeramente se midió la longitud del cilindro y después se tomó y se aplicó vaselina en las caras que iban a estar en contacto con los transductores; acto siguiente se colocaron los transductores asegurando un buen contacto con el espécimen y se ejecutó el pulso, registrando el tiempo que tardó en llegar desde un transductor al otro; para, como resultado final, calcular una velocidad dividiendo la longitud del cilindro entre el tiempo que tardó la onda en desplazarse.

Lo anterior fue ejecutado siguiendo los lineamientos que dicta ASTM C597.[78]

3.4.5. Extracción pull-out (Lok-Test)

Para llevar a cabo la extracción de los insertos destinados para Lok-Test se siguieron las recomendaciones dictadas por el fabricante en el Manual de uso del equipo [75] y la ASTM C900[79]. Como la velocidad de extracción, la cual se fijó en una vuelta de la manija del equipo por cada 3 segundos (ilustración 32).



Ilustración 32. Ejecución del ensayo Lok-Test (pull-out) a un prisma de concreto.

Finalmente se reportó la fuerza de extracción máxima registrada por el equipo. Y en la ilustración 33 se puede apreciar una falla adecuada de la prueba Lok-Test.



Ilustración 33. *Falla correcta en la extracción de inserto por la prueba Lok-Test.*

3.5. ETAPA IV. ACI 214.4-21 y ACI 318-19

En esta sección se detalla el análisis de los resultados obtenidos a partir del ensaye de los núcleos de concreto, donde, por parte del ACI 214.4-21, se manejan dos métodos, tanto el de Factor de Tolerancia como el Alternativo, los cuales, a su vez, tienen distintos caminos para llegar al resultado. En la ilustración 34 se pueden apreciar y del lado del ACI 318-19 se utilizó la adaptación de los criterios de 85% y 75%.

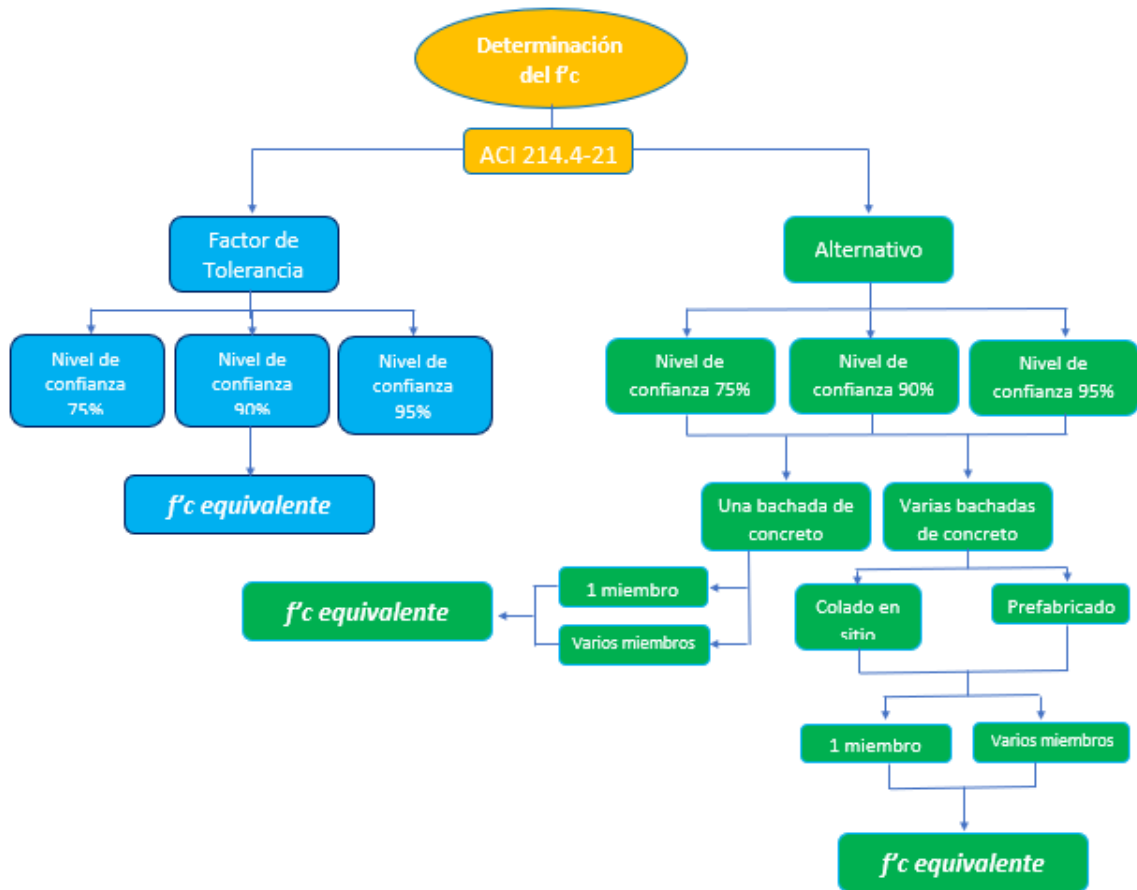


Ilustración 34. Métodos de determinación de $f'c$ equivalente por el ACI 214.4-21.[5]

A continuación, se puede ver una ejemplificación de los cálculos aplicados para llegar al resultado de un $f'c$ equivalente por los diferentes métodos analizados en este proyecto. En esta sección se van a mostrar algunos cálculos y el tratamiento que se les da a los valores obtenidos por medio del ACI 214.4-21, ejemplificando un concreto de 25 MPa y a una edad de 14 días, esto con núcleos de concreto de 7.5 cm de diámetro.

3.5.1. Método de Factor de Tolerancia

El primer paso es definir el número de especímenes que se van a extraer y posteriormente a examinar. Por esto se aplica el siguiente cálculo.

De todas las infinitas posibilidades de combinaciones entre el valor de V y e se eligieron para $V=13$ y para $e=9$.

$$n = \left(\frac{2V}{e}\right)^2 = \left(\frac{2(13)}{9}\right)^2 \approx 8 \quad (1)$$

De lo anterior, se definió que el número recomendado de especímenes para cumplir con los valores del error y del coeficiente de variación estimado es de 8 núcleos de concreto.

Después de haber definido el paso anterior, lo siguiente es ejecutar la extracción, el corte, el cabeceo y, finalmente, el ensaye mecánico para obtener los valores de la resistencia a la rotura de los núcleos de concreto. En la tabla 15 se pueden observar valores de un ensayo mecánico a la compresión, en núcleos de 7.5 cm.

Donde “*f_{core}*” representa la resistencia a la rotura de los núcleos de concreto.

Tabla 15. Resistencia a la rotura de núcleos de concreto de 7.5 cm de diámetro a una edad de 14 días de curado.

Núcleos 7.5 cm								
Muestra	Diámetro (cm)	Altura SA (cm)	Altura CA (cm)	Rel. l/d	Rel. l/d Az	Área (cm ²)	Carga (Kg)	f _{core} (MPa)
1	7	14.4	14.8	2.06	2.11	38.47	8806	22.4
2	7.1	14.2	14.6	2.00	2.06	39.57	8617	21.3
3	7	13.8	14.2	1.97	2.03	38.47	9017	23.0
4	7	14	14.4	2.00	2.06	38.47	8195	20.9
5	7	14	14.4	2.00	2.06	38.47	7496	19.1
6	7.1	13.9	14.3	1.96	2.01	39.57	7511	18.6
7	7	13.8	14.2	1.97	2.03	38.47	8922	22.7
8	7	14	14.4	2.00	2.06	38.47	8575	21.9
						Promedio		21.2

Además de lo anterior, también se puede destacar la obtención de las dimensiones de los núcleos, tanto de sus diámetros, la altura sin cabeceo, la altura con cabeceo, la relación de longitud con diámetro, tanto para el núcleo sin azufre como con azufre, el área y la carga máxima soportada.

Cabe mencionar que la relación l/d que se va a seguir utilizando para el resto de los cálculos es la que considera el cabeceo de azufre en el núcleo, esto por lo dictado en ASTM C42. [12]

Lo siguiente es determinar un *f_c* equivalente para evaluar la capacidad estructural de una estructura existente. Para esto es necesario emplear los valores que se encuentran en la “Tabla 3. Magnitud y precisión de los factores de corrección de resistencia para convertir las resistencias de núcleos en resistencias equivalentes en el lugar.” Y esto se efectúa de la siguiente manera:

$$f_c = F_{l/d} F_{dia} F_{mc} F_d f_{core} \quad (4)$$

Los resultados se representan por f_c y pueden verse tabulados en la tabla 16.

Tabla 16. f_c equivalente para evaluar la capacidad estructural de una estructura existente.

Núcleos 7.5 cm	$F_{l/d}$			F_{dia}		F_{mc}		F_d		F_c
	Muestra	α	Valor prom.	C.V. (%)	Valor prom.	C.V. (%)	Valor prom.	C.V. (%)	Valor prom.	C.V. (%)
1	0.00043	0.9984	0.0327	1.04	8.85	1.00	2.50	1.06	2.25	24.70
2	0.00043	0.9996	0.0079	1.04	8.85	1.00	2.50	1.06	2.25	23.53
3	0.00043	0.9999	0.0020	1.04	8.85	1.00	2.50	1.06	2.25	25.33
4	0.00043	0.9996	0.0082	1.04	8.85	1.00	2.50	1.06	2.25	23.02
5	0.00043	0.9996	0.0082	1.04	8.85	1.00	2.50	1.06	2.25	21.05
6	0.00043	1.0000	0.0005	1.04	8.85	1.00	2.50	1.06	2.25	20.51
7	0.00043	0.9999	0.0020	1.04	8.85	1.00	2.50	1.06	2.25	25.07
8	0.00043	0.9996	0.0082	1.04	8.85	1.00	2.50	1.06	2.25	24.08
										23.4

Los resultados anteriores consideraron las diferentes relaciones longitud-diámetro de cada núcleo individual tomando en cuenta el cabeceo como parte de la longitud. Además, de una condición de humedad considerada como tratamiento estándar.

Mientras que el valor del factor de daño es el brindado por la guía, el factor de diámetro se interpoló para obtener el valor correspondiente para un núcleo de 7.5 cm y, finalmente, el valor de f_{core} es el obtenido en el paso anterior.

Avanzando con los cálculos, lo siguiente es la determinación de los aspectos estadísticos como las incertidumbres y las desviaciones estándar. Esto con las siguientes ecuaciones.

Para la desviación estándar de la muestra se obtiene de lo siguiente:

$$S_c = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(f_{ci} - \bar{f}_c)^2}{(n-1)}} \quad (6)$$

Mientras que para la desviación estándar de la resistencia en sitio por los factores de corrección se utiliza la siguiente ecuación:

$$S_a = f_c \sqrt{V_{l/d}^2 + V_{dia}^2 + V_{mc}^2 + V_d^2} \quad (7)$$

Y para la desviación estándar general se aplica la ecuación mostrada aquí:

$$S_o = \sqrt{S_c^2 + S_a^2} = \sqrt{1.8^2 + 2.14^2} = 2.79 \quad (8)$$

En la Tabla 17 se resumen los resultados de las tres ecuaciones anteriores.

Tabla 17. Resultado de los cálculos de las diversas desviaciones estándar aplicadas por el ACI 214.4-21.

Muestra	S _c	S _a	S _o
Núcleos 7.5 cm			
Resultado	1.8	2.14	2.79

Para obtener el valor del 10 por ciento fractil de los datos de resistencia en el lugar, $f_{0.10}$ se emplea la ecuación siguiente:

$$f_{0.10} = \bar{f}_c - KS_c = 23.4 MPa - (1.74(1.8)) = 20.28 MPa \quad (9)$$

Y para esta ejemplificación se muestra un valor de K para un nivel de confianza del 75%. Y se adjuntan los resultados en la tabla 18.

Tabla 18. Valores del 10 por ciento fractil de los datos de resistencia en el lugar.

Muestra	S _c	S _a	S _o	K	f _{0.10}
Núcleos 7.5 cm					
Resultado	1.8	2.14	2.79	1.74	20.28 MPa

Y para culminar con el método de Factor de Tolerancia y obtener el f'_c equivalente, se aplica la ecuación final:

$$f'_{c_{eq}} = \bar{f}_c - \sqrt{(KS_c)^2 + (ZS_a)^2} = 23.4 MPa - \sqrt{(1.74(1.8))^2 + (0.67(2.14))^2} = 19.97 MPa \quad (10)$$

Recordando que para los coeficientes K y Z se utilizó el Nivel de Confianza del 75%. Para ver los valores del f'_c equivalente del concreto a partir de núcleos, se pueden consultar en la tabla 19.

Tabla 19. Resultados del f'_c equivalente por el método FT y para un NC de 75%.

Muestra Núcleos 7.5 cm	S_c	S_a	S_0	K	$f_{0.10}$	Z	f'_{Ceq}
Resultado	1.8	2.14	2.79	1.74	20.28 MPa	0.67	19.97 MPa

Obteniéndose al final que el f'_c equivalente para el concreto de 25 MPa, con núcleos de 7.5 cm de diámetro y a una edad de 14 días, todo esto catalogado con un nivel de confianza del 75%, arroja un valor final de 19.97 MPa.

3.5.2. Método Alternativo

El método alternativo comparte con el de Factor de Tolerancia que ambos definen el número de especímenes de la misma manera, al igual que los cálculos de la desviación estándar, los cuales también corresponden a las mismas ecuaciones.

Para este método, la resistencia especificada equivalente es obtenida a partir de dos ecuaciones. Primero se debe determinar el límite inferior de la resistencia promedio en el lugar, para después obtener el fractil del 10 por ciento de la resistencia en el lugar, que es equivalente a la resistencia especificada.

$$\bar{f}_{c_{CL}} = \bar{f}_c - \sqrt{\frac{(TS_c)^2}{n} + (ZS_a)^2} =$$

$$23.4 \text{ MPa} - \sqrt{\frac{(0.71(1.8))^2}{8} + (0.67(2.14))^2} = 21.9 \text{ MPa} \quad (11)$$

La definición del valor de T y de Z también están en función de un nivel de confianza y que para este caso se va a ejemplificar el correspondiente al 75%. Mientras la variable n es el número de especímenes utilizados. En la tabla 20 se pueden observar los resultados.

Tabla 20. Límite inferior de la resistencia promedio en el lugar.

Muestra	F _c	S _c	S _a	S ₀	Z	T	n	f _{CpromCL}
Núcleos 7.5 cm								
Resultado	23.4 MPa	1.8	2.14	2.79	0.67	0.71	8	21.91 MPa

Mientras que, la resistencia especificada equivalente se obtiene usando f_{CCL} en la siguiente ecuación:

$$f'_{C_{eq}} = C \bar{f}_{CCL} = 0.91(21.91 \text{ MPa}) = 19.94 \text{ MPa} \quad (12)$$

En la tabla 21 se puede observar el valor de un $f'c$ equivalente por el método alternativo que muestra el ACI 214.4-21.

Tabla 21. Resultados del $f'c$ equivalente por el método alternativo para un NC de 75% por ACI 214.4-21.

Muestra	F _c	f _{CpromCL}	C	f'Ce _q
Núcleos 7.5 cm				
Resultado	23.4 MPa	21.91 MPa	0.91	19.94 MPa

Para esto se debió de haber definido un valor de C con respecto a los que se dicta en la Tabla 6.

3.5.3. ACI 318-19

En esta sección se ejemplifica cómo se hizo la interpretación de los resultados de resistencia a la rotura de los núcleos de concreto, por medio de los dos criterios que se adaptaron del código ACI 318-19.

Primero que todo, se definió el número de especímenes, los cuales fueron 3, por lo que dicta el propio ACI 318-19. Estos tres valores se obtuvieron de los 8 valores de resistencia a la rotura que se utilizaron en la fase del ACI 214.4-21, solo que para esto se descartaron primeramente el valor más alto y el más bajo, quedando disponibles solo 6 núcleos y de éstos se seleccionaron al azar 3, para formar un juego y otros 3 para otro juego, para así conformar la muestra promediando los resultados finales de ambos juegos.

El ACI 318-19 se refiere a lo descrito en ASTM C42, por lo cual los núcleos se vieron afectados por un factor de corrección de longitud-diámetro, el cual se puede encontrar dentro de esta normativa. Y en la tabla 22 se puede observar

cómo se prepararon los juegos de núcleos de concreto y la aplicación de sus respectivos factores de corrección por la relación l/d.

Tabla 22. Resultados del $f'c$ estimado adoptando los criterios del ACI 318-19.

Núcleos 7.5 cm	$f'c$ ACI (l/d)	$f'c$ ACI 85%	$f'c$ ACI 75%	Factor l/d
Muestra	$f_{core} * F_{l/d}$	$f_{core} / 3 * 0.85$	$f_{core} / 0.75$	Tabla ASTM
1	22.65		30.20	1.01
2	21.44		28.59	1.00
3	23.03	18.44	30.71	1.00
4	20.98		27.98	1.00
5	19.19		25.59	1.00
6	18.63	18.12	24.84	1.00
7	22.79		30.39	1.00
8	21.96		29.27	1.00
	22.91	18.28	28.45	

De lo anterior se puede observar la comparativa de los dos distintos criterios adaptados del ACI 318-19 para estimar el $f'c$ del concreto.

3.6. ETAPA V.- Correlaciones

En esta sección se representan gráficamente, en la ilustración 35, las diferentes correlaciones que se tiene considerados realizar con los resultados obtenidos de la fase experimental. Todas estas están relacionadas con la resistencia del concreto a la compresión, siendo el punto de partida el f'_c equivalente obtenido a partir los métodos del ACI 214.4-21, ya que es quien dicta los criterios únicos establecidos para obtener esta propiedad en específico.

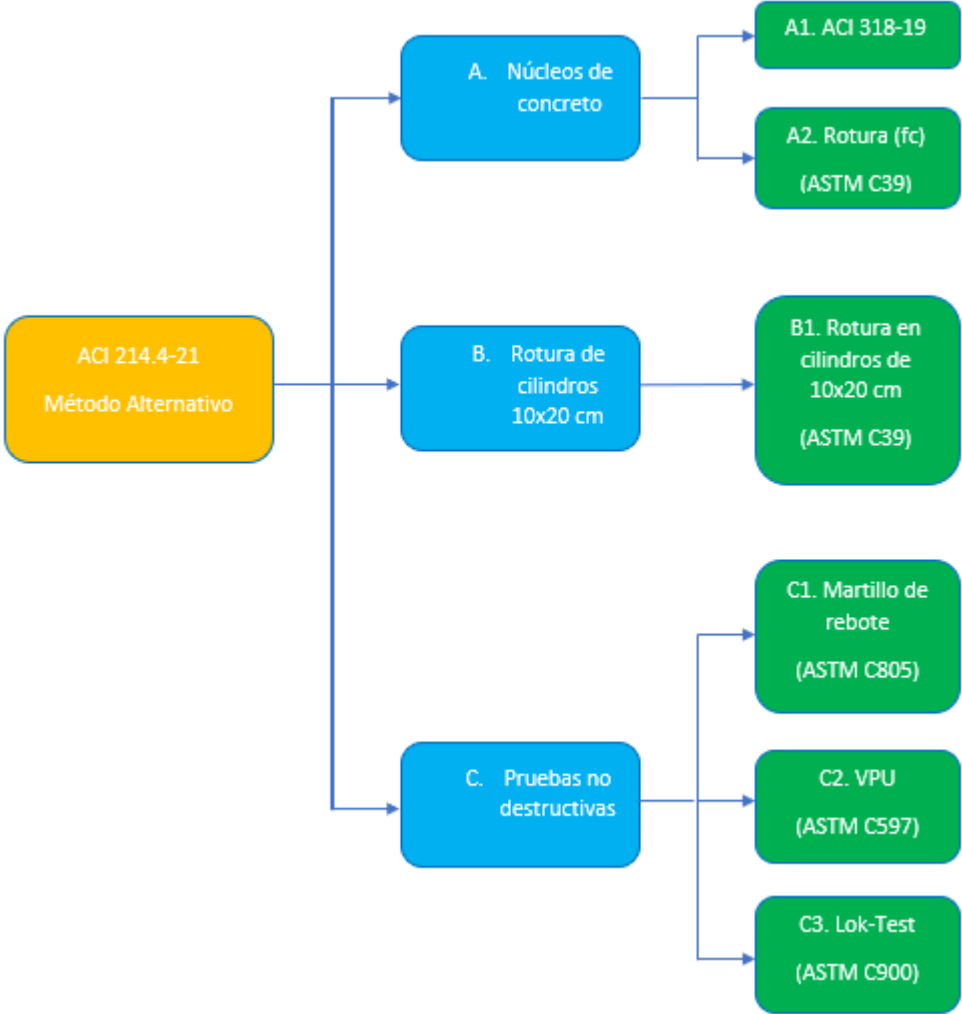


Ilustración 35. Correlaciones obtenidas a partir de los resultados de la fase experimental.

CAPÍTULO 4

4.1. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.2. ETAPA I.- Caracterización de los materiales

4.2.1. Agregados

Se llevó a cabo la caracterización de los agregados, para calcular el proporcionamiento de los diferentes diseños de mezclas de concreto partir de las densidades de los materiales. Además, se obtuvieron las absorciones de los materiales para poder ejecutar la corrección por humedad y no afectar las relaciones agua/cemento establecidas en el diseño. En la tabla 23 se pueden encontrar los resultados tabulados.

Tabla 23. Propiedades de los agregados utilizados en la producción del concreto.

Propiedades de los agregados					
Material	Densidad (kg/m ³)	PVSS (kg/m ³)	PVVS (kg/m ³)	Absorción (%)	M.F.
Agregado grueso	2429	1429	1513	0.66	
Agregado fino	2445			1.69	3.44

Se ejecutó un análisis granulométrico a los agregados y se graficó en la ilustración 36, en conjunto con los límites, tanto superior como inferior que marca la ASTM C33. [80]

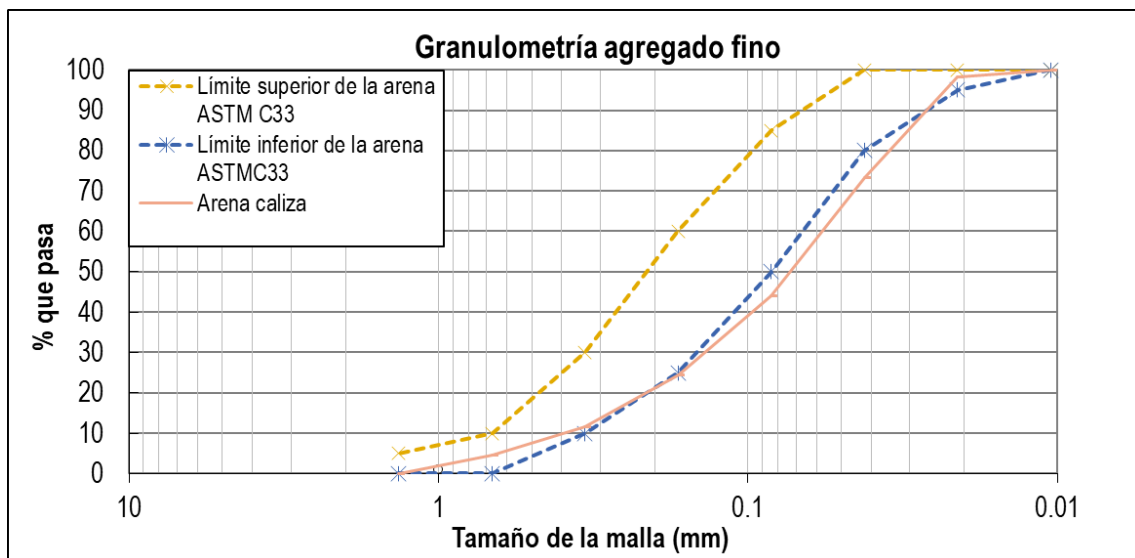


Ilustración 36. Granulometría del agregado fino con los límites de ASTM C33.

4.2.2. Cemento Portland

De la caracterización del cemento se obtuvieron los resultados que se muestran en la tabla 24. Primeramente, se obtuvo la consistencia normal para poder trabajar el ensaye de los tiempos de fraguado, los cuales, para el cemento analizado se obtuvieron resultados que entran en los límites definidos en la ASTM C150. El resultado de la densidad es importante para el proporcionamiento de concreto a trabajar en el proyecto.[81]

Tabla 24. Propiedades del cemento Portland utilizado para la producción del concreto.

Propiedades del cemento Portland				
Material	Densidad (kg/m ³)	Consistencia Normal (%)	T. Fraguado Inicial (min)	T. Fraguado Final (min)
Cemento Portland Ordinario	3000	26	180	255

4.2.3. Aditivos

Para los aditivos sólo se determinaron las densidades, con la finalidad de complementar al resto de los valores de dicha propiedad y ajustar el proporcionamiento de las mezclas de concreto elaboradas en la investigación. En la tabla 25 se pueden observar las densidades de los aditivos.

Tabla 25. Densidades de los diversos aditivos utilizados en la producción del concreto.

Densidad de los aditivos		
Aditivo	Densidad (kg/m ³)	Contenido de sólidos (%)
Mapei n280	1160	43
Mapei n190	1180	40
Plastol precast plus	1110	41
Plastol WO Plus	1180	44

4.3. ETAPA II.- Mezclas de concreto

4.3.1. Proporcionamiento del concreto

Para la fase experimental se propusieron 4 diseños de mezcla, con el objetivo de evaluarlos por medio de ensayos no destructivos y semi-destructivos. Para esto se experimentó la fabricación de concreto con diversas cantidades de materiales para así optimizar el diseño y precisarlo en el $f'c$ específico a 28 días.

El proporcionamiento se fabricó con base en el método de volúmenes absolutos considerando los materiales en su peso seco. Los diseños para las resistencia objetivos de 25, 30, 50 y 70 MPa se fabricaron con consumos de cemento de 210, 230, 390, y 560kg/m³, con relaciones agua/cemento de 0.76, 0.75, 0.46 y 0.28, respectivamente. Cada uno de los proporcionamientos trabajados en este proyecto de investigación se pueden observar en la tabla 26.

Tabla 26. Proporcionamiento de concreto para 1 m³.

Peso de los materiales secos por m³				
Mezcla	M1	M2	M3	M4
Materiales	25 MPa	30 MPa	50 MPa	70 MPa
Agua (kg)	167	172.5	179.5	167
Cemento (kg)	220	230	390	560
Agregado Fino (kg)	1016	1006	916	833
Agregado Grueso (kg)	761	754	687	625
Aditivo n280 (cc/kg cem)	2	2	4	-
Aditivo rp190 (cc/kg cem)	2	2	4	-
Aditivo Plastol precast plus (cc/kg cem)	-	-	-	4
Aditivo WO plus (cc/kg cem)	-	-	-	2
Relación agua/cemento	0.76	0.75	0.46	0.28
Relación grava/arena	0.75	0.75	0.75	0.75
Revenimiento (mm)	130	150	160	170
Contenido de aire (%)	2.9	3.0	2.5	2.8

Para llegar hasta los proporcionamientos anteriores fue necesario llevar a cabo diversas pruebas a la compresión, en cilindros elaborados a partir de diferentes diseños de mezcla, donde se varió el contenido de cemento, la relación agua-cemento, así como la cantidad de aditivo.

Se determinó que para $f'c$ objetivos menores a 50 MPa, se puede alcanzar un revenimiento de entre 125-160 mm, adecuado para la fabricación de especímenes cilíndricos y prismáticos utilizados en esta investigación. Esto utilizando los aditivos n280 y rp190, considerados como aditivos de línea reductores de agua.

Sin embargo, para un $f'c$ objetivo de 70 MPa, debido al gran consumo de cemento portland y la baja relación agua-cemento, los aditivos considerados “de línea”, ya no aportan el comportamiento suficiente para el colado de los especímenes utilizados.

Es aquí donde se reporta que la adición de un superplastificante puede permitir la fabricación de un concreto fluido, que puede ser colocado en los moldes. Mas, la gran cantidad de cemento utilizado provocó que la mezcla de concreto fuera extremadamente cohesiva, lo cual incrementó el esfuerzo físico para el colado de los elementos utilizados. Y, a su vez, por el mismo comportamiento de trabajabilidad del material, se optó por cambiar la compactación manual por el uso de un vibrador mecánico, con la finalidad de una mejor distribución del concreto en el molde.

La compactación para los $f'c$ objetivos de 25, 30 y 50 MPa fue de manera manual, sin embargo, para el $f'c$ de 70 MPa se aplicó una compactación por medio de un vibrador mecánico.

4.4. ETAPA III.- Ensayos al concreto en estado endurecido

4.4.1. Resistencia a la compresión en cilindros

Para la resistencia a la compresión se anexa la tabla 27, donde se aprecian los resultados promedio de 3 cilindros de 10x20 cm, para las diversas edades analizadas de 1, 3, 7, 14, 28 y 56 días. Así como sus respectivas desviaciones estándar y sus coeficientes de variación. Todo esto para los $f'c$ objetivos de 25, 30, 50 y 70 MPa.

Tabla 27. Resistencia a la compresión, desviación estándar y coeficiente de variación para los resultados de cilindros de 10x20 cm.

Edad	Resistencia a compresión promedio*	Desviación estándar	Coef. de variación	Edad	Resistencia a compresión	Desviación estándar	Coef. de variación
25 MPa				50 MPa			
Días	MPa	MPa	%	Días	MPa	MPa	%
1	12.82	0.58	4.54	1	23.44	1.23	5.26
3	18.49	3.15	17.02	3	33.23	1.48	4.46
7	22.07	3.19	14.44	7	37.84	2.71	7.15
14	25.21	1.83	7.26	14	41.77	2.00	4.79
28	26.56	0.71	2.66	28	52.28	1.00	1.91
56	26.99	0.98	3.65	56	52.84	0.57	1.09
30 MPa				70 MPa			
1	13.60	1.46	10.77	1	27.18	1.93	7.11
3	18.71	1.67	8.95	3	57.01	2.35	4.13
7	24.53	0.09	0.35	7	60.85	0.88	1.45
14	28.95	0.35	1.21	14	64.89	1.78	2.74
28	30.61	0.22	0.73	28	68.91	0.95	1.37
56	32.26	0.72	2.24	56	76.70	0.71	0.92

*Promedio de 3 cilindros ensayados.

La desviación estándar calculada para los ensayos de resistencia a la compresión desde un punto de vista general, son valores que pueden clasificarse como un buen control en la producción del concreto. Esto si el análisis se hace con respecto a la tabla “Estándares de control del concreto para $f_c' \leq 35$ MPa (5000 lb./pulg.²)” del ACI 214-11, tanto para los concretos con f_c objetivo de 25 y 30 MPa; los cuales, para la mayoría de la edades, quedan dentro del apartado de variación “Muy buena” y “Excelente”; sin embargo, hubo tres resultados que muestran una tendencia diferente a esto, para los cuales los valores calculados del coeficiente de variación son de 17.02, 14.44 y 10.77, para edades de 3 y 7 días, en concretos de 25 MPa y para 1 día en concreto de 30 MPa. La causa puede adjudicarse a un mal manejo en el proceso de cabeceo y en aspectos como la perpendicularidad entre las superficies de la probeta cilíndrica sobre la que se aplica la carga axial paralela al eje longitudinal del cilindro.[82]

Mientras que para los f_c objetivos de 50 y 70 MPa el ACI 214-11, recomienda analizar los resultados con el coeficiente de variación que aparece en la tabla 4.4 “Estándares de control para $f_c' \geq 35$ MPa (5000 lb. /pulg. ²)”, de donde se puede apreciar que, de las 6 edades de ensayo, sólo tres se ubican en estado de “Mala”,

mientras que las demás varían en los intervalos de “Excelente”, “Muy buena” y “Buena”. [82]

En la tabla 28 se presenta la evolución de la resistencia a la compresión registrada a partir del ensayo mecánico de cilindros de 10x20 cm. La comparación de resistencia en porcentaje está dada con base en la edad nominal de 28 días.

Tabla 28. Evolución de la resistencia a la compresión en cilindros de 10x20 cm.

Evolución de la resistencia a la compresión en cilindros de 10x20 cm*												
f'c	1 día		3 días		7 días		14 días		28 días		56 días	
	MPa	%	MPa	%	MPa	%	MPa	%	MPa	MPa	%	
25 MPa	12.82	48.25	18.49	69.62	22.07	83.07	25.21	94.90	26.56	26.99	101.60	
30 MPa	13.60	44.44	18.71	61.13	24.53	80.13	28.95	94.58	30.61	32.26	105.40	
50 MPa	23.44	44.84	33.23	63.56	37.84	72.36	41.77	79.89	52.28	52.84	101.06	
70 MPa	27.18	39.44	57.01	82.73	60.85	88.31	64.89	94.17	68.91	76.70	111.32	

* El porcentaje de evolución está basado con respecto a la edad de 28 días de curado.

Claramente, en la tabla anterior se puede observar que la resistencia a la compresión alcanza un alto incremento a las edades de 7 y 14 días. Algo que suele ser común para un concreto convencional, del cual no se esperan altos incrementos en la resistencia a edades tardías, por la falta de algún cemento suplementario, los cuales suelen ser los responsables de estos comportamientos.

La ilustración 36 muestra los valores de resistencia a la compresión, contra el tiempo para cilindros de 10 x 20, en la cual se muestran las líneas de tendencia para cada una de las resistencias objetivo de esta investigación en la misma se puede observar el comportamiento de la resistencia a la compresión para los diferentes f'c objetivos, así como la línea de tendencia que mejor se adapta al comportamiento del desarrollo de resistencia a través del tiempo para este concreto. Y como información complementaria, se muestran las ecuaciones de cada comportamiento, así como el ajuste de los puntos, representado por R².

Los valores del ajuste entre los puntos son valores que superan el 0.86, lo cual para ensayos de materiales de ingeniería ya se consideran como resultados “Muy buenos”. Además, para los f'c objetivo de 30 y 50 MPa los valores de R² llegan a alcanzar valores de 0.97, resultados muy altos; esto ligado a que la fabricación, el curado y el ensayo del concreto fue llevado a cabo bajo las condiciones de laboratorio, ajustando las condiciones para un buen control en la producción y el ensayo del concreto.

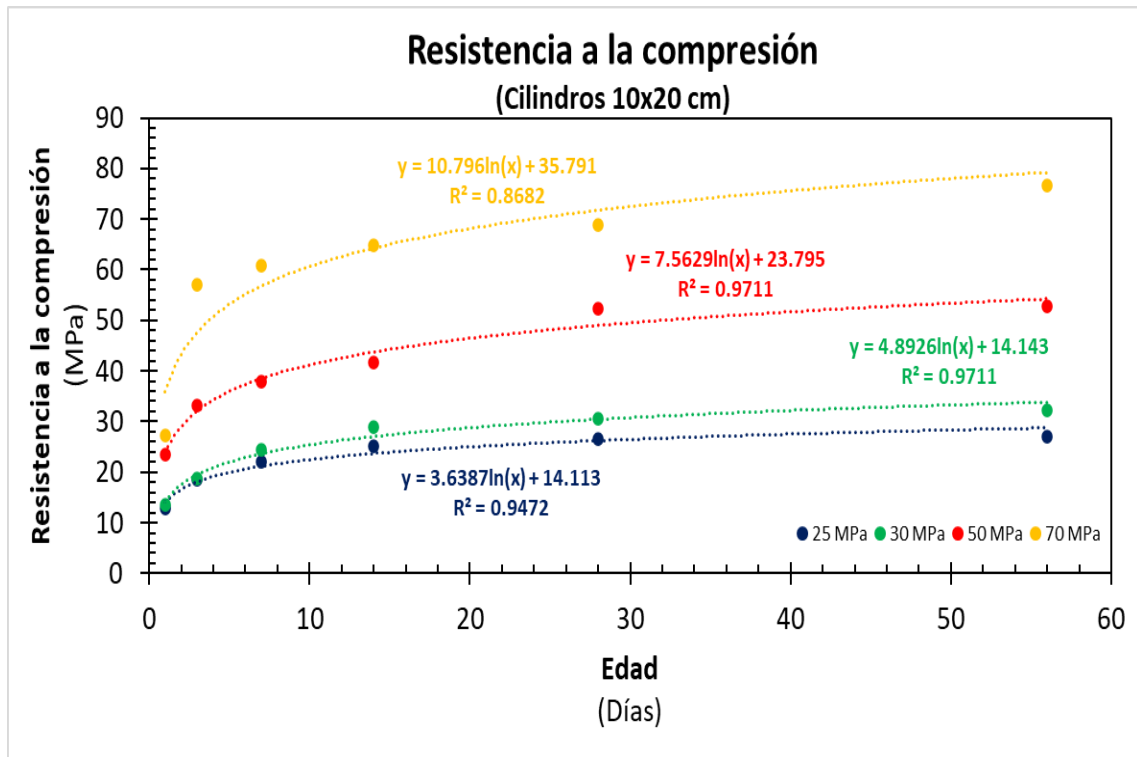


Ilustración 37. Resistencia a la compresión en cilindros de 10x20 cm para los diferentes $f'c$ objetivos.

