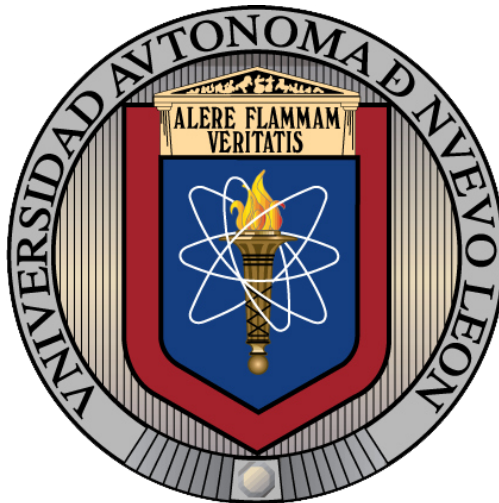


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



**ROBUSTEZ DE UN CONCRETO AUTOCOMPACTABLE
PRODUCIDO CON MATERIALES DISPONIBLES EN LA REGIÓN
DE MONTERREY, NUEVO LEÓN**

POR:
DANIEL GÁLVEZ MORENO

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

NOVIEMBRE 2015

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



Robustez de un concreto autocompactable producido con materiales disponibles en la región de Monterrey, Nuevo León

Por:

Daniel Gálvez Moreno

Director de tesis:

Dr. Alejandro Durán Herrera
Universidad Autónoma de Nuevo León

Co-Director de tesis:

Dr. Javier Rodrigo González López
Universidad Autónoma de Nuevo León

Asesor externo:

Dr. Kamal H. Khayat
Missouri University of Science and Technology

Como requisito parcial para obtener el grado de Maestría en Ciencias con Orientación
en Materiales de Construcción.

Noviembre 2015



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FIC



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
INSTITUTO DE INGENIERÍA CIVIL

DR. CÉSAR ANTONIO JUÁREZ ALVARADO
SUBDIRECTOR DE ESTUDIOS DE POSGRADO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL UANL.
Presente.-

Estimado Dr. Juárez Alvarado:

Por este medio le comunico que el **Ing. Daniel Gálvez Moreno**, pasante de la Maestría en Ciencias con Orientación en Materiales de Construcción, ha concluido satisfactoriamente su trabajo de tesis denominada **“Robustez de un concreto autocompactable producido con materiales disponibles en la región de monterrey, N.L.”**, por lo que no tengo inconveniente en solicitarle que amablemente gire las instrucciones para dar paso a los trámites correspondientes y atender la solicitud del Examen de Grado del Ing. Gálvez Moreno para cumplir con los requisitos que exige el Reglamento de Exámenes Profesionales de nuestra institución.

Agradeciendo de antemano la atención brindada a la presente, me despido quedando a sus órdenes.

ATENTAMENTE,
“Alere Flammam Veritatis”
Ciudad universitaria, 27 de octubre de 2015

DR. ALEJANDRO DURÁN HERRERA
DIRECTOR DE TESIS

C.c.p. Archivo.



“Educación de clase mundial,
un compromiso social”

Ave. Universidad S/N Ciudad Universitaria
San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México. C.P. 66455
Tel.: 1442 4400 Fax: 1442 4443
<http://www.fic.uanl.mx>



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
INSTITUTO DE INGENIERÍA CIVIL

DR. CÉSAR ANTONIO JUÁREZ ALVARADO
SUBDIRECTOR DE ESTUDIOS DE POSGRADO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL UANL.
Presente.-

Estimado Dr. Juárez Alvarado:

Por este medio le comunico que el **Ing. Daniel Gálvez Moreno**, pasante de la Maestría en Ciencias con Orientación en Materiales de Construcción, ha concluido satisfactoriamente su trabajo de tesis denominada **“Robustez de un concreto autocompactable producido con materiales disponibles en la región de monterrey, N.L.”**, por lo que no tengo inconveniente en solicitarle que amablemente gire las instrucciones para dar paso a los trámites correspondientes y atender la solicitud del Examen de Grado del Ing. Gálvez Moreno para cumplir con los requisitos que exige el Reglamento de Exámenes Profesionales de nuestra institución.

Agradeciendo de antemano la atención brindada a la presente, me despido quedando a sus órdenes.