El concreto, en general, para los 4 $f'c$ objetivo presenta una ganancia grande de resistencia a la edad de 3 días, teniendo una pendiente muy elevada si se le compara contra la pendiente que se forma a los 28 días, alcanzando porcentajes de resistencia desde el 60% hasta el 82%, en el caso del $f'c$ de 70 MPa. Esto se atribuye a la utilización de un CPO 40R, lo cual tiene la principal característica de proveer altas resistencias a edades iniciales, además, de compartir algo en común, el estancamiento de la resistencia a la edad de 14 días, en donde se pueden observar valores muy similares con los que se reportan para 7 días; sin embargo, para la edad de 28 y 56 días la evolución se mantiene con una buena tendencia.

4.4.2. Resistencia a la compresión de núcleos de concreto

Con respecto a los núcleos de concreto, también se tabularon los resultados de la resistencia a la compresión o lo que a su vez en este punto se denominará resistencia a la rotura, además se calcularon las respectivas desviaciones estándar y coeficientes de variación que presentaron los núcleos tras ser sometidos a los ensayos mecánicos. En ese sentido las tablas 29 y 30, muestran los resultados de resistencia a la rotura del promedio de 8 cilindros ensayados

para los diámetros de 7.5 cm y 10cm, respectivamente, al igual que el correspondiente análisis estadístico de los resultados obtenido.

Tabla 29. Resistencia a la compresión (rotura), desviación estándar y coeficiente de variación para los resultados de núcleos de 7.5 cm.

Edad	Resistencia a compresión promedio*	Desviación estándar	Coeficiente de variación
Días	MPa	MPa	%
25 MPa			
14	21.25	1.64	7.70
28	21.94	2.06	9.38
56	22.74	5.75	25.29
30 MPa			
14	21.79	1.95	8.97
28	24.45	1.59	6.49
56	31.17	1.33	4.25
50 MPa			
14	45.96	1.27	2.76
28	47.53	2.10	4.41
56	50.66	1.53	3.03
70 MPa			
14	51.44	4.46	8.67
28	62.15	12.16	19.56
56	69.07	2.29	3.31

*Promedio de 8 núcleos ensayados.

La diferencia entre resultados obtenidos a partir de cilindros de 10 x 20 cm contra los de núcleos de 7.5 cm fue relativamente pequeña. Siendo la resistencia de los núcleos menor en porcentajes que rondan entre el 3 y 15% con respecto a los cilindros de concreto. Esto puede ser atribuido a los daños que se generan cuando se extrae el núcleo del elemento estructural. Esto debido a que para este proceso se añaden algunos pasos extras, como la extracción, el corte con la sierra mecánica, la pequeña variación con respecto a la relación longitud-diámetro, así como los problemas que pudieran existir por la condición de humedad que en realidad se está presentando en el interior de los núcleos de concreto.

A pesar de que la mayoría de los coeficientes de variación rondan en valores menores que el 10%, en dos edades se alcanzaron coeficientes altos, con valores de 25.29 y 19.56 %, lo cual se puede generar, cuando se presentan problemas en la extracción, como vibraciones en la máquina, o la pérdida de filo de la broca, lo que suelen generar un esfuerzo mayor en el proceso mecánico generando microgrietas en el elemento las cuales afectan el rendimiento del concreto.

Tabla 30. Resistencia a la compresión (rotura), desviación estándar y coeficiente de variación para los resultados de núcleos de 10 cm.

Edad	Resistencia a compresión promedio*	Desviación estándar	Coeficiente de variación
Días	MPa	MPa	%
25 MPa			
14	23.19	1.57	6.78
28	24.92	0.68	2.74
56	26.19	3.56	13.58
30 MPa			
14	24.96	1.00	4.02
28	26.03	1.21	4.63
56	27.64	1.39	5.03
50 MPa			
14	40.75	3.13	7.69
28	48.62	2.88	5.93
56	45.75	1.78	3.89
70 MPa			
14	60.29	9.56	15.85
28	66.70	3.95	5.92
56	68.57	1.88	2.74

*Promedio de 8 núcleos ensayados.

Los resultados del coeficiente de variación suelen ser mayores para los núcleos de 7.5 cm, si se comparan contra los núcleos de 10 cm, situación que se respalda con lo consultado en la bibliografía. Sin embargo, la diferencia entre estos coeficientes no suele superar el 5%.

Tanto los coeficientes de variación como las desviaciones estándar tienen valores muy cercanos entre ambos tamaños de diámetro para los núcleos, pudiendo deberse a que el tamaño menor que 7.5 cm puede ser considerado como un buen diámetro nominal para ejecutar este tipo de pruebas. Esto al ser prácticamente cuatro veces el tamaño máximo de agregado utilizado para fabricar el concreto, siendo 3 veces el recomendable con respecto a lo descrito en la ASTM C42.[12]

En la ilustración 38, donde se muestran gráficamente los puntos y las líneas de tendencia de resistencia a la compresión de núcleos de concreto de 7.5 y 10 cm para los 4 f'_c objetivo que se analizaron en este proyecto, recordando que a estos valores se les está denominando también como resistencia a la rotura.

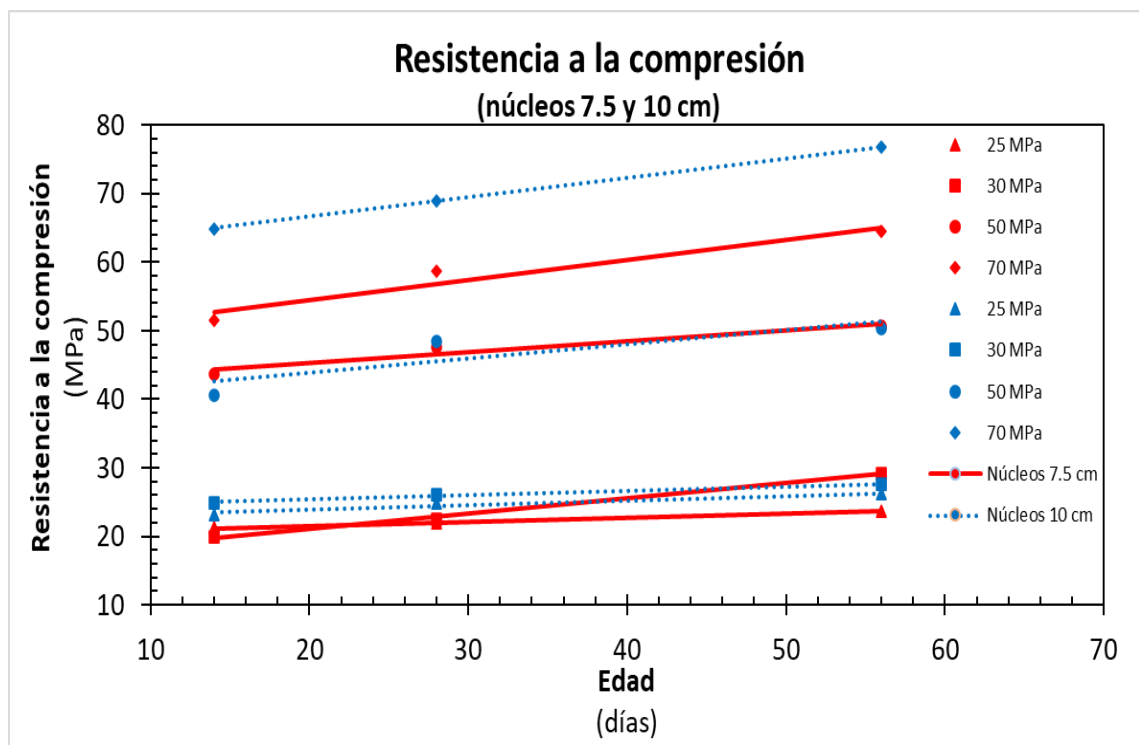


Ilustración 38. Resistencia a compresión (rotura) del concreto a través de núcleos de 7.5 y 10 cm.

La evolución de la resistencia tiene una pendiente tenue, debido a que por recomendación de la ASTM C42[12] se trabajaron con las edades de 14 días en adelante, siendo ésta la razón por la cual el incremento de resistencia entre edades es muy poco.

Y para este caso específico, se nota que para la edad de 14 días la resistencia para el f'_c objetivo de 25 MPa es mayor que la de 30 MPa, en los núcleos de 7.5 cm. Esto puede atribuirse a la cercanía entre ambas, donde teóricamente solo son 5 MPa en la edad nominal, siendo para edades tempranas aún menor la

diferencia entre ambas, por lo cual, debido a la desviación estándar calculada, la cual para núcleos de menor diámetro es mayor la variación entre los resultados, muestra la posibilidad de llegar a presentar estos escenarios donde un valor puede quedar por debajo de lo estimado y el otro por encima generando un cruce en la línea de tendencia.

Para los núcleos de 10 cm se tiene una tendencia entre los $f'c$ objetivos de 25 y 30 MPa con una mejor relación. Aunque anteriormente se descartó una mayor variación de los resultados para los núcleos de 7.5, con respecto a los de 10 cm, se puede atribuir a eso la causa de que para el diámetro mayor se obtenga una mejor tendencia en estas dos resistencias objetivo. Trabajar con un diámetro mayor también impacta en presentar resultados más altos en cuestión de resistencia, lo cual se atribuye a que para un núcleo de menor diámetro se puede afectar con mayor impacto cuando el proceso mecánico de extracción o de corte se dificulta. Sin embargo, este comportamiento también está acorde con lo investigado en la bibliografía.

4.4.3. Fuerza de extracción lok-test

En la tabla 31 se adjuntan los resultados de las extracciones de pull-out por el método lok-test, los cuales corresponden a un promedio de 5 insertos ensayados, donde se realizaron, a las edades de 1, 3, 7, 14, 28 y 56 días, buscando principalmente conocer la evolución de fuerza para las edades tempranas que es donde se tiene mayor aplicación de esta técnica. Además, para complementar el análisis de los resultados, también se añadieron los valores de la desviación estándar y el coeficiente de variación.

Los coeficientes de variación suelen ser pequeños en la mayoría de las edades, para los cuatro tipos de resistencias a la compresión analizados en esta investigación. Esto, a excepción de la edad de 3 días del $f'c$ objetivo de 30 MPa donde el coeficiente de variación es de 14.84%, un resultado sumamente alto. Para esto se considera que la gran dispersión es a causa de una perpendicularidad inadecuada en los insertos, la cual pudo generarse durante el proceso de compactación, al momento del colado del espécimen.

Tabla 31. Fuerza de extracción, desviación estándar y coeficiente de variación para los resultados de Lok-Test (Pull-out).

Edad	Lok-Test Promedio*	Desviación estándar	Coeficiente de variación	Edad	Lok-Test Promedio*	Desviación estándar	Coeficiente de variación
Días	kN	kN	%	Días	kN	kN	%
25 MPa				50 MPa			
1	14.82	1.24	8.39	1	21.44	2.16	10.06
3	17.58	0.81	4.63	3	26.86	2.29	8.52
7	20.34	0.76	3.75	7	28.00	0.30	1.02
14	21.60	0.64	2.98	14	30.96	2.29	7.39
28	25.16	0.68	2.72	28	38.56	0.59	1.53
56	27.02	2.38	8.81	56	40.08	0.63	1.56
30 MPa				70 MPa			
1	15.20	0.41	2.67	1	40.08	1.54	3.83
3	16.22	2.41	14.84	3	44.44	1.51	3.40
7	21.06	1.32	6.28	7	48.30	1.29	2.68
14	24.74	0.68	2.75	14	46.48	1.28	2.48
28	26.52	1.14	4.29	28	53.18	1.19	2.24
56	29.08	0.80	2.76	56	58.54	0.55	0.94

*Promedio de 8 extracciones de insertos

En la ilustración 40 se ve el comportamiento, de manera gráfica, del concreto cuando es ensayado bajo una fuerza de extracción por medio de lo dictado en la normativa de la técnica Lok-Test.

Descuidos en la perpendicularidad de los insertos pueden provocar que las resistencias a extracción resulten menores y que exista una mayor variación en los resultados, lo cual defiende el alto valor de coeficiente de variación para la edad de 3 días, para el $f'c$ objetivo de 30 MPa.

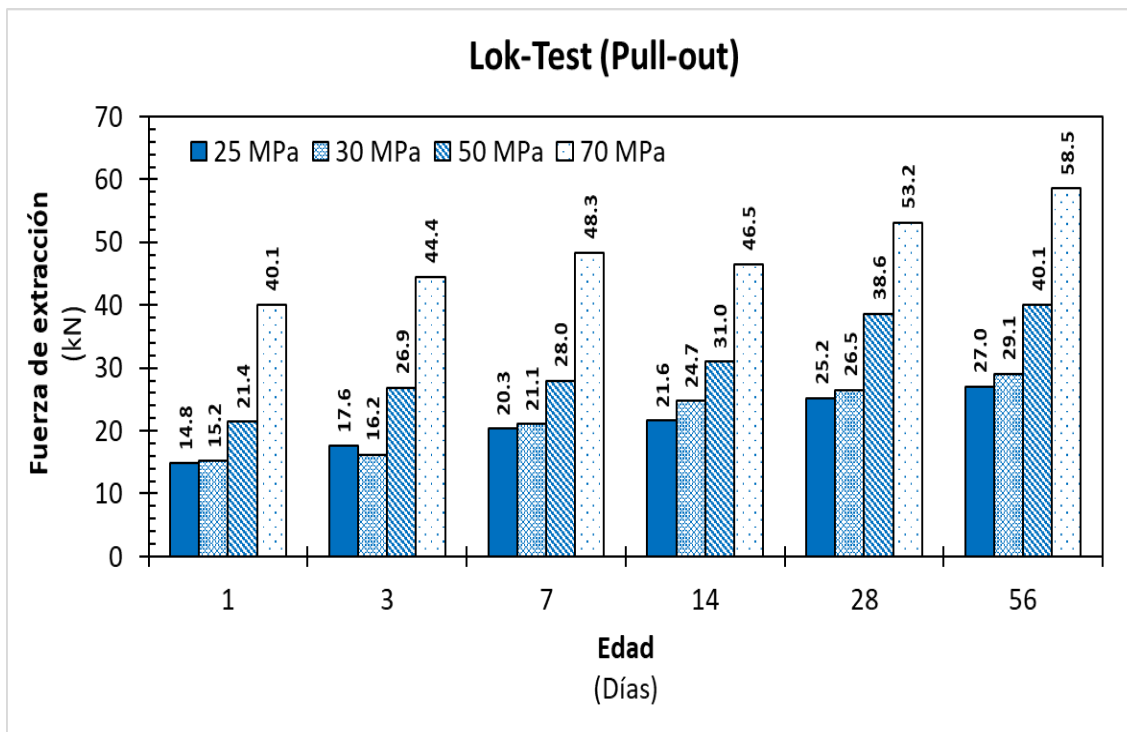


Ilustración 39. Fuerza de extracción al concreto a través de Lok-Test (pull-out).

El ensayo de fuerza de extracción está relacionado directamente con la resistencia a la compresión del concreto, siendo ésta la razón por lo cual el incremento de fuerza para extraer un inserto presenta el mismo comportamiento que el desarrollo de la rotura de los concretos ensayados. Y un aspecto que sustenta este argumento es el estancamiento de los resultados que corresponden a la edad de 14 días de ensayo.

Aunque, para esta técnica este efecto es más notable, presentando resultados muy similares entre las edades de 7 y 14 días; sin embargo, para el resto de las edades la evolución de resistencia continúa de manera normal a como suele comportarse un concreto convencional, que está fabricado con un CPO 40R.

El aumento del f'_c objetivo provocó también una mayor dispersión de los puntos en la línea de tendencia, recordando que los insertos utilizados para los f'_c objetivo de 25 y 30 MPa fueron diferentes con los de 50 y 70 MPa, lo cual en parte pueden tener cierta responsabilidad, debido a las diferentes dimensiones que muestra cada modelo.

4.4.4. Velocidad de pulso ultrasónico

Se realizaron 3 tomas de datos para cada edad de ensayo, para la cuales se obtuvo el promedio de éstas, que se puede observar en la tabla 32, así como los resultados de la desviación estándar y el coeficiente de variación.

Tabla 32. Velocidad de onda, desviación estándar y coeficiente de variación para los resultados de VPU.

Edad	Velocidad de onda prom*	Desviación estándar	Coef. de variación	Edad	Velocidad de onda prom*	Desviación estándar	Coef. de variación
Días	m/s	m/s	%	Días	m/s	m/s	%
25 MPa				50 MPa			
1	4519	48.23	1.07	1	4870	23.62	0.49
3	4840	63.45	1.31	3	5089	22.26	0.44
7	5020	76.04	1.51	7	5169	27.38	0.53
14	5065	62.01	1.22	14	5179	34.04	0.66
28	5107	30.24	0.59	28	5251	27.12	0.52
56	5125	15.09	0.29	56	5284	15.36	1.07
30 MPa				70 MPa			
1	4586	62.92	1.37	1	4979	18.84	0.38
3	4934	30.84	0.62	3	5124	14.84	0.29
7	5058	42.40	0.84	7	5265	35.58	0.68
14	5094	32.36	0.64	14	5293	26.60	0.50
28	5141	50.67	0.99	28	5341	15.52	0.29
56	5147	14.96	0.29	56	5369	15.60	0.29

*Promedio de 3 cilindros ensayados.

Esta técnica no destructiva tiene la ventaja de no necesitar de preparación previa en los especímenes, lo cual ayuda a reducir variaciones en los resultados por efecto de dichos procesos. La tabla muestra que los coeficientes de variación son bajos, esto porque ningún valor individual supera el 2%.

Para mostrar de una manera gráfica los resultados anteriores, se pueden encontrar en la ilustración 41, donde se observa la evolución del incremento de

velocidad de la onda, conforme aumenta la edad del espécimen y se identifica la matriz.

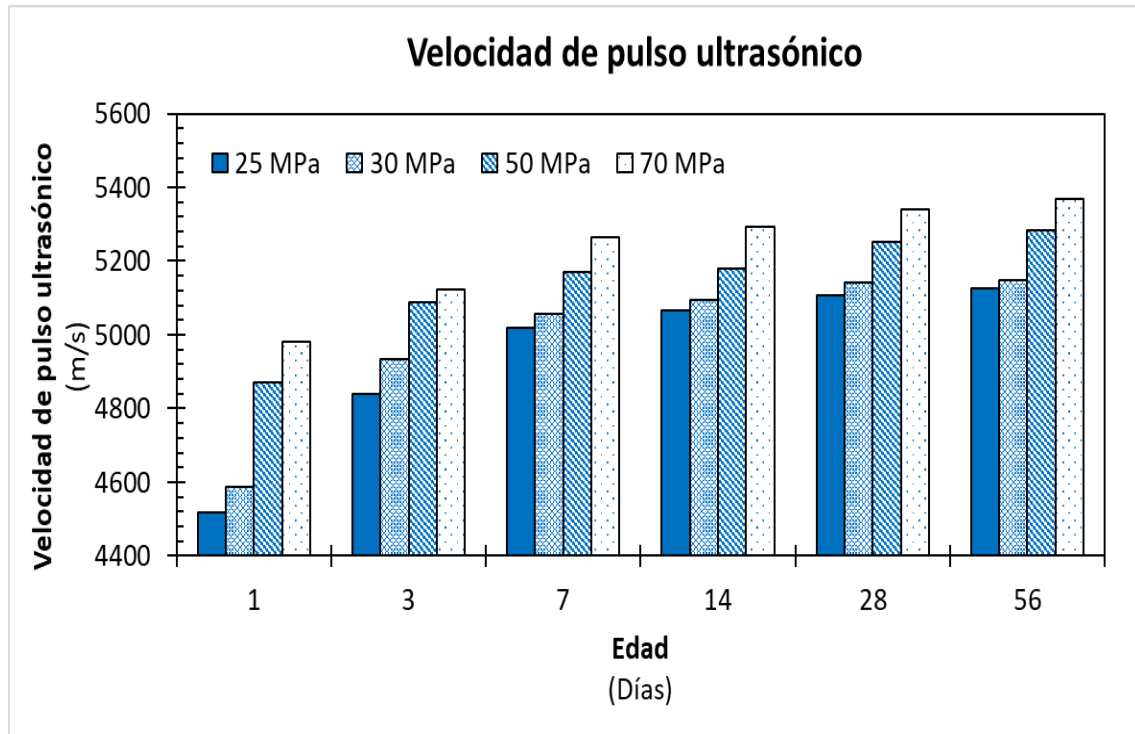


Ilustración 40. Velocidad de onda en el concreto a través del ensaye VPU.

En esta técnica las edades tempranas suelen ser de gran importancia, debido a que este ensayo tiene como una de sus principales bases el conocer la densificación de la matriz del concreto, y en las edades tempranas se muestra el mayor cambio en esta propiedad, sobre todo de 1 a 7 días, donde para el f'_c objetivo de 25 y 30 MPa, donde la densificación suele tener un gran cambio. Sin embargo, para el f'_c objetivo de 50 y 70 MPa, como el consumo de cemento es grande, desde un inicio se presenta ya una matriz densa y el cambio suele ser menos impactante.

El comportamiento observado en la prueba de VPU muestra que a edades tempranas este ensayo evidencia una mejor tendencia del comportamiento del material que el ensayo de Lok test.

4.4.5. Martillo de rebote

Con respecto al martillo de rebote, se pueden observar los resultados finales en la Tabla 32 y en la Ilustración 41, ya graficados, para ver el comportamiento de la técnica.

Con respecto al martillo de rebote, se recopilaron 10 valores de rebote por edad, para calcular un promedio. Esto fue a partir de dos cilindros estándar, los cuales estuvieron precargados conforme a lo descrito en la sección del método, y partir del promedio se obtuvo la desviación estándar y el coeficiente de variación.

Tabla 33. Número de rebote, desviación estándar y coeficiente de variación.

Edad	Martillo de rebote prom*	Desviación estándar	Coeficiente de variación	Edad	Martillo de rebote prom*	Desviación estándar	Coeficiente de variación
Días	No. Rebote	No. Rebote	%	Días	No. Rebote	No. Rebote	%
25 MPa				50 MPa			
1	30	4.38	14.47	1	41	0.92	2.27
3	34	0.07	0.21	3	47	0.71	1.51
7	39	1.13	2.92	7	50	0.92	1.82
14	40	1.20	3.00	14	53	1.06	1.99
28	42	0.92	2.21	28	56	1.20	2.14
56	45	2.76	6.19	56	59	0.00	0.00
30 MPa				70 MPa			
1	31	1.20	3.93	1	59	0.92	1.57
3	36	0.28	0.79	3	60	0.07	0.12
7	40	0.00	0.00	7	62	0.42	0.68
14	43	0.99	2.29	14	64	1.98	3.11
28	45	2.33	5.24	28	66	0.07	0.11
56	48	0.00	0.00	56	68	0.64	0.94

*Promedio de 2 cilindros ensayados con 10 rebotes de martillo.

Debido a que para esta técnica sólo se utilizaron dos especímenes cilíndricos, en algunas ocasiones se logró obtener el mismo promedio de los números de rebote; lo cual, a su vez, genera que la desviación estándar y el coeficiente de variación sean equivalentes a cero, pues los valores no tienen una dispersión.

Solo en el caso de la primera resistencia, que es de 25 MPa a la edad de 1 día, fue que se obtuvo una variación alta. En la ilustración 41 se muestra gráficamente el desarrollo de la dureza superficial del concreto conforme al avance de la edad de ensaye.

El resto de los valores estadísticos pueden considerarse como “Excelentes” o “Muy buenos”, por ser relativamente pequeños. Considerando que la técnica de martillo de rebote se basa en la dureza superficial del concreto, y al ser especímenes con superficies con acabados lisos, a causa del buen estado del material que conforma el molde con el cual se fabricó el espécimen y que el elemento tampoco se ve dañado por la carbonatación o algún fenómeno de durabilidad, éstos son factores que benefician la aplicación de la técnica.

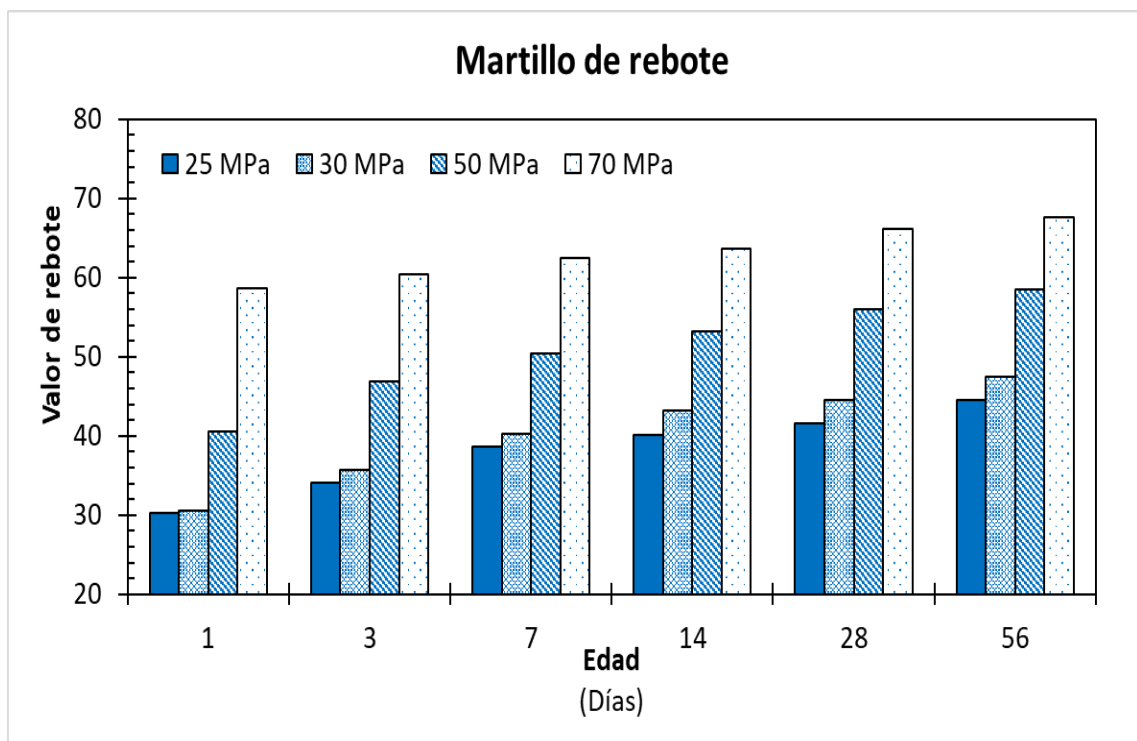


Ilustración 41. Número de rebote en el concreto a través del ensaye martillo de rebote.

En esta técnica no se aprecia gran incremento en los valores de rebote con respecto a las edades, a excepción de la mezcla con $f'c$ objetivo de 50 MPa. Sin embargo, la evolución de la resistencia superficial mantiene el comportamiento de la propiedad a la compresión.

Si se vuelve a analizar el gráfico, con base en las pendientes formadas por las líneas de tendencia, se puede apreciar de nuevo que esta técnica no muestra una gran variación en los resultados obtenidos a edades tempranas, sobre todo si se trata de un $f'c$ de 70 MPa, donde claramente se observa que la pendiente tiende a variar muy poco. Sin embargo, en comparación con la prueba de Lok-

Test, el martillo de rebote presenta un mejor ajuste de los puntos dentro de la línea de tendencia, siendo una prueba con baja variación en los resultados, sobre todo al realizarse el ensaye en las caras de los cilindros que tienen un buen acabado, debido a que este ensaye se rige por la dureza superficial del concreto.

4.4.6. Comparación de los métodos para el $f'c$ del concreto

En la ilustraciones 42 y 43 se muestran los resultados de los núcleos de concretos analizados por diferentes métodos para resaltar el comportamiento propio que cada método genera. La línea de f_{core} , es la que corresponde a la resistencia a la rotura; mientras, que el f'_{ceq} (MFT) a el Método de Factor de Tolerancia y el f'_{ceq} (MA) para el Método Alternativo, ambos dictados en el ACI 214.4-21. Y finalmente dos líneas para el ACI 318-19, uno correspondiente a la adaptación del criterio del 85% y el otro al de 75%.

Sin embargo, tanto en las ilustraciones 42 y 43, los resultados mostrados para los métodos del ACI 214.4-21, corresponden para los factores de un nivel de confianza del 90%, recordando, que existen tres niveles de confianza en la guía, 75, 90 y 95%. Es por esto por lo que más adelante se muestra la comparación entre dichos caminos para observar cómo se ve afectado el $f'c$ equivalente, inclusive cuando se trabaja con la misma guía.

En esta Ilustración queda claro que son sólo tres líneas las que tienen un comportamiento similar, el MA y el MFT del ACI 214.4-21, y el criterio de 85% del ACI 318-19. Sin embargo, por lo mencionado en el marco teórico sobre el MFT y su gran impacto por las desviaciones estándar, las cuales provocan que el $f'c$ equivalente para 56 días sea menor que para 28 días, inclusive cuando los valores de resistencia a la rotura de los núcleos que son la base para determinar el $f'c$ equivalente muestran lo contrario, siendo mayor el valor de rotura a 56 días que a 28.

Con respecto al MFT, tanto para el $f'c$ objetivo de 25 y 30 MPa, se observa que tiene valores mayores al MA, debido a que si se hace una comparación contra el f_{core} , el cual se estará considerando como base, entonces se encuentra que el MFT corresponde a valores que rondan entre un 12-26% menor para el concreto de 25 MPa, y para un concreto de 30 MPa los valores rondan entre un 8-17%, mientras que el MA muestra resultados que rondan aproximadamente en un 20% de disminución para 25 MPa, con una menor variación de este porcentaje entre las edades y para 30 MPa se tienen los mismos valores del 20%.

Para los resultados de los criterios de ACI 318-19 se tienen reducciones para el criterio de ACI 318-19-85%, que van desde el 14-17% con respecto al f_{core} en 25 MPa y de 15-16% para 30 MPa, teniendo también una variación mínima entre

sus edades. Sin embargo, esto no se muestra para el criterio ACI 318-19-75% donde los resultados son extremadamente altos, comportamiento contrario al que se observa en el resto de los métodos. Los resultados corresponden a 33% más altos que f_{core} , tanto para 25 como para 30 MPa.

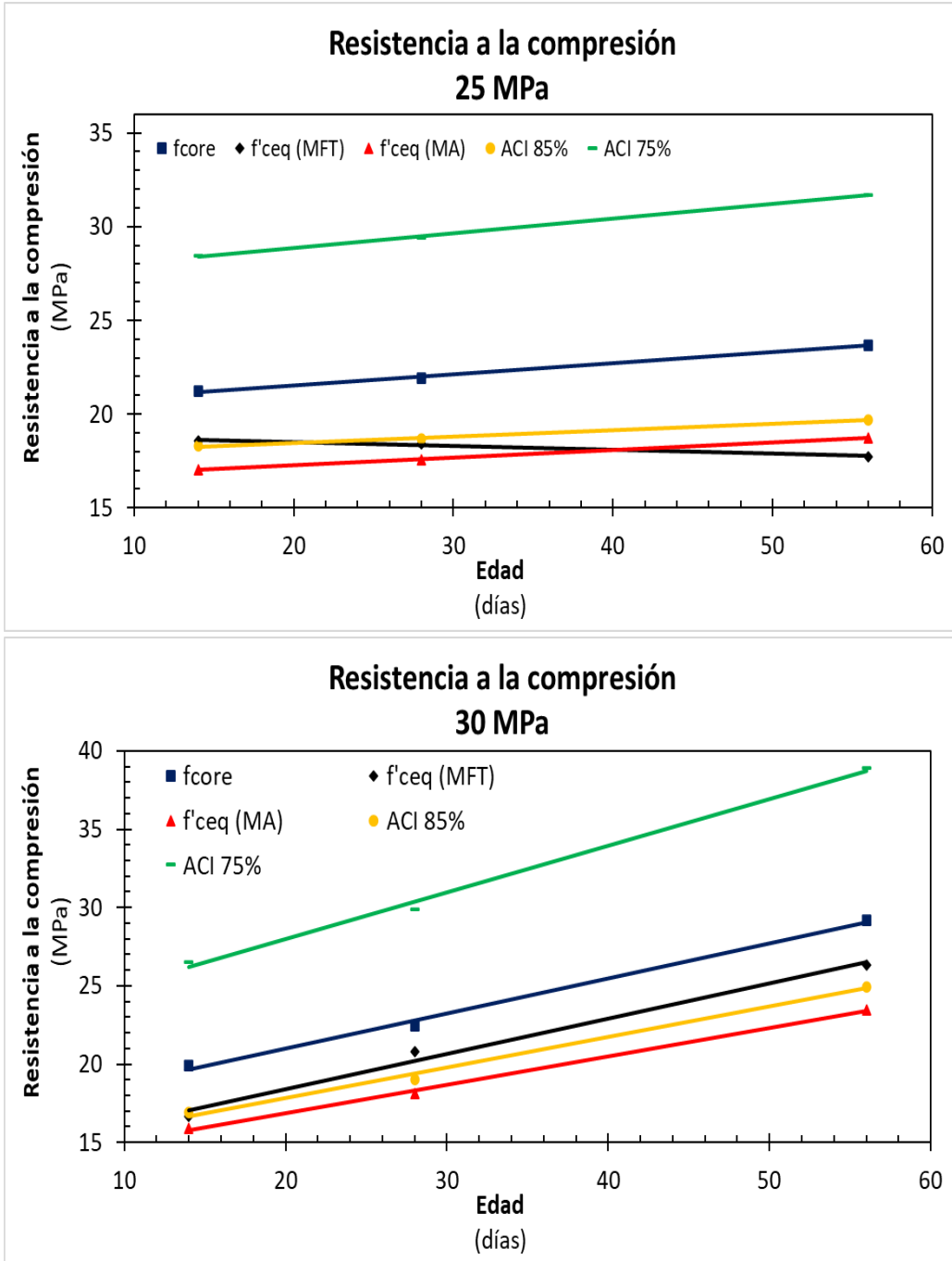


Ilustración 42. Comparación de la resistencia a la compresión en núcleos de 7.5 cm por los diferentes métodos considerados en este proyecto para 25 y 30 MPa.

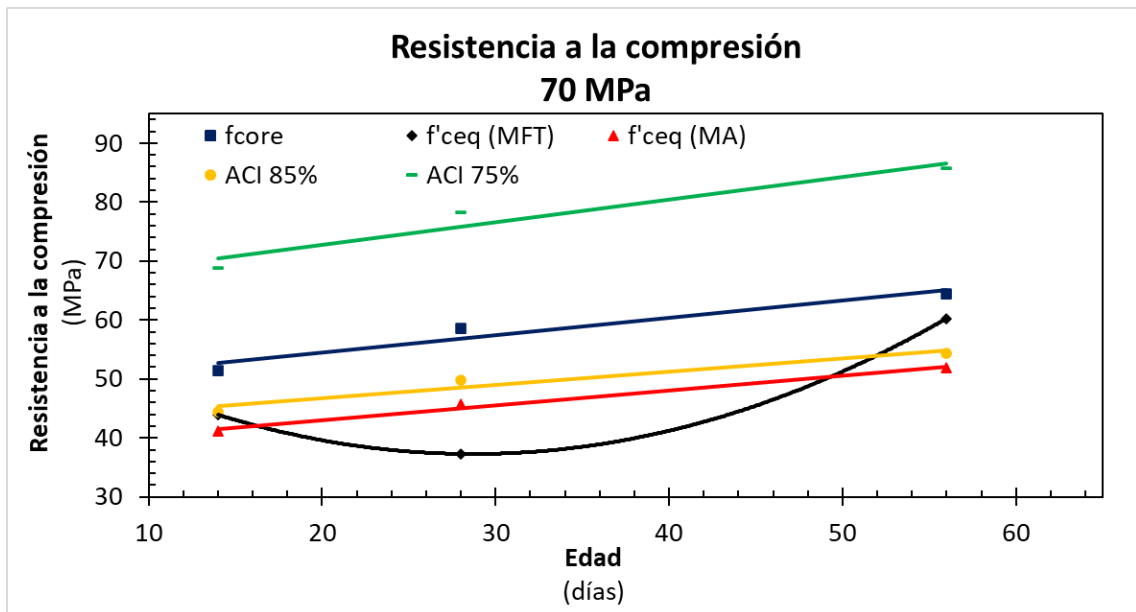
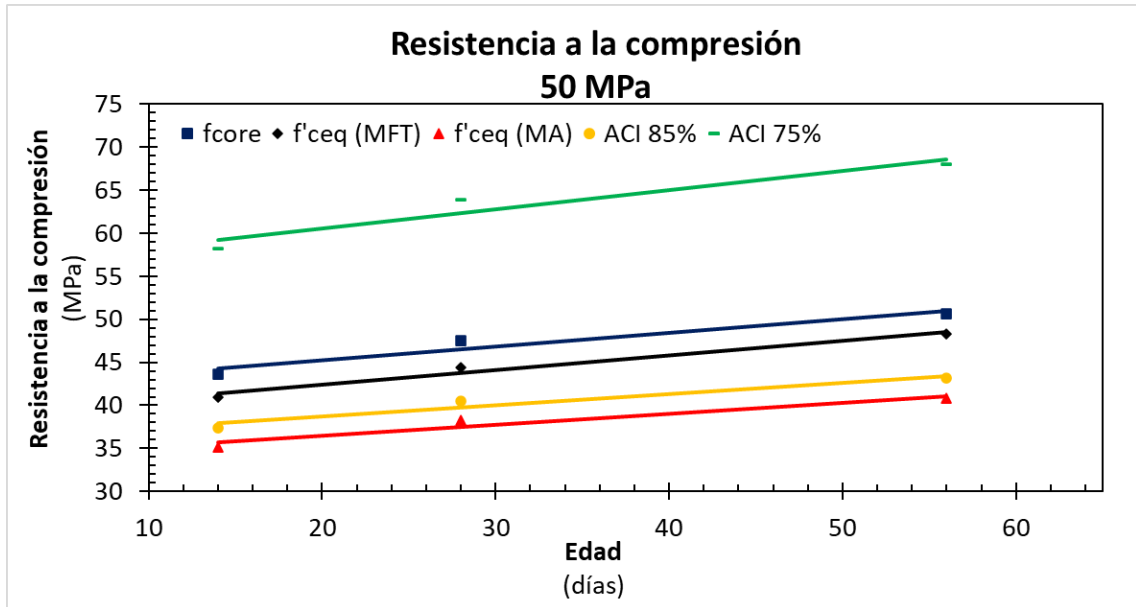


Ilustración 43. Comparación de la resistencia a la compresión en núcleos de 7.5 cm por los diferentes métodos considerados en este proyecto para 50 y 70 MPa.

Tanto en la ilustración 42 como en la 43, el comportamiento del criterio del ACI 318-19-75% tiende a ser el mismo, presentando resultados de un f'_c que supera el valor de rotura que se obtiene al ensayar los núcleos, por lo cual se toma la decisión de descartarse.

En el f'_c objetivo de 30 y 50 MPa el comportamiento del f'_c equivalente determinado a partir del MFT tiene un comportamiento lógico; sin embargo, para 25 y 70 MPa no mantiene la misma tendencia o ajuste, que se puede observar entre el MA y el ACI 85%. Esto se resalta cuando para 25 MPa el resultado de f'_c

equivalente tiende a reducir con el incremento de la edad de ensayo, lo cual no resulta lógico para un concreto que se encuentra en buen estado. Mientras que, para 70 MPa, la línea de tendencia muestra un comportamiento polinómico, donde el porcentaje de decremento con respecto al f_{core} es de 15 y 7%, para las edades de 14 y 56 días, pero para la edad de 28 días, el decremento es de 37%, lo cual causa el comportamiento en la tendencia al tratar de unir los puntos.

El comportamiento del f'_c obtenido a partir del MFT se puede entender cuando se recuerda que la guía de ACI 214.4-21 habla de que este método tiene gran influencia de los valores de desviación estándar, que se calculan a partir de los resultados, lo cual provoca que en edades con valores de desviación estándar alta se tengan que aplicar factores de reducción mayores, que a su vez provoca tendencias extrañas en los gráficos.

En situaciones donde se puede lograr un excelente control en la desviación estándar de los núcleos del concreto, se puede acudir con gran confianza al MFT, debido a que en este gráfico se observa un buen comportamiento en la línea de tendencia que muestra el método, mas, algo que no debe dejarse fuera es que los resultados aun así resultan ser mayores, tanto los del MA como los del criterio de 85% del ACI 318-19.

Siendo el MFT un poco más cercano a los resultados obtenidos a partir del valor de resistencia a la rotura del cilindro, aunque si conservador con respecto a éste, pero no tan estricto como el MA.

Ya cuando se han analizado las 4 resistencias objetivos se determina que la variación en el MFT no marca una tendencia por el incremento de la resistencia a la compresión o al menos cuando los resultados son obtenidos a partir de núcleos de 7.5 cm.

También se generó una comparación entre los métodos utilizados en la determinación del f'_c equivalente, pero ahora para núcleos de 10 cm, con la finalidad de observar cuáles son las tendencias que se generan cuando el núcleo tiene un diámetro mayor. De igual manera se realizó una comparación porcentual de los resultados, con respecto a los de f_{core} , para así llegar a la elección de un método para trabajar las correlaciones finales del proyecto. Por lo tanto, en la ilustración 44 se encuentran los resultados para 25 y 30 MPa y en la ilustración 45 para 50 y 70 MPa.

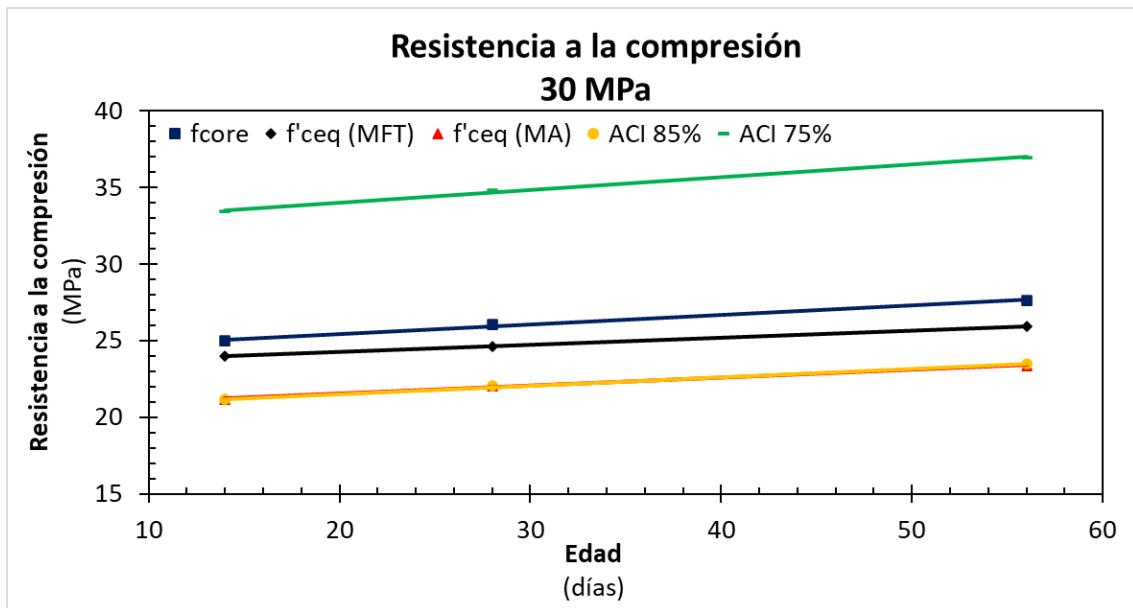
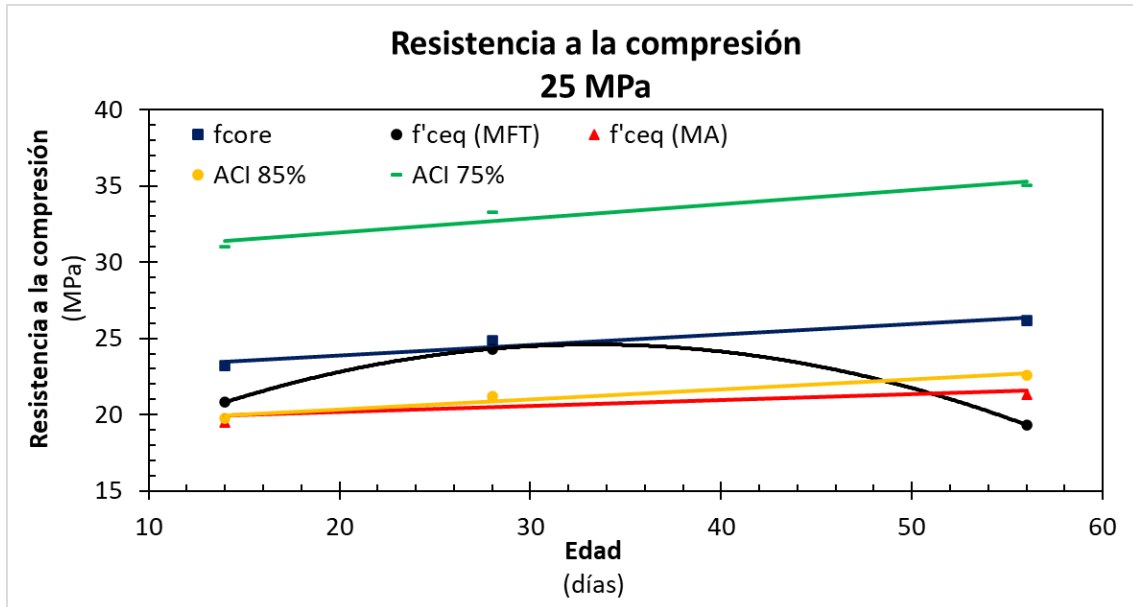


Ilustración 44. Comparación de la resistencia a la compresión en núcleos de 10 cm por los diferentes métodos considerados en este proyecto para 25 y 30 MPa.

Cuando se trabaja con núcleos de 10 cm, la tendencia del MA del ACI 214.4-21 muestra mayor similitud en la adaptación del criterio del ACI 318-85%, donde para un f'_c objetivo de 25 MPa se logra coincidir en el mismo valor a la edad de 28 días. Esto debido a los factores de corrección que presenta la guía del ACI 214.4-21 para tal diámetro. Además, el MFT se ve ampliamente afectado por las diversas desviaciones estándar, calculadas a partir de las ecuaciones proporcionadas por el ACI 214.4-21. El comportamiento incongruente suele presentarse tanto en los núcleos de 7.5 cm como en los de 10 cm.

Para 30 MPa la similitud del ACI 318-19 con el criterio de 85% con la del MA del ACI 214.4-21 es mucho mayor, teniendo prácticamente una sobreposición entre ambas líneas de tendencia. El Método Analítico muestra un comportamiento lógico con respecto a la evolución de la resistencia y muestra una tendencia similar a la expresada por los valores de resistencia a la rotura.

En la ilustración 45 se muestran los resultados de interpretar el f'_c equivalente por los diferentes métodos, pero para un diámetro de núcleo de 10 cm y para f'_c objetivo de 50 y 70 MPa.

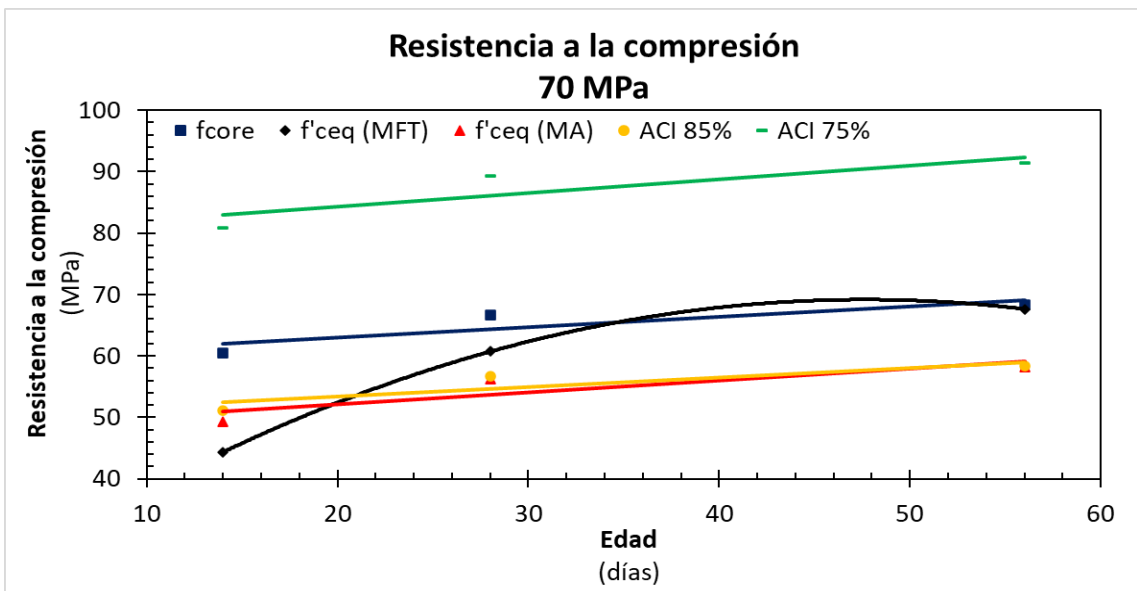
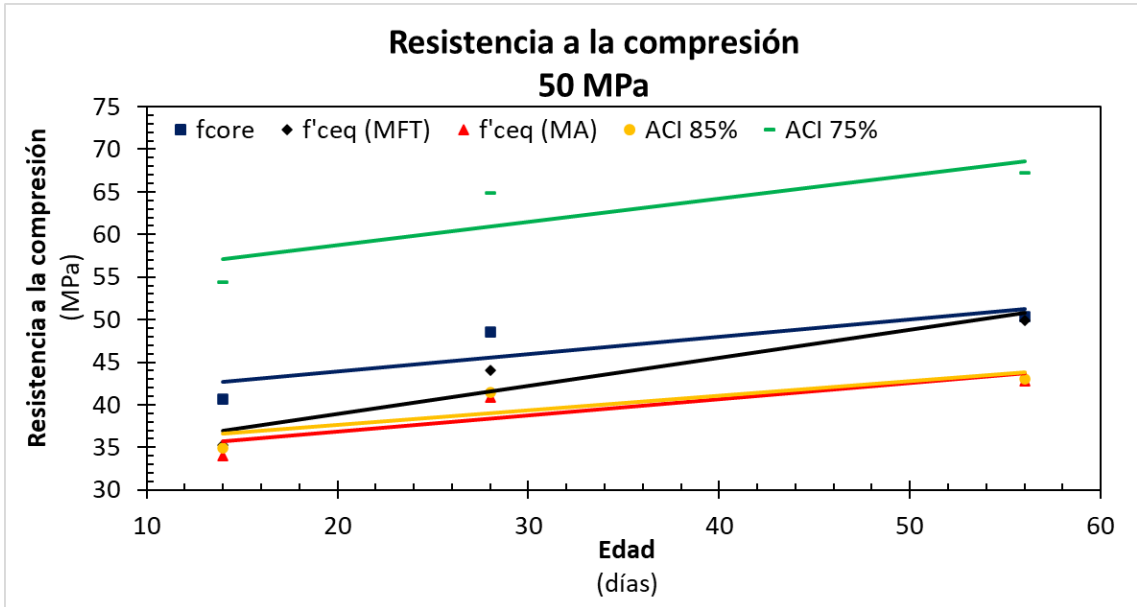


Ilustración 45. Comparación de la resistencia a la compresión en núcleos de 10 cm por los diferentes métodos considerados en este proyecto para 50 y 70 MPa.

4.4.7. Comparación de la resistencia a la compresión para un nivel de confianza 90% por el método alternativo.

La tendencia de las resistencias anteriores sigue presentándose para 50 MPa, donde sólo se ve un pequeño desfase en los puntos de 14 y 28 días, para que a 56 días prácticamente coincidan los valores del $f'c$ equivalente con el $f'c$ estimado por el ACI 318-19 con 85%.

Los valores de resistencia a la rotura suelen rondar entre un 15 a 20% mayores que los del $f'c$ equivalente del ACI 214.4-21 y del ACI 318-19-85%. Los orígenes del concreto al cual se le hace la extracción del concreto tienen mayor impacto en las resistencias a la compresión del concreto mayores que 50 MPa.

Finalmente, con 70 MPa no fue la excepción y se puede decir que, para núcleos de 10 cm, sin importar el nivel de resistencia analizado, en esta investigación se obtiene un mismo resultado de $f'c$ si se calcula a partir del ACI 214.4-21 y con el ACI 318-19 para 85%.

Después de analizar los resultados anteriores mostrados en las ilustraciones 42-45, se optó por trabajar con el Método Alternativo (MA) como representante del ACI 214.4-21, esto a causa de tener un comportamiento con mayor linealidad que el que se observó en los resultados del Método Factor de Tolerancia (MFT) para esta investigación.

Después de haber llevado a cabo todas las combinaciones de los diferentes niveles de confianza y algunos factores extra que son parte de la guía del ACI 214.4-21, se optó por trabajar con los valores más críticos. Para esta sección se adjuntan las ilustraciones 46 y 47, donde se pueden apreciar los resultados para un nivel de confianza de 90% y los casos críticos que corresponden a una muestra de núcleos obtenidos de una bachada y de un solo miembro, como para una muestra de varias bachadas y para varios miembros.

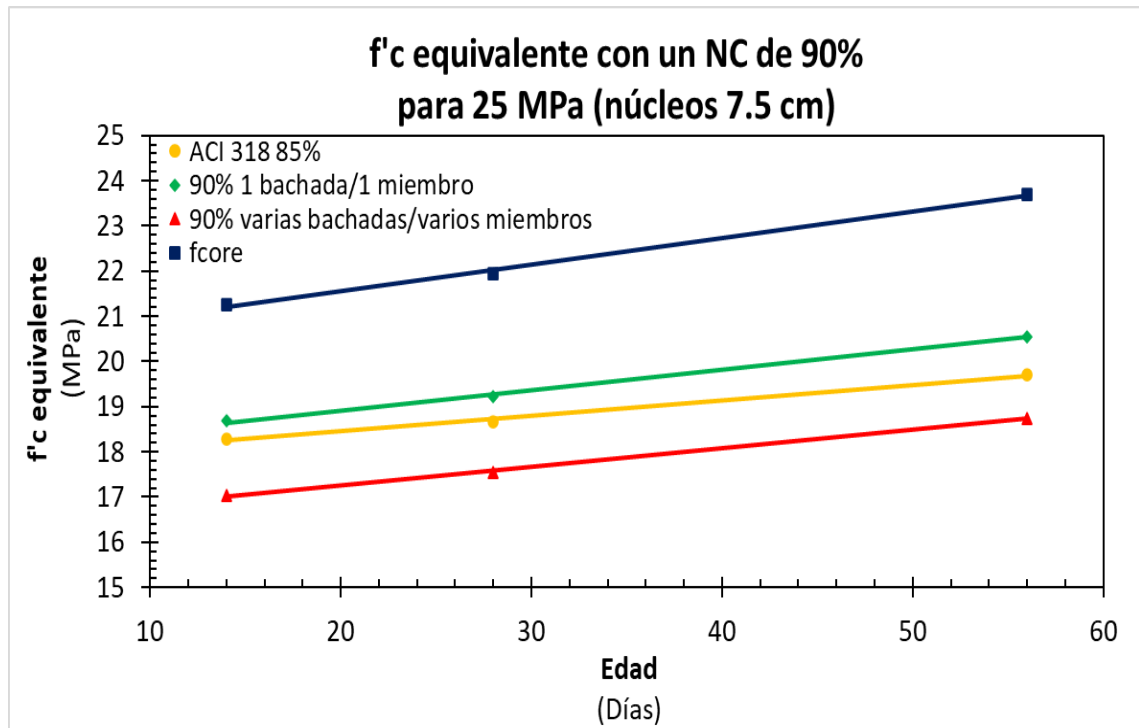


Ilustración 46. Comparación de la resistencia a la compresión en núcleos de 7.5 cm y el $f'c$ equivalente para un 25 MPa y un NC de 90%.

Al trabajar con los valores críticos del MA, ahora las líneas de tendencia ya no se empatan con la del ACI 318-19 para 85%; sin embargo, siguen estando muy cercanas, sobre todo la menos conservadora y recordando que se está mostrando aquí el NC de 90%. El resto de los gráficos puede encontrarse en el Apéndice II.

La causa de que ya no se empaten las líneas va relacionada con que en esta ocasión se están mostrando los valores más críticos, tanto la mayor que tiene valores superiores en aproximadamente el 2%, así como la menor que tiende a estar aproximadamente 6% por debajo. En el caso de que se generara un promedio entre ambos valores, éste tendería a mostrar resultados muy cercanos a los que se obtienen al utilizar el ACI 318-19. Aun así, la adaptación de este criterio tiende a acercarse más al valor mayor que brinda el ACI 214.4-21, mostrando que no resulta tan conservador como se puede lograr con el 214.4-21 cuando se trabaja con el criterio más crítico.

En la ilustración 47 se pueden observar los resultados más críticos del ACI 214.4-21, cuando se emplea el nivel de confianza de 90% en núcleos de 10 cm. En este gráfico se puede observar cómo para una edad temprana el comportamiento tiende a ser más conservador, mientras que conforme avanza la edad de ensayo del espécimen, el resultado se ajusta a un nivel medio.

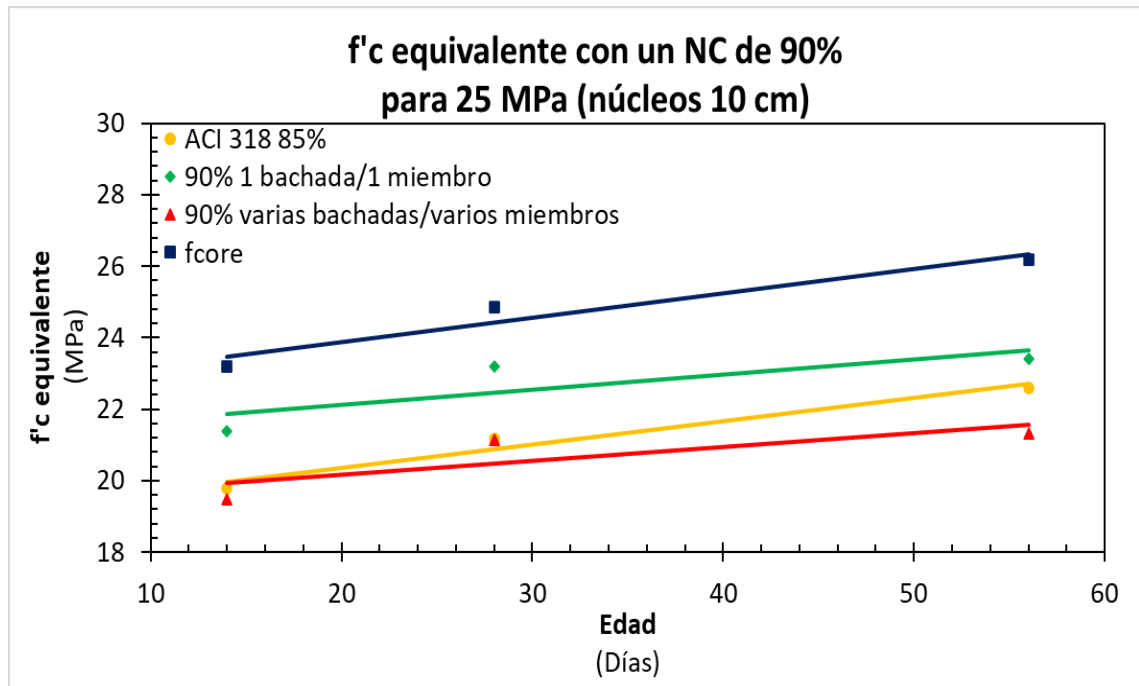


Ilustración 47. Comparación de la resistencia a la compresión en núcleos de 10 cm y el $f'c$ equivalente para un 25 MPa y un NC de 90%.

Para las edades de 14 y 28 días se mantiene un comportamiento más cercano, empatándose los puntos del criterio más conservador del MA ACI 214.4-21 para 90% con el del ACI 318-19 para 85%. Algo que ya venía esperándose por lo visto en los gráficos anteriores, para este diámetro de núcleos. Sin embargo, para la edad de 56 días, el punto del ACI 318-19-85% queda aproximadamente un 5% tanto por encima del criterio más conservador, como un aproximado del 5% por debajo de la línea mayor del MA, en un nivel de confianza del 90%.

Mientras que el resto de los resultados para las diferentes resistencias objetivo y los diferentes niveles de confianza se colocan en los anexos, donde se puede observar el comportamiento cuando se va aumentando dicha propiedad y para los diferentes tamaños de diámetros de los núcleos extraídos.

4.5. ETAPA IV y V.- ACI 214.4-21, ACI318-19 y Correlaciones

Con los resultados de los ensayos de resistencia a la compresión se graficaron distintas correlaciones, con la finalidad de observar si se encuentra un buen ajuste en los resultados y, a la vez, una buena relación entre ambas técnicas. Para cada conjunto de correlaciones se determinaron las ecuaciones y R^2 , de las mismas.

Se determinaron las ecuaciones de correlación que existen entre los criterios más críticos para determinar el f'_c equivalente con base al MA del ACI 214.4-21 vs resistencia a la rotura, f'_c equivalente vs ACI 318-19 – 85%, así como las correlaciones entre el f'_c equivalente y las pruebas no destructivas. Los valores graficados corresponden a las resistencias estudiadas, es por esto por lo que se marcan 4 zonas en donde se concentran los puntos, los cuales estarían correspondiendo a resultados cercanos a 25, 30, 50 y 70 MPa.

4.5.1. Correlaciones teóricas entre el f'_c equivalente y la resistencia a la rotura de núcleos de concreto.

En la siguiente ilustración 48, se muestran las correlaciones donde cada gráfica corresponde a las edades de 14, 28 y 56 días, respectivamente y esto para los núcleos con un diámetro de 7.5 cm.

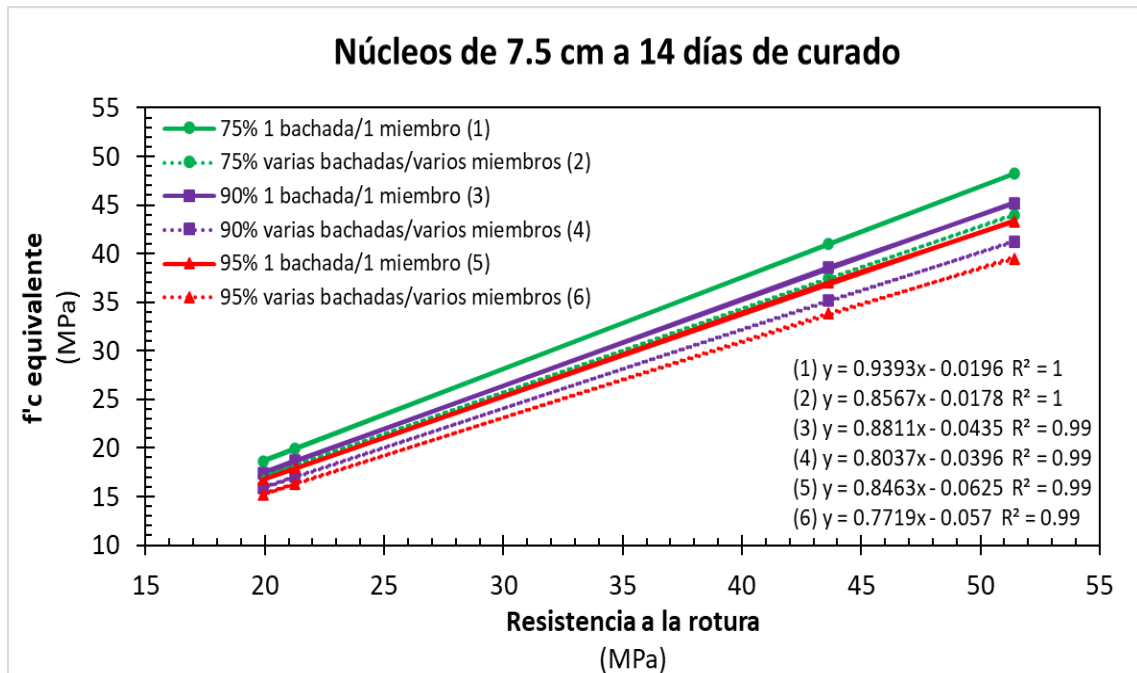


Ilustración 48. Correlación entre la resistencia a la rotura de núcleos de concreto de 7.5 cm a 14 días, contra el f'_c equivalente a través del método alternativo ACI 214.4-21.

En núcleos de 7.5 cm a 14 días se puede apreciar una diferencia entre las tendencias que se generan según va variando el nivel de confianza, donde lógicamente el nivel de 75% muestra los valores menos conservadores, sobre todo cuando se toma en cuenta que los núcleos fueron obtenidos de un elemento colado de una misma bachada de concreto y que todos los núcleos son del mismo miembro. Donde sí se hace una comparación porcentual se encuentra que el valor más conservador que corresponde al 95% de nivel de confianza, es menor en un 22% aproximadamente, con respecto al valor más alto, que sería del nivel de confianza de 75%. Mientras que, si se analiza el nivel de confianza del 90% se puede observar una variación interna del 10%. Estos resultados demuestran la importancia de elegir correctamente el nivel de confianza, acorde en el proyecto que se está analizando.

Se vuelve más crítica la elección cuando va de un nivel de confianza del 75% a 90%, esto por los cambios de resultados que se pueden lograr, que evidentemente son mayores que cuando se hace el cambio de un nivel de confianza de 90% a 95%. Mientras que para 28 días de curado se presenta la ilustración 49, donde se muestran los niveles de confianza y sus diferentes parámetros, con la idea de demostrar la amplitud que existen entre las tendencias, cuando se trabaja a una edad mayor. Hay que recordar que los valores de rotura son los correspondientes a los resultados de los ensayos directos de compresión con los núcleos de concreto.

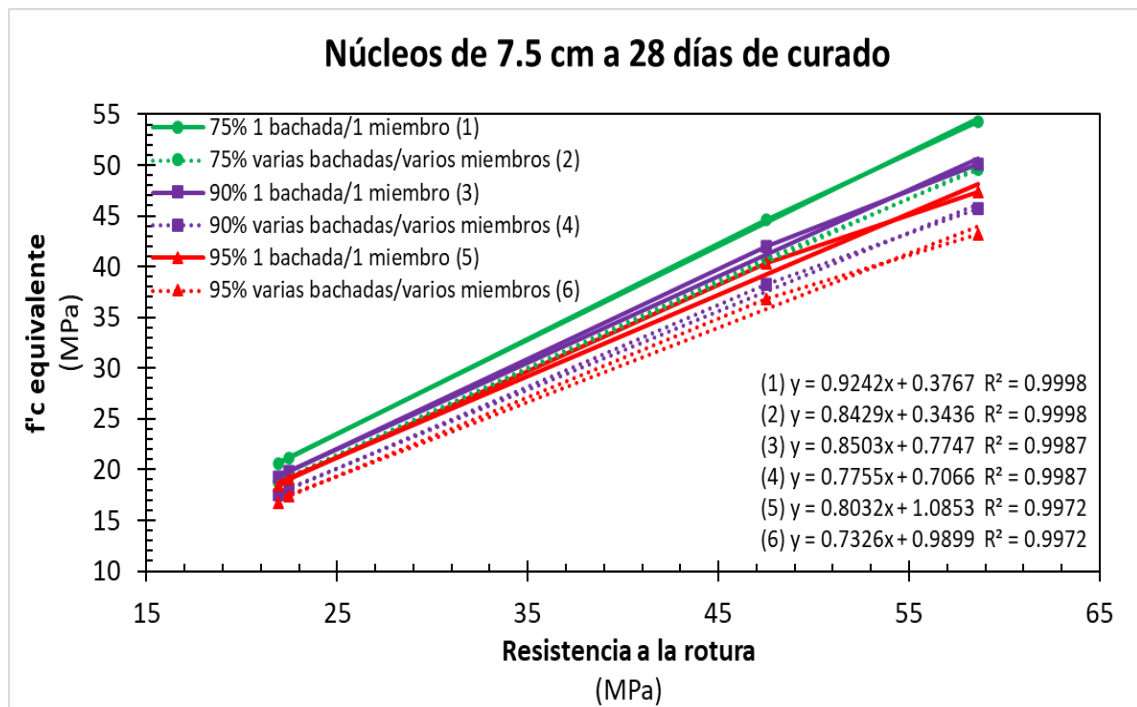


Ilustración 49. Correlación entre la resistencia a la rotura de núcleos de concreto de 7.5 cm a 28 días contra el $f'c$ equivalente a través del método alternativo ACI 214.4-21.

De la edad de 28 días de curado se puede discutir que, para las resistencias mayores, sobre todo a partir de 50 MPa, se encuentra una mayor diferencia de resultados de f'_c equivalente, cuando se trata de los diferentes niveles de confianza. Por ejemplo, si se hace la comparación de los resultados para un f'_c objetivo de 25 MPa se tiene que el valor mayor con respecto al menor es superior en un 17%. Y se compara el concreto de un f'_c objetivo de 70 MPa, se obtiene una diferencia de 20%, notando que, conforme se aumenta la resistencia, se tiende a aumentar la variación de resultados, dependiendo de los parámetros aplicados en la ecuación, con base en el origen de los núcleos.

La ilustración 50 muestra los resultados de correlación de la resistencia de los núcleos, Vs el f'_c equivalente, con el método alternativo del ACI 214.4-21; estos para una edad 56 días.

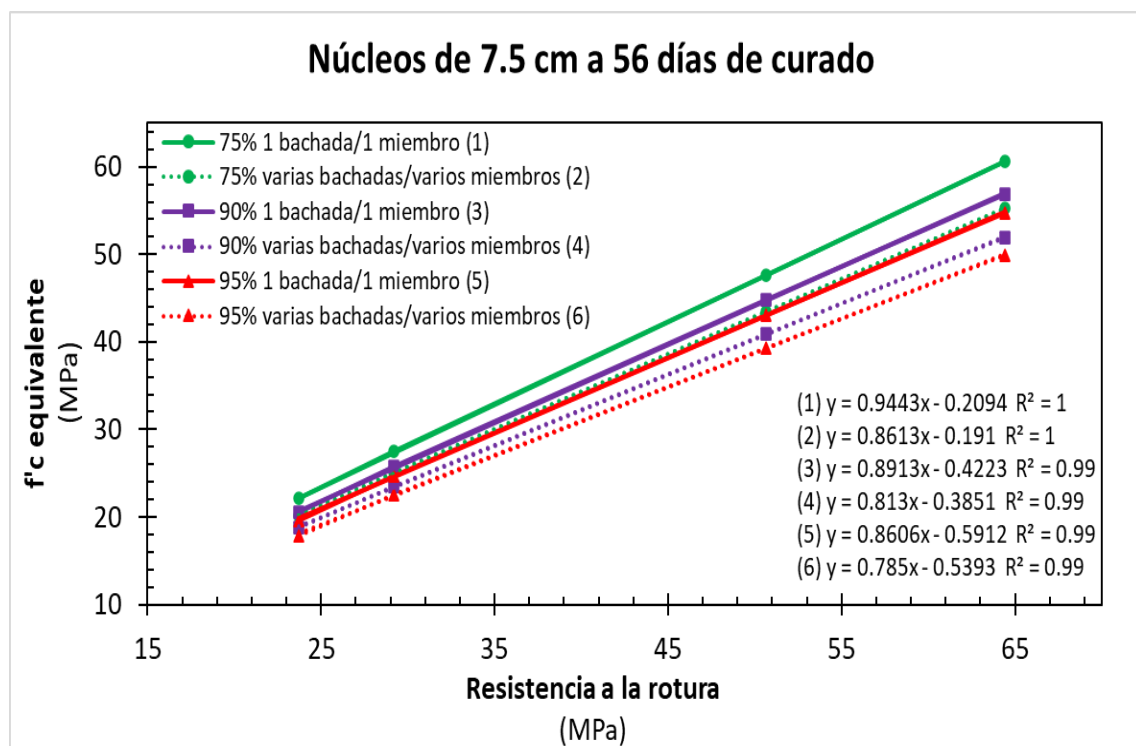


Ilustración 50. Correlación entre la resistencia a la rotura de núcleos de concreto de 7.5 cm a 56 días contra el f'_c equivalente a través del método alternativo ACI 214.4-21.

El comportamiento a los 56 días se mantiene, aunque no tan marcado en las resistencias mayores que 50 MPa, como se aprecia para la edad de 28 días, sin embargo, sí puede notarse cuando se hace la comparación contra las resistencias menores que 50 MPa. Para este caso, las pendientes de todas las líneas son muy similares.

La ilustración 51 se elaboró con la finalidad de conocer el comportamiento en la correlación entre el f'_c equivalente vs la resistencia a la rotura en núcleos de 10 cm.