ATENTAMENTE,
“Alere Flammam Veritatis”
Ciudad universitaria, 27 de octubre de 2015

DR. JAVIER RODRIGO GONZÁLEZ LÓPEZ
CO-DIRECTOR DE TESIS

C.c.p. Archivo.



“Educación de clase mundial,
un compromiso social”

Ave. Universidad S/N Ciudad Universitaria
San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México. C.P. 66455
Tel.: 1442 4400 Fax: 1442 4443
<http://www.fic.uanl.mx>

DR. CÉSAR ANTONIO JUÁREZ ALVARADO
SUBDIRECTOR DE ESTUDIOS DE POSGRADO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL UANL.
Presente.-

Estimado Dr. Juárez Alvarado:

En atención a su oficio en el que me informa que fui designado EVALUADOR de la tesis **“Robustez de un concreto autocompactable producido con materiales disponibles en la región de monterrey, N.L.”**, que presenta el **Ing. Daniel Gálvez Moreno**, como requisito parcial para obtener el grado de Maestría en Ciencias con Orientación en Materiales de Construcción, me permito informar a Usted que después de haber leído y evaluado la calidad de la tesis, dictamino que la misma es APROBADA.

Agradeciendo de antemano la atención brindada a la presente, me despido quedando a sus órdenes.

ATENTAMENTE,
Ciudad universitaria, 29 de octubre de 2015


DR. ISMAEL FLORES VIVIAN
EVALUADOR

C.c.p. Archivo.



Kamal H. Khayat, Ph.D., FACI
Director, Center for Infrastructure Engineering Studies
224 Engineering Research Laboratory • Rolla, MO 65409-0710
Tel: (573) 341-6623 • Fax: (573) 341-6215 • E-mail: khayatk@mst.edu

November 5, 2015

Dr. Cesar Antonio Juárez Alvarado
Head of Postgraduate Studies
Civil Engineering School
Universidad Autónoma de Nuevo León

RE: Evaluation of master thesis of Mr. Daniel Gálvez Moreno

Dear Dr. Alvarado:

Through this letter and in response to my designation as external advisor of the thesis entitled "Robustez de un concreto autocompactable producido con materiales disponibles en la region de Monterrey, N. L.", presented by Mr. Daniel Gálvez Moreno, as a prerequisite to obtain the degree of the Master of Science program with orientation on Construction Materials, I acknowledge that I have read and evaluated the thesis and have indicated my comments, suggestions and corrections to the document on time.

Considering that the student has made the necessary modifications, I feel that the thesis document can be APPROVED so that Mr. Daniel Gálvez Moreno can proceed with the presentation to satisfy the requirements of the Master of Science degree from the Universidad Autónoma de Nuevo Leon.

Please do not hesitate to contact me if you need any further information. Please receive my best regards.

Kind regards,

Kamal H. Khayat

Agradecimientos

A mis padres, Patricia Moreno Palacios y José Luis Gálvez Cerecer, por estar ahí en todas las etapas de mi vida para guiarme con sus consejos, cariños y regaños. De igual manera les agradezco por todo el esfuerzo que han puesto en mi educación. Estaré eternamente agradecido con ustedes por su amor, apoyo y comprensión. El impulso que me han dado es invaluable.

A mis hermanos, José Luis y Edgar José, la vida jamás hubiera sido lo mismo de no haber crecido a su lado. Gracias por sus consejos, apoyo y palabras de aliento. Nunca olviden que siempre podrán contar conmigo también.

A mi novia, Aida Margarita Ley Hernández, por todo el apoyo y comprensión que me has brindado antes y durante esta etapa. Muchas gracias por tu paciencia y cariño.

A mi amigo de toda la vida, Javier Alberto Mezta Flores por la ayuda ofrecida durante la etapa experimental y por estar siempre conmigo en las buenas y en las malas desde el jardín de niños hasta el posgrado. “¡Estudia Mezta!”.

A toda la familia Gálvez Cerecer y Moreno Palacios, muchas gracias por todo el cariño brindado, espero que este logro les sea motivo de orgullo.

A mis asesores, Dr. Alejandro Durán Herrera, Dr. Javier Rodrigo Gonzales López y Dr. Kamal H. Khayat. Sus enseñanzas y la confianza brindada han sido piezas claves en la culminación esta etapa.

Al Dr. Dimitri Feys, por sus asesorías en materia de reología del concreto y por el tiempo invertido para atender todas mis dudas.