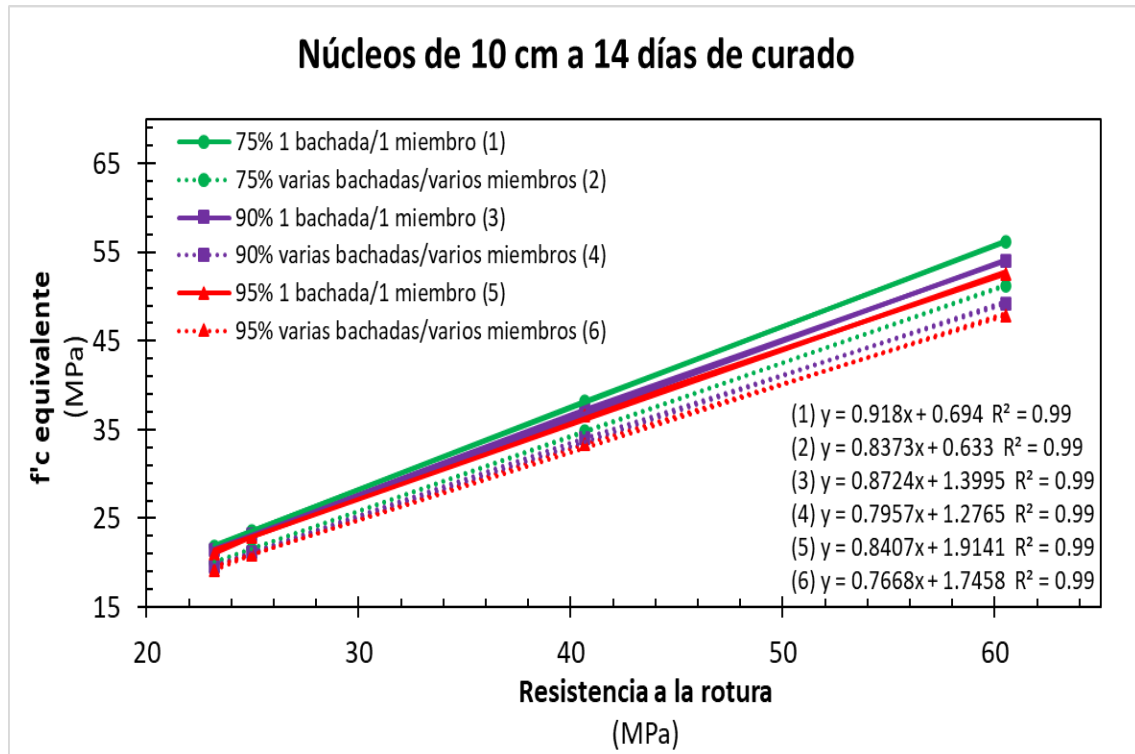


Ilustración 51. Correlación entre la resistencia a la rotura de núcleos de concreto de 10 cm a 14 días, contra el f'_c equivalente a través del método alternativo ACI 214.4-21.

En la ilustración 51, para resistencias de 25 y 30 MPa, se puede observar cómo se agrupan en dos niveles, un nivel conformado por los núcleos una bachada y de un mismo miembro y el otro grupo con núcleos de varias bachadas, así como varios miembros. En las líneas que corresponden al primer nivel se tienen diferencias porcentuales que rondan en un 4%. Mientras que entre las de varias bachadas el porcentaje tiene un valor de 3.5%, mostrando que no existe gran variación entre los niveles de confianza cuando se trabaja a 14 días, con concretos de este nivel de resistencia objetiva. Sin embargo, sí cambia cuando se hace la comparación total entre el resultado mayor que corresponde a un nivel de confianza del 75% y de una bachada y un solo miembro contra un valor de 95% y de varias bachadas, así como varios miembros, debido a que el porcentaje corresponde a un valor de 14%.

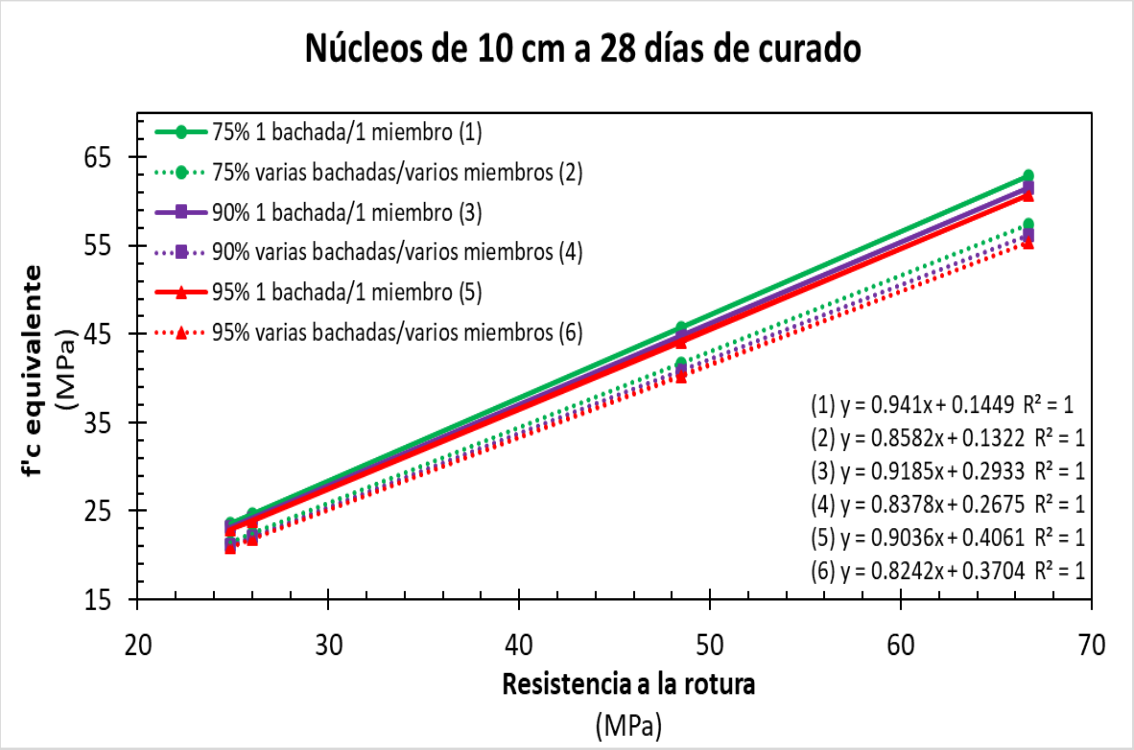


Ilustración 52. Correlación entre la resistencia a la rotura de núcleos de concreto de 10 cm a 28 días contra el $f'c$ equivalente a través del método alternativo ACI 214.4-21.

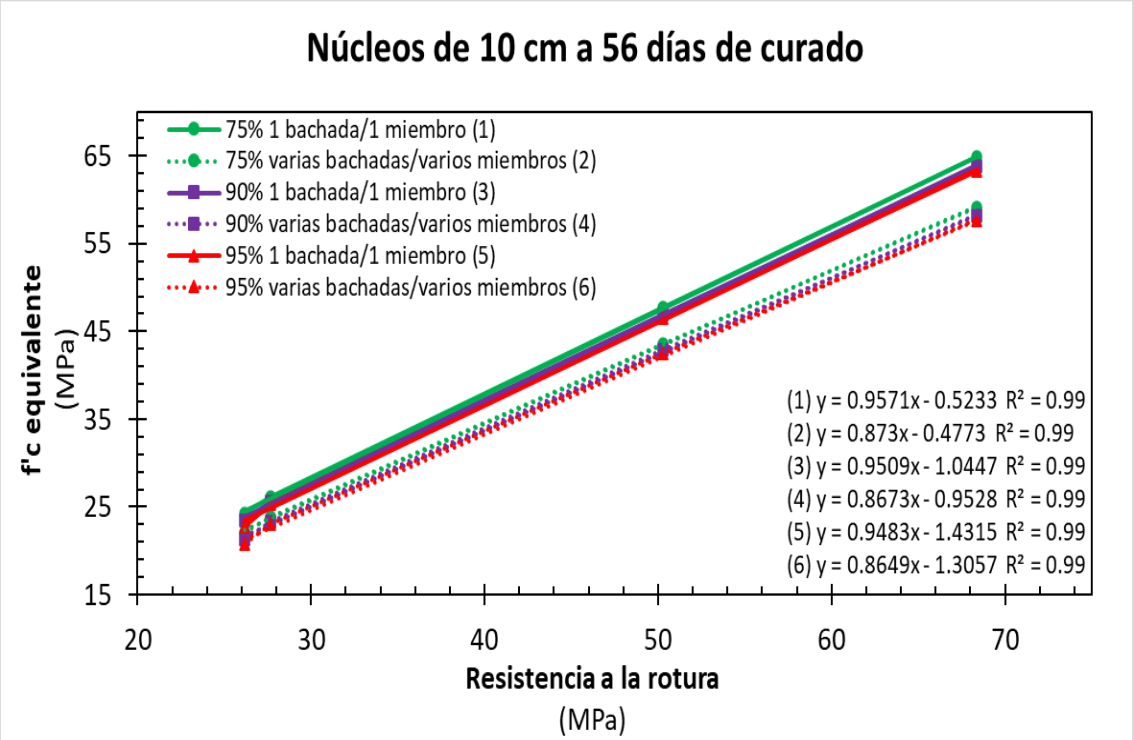


Ilustración 53. Correlación entre la resistencia a la rotura de núcleos de concreto de 10 cm a 56 días contra el $f'c$ equivalente a través del método alternativo ACI 214.4-21.

Cuando se trata de núcleos de 10 cm, para esta investigación se observa un claro distanciamiento entre los resultados que se obtienen cuando el $f'c$ equivalente es de núcleos que fueron extraídos de una sola bachada y un solo miembro contra los que se extraen de varias bachadas, así como de varios miembros, siendo claramente más conservadores los resultados que corresponden a varias bachadas y de varios miembros.

En la ilustración 52 se graficaron los resultados que corresponden a la edad de 28 días para los núcleos de 10 cm, donde, cuando se trata de núcleos de 10 cm las diferencias de $f'c$ equivalente no suelen variar mucho cuando se cambia del nivel de confianza.

Y para ser consistente con lo anterior, en este diámetro de núcleos también se ve la tendencia de mayor variación en las resistencias mayores que 50 MPa, presentando una diferencia del 13% cuando se hace la comparación del valor más alto contra el más bajo $f'c$ objetivo de 50 MPa, exhibiendo que en efecto es importante la definición de estos parámetros, previo a la interpretación de los resultados.

Mientras que la ilustración 53, que corresponde a la edad de 56 días, el comportamiento tiende a ser muy similar a lo que se observa a una edad de 28 días, dejando también claro que existe gran variación entre elegir la línea más conservadora o la que mayor resultado arroja. Y el porcentaje para la resistencia objetivo de 70 MPa es del 12%, mientras que para 50 MPa también se tiene el mismo porcentaje de diferencia.

4.5.2. Correlaciones teóricas entre el $f'c$ equivalente y el criterio del 85% de $f'c$ del ACI 318-19.

A partir de los datos recolectados de la resistencia a la rotura, fue posible determinar un $f'c$ a partir de la adopción del criterio de 85% del ACI 318-19, el cual, a la vez, se utilizó para generar una correlación entre los valores del ACI 214.4-21 con el Método Alternativo y sus dos caminos más críticos contra los resultados del ACI 318-19. Esto corresponde a las Ilustraciones 54-59.

La primera ilustración de esta sección es la 54 y corresponde a la correlación generada entre el $f'c$ equivalente por el método alternativo del ACI 214.4-21 contra el ACI 318-19 para núcleos de 7.5 cm y a una edad de 14 días de curado.

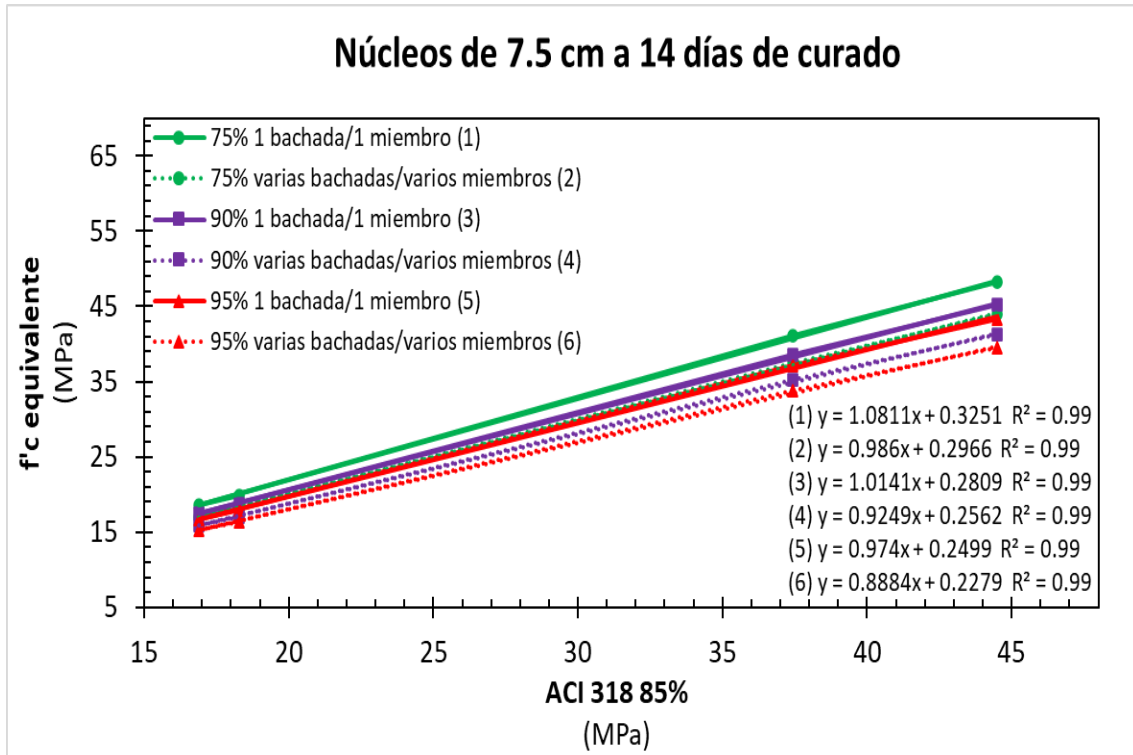


Ilustración 54. Correlación entre el $f'c$ estimado por ACI 318-19 85% de núcleos de concreto de 7.5 cm a 14 días contra el $f'c$ equivalente a través del método alternativo ACI 214.4-21.

El objetivo de la investigación se centra en estos resultados donde se correlaciona el $f'c$ equivalente por el ACI 214.4-21 Vs el $f'c$ estimado por el ACI 318-19-85%. En primera instancia se observa un buen ajuste en los puntos del gráfico, donde se asegura que en ningún momento el R^2 baja de 0.99, siendo considerado como “Muy bueno”.

Los resultados de 14 días para la correlación de entre $f'c$ equivalente Vs ACI 318-19 coincide con el comportamiento visto en la gráfica de $f'c$ equivalente Vs la resistencia a la rotura, donde los resultados tienen a tener una mayor variación en concretos con resistencias mayores, sobre todo en el $f'c$ objetivo de 70 MPa. Sin embargo, no se agrupan las líneas, presentando cada una de ellas una tendencia propia, volviéndose importante la elección de los parámetros con los cuales se busca correlacionar la resistencia a la compresión con el $f'c$ equivalente.

La única pendiente que tiende a variar un poco es la de un nivel de confianza del 75% y para un núcleo extraído de una sola bachada y un solo miembro, mientras que el resto de las tendencias llevan una pendiente muy similar.

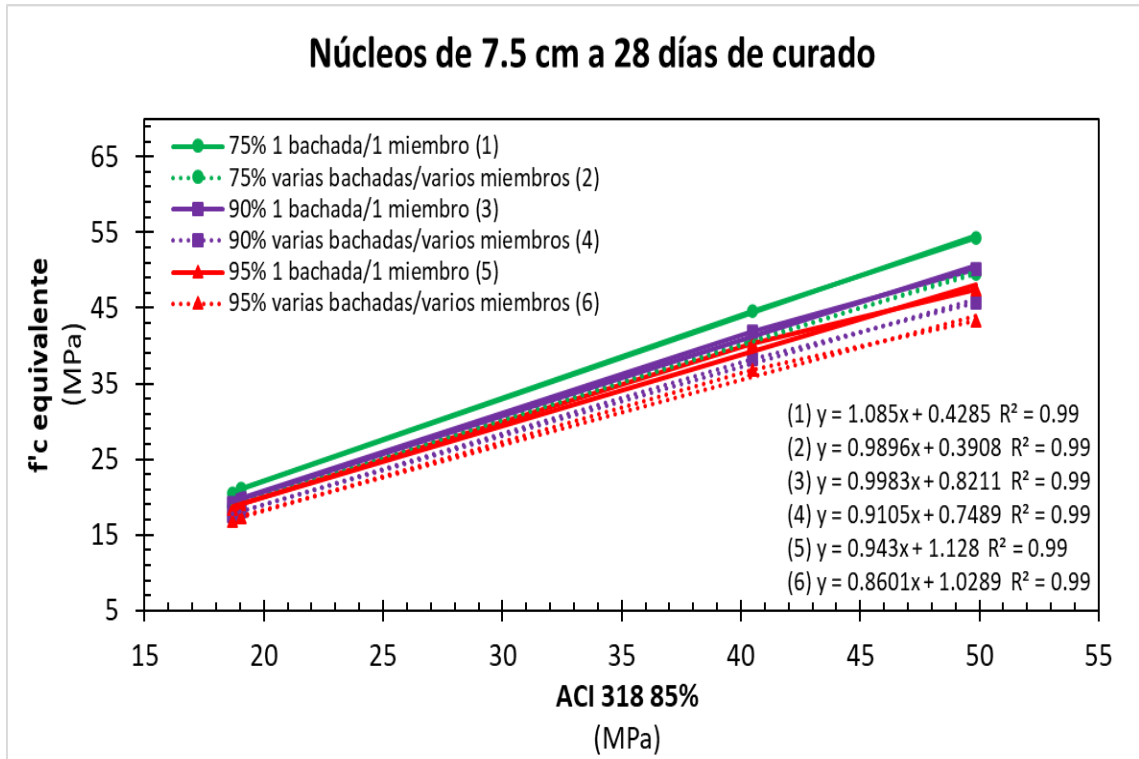


Ilustración 55. Correlación entre el $f'c$ estimado por ACI 318-19 85% de núcleos de concreto de 7.5 cm a 28 días contra el $f'c$ equivalente a través del método alternativo ACI 214.4-21.

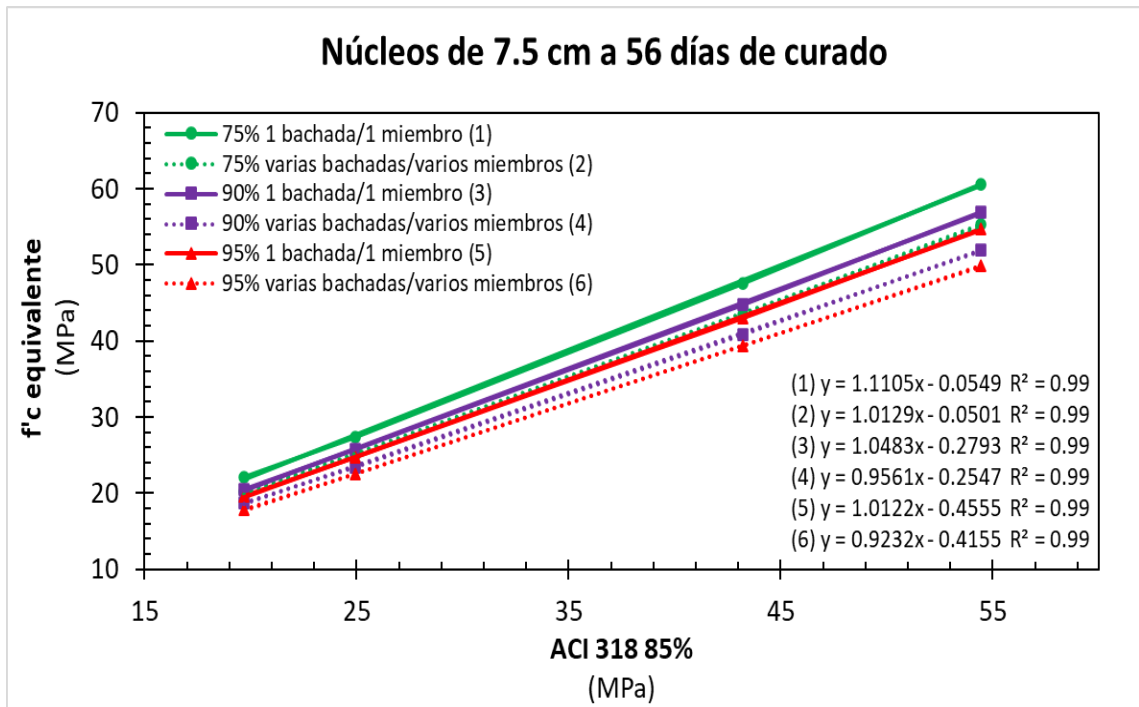


Ilustración 56. Correlación entre el $f'c$ estimado por ACI 318-19 85% de núcleos de concreto de 7.5 cm a 56 días contra el $f'c$ equivalente a través del método alternativo ACI 214.4-21.

A los 28 días también se puede apreciar la misma tendencia que se presenta a los 14 días, donde los ajustes son muy buenos. Sin embargo, se puede observar cómo para el concreto con resistencias altas tienden a generarse un conjunto de resultados muy similares, quedando solo un poco alejado el valor de un nivel de confianza de 75% y para un núcleo de una sola bachada y un solo miembro estructural analizado.

Mas, en comparación con los 14 días, en este caso el resto de las líneas tienden a separarse más entre ellas, generando una mayor variación entre cada elección. Existe un 22% entre la línea de tendencia más alta con respecto a la más baja. Mientras que entre los diferentes parámetros del 75% se tiene un 10% de diferencia, haciendo también considerable la elección correcta del parámetro a utilizar en la determinación del $f'c$ equivalente.

Mientras que la ilustración también deja en claro que, para resistencias de concreto bajas, alrededor de los 25 y 30 MPa, no suele presentar gran variación entre los niveles de confianza que se pueden utilizar; sin embargo, cuando se hace el cálculo de variación se encuentra que también existe una variación aproximada del 22% entre la línea más alta con respecto a la más baja, esto en un $f'c$ objetivo de 25 MPa.

Con respecto a la edad de 56 días, el comportamiento es prácticamente el mismo que a los 28 días, generando una comparación donde para 25 MPa se tiene una diferencia del 20%, para 30 MPa un valor de 21%, para 50 MPa de 22% y finalmente para 70 MPa se tiene un resultado de 21%. Estos valores se generan debido a que las líneas presentan pendientes muy similares, provocando que la distancia entre ellas sea la misma en cualquier resistencia objetivo.

La ilustración 57 muestra los resultados correspondientes a la edad de 14 días, pero ahora para los núcleos de 10 cm de diámetro, con la finalidad de verificar si se tiene un comportamiento similar a los de 7.5 cm o si presenta algún tipo de variación. De igual manera se anexa la ilustración 58, la cual corresponde a la edad de 28 días, de esta manera se facilita el análisis entre las edades al tener, una gráfica sobre la otra.

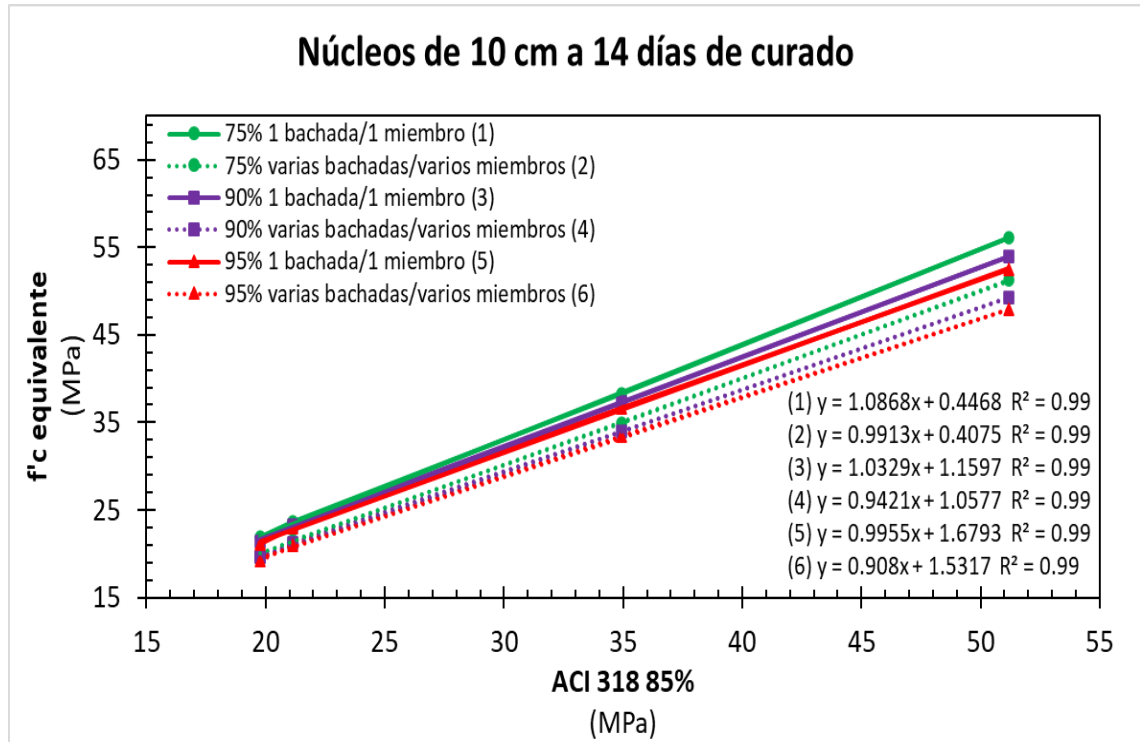


Ilustración 57. Correlación entre el f'_c estimado por ACI 318-19 85% de núcleos de concreto de 10 cm a 14 días de curado contra el f'_c equivalente a través del método alternativo ACI 214.4-21.

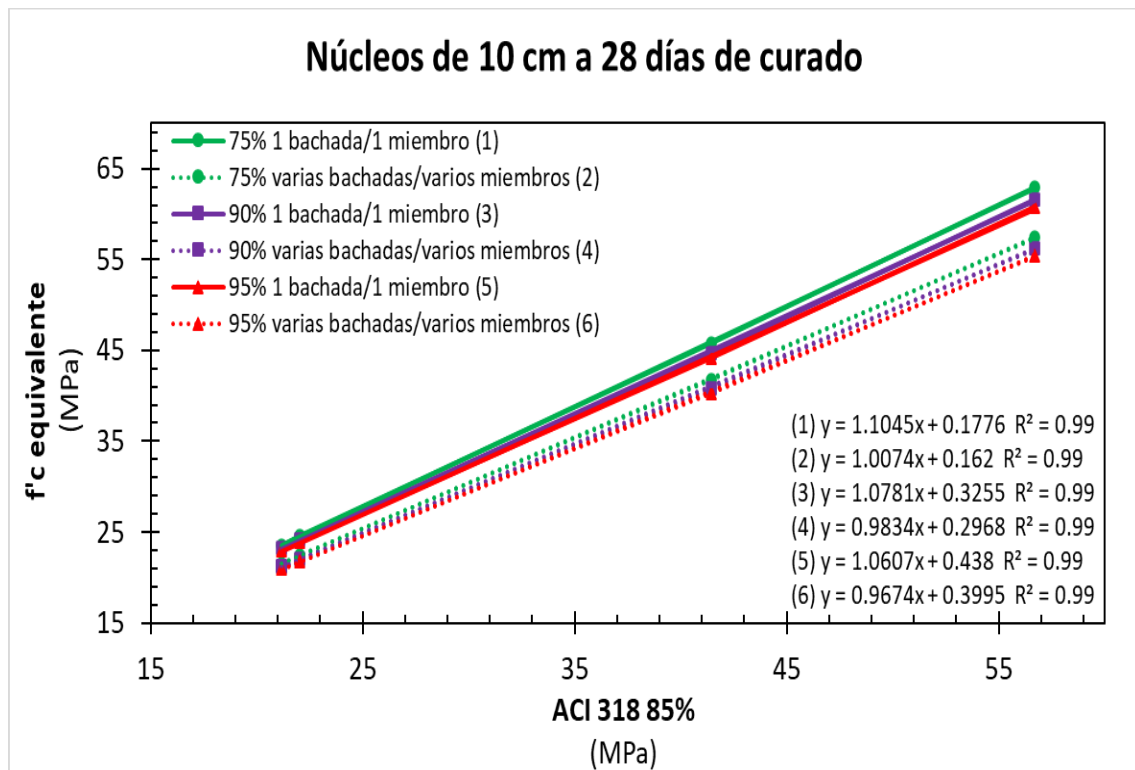


Ilustración 58. Correlación entre el f'_c estimado por ACI 318-19 85% de núcleos de concreto de 10 cm a 28 días de curado contra el f'_c equivalente a través del método alternativo ACI 214.4-21.

Con base en la ilustración 58 a 14 días, para núcleos de 10 cm, el comportamiento de las líneas de tendencia es muy similar al que se presenta con los núcleos de 7.5 cm, recalcando que para las resistencias menores la aplicación de los niveles de confianza tiene un impacto menor con un resultado de 12% entre las líneas con más amplitud, en un $f'c$ objetivo de 25 MPa. Y para 70 MPa el valor correspondiente es de 17%, mayor que la anterior, mientras que para 28 días con un $f'c$ objetivo de 25 MPa, se tiene un valor de 12% similar al que se obtuvo a 14 días y para 70 MPa fue de 13%, inclusive menor que el porcentaje reportado a 14 días, presentando un comportamiento diferente entre estas edades al que se vio con núcleos de 7.5 cm.

Sin embargo, para 28 días se repite la tendencia de alejarse los resultados de $f'c$ equivalente, cuando se trata de considerar los criterios de la obtención de los especímenes que ésta con respecto al número de bachadas y de elementos que se analizaron. Es aquí donde se observa el mayor cambio, el 13% en el $f'c$ objetivo de 50 MPa cuando se compara la línea del nivel de confianza de 75%, menos conservador y éste contra el valor de un nivel de confianza de 95%, más conservador. Es el mismo porcentaje de 13% también para 70 MPa.

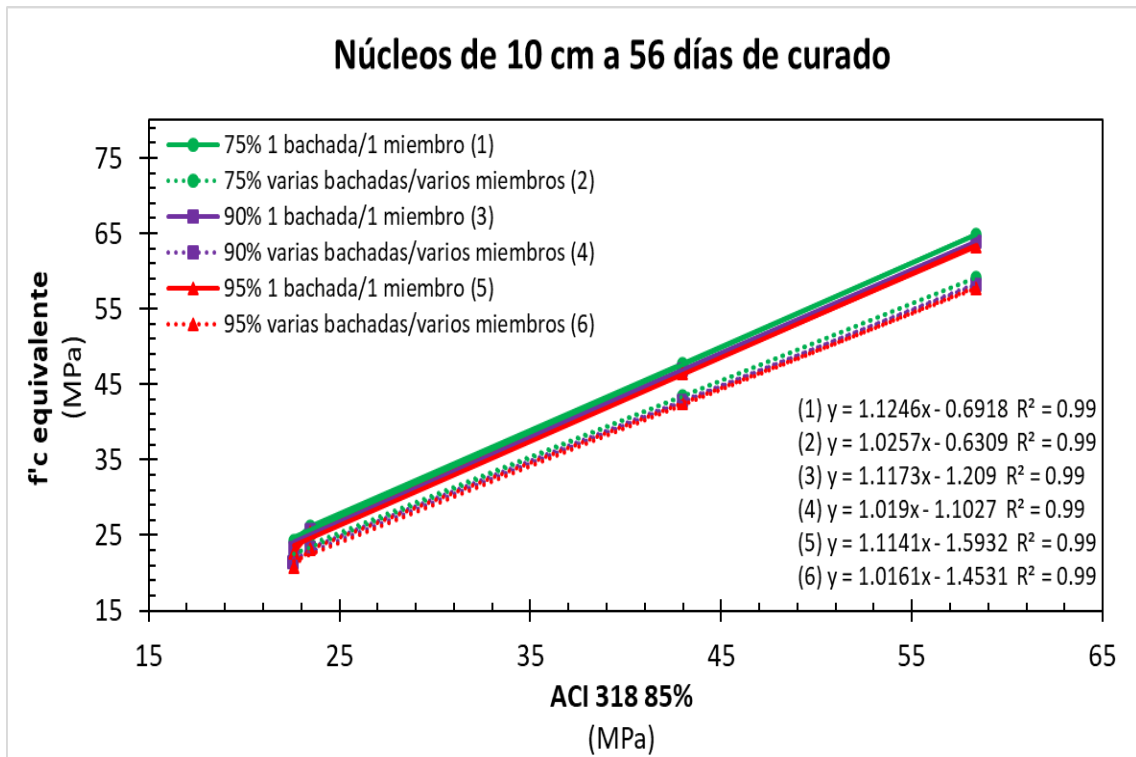


Ilustración 59. Correlación entre el $f'c$ estimado por ACI 318-19 85% de núcleos de concreto de 10 cm a 56 días contra el $f'c$ equivalente a través del método alternativo ACI 214.4-21.

Para 56 días, con base en la ilustración 59, prácticamente se pueden determinar dos líneas de tendencia, una para cuando se considera el criterio de una bachada y un espécimen y otro para varias bachas y varios especímenes. Esto juntando los tres niveles de confianza. De igual manera, para 30 MPa, el porcentaje de comparación que se viene manejando es del 13%, lo que se aproxima al comportamiento de la edad de 14 y 28 días. De igual manera, se tiene el mismo valor de 12% para 50 MPa, lo que significa que las pendientes de las líneas de tendencia son muy similares, manejando variaciones que no cambian mucho cuando se trabaja en un intervalo de resistencia objetivo de 25 a 70 MPa.

4.5.3. Correlaciones teóricas entre el $f'c$ equivalente y las pruebas no destructivas.

También se generaron correlaciones entre las pruebas no destructivas contra el $f'c$ equivalente calculado con base al ACI 214.4-21, del método alternativo. Para esta sección se añadieron las Ilustraciones 60-65, que corresponden a los concretos con $f'c$ objetivo de 25 MPa. El resto de las ilustraciones puede encontrarse en los anexos. En la ilustración 60 se puede observar la correlación entre el $f'c$ equivalente de núcleos de 7.5 cm Vs la velocidad de pulso ultrasónico.

4.5.3.1. Correlación de $f'c$ equivalente vs velocidad de pulso ultrasónico.

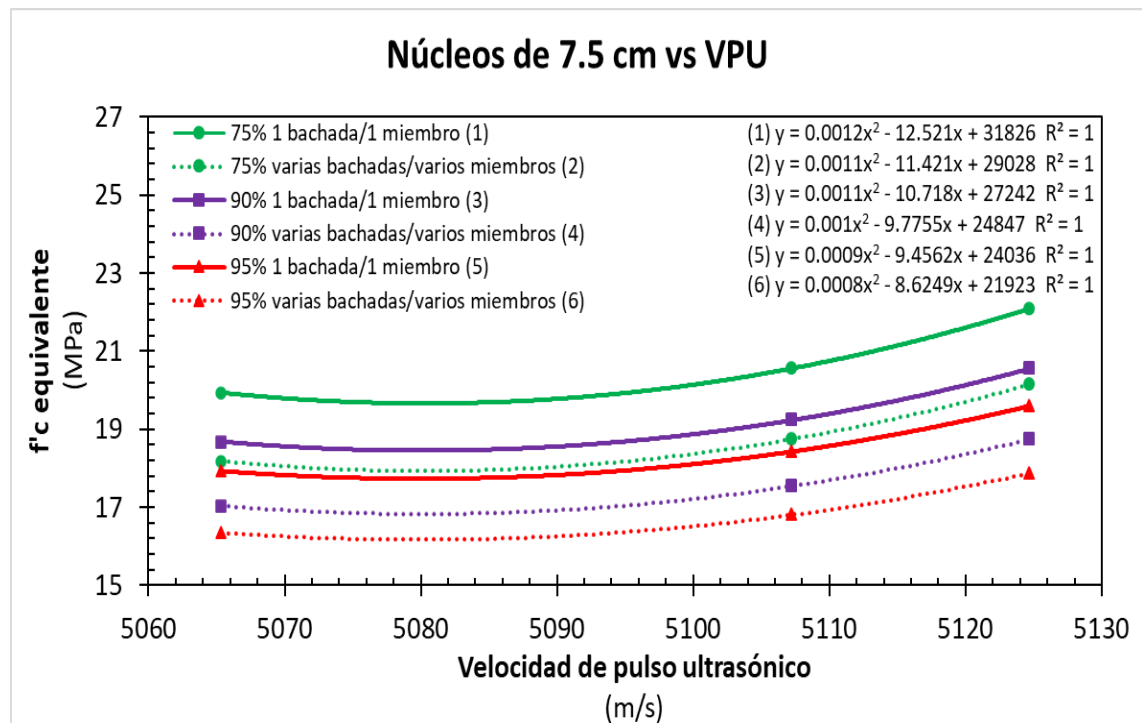


Ilustración 60. Correlación entre el $f'c$ equivalente en núcleos de concreto de 7.5 cm a través del método alternativo ACI 214.4-21 contra la velocidad de pulso ultrasónico para 25 MPa.

La correlación entre el f'_c equivalente vs la velocidad de pulso ultrasónico tiene un buen ajuste, cambiando ahora el comportamiento a una curva de polinómica, diferente a las rectas que se generaban cuando se comparaba con el ACI 318. Con lo mostrado en el gráfico, se puede observar que para este caso sí se vuelve muy importante definir el nivel de confianza que se va a utilizar, debido al gran intervalo existente que abarca prácticamente 5 MPa entre el valor más bajo a elegir, contra el más alto.