A mis compañeros del sótano de tecno, Francisco Anguiano, Juan de León, Joana Campos, Rogelio Dávila, Guillermo Hernández, Sergio Gutiérrez y Jennifer Canul. Gracias por todo, amigos. Sin su guía, consejos, participación y apoyo, no hubiera podido concluir la etapa experimental de este proyecto.

A mis amigos del tercer piso, David García, Loth Rodríguez y Víctor Galván, muchas gracias por todo el apoyo brindado durante la etapa experimental.

A Diego Pinal y Daniel Flores, alumnos de la FIC que voluntariamente ofrecieron su ayuda para sacar adelante la etapa experimental concerniente a este proyecto.

A los alumnos de verano científico Erik Espino, Estefanía Flores, Karla Jáquez, Erick Duarte, Isaí Serrano, Luis Melendrez, Carla Panduro, Hector Robles y Marcos López, por poner todo su empeño y dedicación en las tareas asignadas.

A todo el personal del departamento de Tecnología del Concreto por las innumerables ocasiones que me han apoyado con su ayuda y cooperación.

A Cementos Moctezuma por el generoso donativo del cemento utilizado en esta investigación.

A Daniel Canizales y a BASF México, por el donativo del aditivo superfluidificante empleado en esta investigación.

A la Comisión Federal de Electricidad por el donativo de ceniza volante.

A la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Autónoma de Nuevo León y a los doctores Pedro Valdez Tamez y Cesar Juárez Alvarado. Por el apoyo económico ofrecido para la asistencia a un taller dedicado a la reología de materiales base cemento en la Missouri University of Science and Technology y a una convención del American Concrete Institute en Kansas City, EE. UU. Sin duda, ambas experiencias contribuyeron significativamente a mi formación.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por la beca otorgada para la realización de mis estudios de maestría.

Y a todos los demás que contribuyeron a la realización de este proyecto, muchas gracias a todos.

Dedicatoria

A mis padres por darme la vida, todo su amor, apoyo incondicional y comprensión.

A mis hermanos, por siempre estar ahí para mí y brindarme su ayuda.

A mi tía Leonor[†], siempre estuviste orgullosa de mí... te extraño mucho.

A mi novia, Margarita Ley, por darme fuerza y motivación para seguir superándome.

A mi familia y amigos, por sus consejos y compañía.

Índice

Capítulo 1. Introducción.....	1
1.1. Generalidades.....	1
1.2. La importancia de la robustez del concreto autocompactable	2
1.3. Alcance del proyecto.....	3
Capítulo 2. Antecedentes	4
2.1.1. Concreto Autocompactable (CAC).....	4
2.1.2. Materiales para la producción de CAC	9
2.1.3. Reología del CAC	14
2.1.3.1. Modelos reológicos	19
2.1.3.2. Comportamiento reoespesante del CAC	26
2.1.4. Robustez del CAC.....	28
2.1.4.1. Evaluación de la robustez de los CAC	30
Capítulo 3. Justificación, hipótesis y objetivos.....	42
3.1. Justificación	42
3.2. Hipótesis	43
3.3. Objetivos	43
3.3.1. Objetivo general	43
3.3.2. Objetivos particulares.....	43
Capítulo 4. Materiales	45
4.1. Descripción de materiales	45
4.1.1. Cemento Portland	45
4.1.2. Ceniza volante.....	45
4.1.3. Agregado grueso.....	47
4.1.4. Agregado fino	48
4.1.5. Aditivo superfluidificante	49
4.2. Caracterización de materiales	49
4.2.1. Materiales cementantes	49
4.2.2. Agregados	53
4.2.3. Aditivo superfluidificante	54
Capítulo 5. Metodología experimental.....	55
5.1. Matriz de experimentos.....	55
5.2. Métodos de prueba	57
5.2.1. Flujo de revenimiento, T_{50} e Índice de estabilidad visual.....	58
5.2.2. Anillo J.....	60
5.2.3. Embudo V.....	61
5.2.4. Densidad y contenido de aire (método de presión)	61
5.2.5. Caracterización de parámetros reológicos	62
5.2.5.1. Reómetro	62