La ilustración 61 muestra la misma correlación entre el f'_c equivalente vs la velocidad de pulso ultrasónico, pero ahora para los núcleos de 10 cm.

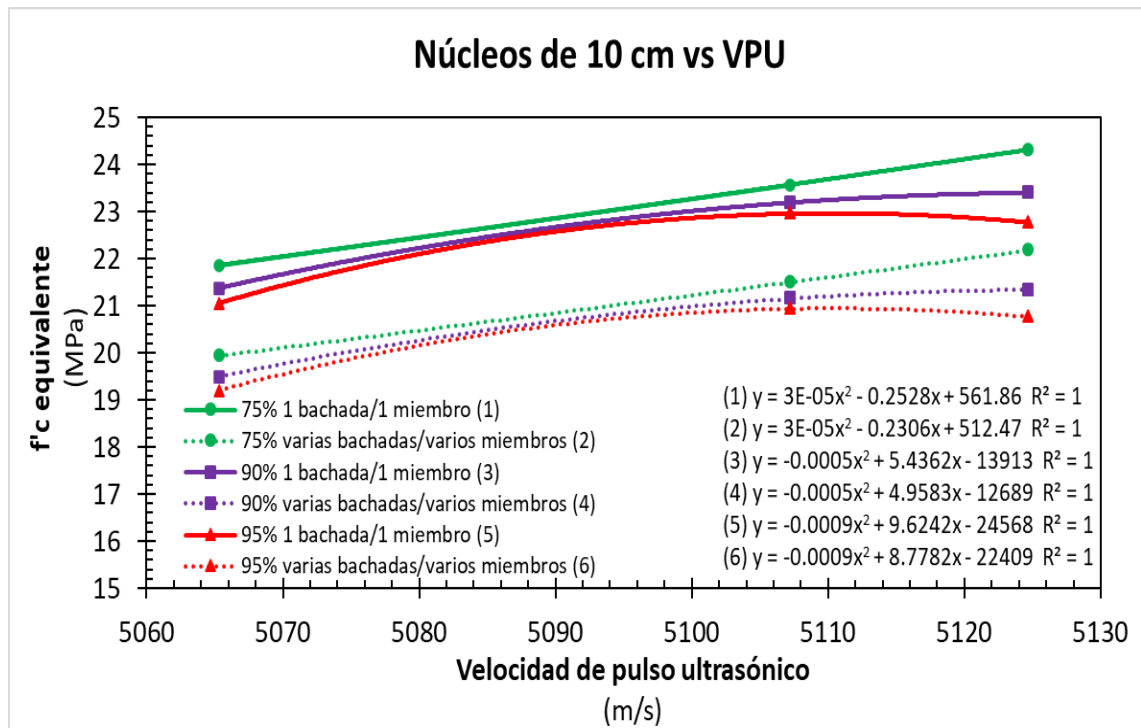


Ilustración 61. Correlación entre el f'_c equivalente en núcleos de concreto de 7.5 cm a través del método alternativo ACI 214.4-21, contra la velocidad de pulso para 25 MPa.

Debido a que la velocidad de pulso ultrasónico está ampliamente relacionada con la densificación de la matriz cementante y la resistencia a la compresión, por tanto, para núcleos de 10 cm se aprecia la diferencia entre líneas de tendencia cuando se cambia de la elección de criterios sobre la extracción de los especímenes, sobre todo cuando aumenta la velocidad de pulso, donde existe una diferencia aproximada de 4 MPa entre las líneas de tendencia más alejadas, mientras que con menor velocidad la variación ronda alrededor de 3 MPa.

En este caso, para los núcleos de 10 cm, de nuevo se vuelve a notar la diferencia de resultados que corresponde a los parámetros de si los núcleos son extraídos de diversas bachadas, así como de distintos miembros estructurales.

4.5.3.2. Correlación de f'_c equivalente vs martillo de rebote.

Las ilustraciones 62 y 63 muestran las curvas de la correlación entre el f'_c equivalente de núcleos de concretos analizados por el ACI 214.4-21 contra los resultados de martillo de rebote tomados de cilindros estándar precargados.

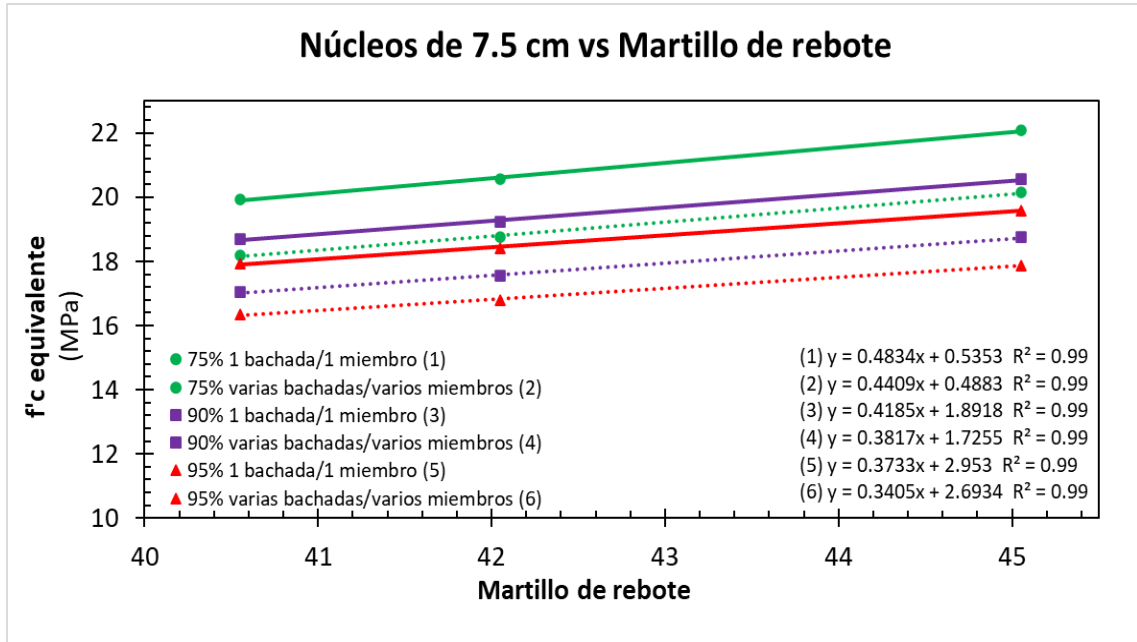


Ilustración 62. Correlación entre el f'_c equivalente en núcleos de concreto de 7.5 cm a través del método alternativo ACI 214.4-21, contra el número de rebote para 25 MPa.

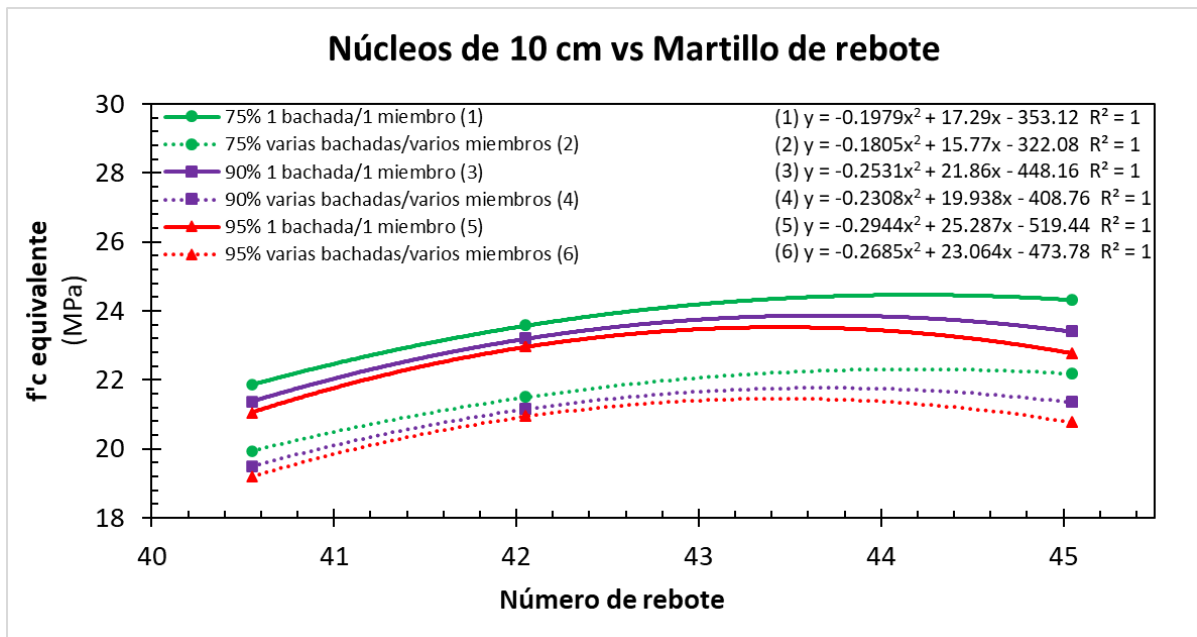


Ilustración 63. Correlación entre el f'_c equivalente en núcleos de concreto de 10 cm a través del método alternativo ACI 214.4-21, contra el número de rebote para 25 MPa.

De la ilustración 62, en el comportamiento del martillo de rebote en concretos analizados con núcleos de 7.5 cm se nota un poco abierto, marcando notablemente una diferencia entre el parámetro elegido, donde el valor más alejado corresponde al de 75%, desplazando el resultado en aproximadamente 1.5 MPa, con respecto al próximo nivel de confianza de 90%. Sin embargo, las pendientes de las líneas resultan muy similares, llevando todas una misma tendencia y teniendo la característica de un comportamiento lineal para este tamaño de núcleo.

Y al ser más comparativos, se encuentra que entre el nivel más crítico se tiene una diferencia de aproximadamente 4 MPa, con respecto al menos conservador, lo cual si tiene un impacto en el resultado. Sin embargo, esto no significa problema alguno, ya que la verdadera función de estos parámetros es proveer un mayor grado de seguridad, al estar diseñados para elementos estructurales de edificaciones con un alto grado de importancia, como puede ser una planta nuclear.

Mientras que, para los núcleos de 10 cm, el comportamiento vuelve a ser polinómico, pero de igual manera marcando una diferencia en el comportamiento cuando se trata de los criterios de origen de los núcleos, que con base en la ilustración 63, se puede observar una diferencia de hasta 2 MPa entre los resultados con diferentes niveles de confianza; sin embargo, cuando se compara el mismo nivel de confianza también se encuentran diferencias aproximadas a 2 MPa entre los resultados del valor más alto contra el más conservador.

Aun así, los resultados de $f'c$ equivalente para núcleos de 10 cm tienden a ser más altos que los núcleos de 7.5 cm, en aproximadamente 3 MPa. Esto puede ser atribuido a un mejor comportamiento mecánico por parte de los núcleos de mayor diámetro, algo que se ya hace tiempo se ha venido reportando en la bibliografía.

4.5.3.3. Correlación de f'_c equivalente vs lok-test

En las ilustraciones 64 y 65 se observan las curvas de la correlación entre el f'_c equivalente de núcleos de concretos analizados por el ACI 214.4-21 contra los resultados de fuerza de extracción lok-test, para un f'_c objetivo de 25 MPa.

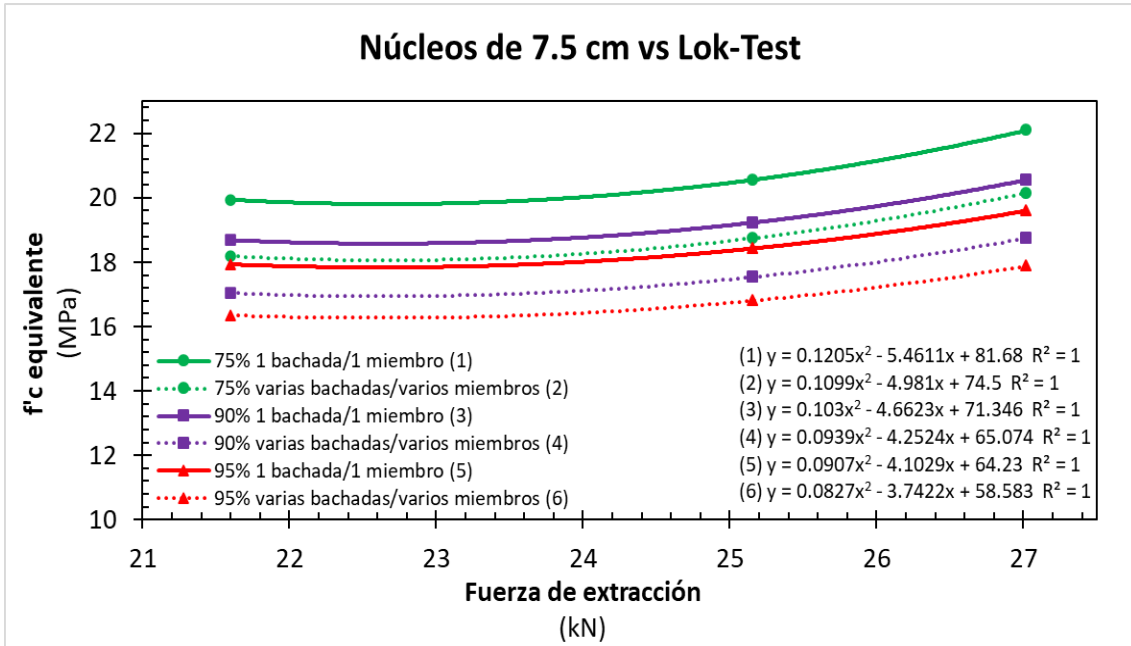


Ilustración 64. Correlación entre el f'_c equivalente en núcleos de concreto de 7.5 cm a través del método alternativo ACI 214.4-21, contra la fuerza para 25 MPa.

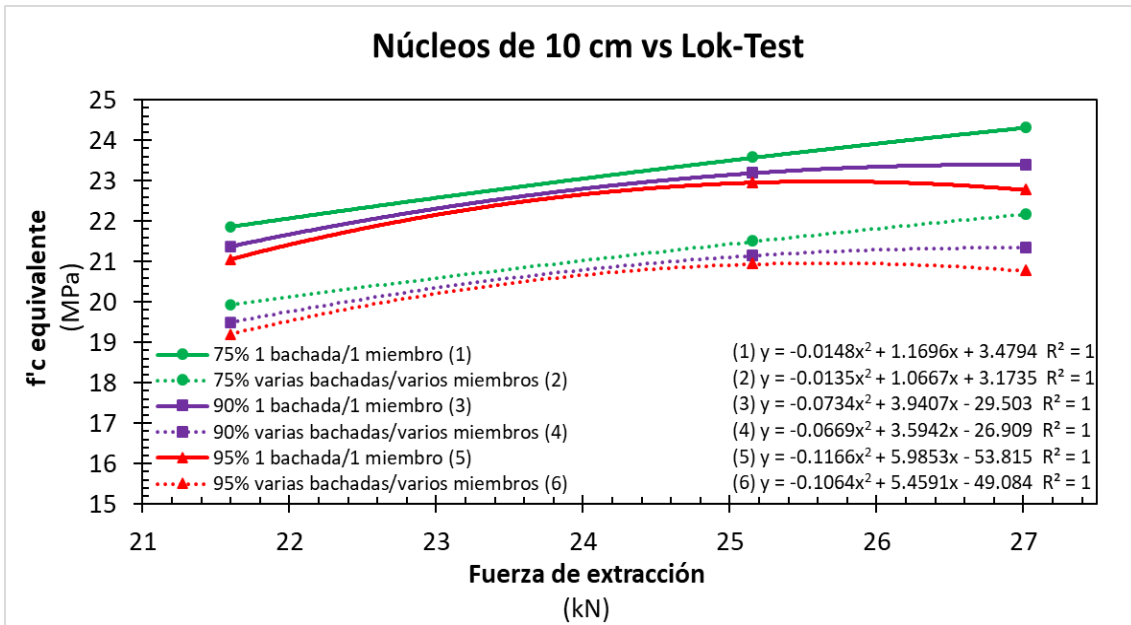


Ilustración 65. Correlación entre el f'_c equivalente en núcleos de concreto de 10 cm a través del método alternativo ACI 214.4-21, contra la fuerza de extracción para 25 MPa.

El comportamiento de la línea de tendencia de este gráfico correspondiente a los núcleos de 7.5 cm tiene una concavidad diferente al de núcleos de 10 cm; sin embargo, las concavidades no resultan ser muy grandes como para representar algún tipo de problema o ya bien que no haya relación alguna entre ambos diámetros. Mas, se puede argumentar que el diámetro sí llega a tener una pequeña influencia en el comportamiento de los resultados.

Aunque si se llegan a analizar los puntos se puede encontrar que para los núcleos de 10 cm los resultados de f'_c equivalente suelen ser más grandes que los que corresponden a 7.5 cm en aproximadamente 2 MPa, respaldado por la bibliografía, donde suele encontrarse que para núcleos con diámetros de tamaños mayores los resultados de resistencia a la compresión también tienen a ser más grandes y con menos variaciones.

La técnica de Lok-Test tiene una tendencia similar a la del martillo de rebote cuando se trata de correlacionarse con el f'_c equivalente. Sin embargo, existe una gran diferencia entre el resultado obtenido cuando se usa un nivel de confianza de 75% contra uno de 95% en las resistencias mayores, debido a que puede llegar a significar aproximadamente 3 MPa, a menos que se trate de resultados de fuerza de extracción en alrededor de los 24 kN, donde para los núcleos de 10 cm, los niveles de confianza no muestran gran diferencia entre ellos cuando se hace la correlación con el f'_c equivalente.

Para las resistencias menores la diferencia ronda en aproximadamente 1 MPa, lo cual deja a criterio del analizador si requiere utilizar rígidamente los niveles de confianza.

CAPÍTULO 5

5.1. CONCLUSIONES

A partir de lo determinado en esta investigación a través de la fase experimental, como de la revisión bibliográfica se deducen las siguientes conclusiones:

A. Desarrollo de resistencia en núcleos de concreto

1. Para estructuras que correspondan a un nivel de confianza del 75%, para núcleos de 10 o 7.5 cm de diámetro nominal, que representan a varios lotes y/o diferentes elementos, el desarrollo del $f'c$ estimado por el criterio del 85% del ACI 318-19 es prácticamente el mismo que el obtenido con el ACI 214.4-21 para el $f'c$ equivalente.
2. Para estructuras que correspondan a un nivel de confianza del 90%, cuando los núcleos son de 10 cm de diámetro nominal y representan a varios lotes y/o diferentes elementos, el desarrollo del $f'c$ estimado por el criterio del 85% del ACI 318-19 es prácticamente el mismo que el obtenido con el ACI 214.4-21 para el $f'c$ equivalente.
3. Para estructuras que correspondan a un nivel de confianza del 90%, cuando los núcleos son de 7.5 cm de diámetro nominal, el desarrollo del $f'c$ estimado por el criterio del 85% del ACI 318-19 se ubica entre los desarrollos obtenidos por el ACI 214.4-21 para resultados de un lote o elemento estructural y de varios lotes y/o elementos estructurales.
4. Para estructuras que correspondan a un nivel de confianza del 95%, cuando los núcleos son de 10 cm de diámetro nominal y representan a varios lotes y/o diferentes elementos, el desarrollo del $f'c$ estimado por el criterio del 85% del ACI 318-19 es prácticamente el mismo que el obtenido con el ACI 214.4-21 para el $f'c$ equivalente.
5. Para estructuras que correspondan a un nivel de confianza del 95%, cuando los núcleos son de 7.5 cm de diámetro nominal, el desarrollo del $f'c$ estimado por el criterio del 85% del ACI 318-19 se ubica entre los desarrollos obtenidos por el ACI 214.4-21 para resultados de un lote o elemento estructural y de varios lotes y/o elementos estructurales.
6. En la evaluación de los núcleos de concreto de diferentes diámetros y a diferentes edades se observaron distintos resultados de $f'c$ equivalente cuando se analizaron los datos con el ACI 214.4-21 y el ACI 318-19–85%, siendo más conservadores los resultados con el tratamiento del ACI 214.4-21.

B. Correlaciones entre el $f'c$ equivalente (ACI 214.4-21) y el $f'c$ estimado (ACI 318-19)

1. Todas las correlaciones del ACI 214.4-21 contra el ACI 318-19-85% presentan buenos coeficientes de correlación/confiabilidad, en todos los casos mayores a 0.997. Desde un punto de vista de control de calidad estos coeficientes son excelentes lo cual es atribuible a que todos ellos son resultados obtenidos de especímenes fabricados, curados y ensayados en laboratorio.
2. En las correlaciones del $f'c$ equivalente determinado por el ACI 214.4-21 vs el $f'c$ estimado por el criterio del 85% del ACI 318-19 se observa que conforme aumenta la edad los resultados se agrupan en dos grupos, uno para resultados representativos de una bachada o elemento de concreto y otro representativo de varias bachadas y/o elementos de concreto. También se observa que el grupo representativo de una bachada o un elemento tiende a presentar una mayor pendiente.
3. Entre mayor es la resistencia analizada, mayor es la variación del $f'c$ equivalente obtenida por medio de la gráfica al elegir la línea de tendencia que corresponde al origen de los núcleos de concreto (una bachada, varias bachadas, un elemento, varios elementos).
4. La adaptación del criterio del 85% del ACI 318-19 tiende a mostrar un comportamiento muy similar al que se obtiene cuando se aplica el Método Analítico del ACI 214.4-21 tanto en los núcleos de 7.5 como en los de 10 cm.
5. Cuando se adapta el criterio de 75% del ACI 318-19 para estimar el $f'c$ del concreto, se obtienen valores mayores a los propios de la resistencia a la rotura de los núcleos de concreto, resultados que alcanzan incrementos de entre el 30 y el 50%.
6. El valor del $f'c$ estimado por el criterio de ACI 318-19-85% suele rondar entre el valor más alto y bajo del $f'c$ equivalente calculado a partir del ACI 214.4-21.
7. Se logró generar una correlación con un buen ajuste de resultados cuando se trabajó con los resultados de $f'c$ equivalente a través del ACI 214.4-21 y con los valores obtenidos directamente de la resistencia a la rotura de núcleos de concreto, volviéndose una opción para evitar la estimación del $f'c$ del concreto por medio del ACI 318-19.
8. Se determinó que un diámetro menor de núcleo tiende a generar mayor variación en los resultados, observando este fenómeno en los resultados de la desviación estándar calculada y de coeficiente de variación.
9. Una posible causa para no mostrar una variación muy grande en los núcleos de 7.5 cm contra los de 10 cm, es porque el núcleo de 7.5 cm, al ser prácticamente 4 veces el tamaño máximo del agregado, se puede

considerar como un diámetro adecuado para llevar a cabo esta prueba semi-destructiva.

10. La ASTM C42 recomienda extraer núcleos en edades mayores que 14 días; sin embargo, para este proyecto se realizaron extracciones a la edad de 7 días. No obstante, debido a que se fabricó el concreto con un CPO 40R que permitió tener aproximadamente el 85% del $f'c$ objetivo a dicha edad, esto ayudó a no presentar ningún tipo de daño o problema a los especímenes extraídos.

C. $f'c$ equivalente vs resultados de martillo de rebote (ASTM C805)

11. Las pruebas no destructivas muestran una buena correlación contra los valores de $f'c$ equivalente determinado a partir de núcleos de concreto, generando resultados en el R^2 que tienden a ser mayores que 0.99, lo cual resulta en un buen ajuste. Un factor de gran ayuda para lograr esto, es el control que se logró en las condiciones de curado y ensayo, debido a que son pruebas que se llevaron a cabo en el laboratorio.
12. En las correlaciones del $f'c$ equivalente determinado por el ACI 214.4-21 vs el martillo de rebote se observa que para núcleos de 10 cm de diámetro nominal los resultados se agrupan en dos grupos, siendo estos resultados representativos de varias bachadas y/o elementos de concreto.
13. El comportamiento de los grupos representativos de una o varias bachadas no suele estar tan marcado en núcleos de diámetro nominal de 7.5 cm como lo es para 10 cm. Mostrando resultados similares entre el criterio de 95% de NC para una bachada y el de 75% para varias bachadas.
14. El comportamiento de la correlación del $f'c$ equivalente vs martillo de rebote para núcleos de concreto de 10 cm de diámetro nominal tiende a ser representado por una ecuación polinómica mientras que para 7.5 cm el desarrollo se puede representar con una ecuación lineal.

D. $f'c$ equivalente vs velocidad de pulso ultrasónico (ASTM C597)

15. El comportamiento de la correlación del $f'c$ equivalente vs velocidad de pulso ultrasónico vuelve a presentar un comportamiento similar al de la correlación con el martillo de rebote. Donde se puede apreciar una gran separación entre grupos de consideración de diversos parámetros de origen del núcleo (una o varias bachadas, uno o varios elementos).
16. La línea de tendencia suele obedecer un comportamiento polinómico tanto en los diámetros nominales de 7.5 y 10 cm.

E. f'_c equivalente vs Lok-Test (ASTM C900)

17. Siendo la correlación del f'_c equivalente vs Lok-Test como la última analizada en esta investigación, viene a confirmar el comportamiento de que los resultados para un diámetro nominal de 10 cm tienden a formar una separación de grupos por la decisión de parámetros (una o varias bachadas, uno o varios elementos), dando mayor importancia a esa elección por la gran diferencia de resultados que puede existir al tomar un criterio u otro.

CAPÍTULO 6

6.1. RECOMENDACIONES

- Se recomienda aplicar el ensayo no destructivo de índice de madurez, para generar una correlación contra el $f'c$ equivalente arrojado por el método del ACI 214.4-21.
- Sería provechoso utilizar diferentes diámetros de núcleo, para conocer el comportamiento de los resultados de compresión, así como para medir la desviación estándar y el coeficiente de variación.
- Una futura investigación puede analizar la relación entre el ACI 214.4 y el ACI 562: Requisitos del Código para Evaluación, Reparación y Rehabilitación de Estructuras de Concreto Existentes y Comentarios.
- Una fuerte aportación puede obtenerse de aplicar estas pruebas a elementos en sitio, de tal manera que se conozcan los resultados cuando una edificación está expuesta a los fenómenos de deterioro, así como cuando se encuentra en función soportando las cargas aplicadas.
- Trabajar con las normativas mexicanas que están relacionadas con las pruebas no destructivas, para observar la variación entre los resultados, debido a lo que dicta cada código.

CAPÍTULO 7

7.1. Referencias bibliográficas

- [1] J. G. Martínez Hernández, “Pruebas no destructivas y semi-destructivas para la verificación de la resistencia a la compresión del concreto en el lugar.,” Universidad Autónoma de Nuevo León, 2018.
- [2] J. Baltazar, “Evaluación y validación del uso de cubos para obtener la resistencia a la compresión del concreto vs especímenes cilíndricos de 15 x 30 cm,” Jan. 2015.
- [3] S. H. Kosmatka, Beatrix. Kerkhoff, and W. C. Panarese, *Design and control of concrete mixtures*. Portland Cement Association, 2002.
- [4] A. Neville and J. J. Brooks, *Concrete technology*, Second Edition. United States, 1987.
- [5] ACI 214.4, *Obtaining Cores and Interpreting Core Compressive Strength Results-Guide*. United States: ACI, 2021. [Online]. Available: www.concrete.org
- [6] NRMCA, “Prueba de resistencia a la compresión del concreto,” *El concreto en la práctica*, vol. 1, 2019.
- [7] J. Klinger, C. Lobo, E. Connolly, and B. Suprenant, “En cada proyecto debemos esperar que los resultados de los ensayos de resistencia a la compresión sean inferiores a la resistencia especificada,” *Concreto Latinoamericano*, Feb. 2022.
- [8] Instituto del Cemento y del Concreto de Guatemala, “Núcleos perforados para la evaluación de la resistencia a compresión del concreto endurecido,” *ICCG*, 2019.
- [9] M. F. Bonfigli, A. L. Materazzi, and M. Breccolotti, “Influence of spatial correlation of core strength measurements on the assessment of in situ

- concrete strength,” *Structural Safety*, vol. 68, pp. 43–53, 2017, doi: 10.1016/j.strusafe.2017.05.005.
- [10] B. Akcay, “Variation of In-Place Concrete Core Strength in Structures from Istanbul Area: Statistical Analysis of Concrete Core Data,” *Journal of Materials in Civil Engineering - J MATER CIVIL ENG*, vol. 16, Oct. 2004, doi: 10.1061/(ASCE)0899-1561(2004)16:5(507).
- [11] S. Khoury, A. A. H. Aliabdo, and A. Ghazy, “Reliability of core test - Critical assessment and proposed new approach,” *Alexandria Engineering Journal*, vol. 53, no. 1, pp. 169–184, 2014, doi: 10.1016/j.aej.2013.12.005.
- [12] American Society for Testing of Materials, “Standard Test Method for Obtaining and Testing Drilled Cores and Sawed Beams of Concrete,” *ASTM*, 1990, doi: 10.1520/C0042_C0042M-13.
- [13] British Standards Institution, “Method for Determination of the Compressive Strength of Concrete Core,” ; *British Standards Institution*, 1983.
- [14] American Concrete Institute, “Specification for Structural Concrete for Buildings (AC1301-84,” *ACI Committee 301*, 1984.
- [15] T. R. Naik, “Evaluation of Factors Affecting High-Strength Concrete Cores,” *American Society of Civil Engineers*, 1990.
- [16] M. Ju, K. Park, and H. Oh, “Estimation of compressive strength of high strength concrete using non-destructive technique and concrete core strength,” *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 7, no. 12, Dec. 2017, doi: 10.3390/app7121249.
- [17] F. Indelicato, “Estimate of concrete cube strength by means of different diameter cores: A statistical approach,” *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, vol. 30, no. 3, pp. 131–138, 1997, doi: 10.1007/bf02486384.
- [18] S. Khoury, A. A. H. Aliabdo, and A. Ghazy, “Reliability of core test - Critical assessment and proposed new approach,” *Alexandria Engineering Journal*, vol. 53, no. 1, pp. 169–184, 2014, doi: 10.1016/j.aej.2013.12.005.

- [19] R. Caspeele and L. Taerwe, "Influence of concrete strength fractile estimation on the safety level of existing structures assessed using the Adjusted Partial Factor Method," *Assessment, Upgrading and Refurbishment of Infrastructures*, 2013, doi: 10.2749/222137813806481419.
- [20] ACI, *Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural (ACI 318SUS-14)*. USA: American Concrete Institute, 2015.
- [21] ASTM C823, "Standard Practice for Examination and Sampling of Hardened Concrete in Constructions," USA, 1995.
- [22] M. Johnson, "Investigation of Parameters Effecting Concrete Core Performance for Quality Control and Assurance," 2019.
- [23] A. Martínez, "Rechazo de datos de una serie ," vol. 1, 2017.
- [24] American Standard Test of Materials, "Dealing With Outlying Observations," *ASTM*, 2015, doi: 10.1520/E0178-08.
- [25] D. Abdullah and A. Laskar, "Influence of Direction of Coring on Insitu Concrete Core Strength Results with Respect to Pouring Direction of Concrete," *International Research Journal of Engineering and Technology*, 2020, [Online]. Available: www.irjet.net
- [26] F. M. Bartlett and J. G. Macgregor, "Effect of Core Diameter on Concrete Core Strengths," *Materials*, vol. 91, pp. 460–470, 1994.
- [27] S. Popovics, "Effect of Curing Method and Final Moisture Condition on Compressive Strength of Concrete," *ACI Journal Proceedings*, vol. 83, no. 4, 1986, doi: 10.14359/10658.
- [28] R. J. Larsen and M. L. Marx, *An introduction to mathematical statistics and its applications*. Prentice Hall, 2012.
- [29] A. Fernández Domínguez and J. J. Howland Albear, "Evaluación de métodos para estimar la resistencia característica a compresión del hormigón en

estructuras existentes a partir de la extracción y ensayo de testigos,” *Hormigón y Acero*, Jun. 2018, doi: 10.1016/j.hya.2018.04.001.

- [30] F. McGregor, Bartlett, and G. James, “Statistical Analysis of the Compressive Strength of Concrete in Structures,” *ACI Mater J*, vol. 93, no. 2, 1996, doi: 10.14359/1353.
- [31] K. Bergstrom, R. Hindo, and R. Wayne, “Statistical Evaluation of the In-Place Compressive Strength of Concrete,” *Concrete International*, vol. 7, no. 2, 1985.
- [32] M. Natrella, “Experimental statistics,” 1963. [Online]. Available: <http://books.google.com>
- [33] R. E. Philleo, “Increasing the Usefulness of ACI 214: Use of Standard Deviation and a Tech-nique for small sample sizes,” *Concrete International*, vol. 3, no. 9, 1981.
- [34] F. MacGregor, M. Bartlett, and G. James, “Equivalent Specified Concrete Strength from Core Test Data,” *Concrete International*, vol. 17, no. 3, 1995.
- [35] J. W. Bartlett and C. Frost, “Reliability, repeatability and reproducibility: Analysis of measurement errors in continuous variables,” *Ultrasound in Obstetrics and Gynecology*, vol. 31, no. 4. pp. 466–475, Apr. 2008. doi: 10.1002/uog.5256.
- [36] ACI 318, *Requisitos de reglamento para concreto estructural*, ACI. United States: ACI, 2019.
- [37] The structural world, “Calculation of the Equivalent Compressive Strength of Concrete Core,” Nov. 2019.
- [38] D. Aragón, “Cilindros de Concreto Medición de la Resistencia a la Compresión,” *Infraestructura Vial*, pp. 9–13, 2012.
- [39] IMCYC, “Prueba de resistencia a la compresión del concreto,” *Instituto Mexicano Del Cemento Y Del Concreto*, 2006.

- [40] J. Rodríguez, “Ensayos acelerados de resistencia del concreto,” *Semana 15 : ensayos acelerados de resistencia del concreto*, Jul. 02, 2016.
- [41] NRMCA, “CIP 34 - Preparación de los Cilindros de Concreto en Campo,” *National Ready Mixed Concrete Association*, pp. 2–3.
- [42] Sabio Siglo XX, *Refrentado con azufre ASTM C617*, (2015).
- [43] F. Ortega, “Experiencias en el empleo de ensayos no destructivos, en el análisis de estructuras de hormigón afectadas por diferentes situaciones patológicas,” *RIPANI*, 2007.
- [44] International Atomic Energy Agency, “Guidebook on non-destructive testing of concrete structures,” *Industrial Applications and Chemistry Section, IAEA*, vol. 17, no. 17, p. 231, 2002.
- [45] J. Hernández, Á. Orozco, D. Almanza, and J. Ramírez, “Relación entre resistencia a compresión en cilindros de concreto y los rebotes con esclerómetro digital,” *Ingeniare*, no. 22, pp. 59–68, Apr. 2018, doi: 10.18041/1909-2458/ingeniare.22.1342.
- [46] L. Suárez, “Martillo de rebote Schmidt,” in *Suarez-Burgoa(2014)*, Colombia: Universidad Nacional de Colombia, 2014.
- [47] P. Faria, V. Silva, and T. Madeira, “Natural hydraulic lime mortars with ceramic wastes for masonry,” *9 th International Masonry Conference*, 2014.
- [48] Norma Técnica Ecuatoriana, “Determinación del número de rebote.,” Ecuador, 2016.
- [49] H. Hertz, “On the contact of elastic solid bodies,” *Journal für die Reine und Angewandte Mathematik*, vol. 5, 1981.
- [50] E. Schmidt, “Quality control of concrete by rebound hammer testing,” *Schweiz Arch angew Wiss Tech*, vol. 17, 1951.
- [51] E. Schmidt, “Rebound hammer for concrete testing,” *chweiz Baufachzeitung*, vol. 68, 1950.

- [52] J. Kolek, "Using Schmidt Rebound Hammer," *The Aberdeen Group Publication*, 1969.
- [53] H. R. Kumavat, N. R. Chandak, and I. T. Patil, "Factors influencing the performance of rebound hammer used for non-destructive testing of concrete members: A review," *Case Studies in Construction Materials*, vol. 14. Elsevier Ltd, Jun. 01, 2021. doi: 10.1016/j.cscm.2021.e00491.
- [54] V. M. Malhotra and N. J. Carino, *Handbook on Nondestructive Testing of Concrete*. CRC Press, 2003. doi: 10.1201/9781420040050.
- [55] S. Vivithkeyoonvong and S. Puwapattanachat, "Effect of internal compressive stress and direction of Schmidt hammer on compressive strength of concrete estimated by combined ultra-sonic pulse velocity and rebound hammer methods," *Kasetsart Engineering Journal*, vol. 38, 2006.
- [56] ACI 228.1R-03, "In-Place methods to estimate concrete strength," *American Concrete Institute*, 2003.
- [57] J. Chefdeville, "Nondestructive testing of concrete," *Annales de l'Institut Technique du Batiment et des Travaux Publics*, vol. 95, 1955.
- [58] G. Greene, "Test hammer provides new method of evaluating hardened concrete," *Journal of American Concrete Institute*, vol. 26, 1954.
- [59] A. Brencich, R. Bovolenta, V. Ghiggi, D. Pera, and P. Redaelli, "Rebound Hammer Test: An Investigation into Its Reliability in Applications on Concrete Structures," *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2020, pp. 1–11, Dec. 2020, doi: 10.1155/2020/6450183.
- [60] V. M. Malhotra, *Handbook on nondestructive testing of concrete*, Second edi., vol. 1, no. 1. U.S.: CRC Press LLC, 2004. doi: 10.1016/0041-624x(66)90307-6.
- [61] S. Mindess and J. F. Young, "Concrete," *Prentice Hall*, 1981.