5.2.5.2.	Muestreo del concreto	63
5.2.5.3.	Adquisición de datos	64
5.2.5.4.	Determinación del esfuerzo de fluencia estático	67
5.2.5.5.	Reograma	68
5.2.6.	Resistencia a la segregación estática	78
5.2.7.	Deformación autógena	79
5.2.8.	Tiempos de fraguado	79
5.2.9.	Resistencia a la compresión	80
5.3.	Mezcla de referencia	81
5.3.1.	Contenido de cementante y contenido total de polvos	81
5.3.2.	Dosificación de superfluidificante	82
5.3.3.	Relación agregado fino – agregado (Af/A)	82
5.3.4.	Proporcionamiento final de la mezcla de referencia	83
Capítulo 6. Resultados y discusión		85
6.1.	Caracterización de materiales	85
6.1.1.	Cementantes	85
6.1.1.1.	Densidad	85
6.1.1.2.	Distribución de tamaño de partículas	86
6.1.1.3.	Fases minerales	86
6.1.1.4.	Composición química	88
6.1.1.5.	Morfología de la ceniza volante	88
6.1.1.6.	Pérdida por ignición	89
6.1.1.7.	Índice de actividad a la resistencia.	90
6.1.2.	Agregados	91
6.1.2.1.	Densidad y absorción	91
6.1.2.2.	Análisis granulométrico	92
6.1.3.	Aditivo superfluidificante	95
6.1.3.1.	Densidad y contenido de sólidos	95
6.2.	Resultados experimentales	96
6.2.1.	Propiedades de la mezcla de referencia	96
6.2.1.1.	Caracterización de propiedades reológicas	99
6.2.1.2.	Deformación autógena	101
6.2.1.3.	Resistencia a la compresión	102
6.2.2.	Variaciones efectuadas al diseño de mezcla de referencia	102
6.2.3.	Robustez de la mezcla de referencia	105
6.2.3.1.	Flujo de revenimiento	106
6.2.3.2.	T ₅₀	109
6.2.3.3.	Anillo J	111
6.2.3.4.	Embudo V	115
6.2.3.5.	Columna de segregación	117
6.2.3.6.	Contenido de aire	119

6.2.3.7.	Tiempos de fraguado	122
6.2.3.8.	Determinación directa de parámetros reológicos	125
6.2.3.9.	Deformación autógena.....	136
6.2.3.10.	Resistencia a la compresión	138
6.2.4.	Evaluación de la robustez de las variables de estudio	143
Capítulo 7. Conclusiones y recomendaciones		147
Trabajo futuro		151
Bibliografía.....		152
Anexo 1. Reogramas		166
Anexo 2. Deformación autógena		168
Resumen autobiográfico.....		170

Lista de tablas

Tabla 1. Flujos de revenimiento objetivo y otros parámetros recomendados para distintas características del elemento a fabricar [3].....	6
Tabla 2. Contenido de polvos para rangos de flujo de revenimiento de acuerdo al ACI 237 [2].	9
Tabla 3. Modelos reológicos usados para describir el flujo del concreto	20
Tabla 4. Tolerancias especificadas por distintos códigos para variaciones en dosificadoras de concreto premezclado	30
Tabla 5. Criterios para asignación del VSI [88]	60
Tabla 6. Evaluación del bloqueo de acuerdo a ASTM C1621/1621M-09b	61
Tabla 7. Configuración de parámetros para obtención del reograma con el reómetro RHM-3000	68
Tabla 8. Ecuaciones para transformar G, H y C a unidades reológicas fundamentales	72
Tabla 9. Parámetros calculados durante la primera iteración.....	76
Tabla 10. Verificación de convergencia entre valores iniciales (valores de entrada) y el resultado de la corrección (valores de salida).	76
Tabla 11. Fin del proceso iterativo y obtención de los parámetros reológicos verdaderos.....	77
Tabla 12. Proporción del material cementante y volumen total de polvos	82
Tabla 13. Diseño de mezcla de referencia	83
Tabla 14. Comparación de los parámetros de diseño de la mezcla de referencia contra los recomendados por el ACI 237-07 y EFNARC.....	84
Tabla 15. Secuencia de mezclado para mezclas de referencia y mezclas de prueba ..	84
Tabla 16. Densidades de los materiales cementantes	85
Tabla 17. Composición química de los materiales cementantes	88
Tabla 18. Densidad y absorción de los agregados.....	91
Tabla 19. Comparación del coeficiente de determinación (R^2) generados a partir del modelo empaquetamiento teórico de Andreasen y Andersen modificado ($q = 0.20$). ...	95
Tabla 20. Repetibilidad de las propiedades en estado fresco de la mezcla de referencia.....	96
Tabla 21. Clasificación de las propiedades del CAC de referencia de acuerdo a ASTM y EFNARC.....	97
Tabla 22. Tiempos de fraguado del CAC de referencia.....	99

Tabla 23. Esfuerzo de fluencia estático del CAC de referencia.....	99
Tabla 24. Parámetros reológicos que describen el flujo del CAC de referencia	100
Tabla 25. Deformación autógena del CAC de referencia	101
Tabla 26. Resistencia a la compresión del CAC de referencia.....	102
Tabla 27. Contenido de agua dosificado para las mezclas de prueba.....	103
Tabla 28. SP dosificado para las mezclas de prueba.....	104
Tabla 29. Resultados de las pruebas empíricas estandarizadas para las distintas mezclas del plan experimental.....	106
Tabla 30. Cálculo del índice de robustez de las variables estudiadas.....	144
Tabla 31. Comparación de los resultados obtenidos con las tolerancias aceptadas en plantas de concreto premezclado.	146

Lista de figuras

Figura 1. Ejemplo de las fracciones volumétricas de los materiales usados en el CAC comparadas con las del CVC [15].....	13
Figura 2. Efecto de los microfinos en las fracciones volumétricas del CAC.....	14
Figura 3. Reómetros para concreto. De izquierda a derecha, BTRHEOM (placas paralelas), ConTec BML Viscometer (coaxial) e IBB Rheometer (paleta).	16
Figura 4. Comparación de los resultados obtenidos por diferentes reómetros de muestras extraídas de las mismas mezclas de concreto [18].....	17
Figura 5. Rheometer-4SCC (izquierda) e ICAR RHM-3000 (derecha)	18
Figura 6. Identificación de distintos reogramas de acuerdo a su forma característica. .	19
Figura 7. Deformación de un cuerpo sometido a un esfuerzo de corte.	23
Figura 8. Desviación del modelo de Bingham (línea continua) detectada en CAC.	24
Figura 9. Comparación entre el modelo reológico de Bingham, Herschel-Bulkley y Bingham modificado	25
Figura 10. Representación de los “hidroclusters” formados por las partículas bajo acción de un esfuerzo cortante [39].	27
Figura 11. Efecto de la variación del contenido de agua en el flujo de revenimiento de mezclas de SCC con y sin AMV [44].....	31
Figura 12. Resultados típicos de una prueba de robustez usando la probeta de segregación de Lin Shen [46].	32
Figura 13. Efecto de la humedad del agregado, contenido de finos y temperatura en el esfuerzo de fluencia (izquierda) y viscosidad plástica (derecha) para mezclas de mortero equivalente a concreto sin AMV [47].....	33
Figura 14. Cálculo de las áreas de robustez a partir del coeficiente de variación [47]..	33
Figura 15. El flujo de revenimiento de las mezclas elaboradas con el SP “C” demostró tener un menor rango de respuesta ante variaciones en la viscosidad [52].	35
Figura 16. Variación de (a) flujo de revenimiento y (b) tiempo de embudo V en función de distintos lotes de cemento [54].....	37
Figura 17. Esquematización del modelo de análisis para calcular el porcentaje de variación de agua permisible [56].	38
Figura 18. Apariencia de la CV antes (CVSC) y después (CVP100) del cribado a través de la malla No. 100 (150 μ m).....	46
Figura 19. Muestra del agregado grueso típico regional utilizado en el proyecto	47