- [62] A. T. Moczko, N. J. Carino, and C. G. Petersen, "CAPO-TEST to estimate concrete strength in bridges," *ACI Mater J*, vol. 113, no. 6, pp. 827–836, 2016, doi: 10.14359/51689242.
- [63] A. Ndagi, A. A. Umar, F. Hejazi, and M. S. Jaafar, "Non-destructive assessment of concrete deterioration by ultrasonic pulse velocity: A review," in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Nov. 2019, vol. 357, no. 1. doi: 10.1088/1755-1315/357/1/012015.
- [64] IAEA, "Guidebook on non-destructive testing of concrete structures," 2002.
- [65] H. Krenchel and S. P. Shah, "Fracture analysis of the pullout test."
- [66] J. Helal, M. Sofi, and P. Mendis, "Non-Destructive Testing of Concrete : A Review of Methods," vol. 14, no. 1, pp. 97–105, 2015.
- [67] C. G. Petersen and E. Poulsen, "Pull-out testing by Lok-Test and Capo-Test," 1993.
- [68] V. M. Malhotra, *Non-destructive testing of concrete*, CRC Press. USA: CRC Press LLC, 2004.
- [69] J. Carino, "Non-destructive Test Methods," pp. 1–68, 1997.
- [70] Kierkegaard, Hansen, and Bickley, "In-situ strength evaluation by the lok-test," *American Concrete Institute*, 1978.
- [71] P. Kierkegaard-Hansen, "LOK-TEST".
- [72] S. P. Pessiki, A. G. Davis, R. L. Dilly, K. E. Kesner, P. J. Sullivan, and G. V Teodoru, "In-Place Methods to Estimate Concrete Strength Reported by ACI Committee 228," pp. 1–44, 2003.
- [73] Elvec, "Equipos para agregados," *Equipos para ensayos de materiales de construcción*, 2003.
- [74] ASTM C31, "Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Field," *American Society Testing of Materials*, 2015, doi: 10.1520/C0031_C0031M-15A.

- [75] Germann Instruments, "Pull-Out Sistema de Extracción," Denmark.
- [76] ASTM C617, "Standard Practice for Capping Cylindrical Concrete Specimens," USA, 1998. [Online]. Available: www.astm.org,
- [77] ASTM C39, "Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens," *American Society Testing of Materials*, 2016, doi: 10.1520/C0039_C0039M-16.
- [78] ASTM C597, "Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete," *American Society Testing of Materials*, 2002, doi: 10.1520/C0597-09.
- [79] ASTM C900, "Standard Test Method for Pullout Strength of Hardened Concrete," USA, 2006. [Online]. Available: www.astm.org,
- [80] ASTM C33, "Standard Specification for Concrete Aggregates," *American Society Testing of Materials*, 2016, doi: 10.1520/C0033_C0033M-16.
- [81] ASTM C150, "Standard Specification for Portland Cement," *American Society Testing of Materials*, 2015, doi: 10.1520/C0150_C0150M-15.
- [82] 214RS-11, *Guía para la evaluación de resultados de ensayos de resistencia del concreto*. Comité ACI 214, 2011. [Online]. Available: <http://concrete.org/Publications/Documenterrata.asp>.

CAPÍTULO 8

8.1. APÉNDICES

8.1.1. Apéndice I



DESCRIPCIÓN

Mapefluid N280 es un aditivo líquido reductor de agua de alto rango y retardante para la fabricación de concreto premezclado de alta calidad y baja relación agua-cemento. Cumple con la norma ASTM-C-494 Tipo G, ASTM-C-1017 tipo II.

CAMPOS DE APLICACION

Mapefluid N280 está diseñado como un aditivo reductor de agua de alto rango y retardante para la elaboración de concreto para todo tipo de estructuras, debido a su desempeño el concreto es fácil de colocar cuando está en estado fresco y tiene características de alto rendimiento cuando endurece.

Los principales campos de aplicación son:

- concreto premezclado;
- concreto hiperfluido;
- concreto masivo;
- concreto de baja relación agua-cemento;
- concretos de alta resistencia.

Algunos ejemplos de aplicación

Mapefluid N280 es un aditivo que se utiliza para:

- concreto premezclado para estructuras que requieren baja permeabilidad;
- concretos hiperfluidos que permiten obtener un mejor acabado en el elemento;

- concretos masivos utilizados para reducir los gradientes térmicos derivados de la hidratación del cemento;

- elaboración de concretos de alta resistencia a la compresión.

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS

Mapefluid N280 es un aditivo reductor de agua de alto rango retardante que permite:

- incrementar resistencias a compresión;
- reducción de agua mínimo del 12%;
- incremento de revenimiento mínimo de 9 cm;
- reducir consumo de cemento por metro cúbico.

AVISO IMPORTANTES

Mapefluid N280 al ser un aditivo reductor de agua de alto rango y retardante la sobredosificación del mismo puede generar retardo de fraguado.

No se recomienda utilizar en sinergia con aditivos de la línea **Dynamon**.

Para usar este producto en concreto es necesario definir la dosificación óptima mediante pruebas previas con los materiales utilizados en la obra.

MODO DE APLICACION

Se recomienda añadir **Mapefluid N280** directamente sobre la masa de concreto para obtener una mayor eficiencia del producto.

Aditivo reductor de agua utilizado para la fabricación del concreto con $f'c$ objetivo de 25, 30 y 50 MPa.



Mapeplast RP190

Aditivo reductor de agua de medio rango, retardante

DESCRIPCIÓN

Mapeplast RP190 es un aditivo líquido, reductor de agua de medio rango retardante para la fabricación de concreto premezclado. Cumple con la norma ASTM-C-494 Tipo D, ASTM-C-1017 Tipo II.

CAMPOS DE APLICACIÓN

Mapeplast RP190 está diseñado como un aditivo reductor de agua para la elaboración de concreto para todo tipo de estructuras especialmente aquellas que requieren ser transportadas en largos trayectos sin pérdida de trabajabilidad.

Los principales campos de aplicación son:

- fabricación de concreto en clima calido;
- concreto para pavimento;
- concreto masivo.

Algunos ejemplos de aplicación

Mapeplast RP190 debido a su diseño es un aditivo que se utiliza para:

- optimización de concretos convencionales;
- elaboración de concretos MR;
- elaboración de concretos masivos donde requieren reducir los gradientes térmicos derivados de la hidratación del cemento;
- fabricación de concretos que requieren buen tiempo de trabajabilidad.

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS

Mapeplast RP190 es un aditivo reductor de agua retardante que permite:

- incrementar resistencias mecánicas;
- reducción de agua del 5 al 12%;
- incremento de revenimiento de 5 a 10 cm dependiendo la dosis utilizada;
- reducir consumo de cemento por metro cúbico;
- optimización de diseños de concreto;
- mejora la trabajabilidad y bombeo;
- permite la reducción de la contracción del concreto.

AVISO IMPORTANTES

Mapeplast RP190 al ser un aditivo reductor de agua retardante, no se recomienda para utilizarse en la fabricación de concretos a edades tempranas.

Para el uso de este producto en concreto es necesario definir la dosificación óptima mediante la ejecución de pruebas previas con los materiales utilizados en la obra.

MODO DE APLICACION

Se recomienda añadir **Mapeplast RP190** junto con el agua de mezcla para tener mejor eficiencia o directamente sobre la masa de concreto si requiere utilizarlo como plastificante.

Aditivo reductor de agua de medio rango y retardante utilizado en la fabricación de concreto con $f'c$ objetivo de 25, 30 y 50 MPa.



PLASTOL PRECAST PLUS

Aditivo reductor de agua de alto rango

Descripción

PLASTOL PRECAST PLUS es un aditivo reductor de agua de alto rango hiperfluidificante, formulado con la más reciente tecnología en agentes dispersantes base policarboxilato. **PLASTOL PRECAST PLUS** está diseñado especialmente para dar alta fluidez y alta reducción de agua. Cumple con la norma ASTM-494 tipo A y F como reductor de agua de alto rango. **PLASTOL PRECAST PLUS** no contiene iones cloruros adicionados que puedan promover la corrosión en el concreto.

Aplicaciones principales

- Concreto para elaboración de elementos prefabricados
- Concretos auto-consolidables.
- Concretos fluidos.
- Concretos de alto desempeño.
- Concretos de resistencia rápidas en sinergia con otros aditivos.
- Concretos de alta resistencia a la compresión.
- Concretos bombeados.

Ventajas

- Menores relaciones agua/cemento en la matriz de concreto.
- Mejora la apariencia de la mezclas de concreto auto-consolidable.
- Reduce los tiempos de descarga en las cimbras.
- Disminuye el rechazo en piezas coladas y en general aumenta la eficiencia en mano de obra, materiales y equipo.
- Proporciona alta fluidez en mezclas secas.
- Altas resistencias a todas las edades.

Información técnica

Apariencia: Líquido color ámbar.

Densidad: 1.11 g/cm³

Está formulado para cumplir con las especificaciones para aditivos ASTM C-494 Tipo A y F.

Envase

- A granel.
- Cubeta de 19 L.
- Tambores de 200 L

Se recomienda mantener el aditivo siempre tapado en los envases de EUCOMEX.

Tiempo de vida

12 meses en el envase original cerrado.

Aditivo hiperfluidificante utilizado en la fabricación de concreto con $f'c$ objetivo de 70 MPa.



EUCOMEX
EUCLID GROUP

EUCON W.O PLUS

Estabilizador para cemento y aditivo retardante.

ADITIVOS ESPECIALES

WWW.EUCOMEX.COM.MX
REV. 01.19

DESCRIPCIÓN

EUCON W.O. PLUS es un aditivo líquido para concreto que inhibe temporalmente la hidratación del cemento. De acuerdo con su aplicación, **EUCON W.O. PLUS** puede utilizarse como parte de un sistema de aditivos para retardar el tiempo de fraguado, o bien, para prolongar el tiempo de retención de la consistencia de mezclas de concreto y mortero. Otra aplicación de **EUCON W.O. PLUS** es la estabilización de la hidratación del cemento para optimizar el uso del agua en la producción de concreto en plantas premezcladoras y promover las prácticas sustentables en la industria de la construcción. **EUCON W.O. PLUS** no es corrosivo y su formulación no incluye ingredientes base cloruros.

EUCON W.O. PLUS requiere una menor dosificación para alcanzar características de trabajabilidad en la mezcla de concreto iguales o superiores que con otros aditivos.

APLICACIONES PRINCIPALES

- Elementos prefabricados densamente armados, los cuales requieren un tiempo de permanencia de fluid determinando para asegurar su adecuada colocación continua.
- Pilotes colados in situ que requieren concreto con un tiempo determinado de fluidez.
- Estructuras de concreto con requerimientos de alta resistencia mecánica, cuya retención de fluidez deba ser controlada.
- Transporte del concreto a lugares lejanos a la planta productora.
- Promueve el uso racional de los materiales para la producción del concreto.

CARACTERÍSTICAS / BENEFICIOS

- Facilidad para colocar concreto en estructuras monolíticas.
- Control de la fluidez del concreto y del tiempo de fraguado.
- Optimización del uso de los recursos para la producción de concreto.

INFORMACIÓN TÉCNICA

Densidad: 1.18 +/- 0.023 g/ml
pH: 6.2 +/- 0.62

ENVASE

Cubeta de 19 L.
Tambor de 200 L.
Se recomienda mantener el aditivo siempre tapado en los envases que EUCOMEX provee.

LIMPIEZA

Limpie con agua las herramientas y el equipo antes que se endurezca el mortero.

INSTRUCCIONES DE USO

Como aditivo retardante y para control de la permanencia de la fluidez, **EUCON W.O. PLUS** se utiliza típicamente en el rango de dosificaciones de 0.5 a 5 cc/kgde cemento como dosis máxima, siempre que se realicen ensayos previos en concreto para evaluar el desempeño. Adicionalmente, es importante tener en cuenta las condiciones de temperatura ambiente para evitar problemas de retardo en el fraguado. Cuando el requerimiento es la permanencia de la trabajabilidad del concreto, se recomienda agregar **EUCON W.O. PLUS** al 90% del agua de mezcla, una vez que el sistema de aditivos reductores de agua ha sido incorporado a la mezcla.

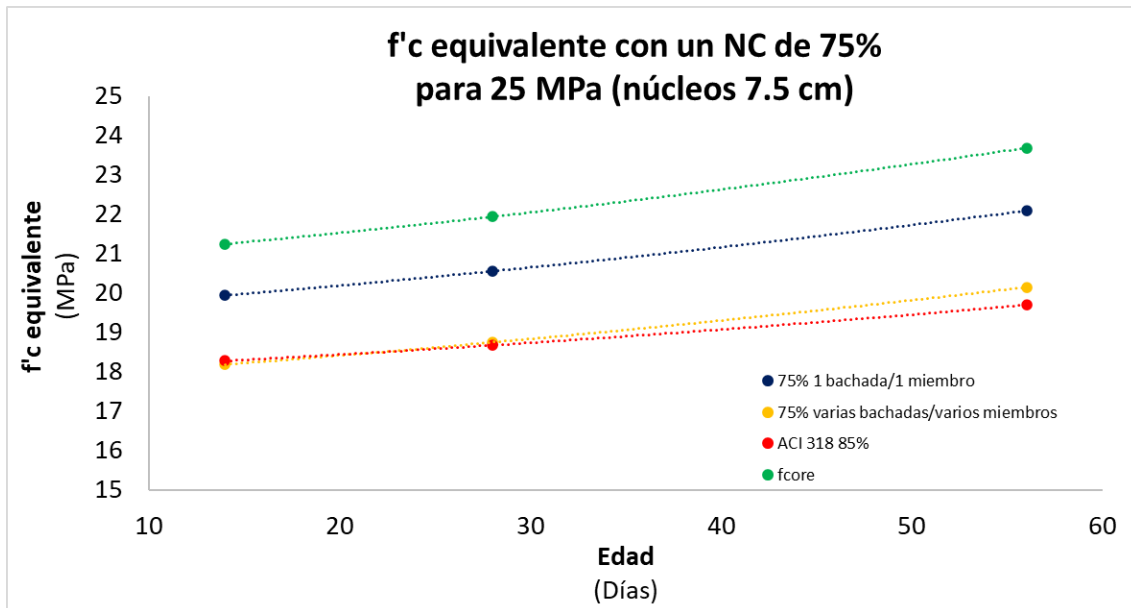
Como estabilizador de la hidratación de cemento, para proporcionar una producción eficaz del uso de los recursos constituyentes del concreto, **EUCON W.O. PLUS** se dosifica aproximadamente de 10 a 15 L por cada 200 L de agua.

TIEMPO DE VIDA

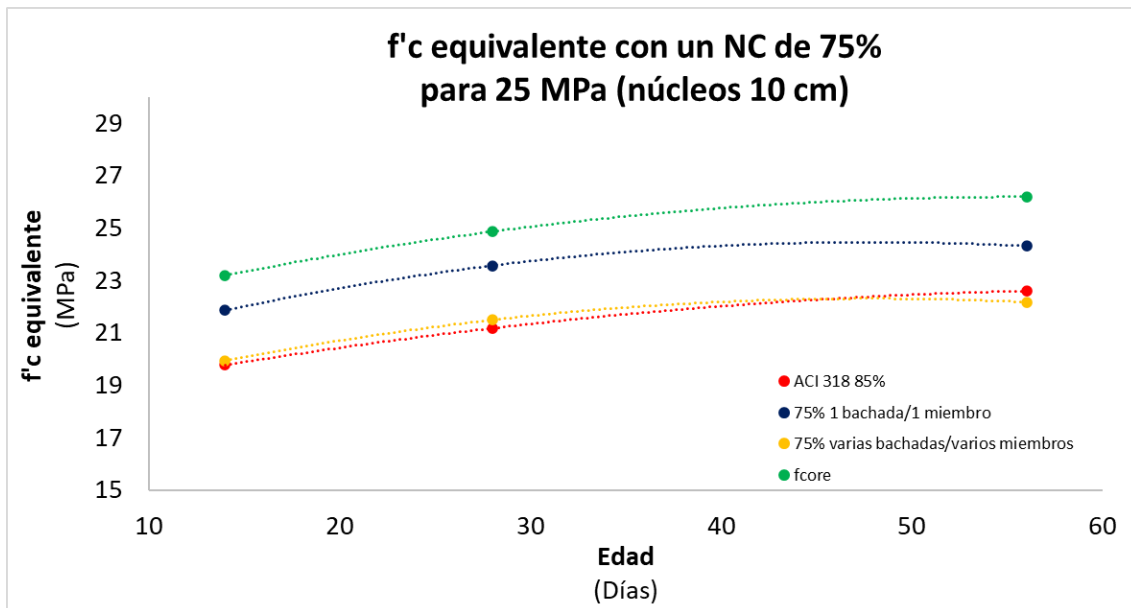
24 meses en el envase original cerrado.

Aditivo retardante y de control de permanencia de fluidez utilizado para fabricar concreto de f'c objetivo de 70 MPa.

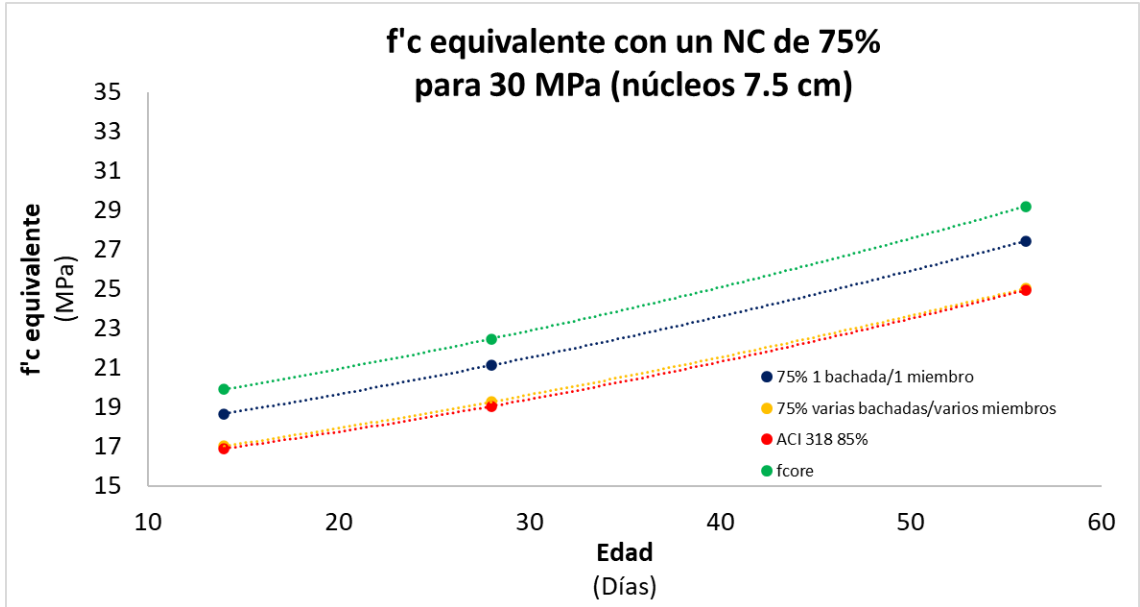
8.1.2. Apéndice II



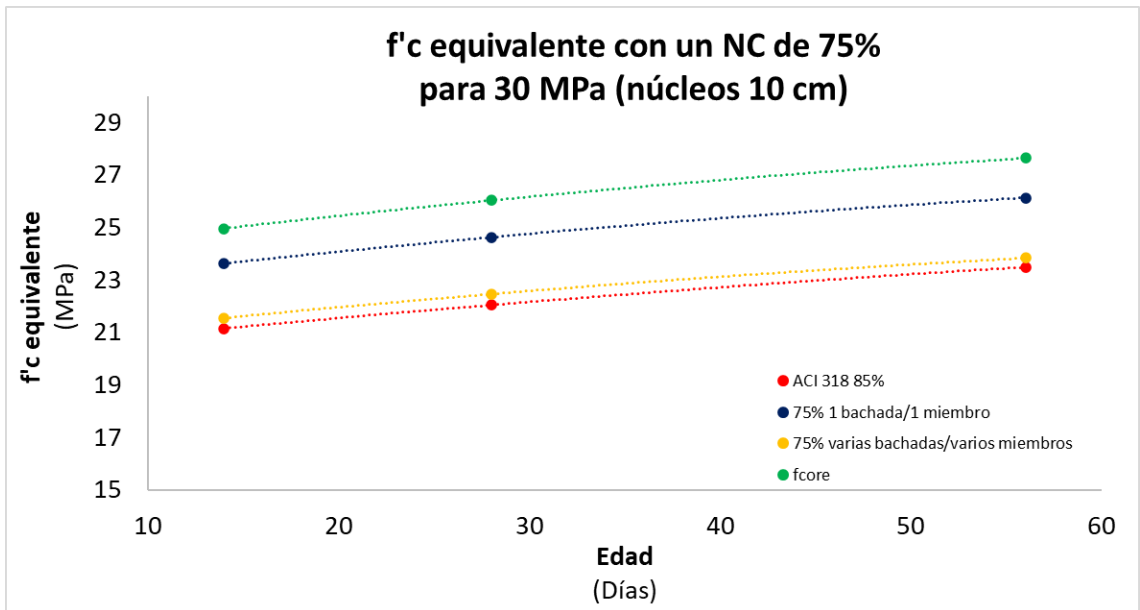
Comparativa de la resistencia a la compresión en núcleos de 7.5 cm y el f'c equivalente para un 25 MPa y un NC de 75%.



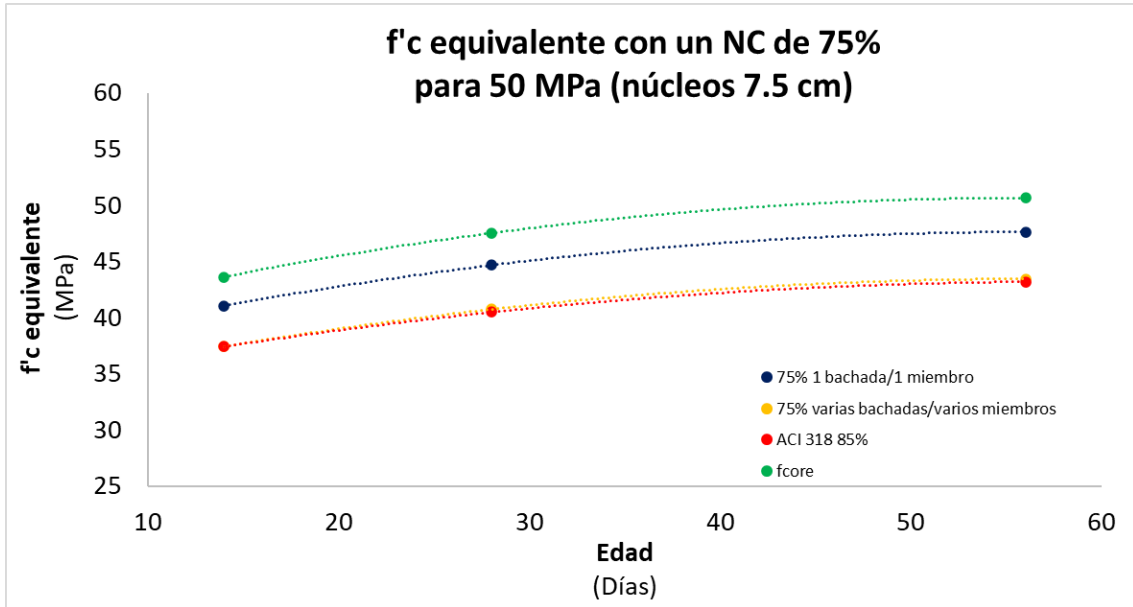
Comparativa de la resistencia a la compresión en núcleos de 10 cm y el f'c equivalente para un 25 MPa y un NC de 75%.



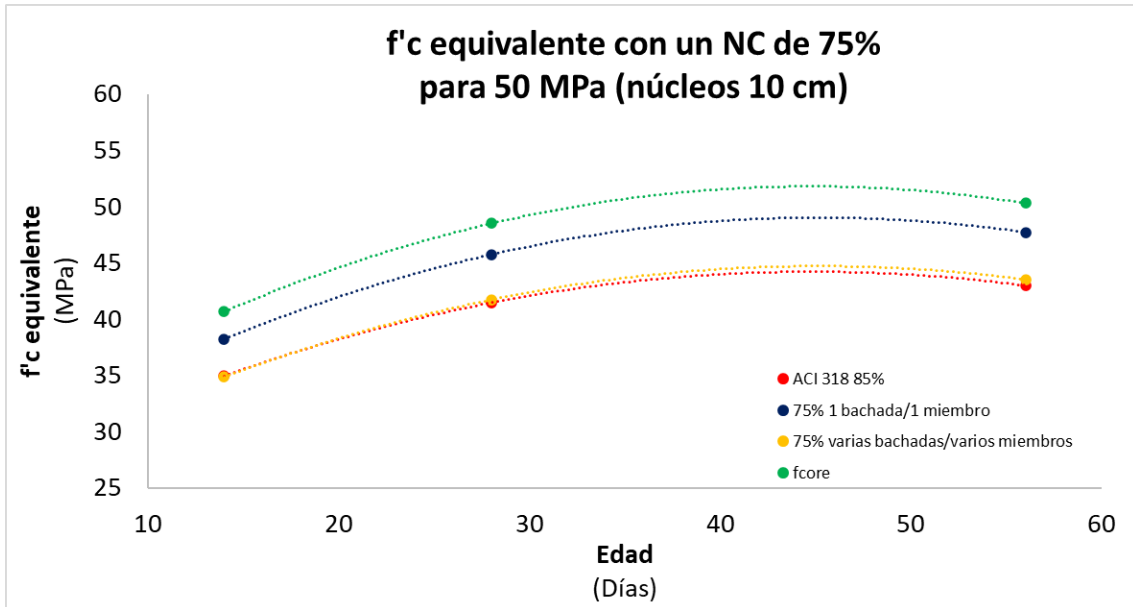
Comparativa de la resistencia a la compresión en núcleos de 7.5 cm y el f'c equivalente para un 30 MPa y un NC de 75%.



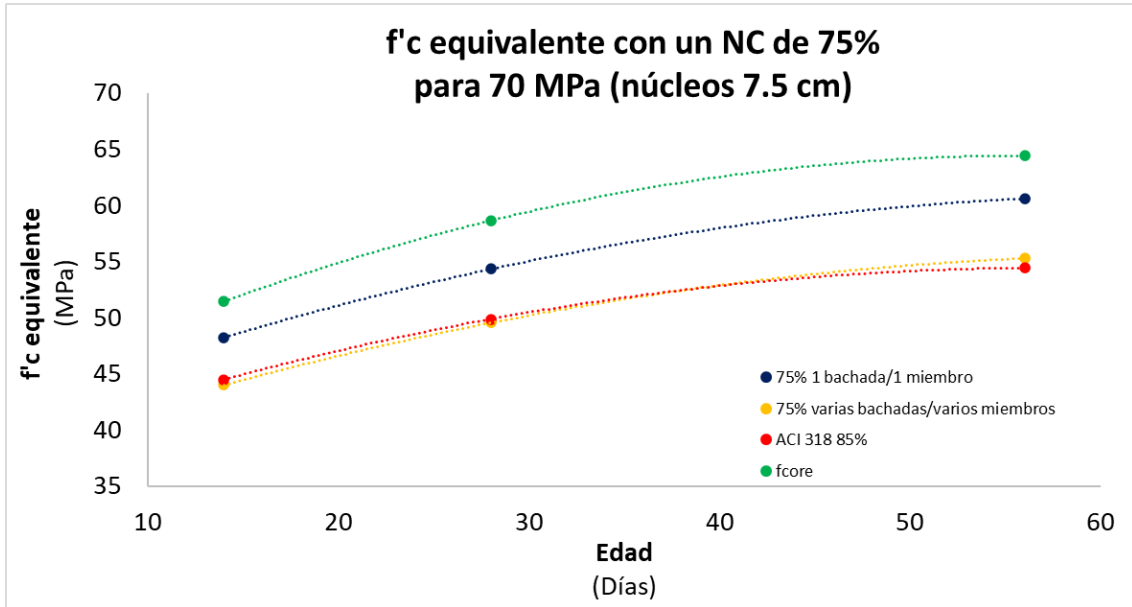
Comparativa de la resistencia a la compresión en núcleos de 10 cm y el f'c equivalente para un 30 MPa y un NC de 75%.



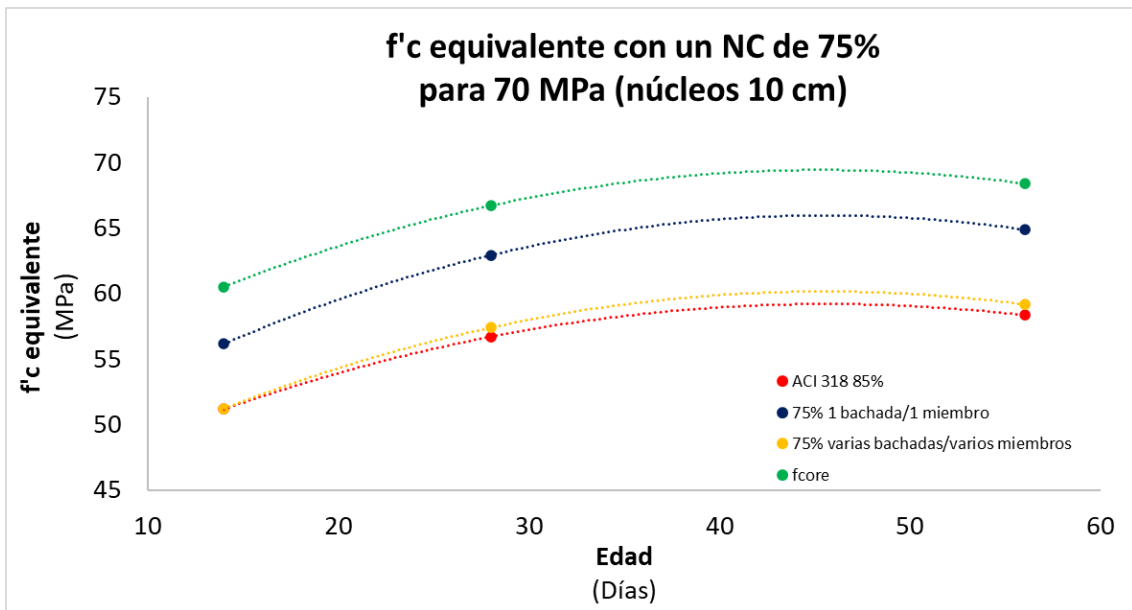
Comparativa de la resistencia a la compresión en núcleos de 7.5 cm y el f'c equivalente para un 50 MPa y un NC de 75%.



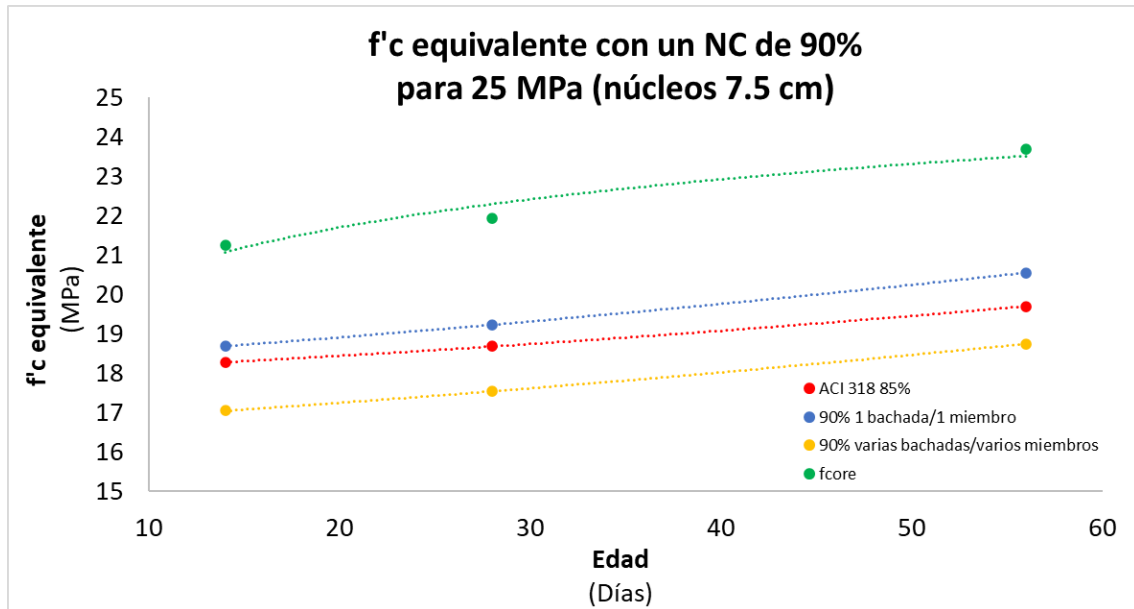
Comparativa de la resistencia a la compresión en núcleos de 10 cm y el f'_c equivalente para un 50 MPa y un NC de 75%.



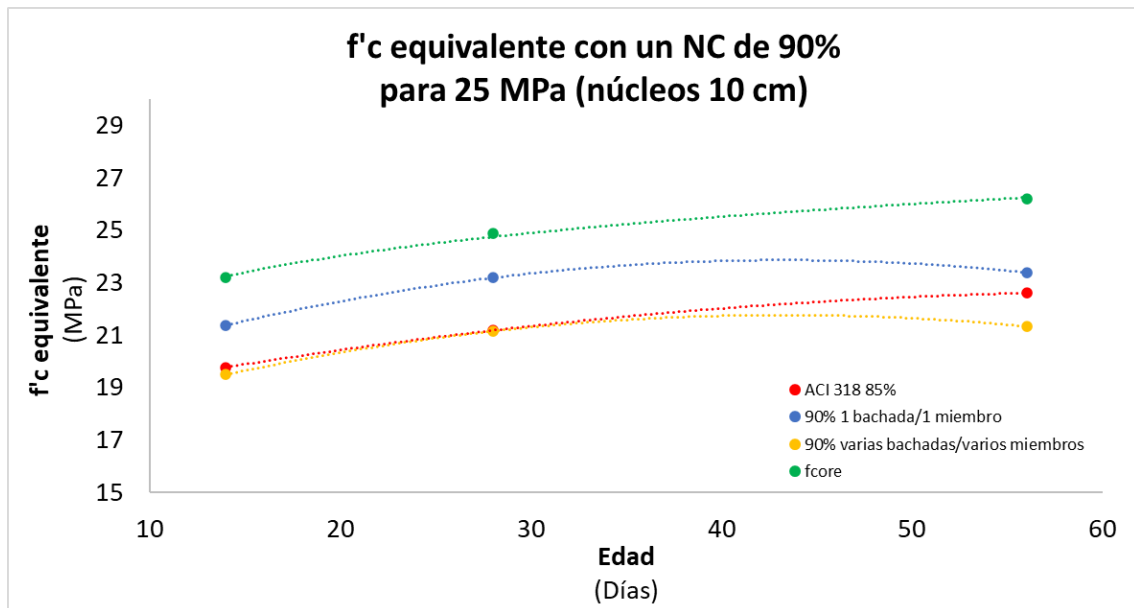
Comparativa de la resistencia a la compresión en núcleos de 7.5 cm y el f'_c equivalente para un 70 MPa y un NC de 75%



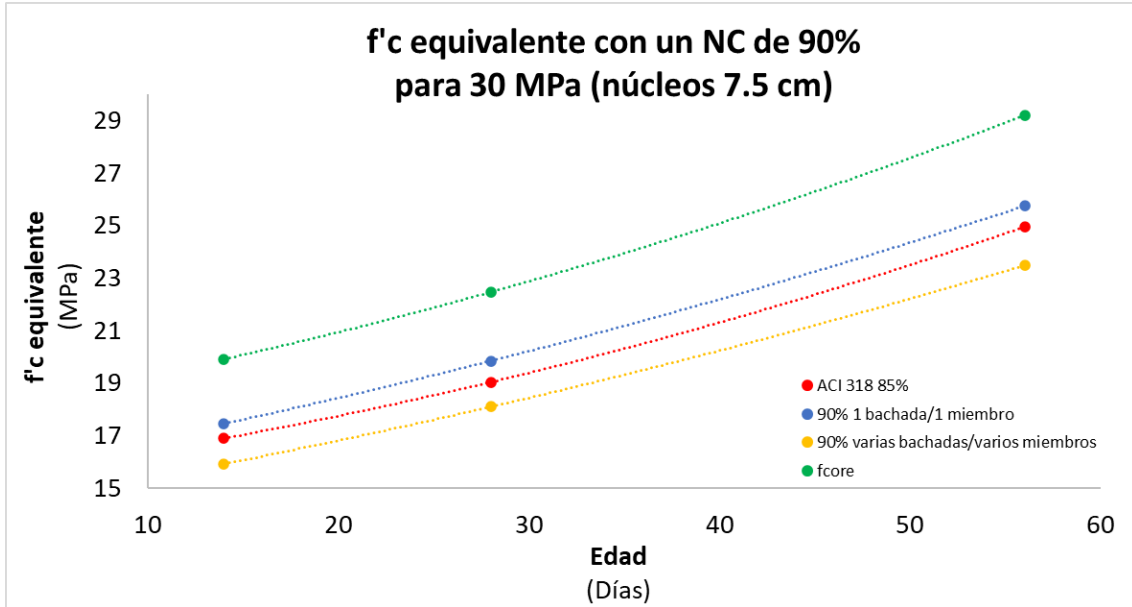
Comparativa de la resistencia a la compresión en núcleos de 10 cm y el f'_c equivalente para un 70 MPa y un NC de 75%.