Figura 20. Muestra del agregado fino típico regional usado en el proyecto.....	48
Figura 21. Determinación de la densidad del cemento.....	50
Figura 22. Analizador de DTP marca MICTROTRAC modelo S3500.....	50
Figura 23. Analizador de ED-XRF PANalytical Epsilon 3-XL.....	52
Figura 24. Determinación de la densidad del aditivo SP	54
Figura 25. Esquematización de las mezclas realizadas	57
Figura 26. Secuencia de ejecución de los métodos de prueba	58
Figura 27. Flujo de revenimiento.....	59
Figura 28. Contenedor llenado parcialmente para suprimir el torque generado en la cara superior del cilindro interior.	64
Figura 29. La falta de estabilidad (línea gris) en las mediciones de torque (lado izquierdo) puede conllevar a la conclusión errónea de que el material evaluado es reoespesante [22].	66
Figura 30. El incremento gradual del torque como consecuencia de una frecuencia rotacional baja y constante permite identificar el esfuerzo máximo a partir del cual el concreto se deforma plásticamente.	68
Figura 31. Datos adquiridos para determinación del reograma.	70
Figura 32. Filtrado de datos debido a dispersión excesiva.	70
Figura 33. Diagrama T(N)	71
Figura 34. Determinación de la existencia de zonas muertas en el espacio anular $R_o - R_i$	74
Figura 35. Resultado de la primera iteración de la corrección por zonas muertas.....	77
Figura 36. Reograma corregido por efecto de zonas muertas expresando los parámetros reológicos correspondientes a la mezcla de concreto	77
Figura 37. Columna de segregación	78
Figura 38. Dispositivo para medición de la deformación autógena.	79
Figura 39. Determinación de los tiempos de fraguado	80
Figura 40. Distribución de tamaño de partículas	86
Figura 41. Difractograma del CPO40	87
Figura 42. Difractograma de la CV antes (CVSC) y después del tamizado (CVP100) a través de la malla No. 100.	88
Figura 43. Morfología de las partículas de carbón sin quemar presentes en la CV.	89
Figura 44. Identificación por EDS de una partícula de carbón sin quemar.	89
Figura 45. Índice de actividad a la resistencia.....	90

Figura 46. Comparado con la interfaz generada por el agregado (A), las partículas grandes de carbón residual (C) forman una zona de transición interfacial porosa con la pasta (P).....	91
Figura 47. Análisis granulométrico del agregado fino.....	92
Figura 48. Análisis granulométrico del agregado grueso.....	93
Figura 49. Distribución de tamaños de partícula de los materiales utilizados.....	94
Figura 50. Esqueleto granular generado a partir del diseño de mezcla de referencia (G-BM) y sus variaciones producto de cambios en la distribución granulométrica de la arena (G-L1, G-L2 y G-L3).....	94
Figura 51. Diferencia entre el diámetro del flujo de revenimiento con y sin anillo J del CAC.....	98
Figura 52. Variación del agua dosificada respecto del agua de mezcla	103
Figura 53. Fracciones volumétricas de fases del CAC para las mezclas G-L1, G-L2 y G-L3.	105
Figura 54. Efecto de las variaciones de agua de mezcla en el flujo del revenimiento	107
Figura 55. Efecto de las variaciones de superfluidificante en el flujo de revenimiento	107
Figura 56. Efecto de la variación de la granulometría en el flujo de revenimiento	108
Figura 57. Flujo de revenimiento de la mezcla G-L1	108
Figura 58. Efecto de las variaciones de agua de mezcla en el T_{50}	109
Figura 59. Efecto de las variaciones de superfluidificante de mezcla en el T_{50}	110
Figura 60. Efecto de las variaciones de la granulometría del agregado fino en el T_{50}	111
Figura 61. Efecto de las variaciones de agua en el bloqueo medido con el anillo J ...	112
Figura 62. Prueba de Anillo J ejecutada en una muestra no homogénea de la mezcla +6WR.	112
Figura 63. Efecto de las variaciones de superfluidificante en el bloqueo medido con el anillo J	113
Figura 64. Cambio proporcional entre el flujo de revenimiento con y sin anillo J ante variaciones de superfluidificante	113
Figura 65. Efecto de las variaciones de la granulometría del agregado fino en el bloqueo medido con el anillo J.....	114
Figura 66. Prueba de Anillo J de la mezcla G-L1	114
Figura 67. Efecto de las variaciones de agua de mezcla en el tiempo de embudo V.	115
Figura 68. Efecto de las variaciones de superfluidificante en el tiempo de embudo V.	116