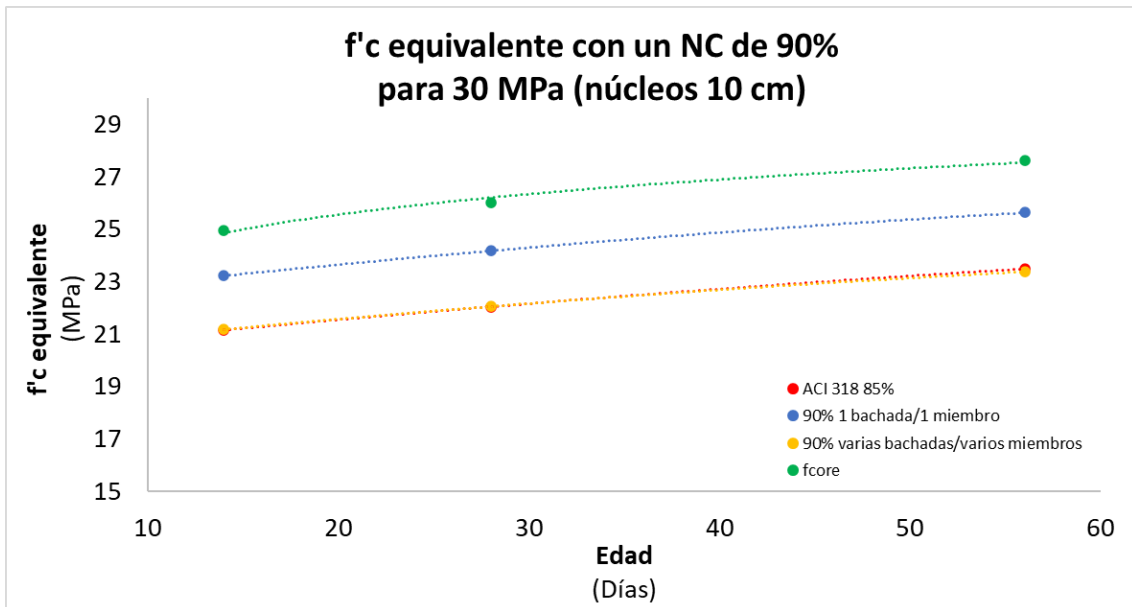
Comparativa de la resistencia a la compresión en núcleos de 7.5 cm y el f'c equivalente para un 25 MPa y un NC de 90%.



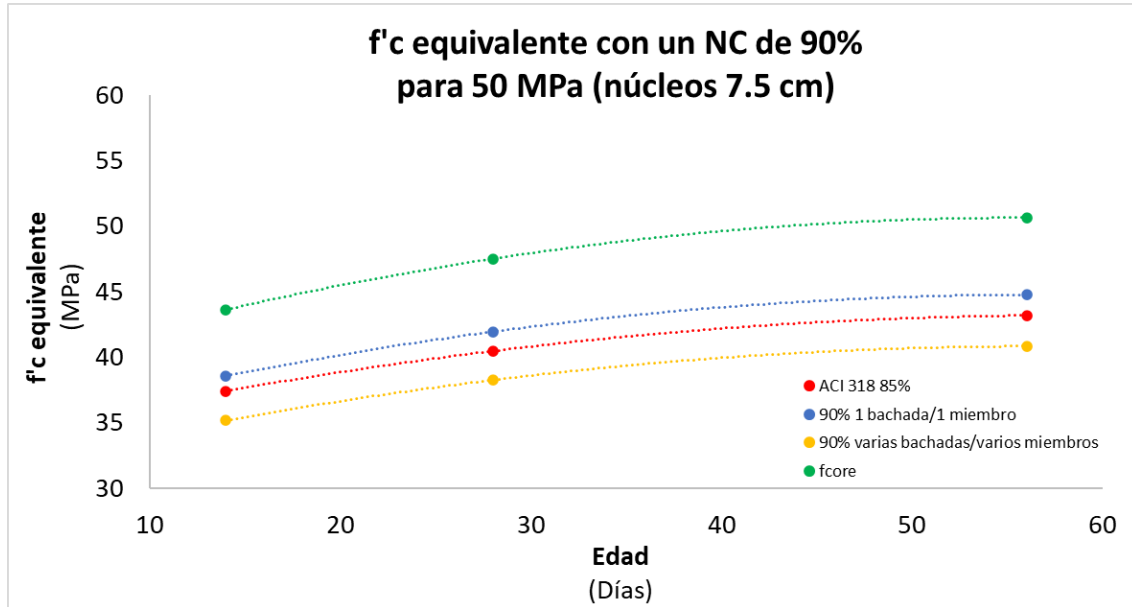
Comparativa de la resistencia a la compresión en núcleos de 10 cm y el f'_c equivalente para un 25 MPa y un NC de 90%.



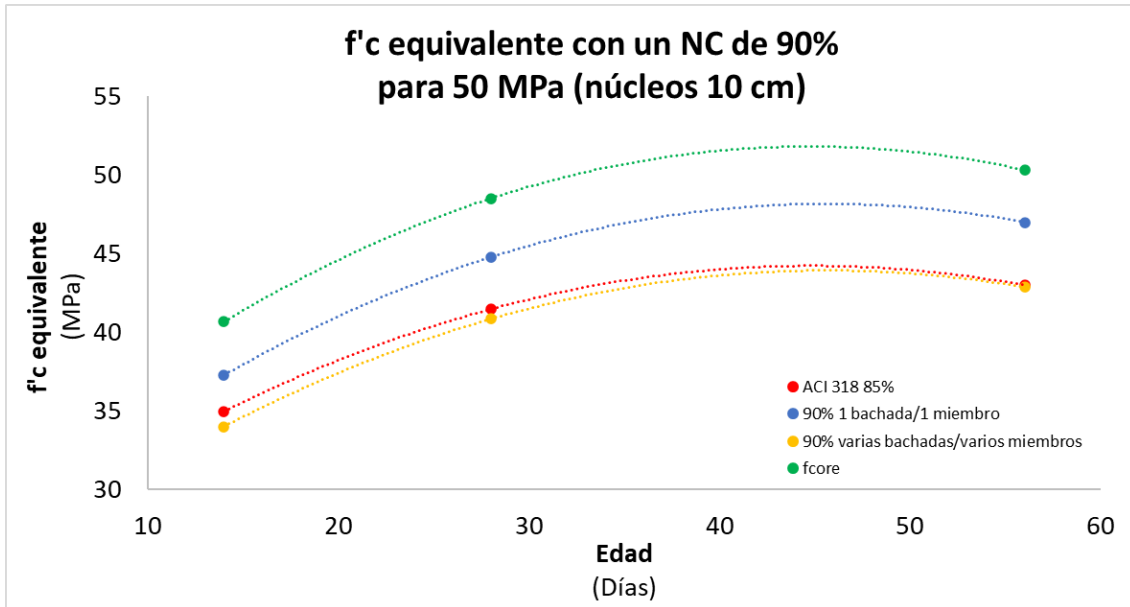
Comparativa de la resistencia a la compresión en núcleos de 7.5 cm y el f'_c equivalente para un 30 MPa y un NC de 90%.



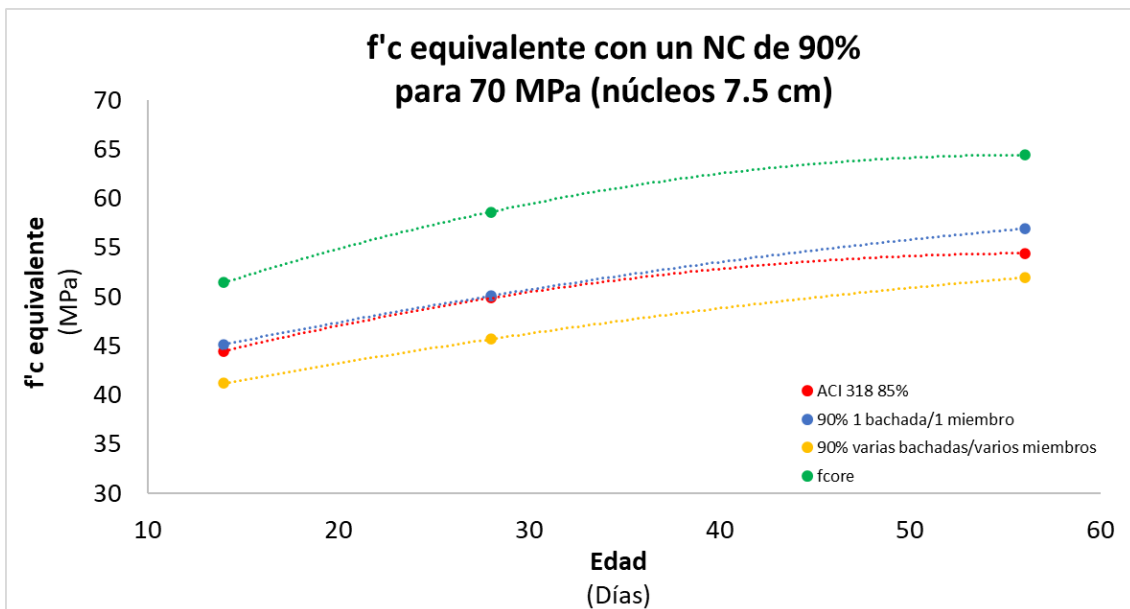
Comparativa de la resistencia a la compresión en núcleos de 7.5 cm y el f'_c equivalente para un 30 MPa y un NC de 90%.



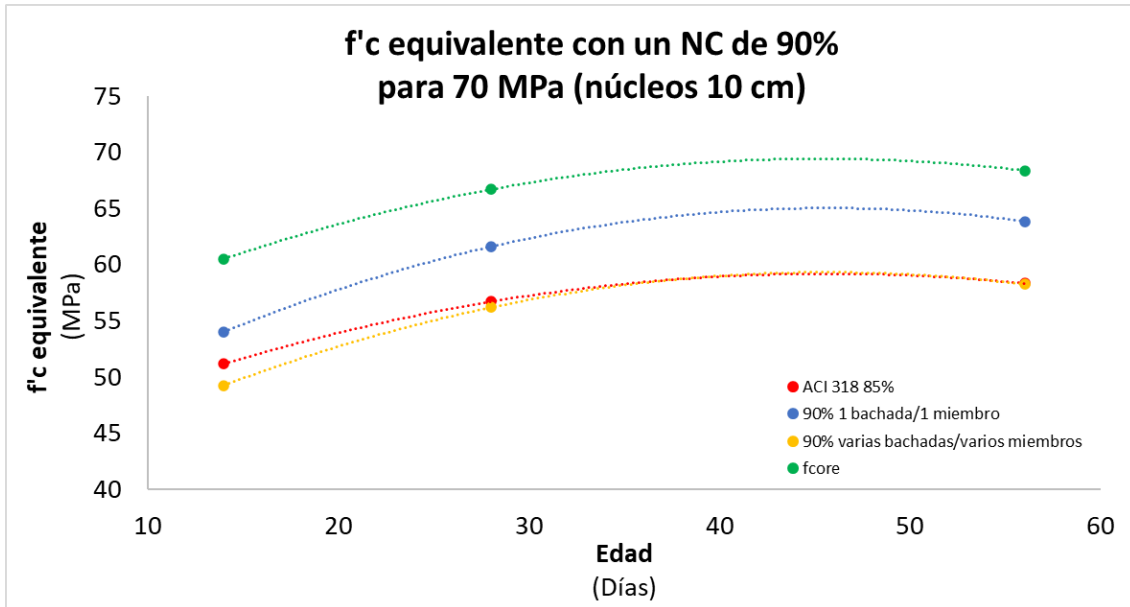
Comparativa de la resistencia a la compresión en núcleos de 7.5 cm y el f'_c equivalente para un 50 MPa y un NC de 90%.



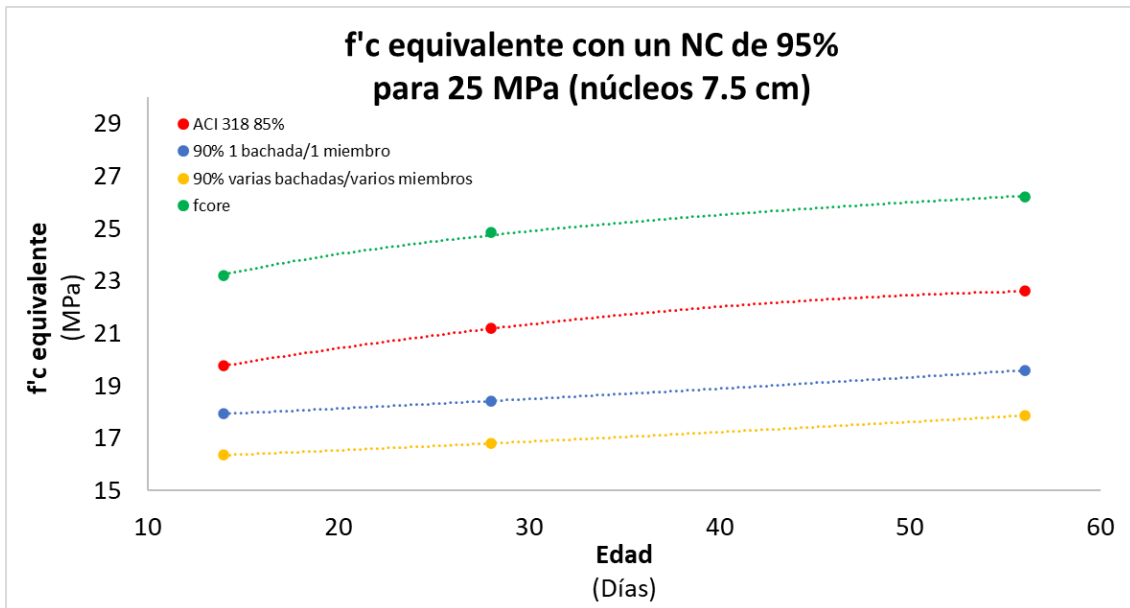
Comparativa de la resistencia a la compresión en núcleos de 10 cm y el f'c equivalente para un 50 MPa y un NC de 90%.



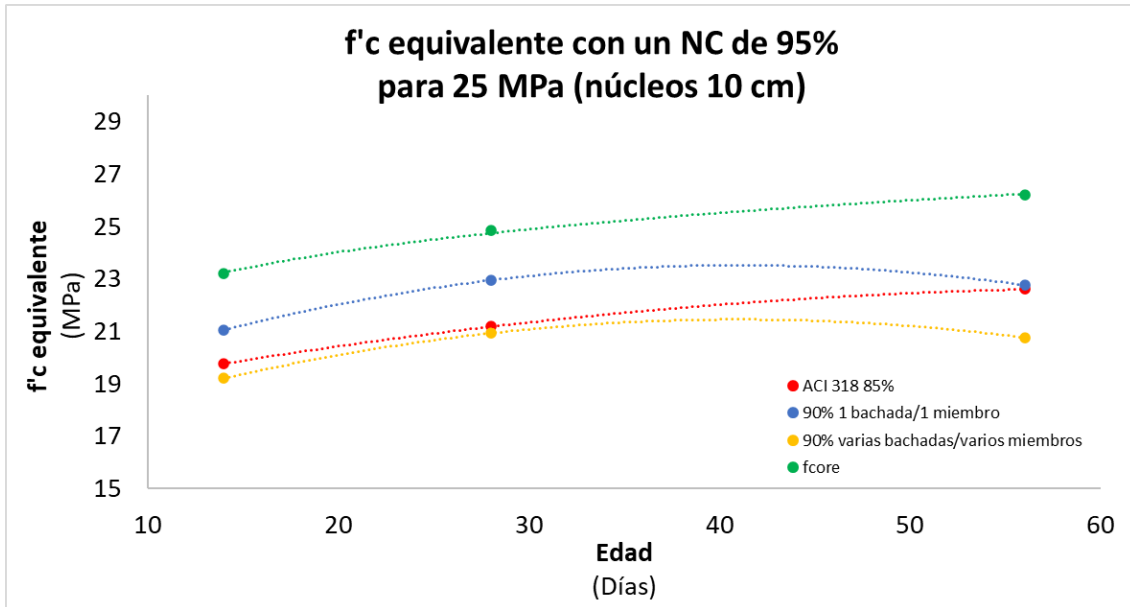
Comparativa de la resistencia a la compresión en núcleos de 7.5 cm y el f'c equivalente para un 70 MPa y un NC de 90%.



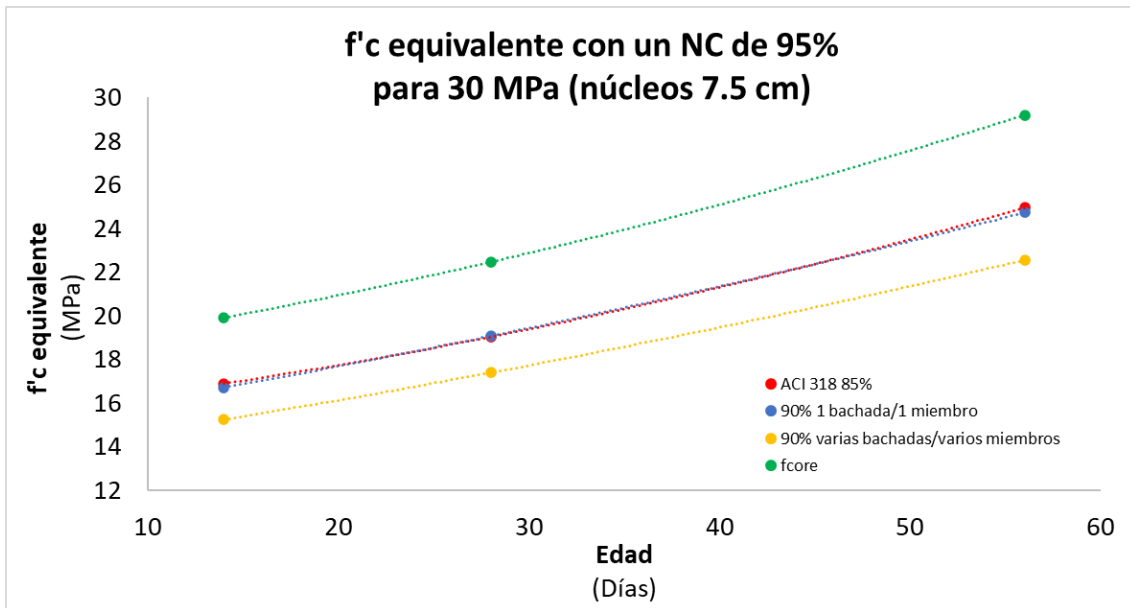
Comparativa de la resistencia a la compresión en núcleos de 10 cm y el f'c equivalente para un 70 MPa y un NC de 90%.



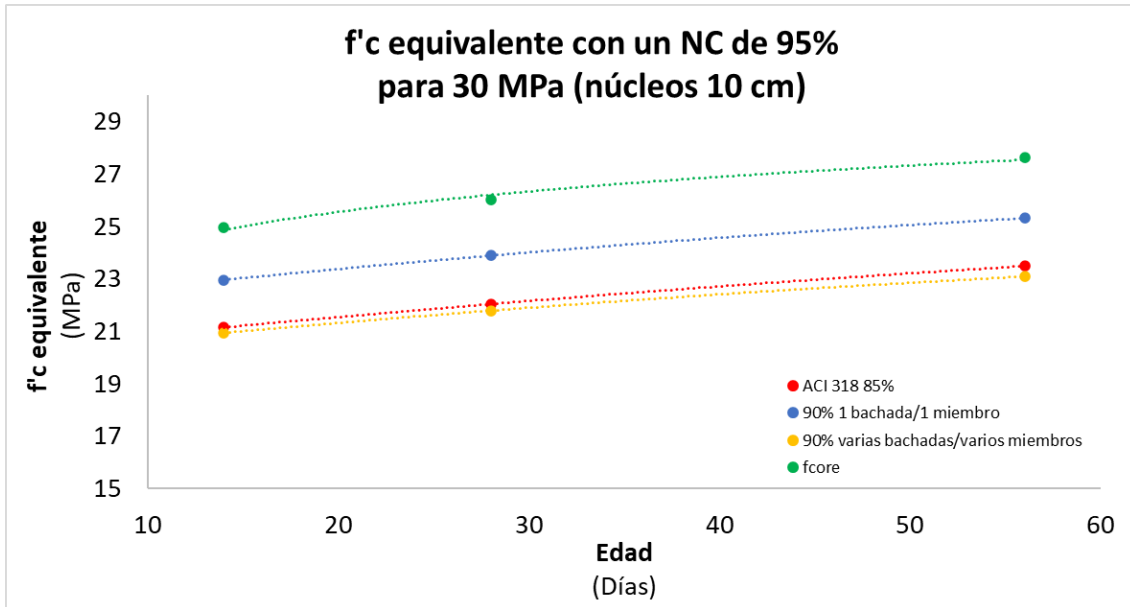
Comparativa de la resistencia a la compresión en núcleos de 7.5 cm y el f'c equivalente para un 25 MPa y un NC de 95%.



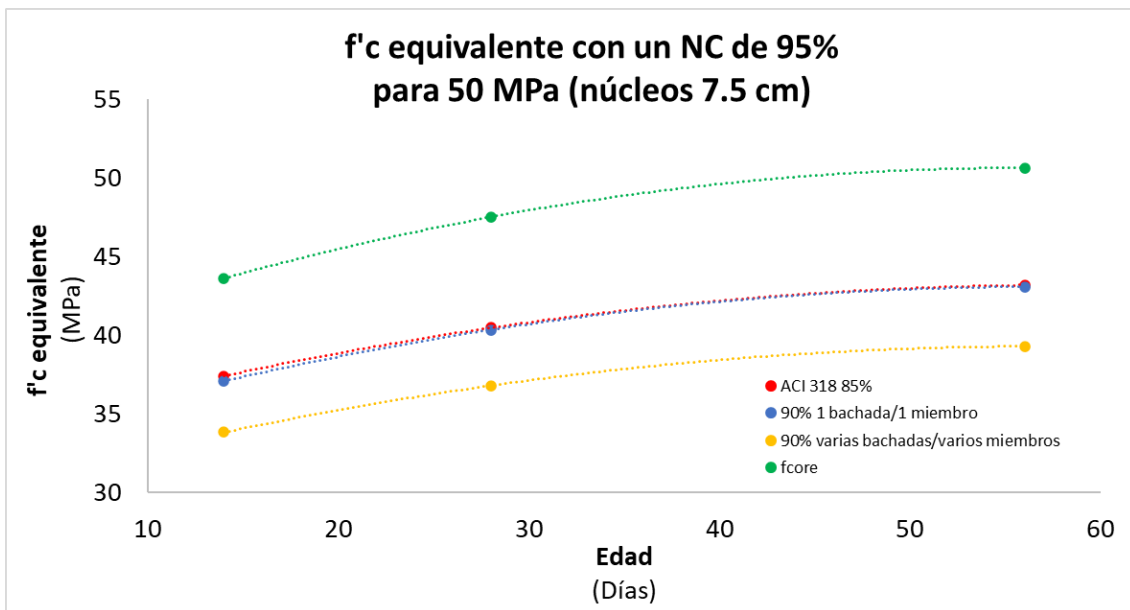
Comparativa de la resistencia a la compresión en núcleos de 10 cm y el f'c equivalente para un 25 MPa y un NC de 95%.



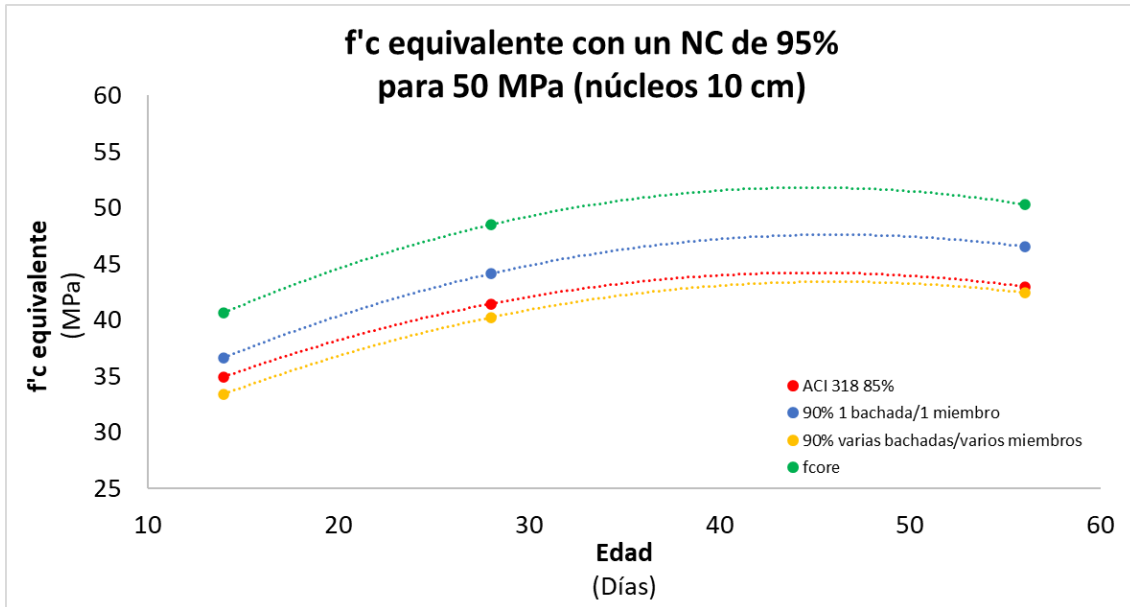
Comparativa de la resistencia a la compresión en núcleos de 7.5 cm y el f'c equivalente para un 30 MPa y un NC de 95%.



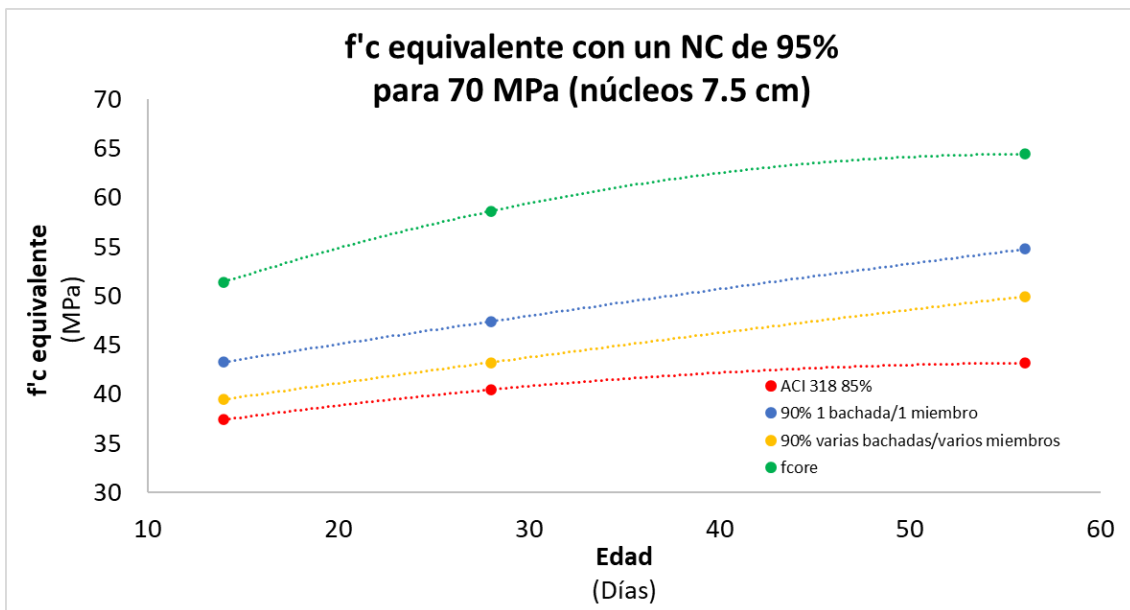
Comparativa de la resistencia a la compresión en núcleos de 10 cm y el f'c equivalente para un 30 MPa y un NC de 95%.



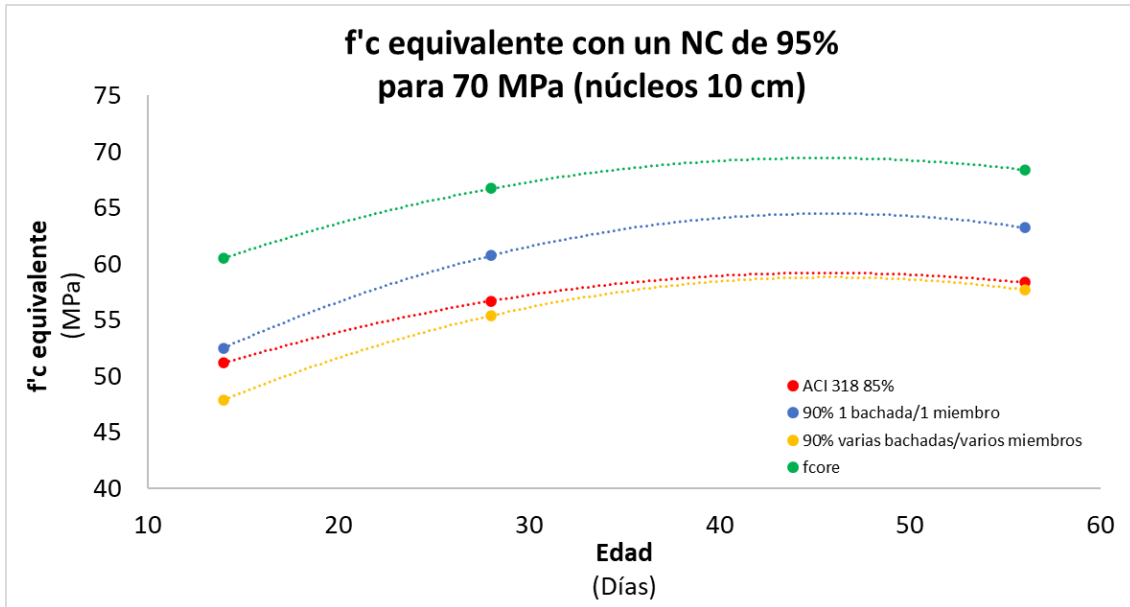
Comparativa de la resistencia a la compresión en núcleos de 7.5 cm y el f'c equivalente para un 50 MPa y un NC de 95%.



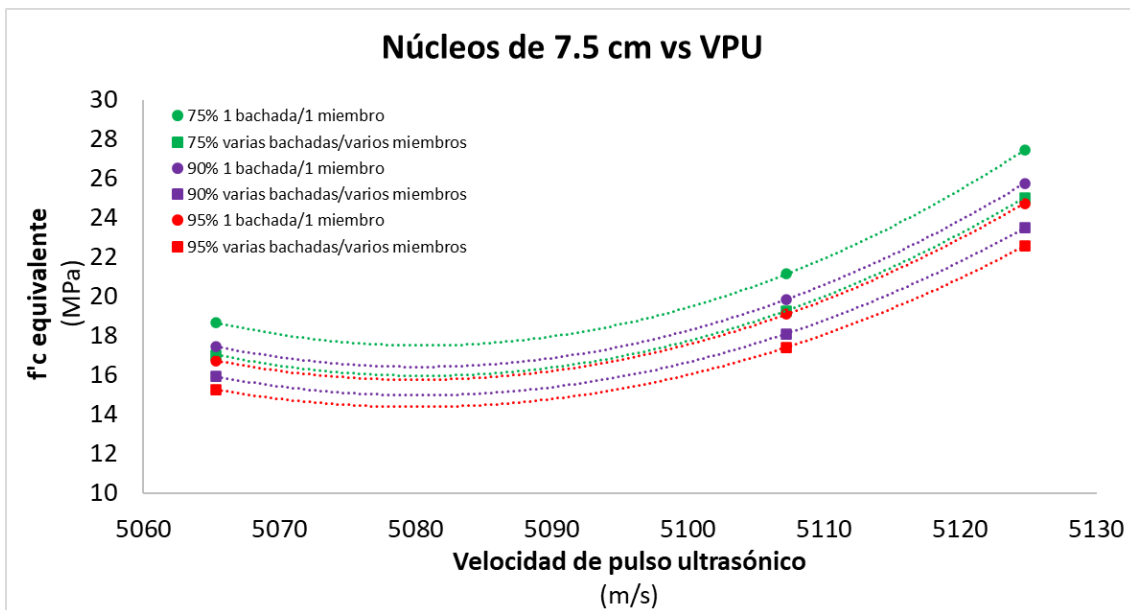
Comparativa de la resistencia a la compresión en núcleos de 10 cm y el f'c equivalente para un 50 MPa y un NC de 95%.



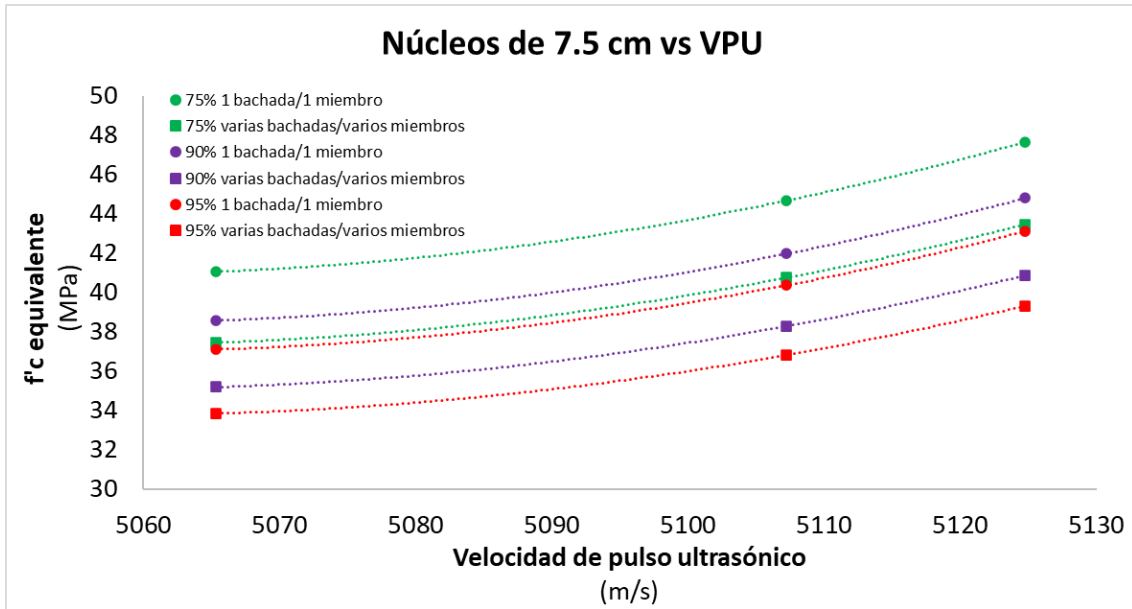
Comparativa de la resistencia a la compresión en núcleos de 7.5 cm y el f'c equivalente para un 70 MPa y un NC de 95%.



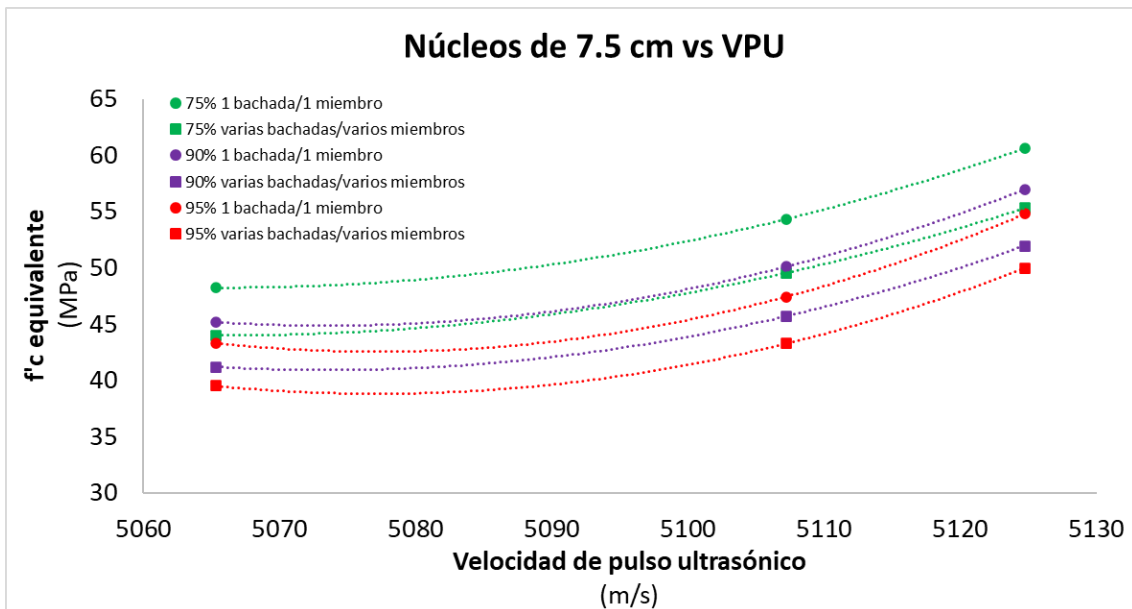
Comparativa de la resistencia a la compresión en núcleos de 10 cm y el f'c equivalente para un 70 MPa y un NC de 95%.



Correlación entre el f'c equivalente en núcleos de concreto de 7.5 cm a través del método alternativo ACI 214.4-21 contra VPU para 30 MPa.

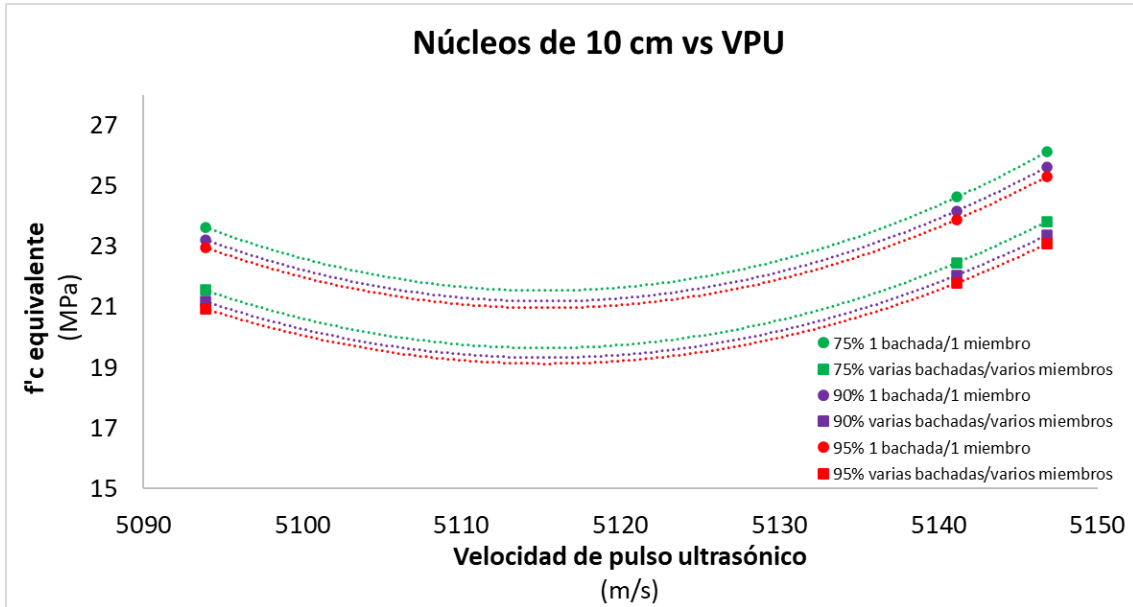


Correlación entre el $f'c$ equivalente en núcleos de concreto de 7.5 cm a través del método alternativo ACI 214.4-21 contra VPU para 50 MPa.

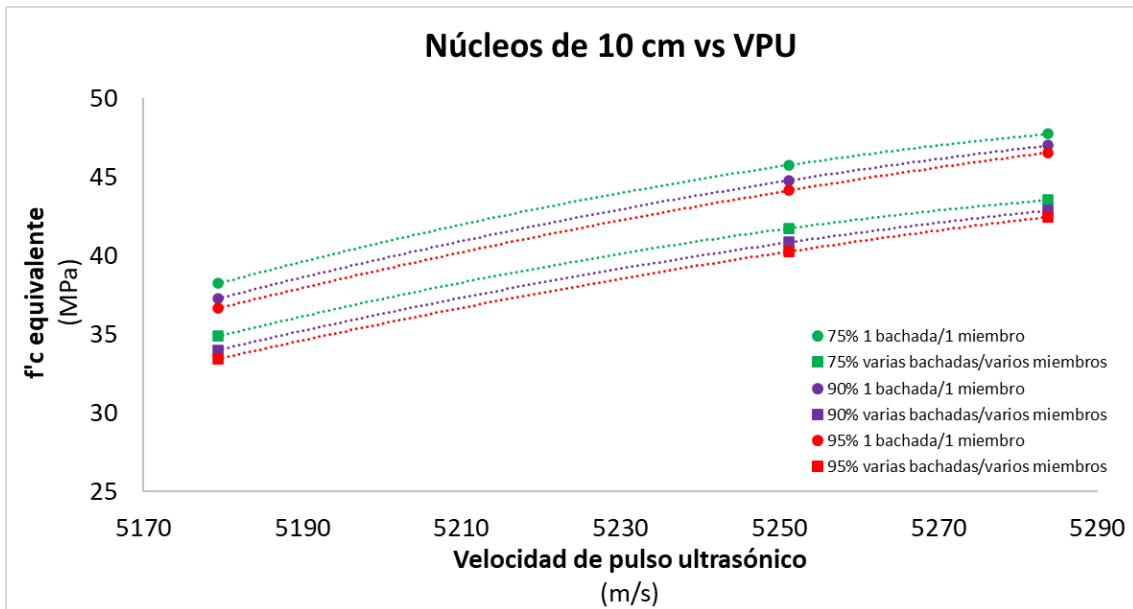


Correlación entre el $f'c$ equivalente en núcleos de concreto de 7.5 cm a través del método alternativo ACI 214.4-21 contra VPU para 70 MPa.

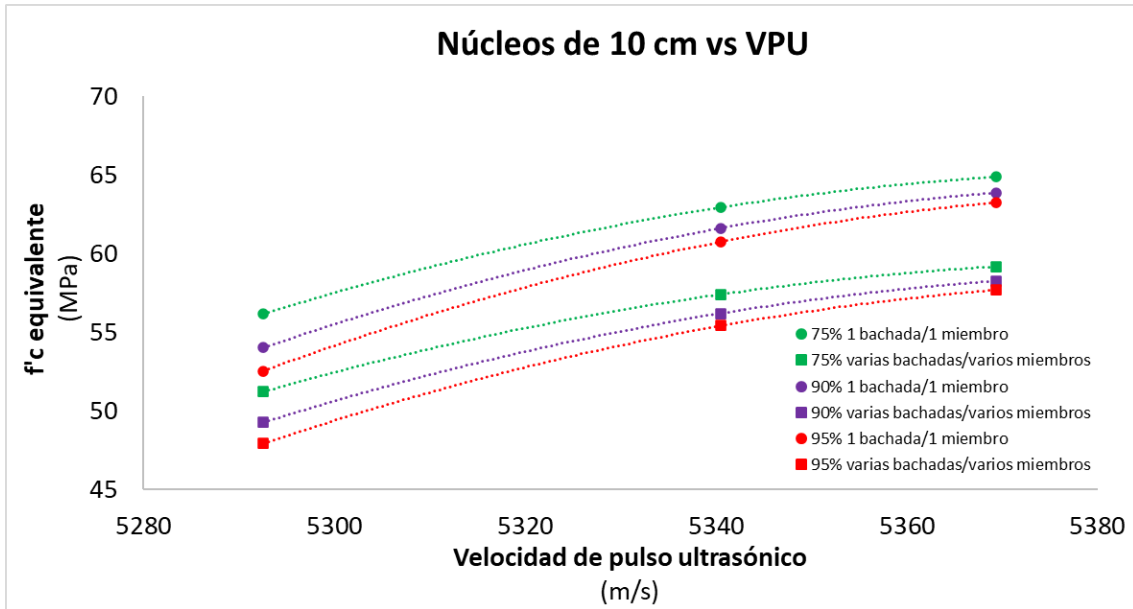
Correlación entre el f'_c equivalente en núcleos de concreto de 7.5 cm a través del método alternativo ACI 214.4-21 contra VPU para 70 MPa.



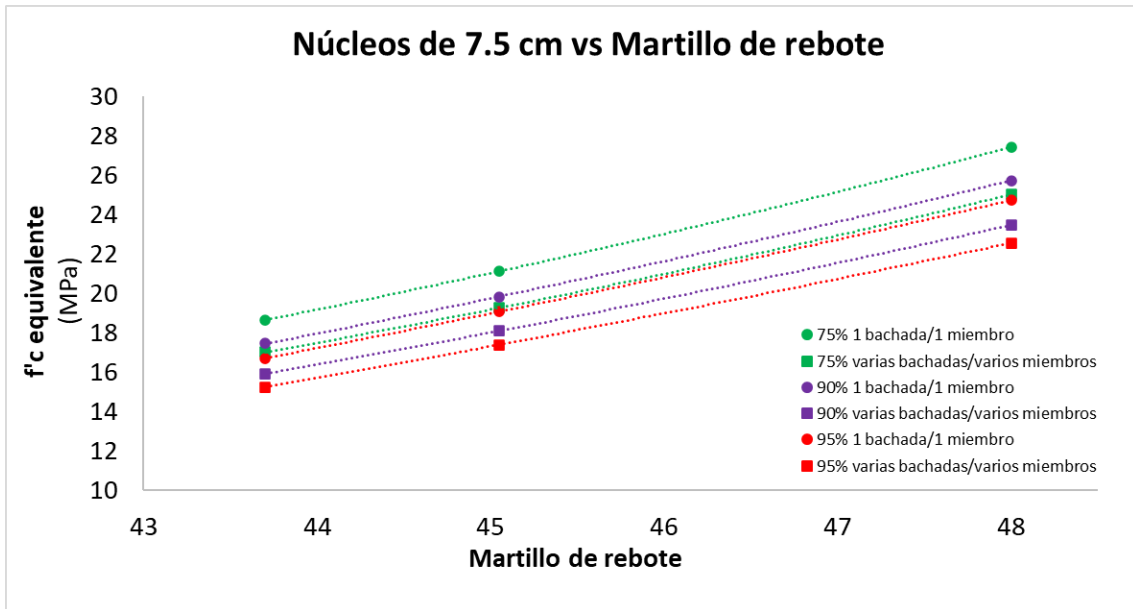
Correlación entre el f'_c equivalente en núcleos de concreto de 10 cm a través del método alternativo ACI 214.4-21 contra VPU para 30 MPa.



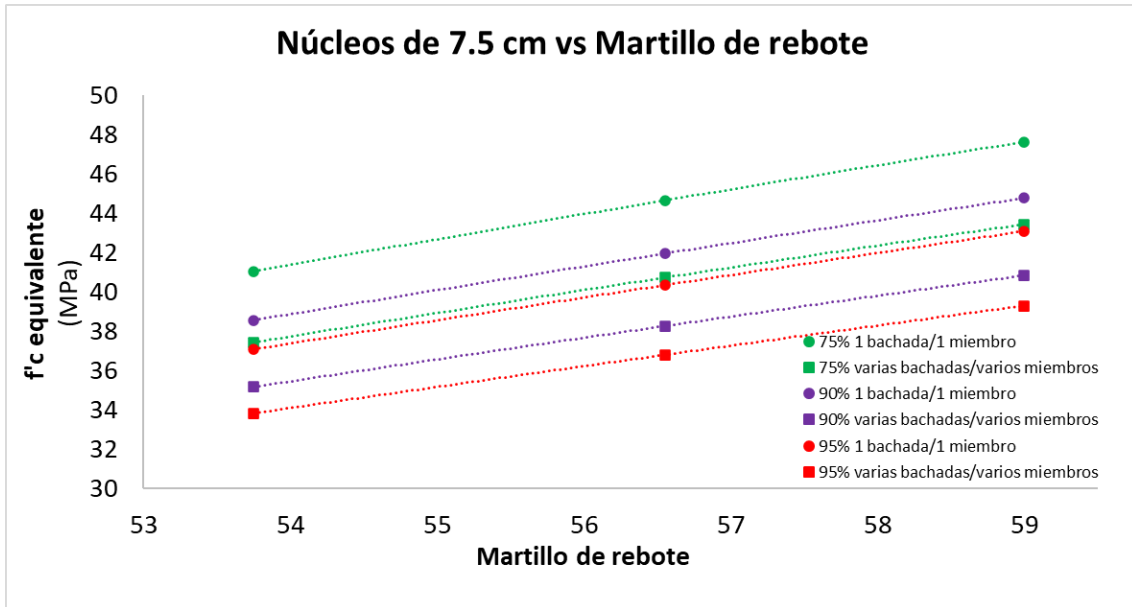
Correlación entre el f'_c equivalente en núcleos de concreto de 10 cm a través del método alternativo ACI 214.4-21 contra VPU para 50 MPa.



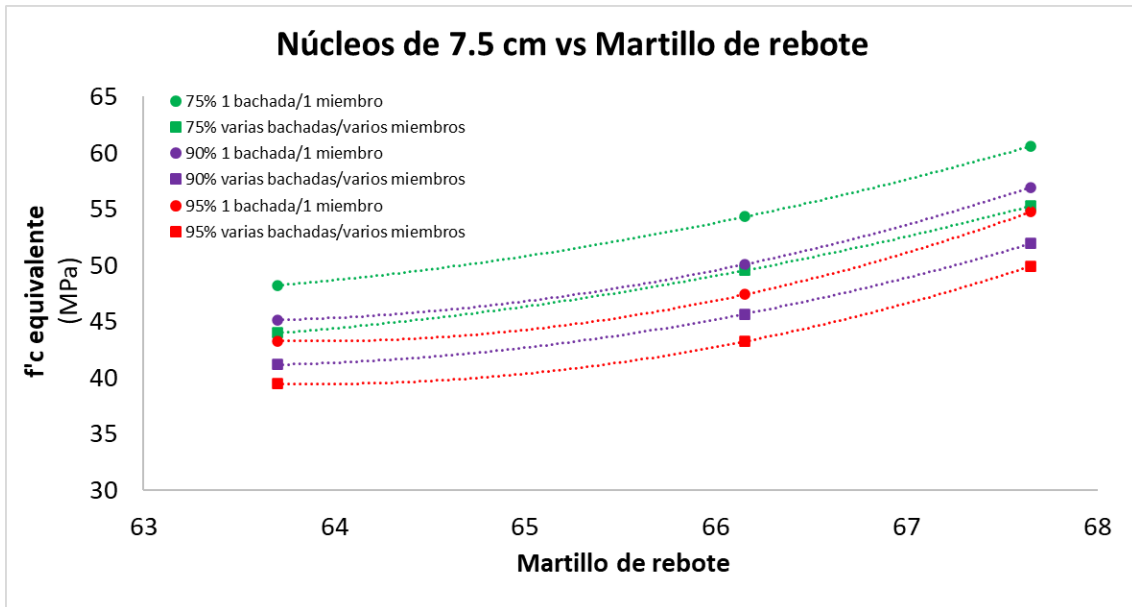
Correlación entre el $f'c$ equivalente en núcleos de concreto de 10 cm a través del método alternativo ACI 214.4-21 contra VPU para 70 MPa.



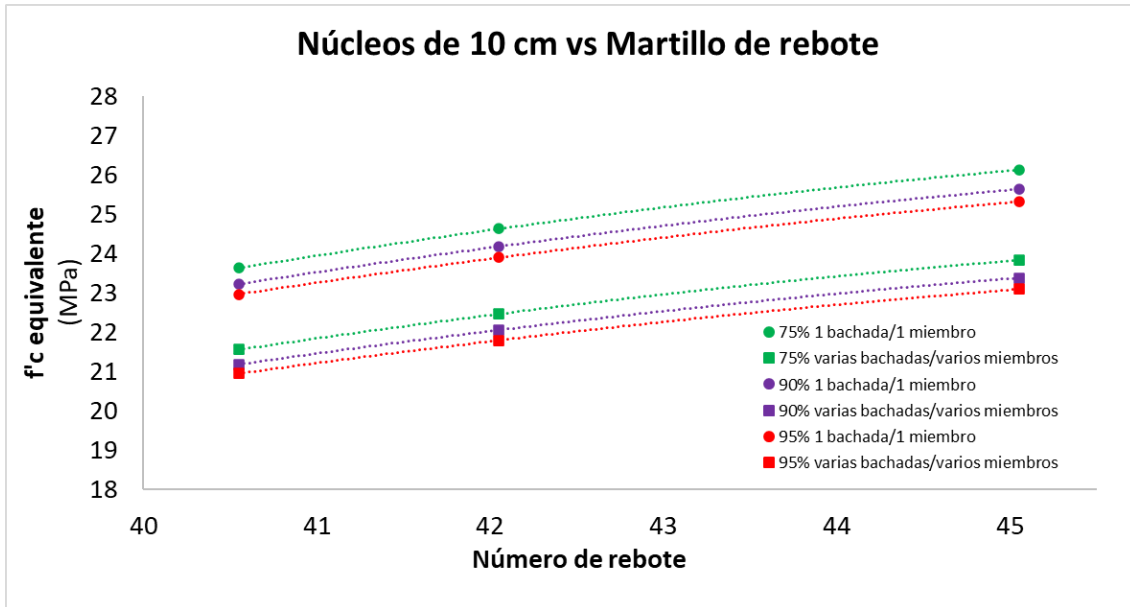
Correlación entre el $f'c$ equivalente en núcleos de concreto de 7.5 cm a través del método alternativo ACI 214.4-21 contra martillo de rebote para 30 MPa.



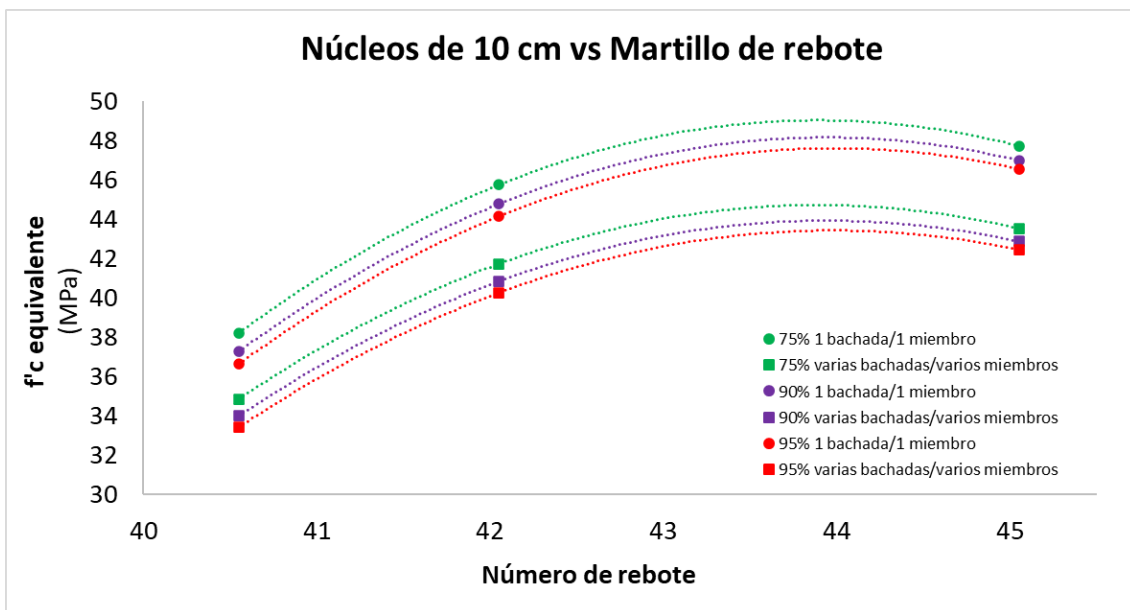
Correlación entre el $f'c$ equivalente en núcleos de concreto de 7.5 cm a través del método alternativo ACI 214.4-21 contra martillo de rebote para 50 MPa.



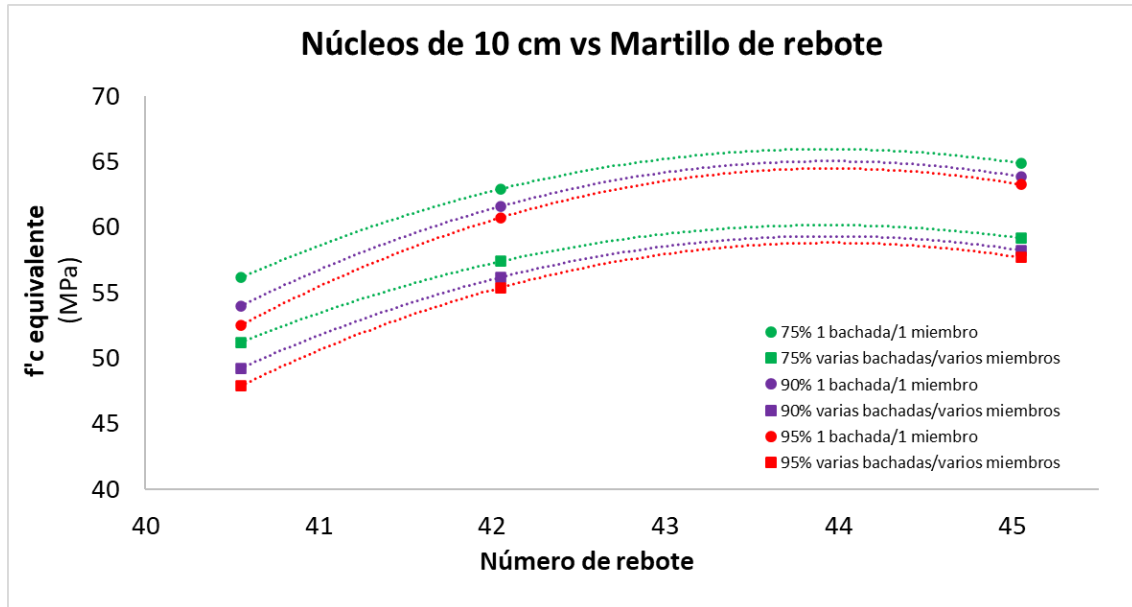
Correlación entre el $f'c$ equivalente en núcleos de concreto de 7.5 cm a través del método alternativo ACI 214.4-21 contra martillo de rebote para 70 MPa.



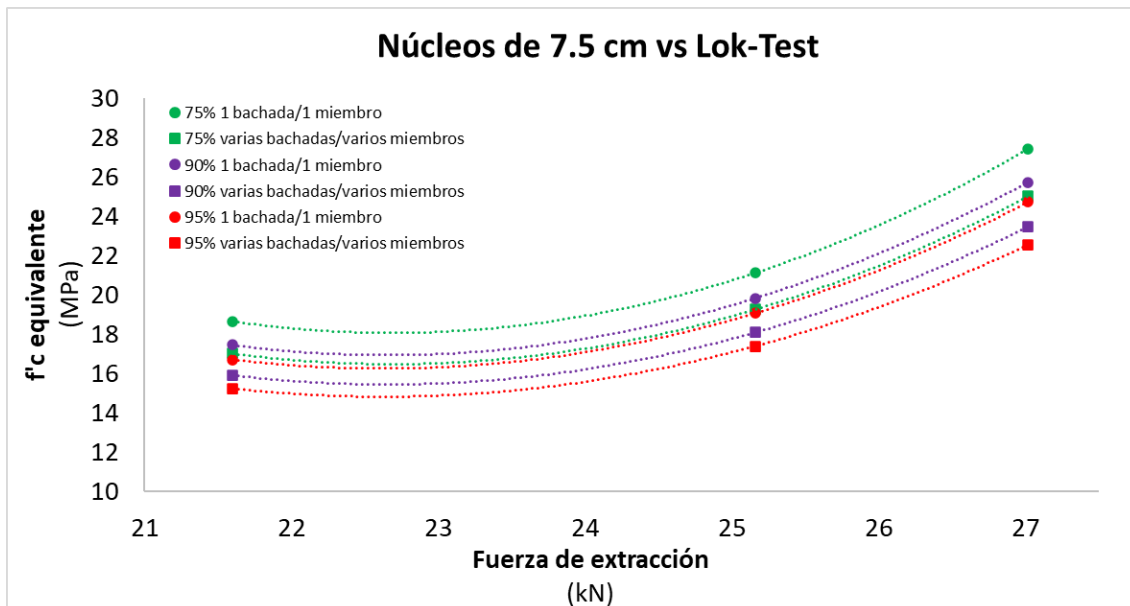
Correlación entre el $f'c$ equivalente en núcleos de concreto de 10 cm a través del método alternativo ACI 214.4-21 contra martillo de rebote para 30 MPa.



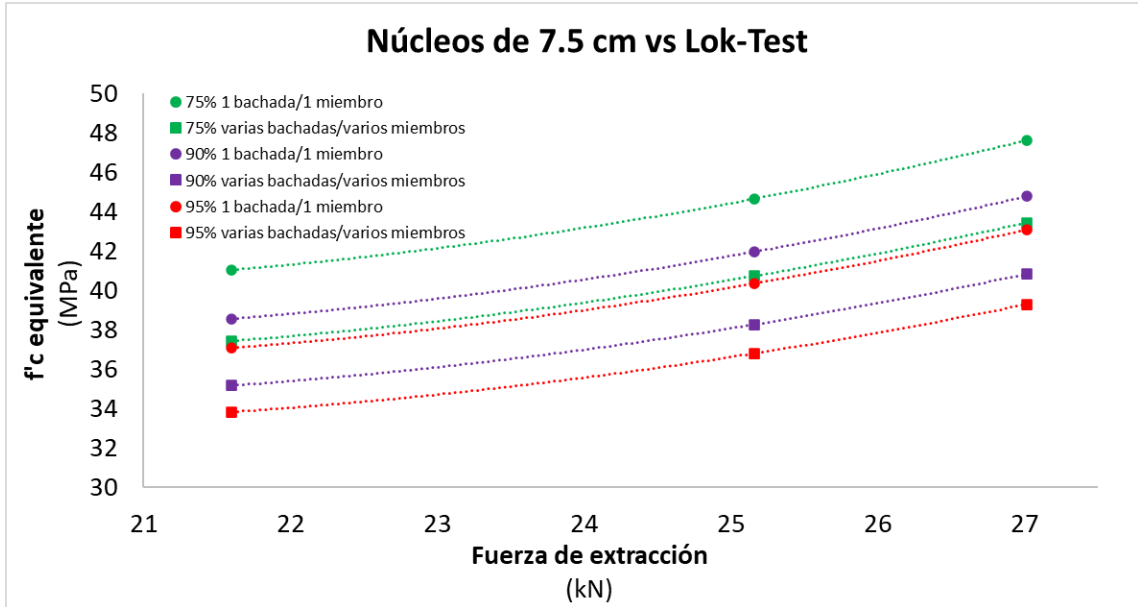
Correlación entre el $f'c$ equivalente en núcleos de concreto de 10 cm a través del método alternativo ACI 214.4-21 contra martillo de rebote para 50 MPa.



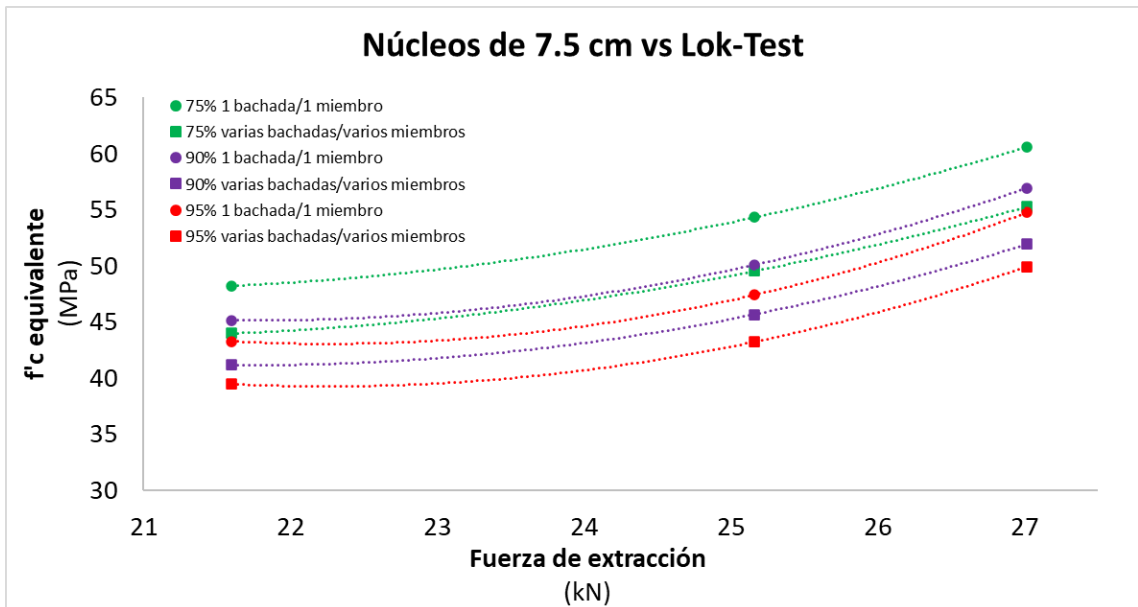
Correlación entre el $f'c$ equivalente en núcleos de concreto de 10 cm a través del método alternativo ACI 214.4-21 contra martillo de rebote para 70 MPa.



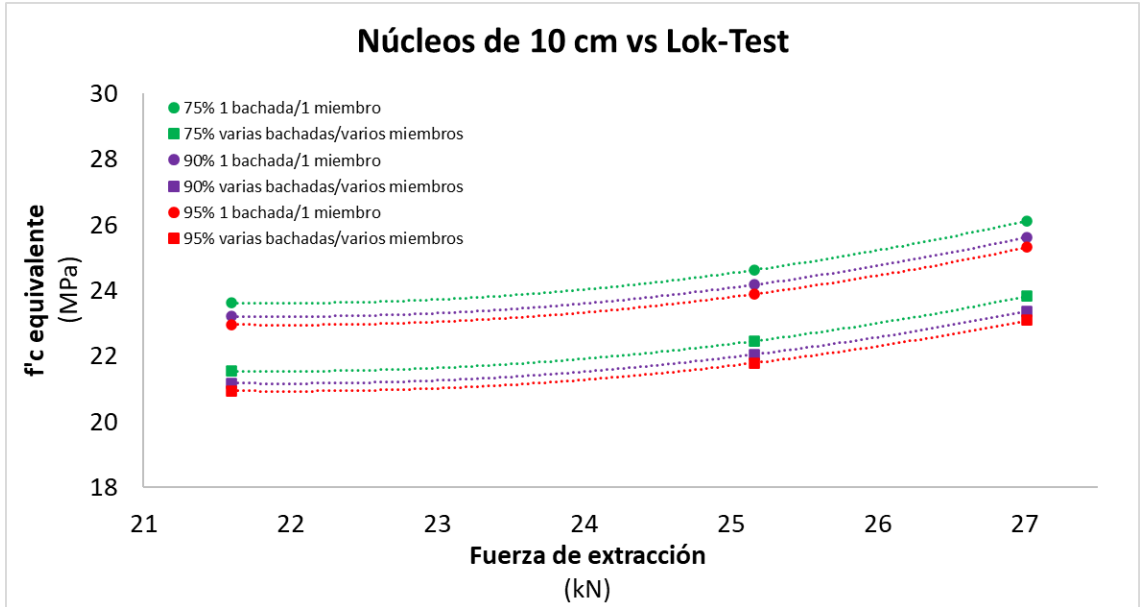
Correlación entre el $f'c$ equivalente en núcleos de concreto de 7.5 cm a través del método alternativo ACI 214.4-21 contra Lok-Test para 30 MPa.



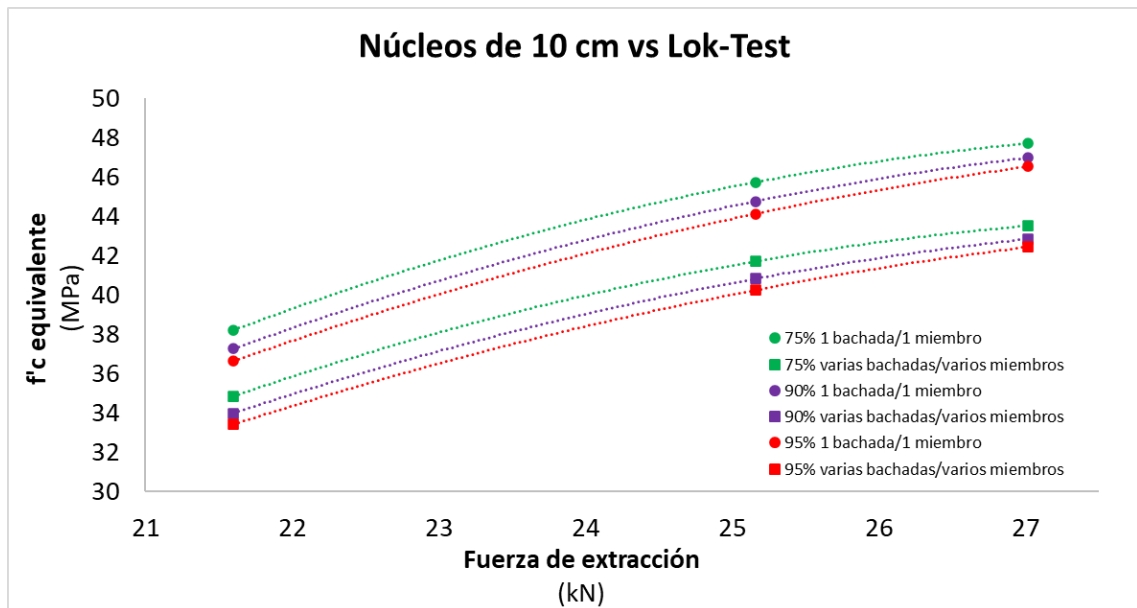
Correlación entre el $f'c$ equivalente en núcleos de concreto de 7.5 cm a través del método alternativo ACI 214.4-21 contra Lok-Test para 50 MPa.



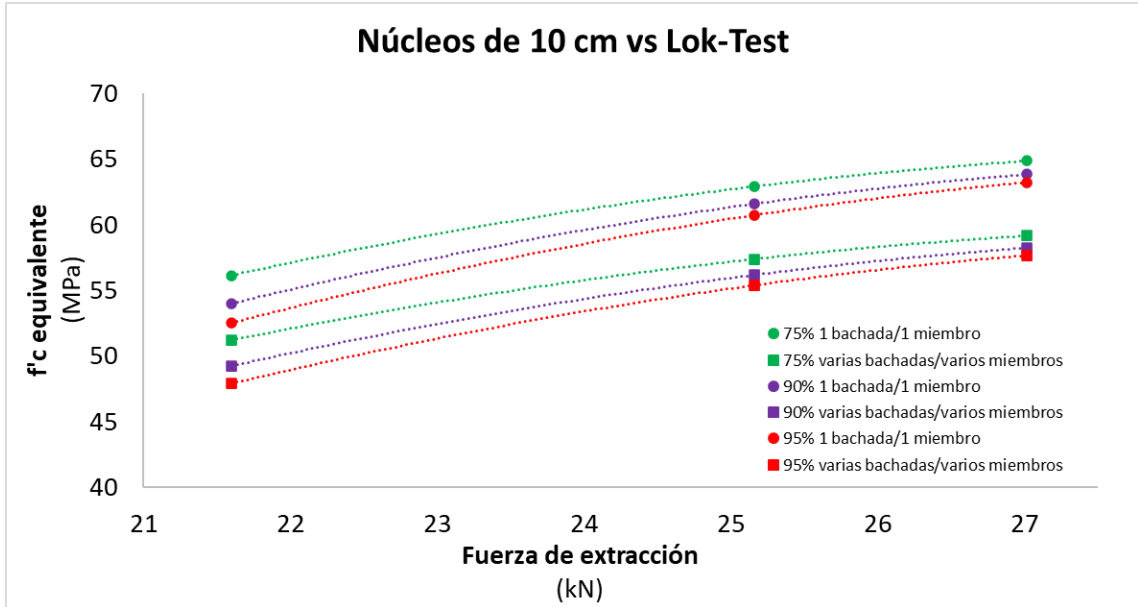
Correlación entre el $f'c$ equivalente en núcleos de concreto de 7.5 cm a través del método alternativo ACI 214.4-21 contra Lok-Test para 70 MPa.



Correlación entre el $f'c$ equivalente en núcleos de concreto de 10 cm a través del método alternativo ACI 214.4-21 contra Lok-Test para 30 MPa.



Correlación entre el $f'c$ equivalente en núcleos de concreto de 10 cm a través del método alternativo ACI 214.4-21 contra Lok-Test para 50 MPa.



Correlación entre el $f'c$ equivalente en núcleos de concreto de 10 cm a través del método alternativo ACI 214.4-21 contra Lok-Test para 70 MPa.