Figura 69. Efecto de las variaciones de granulometría en el tiempo de embudo V	116
Figura 70. Efecto de las variaciones de agua de mezcla en el porcentaje de segregación.....	117
Figura 71. Efecto de las variaciones de superfluidificante en el porcentaje de segregación.....	118
Figura 72. Efecto de las variaciones de granulometría en el porcentaje de segregación	119
Figura 73. Efecto de las variaciones de agua de mezcla en el porcentaje de aire atrapado	119
Figura 74. Efecto de las variaciones de superfluidificante en el porcentaje de aire atrapado	120
Figura 75. Estado del contenedor del dispositivo para medición de aire después de efectuada la prueba en la mezcla G-L1	121
Figura 76. Efecto de la variación de la granulometría del agregado fino en el contenido de aire atrapado.....	121
Figura 77. Efecto de las variaciones de agua de mezcla en el tiempo de fraguado inicial	122
Figura 78. Efecto de las variaciones de agua de mezcla en el tiempo de fraguado final	123
Figura 79. Efecto de las variaciones de superfluidificante en el tiempo de fraguado inicial	123
Figura 80. Efecto de las variaciones de superfluidificante en el tiempo de fraguado final	124
Figura 81. Efecto de la variación de la granulometría del agregado fino en el tiempo de fraguado inicial	125
Figura 82. Efecto de la variación de la granulometría en el tiempo de fraguado final.	125
Figura 83. Efecto de las variaciones de agua de mezcla en el esfuerzo de fluencia estático	127
Figura 84. Efecto de las variaciones de superfluidificante en el esfuerzo de fluencia estático	128
Figura 85. Efecto de la variación de la granulometría de agregado fino en el esfuerzo de fluencia estático	129
Figura 86. Efecto de las variaciones de agua de mezcla en el esfuerzo de fluencia dinámico	130

Figura 87. Efecto de las variaciones de superfluidificante en el esfuerzo de fluencia dinámico	131
Figura 88. Efecto de las variaciones de granulometría en el esfuerzo de fluencia dinámico	131
Figura 89. Efecto de las variaciones de agua de mezcla en la viscosidad diferencial	132
Figura 90. Efecto de las variaciones de superfluidificante en la viscosidad diferencial	133
Figura 91. Efecto de las variaciones de granulometría en la viscosidad diferencial ...	133
Figura 92. Efecto de las variaciones de agua de mezcla en la intensidad del comportamiento reoespesante.....	134
Figura 93. Efecto de las variaciones de superfluidificante en la intensidad del comportamiento reoespesante.....	135
Figura 94. Incremento del radio aparente ($a+\xi$)[116]	135
Figura 95. Efecto de las variaciones de agua de mezcla en la deformación autógena a 28 días.....	136
Figura 96. Efecto de las variaciones de superfluidificante en la deformación autógena a 28 días.....	137
Figura 97. Efecto de la variación de la granulometría en la deformación autógena a 28 días.....	138
Figura 98. Efecto de las variaciones de agua de mezcla en la resistencia a compresión.	139
Figura 99. Aire atrapado en un espécimen para determinación de resistencia a la compresión de la mezcla -6WR.	140
Figura 100. Efecto de las variaciones de superfluidificante en la resistencia a compresión.....	141
Figura 101. Efecto de las variaciones de la granulometria en la resistencia a compresión	142
Figura 102. Sección longitudinal de un espécimen cilíndrico de la mezcla G-L1.....	142
Figura 103. Índice de robustez.....	144

Resumen

El concreto autocompactable (CAC) usualmente tiene un delicado balance entre su cohesividad, deformabilidad, resistencia a la segregación y habilidad de paso. Por lo tanto, es deseable producir mezclas robustas capaces de absorber pequeñas fluctuaciones de los ingredientes inherentes a la naturaleza de los materiales o variaciones del proceso de producción, sin cambiar significativamente las propiedades en estado fresco o endurecido del concreto. En este trabajo de investigación, se produjo un concreto autocompactable del tipo polvo con un flujo de revenimiento de 720 mm y 0% segregación (medida con la columna de segregación), remplazando 20% del volumen de cemento por ceniza volante y usando agregados a base de caliza triturada con un alto contenido de microfinos. Las variables estudiadas fueron la dosificación de agua de mezclas, contenido de superfluidificante y la granulometría del agregado fino, los efectos de sus variaciones fueron caracterizados por medio del flujo de revenimiento, T_{50} , VSI, anillo J, embudo V, columna de segregación, densidad, contenido de aire, tiempos de fraguado, reología, deformación autógena y resistencia a la compresión con intervalos de confianza del 95% contruidos a partir de la repetibilidad del diseño de mezcla de referencia. Los resultados obtenidos mostraron que el concreto autocompactable del tipo polvo es más sensible a los cambios en la granulometría de la arena y el agua de mezcla que a las variaciones de superfluidificante.

Capítulo 1

Introducción

1.1. Generalidades

El Concreto autocompactable (CAC) es un concreto de alto comportamiento en estado fresco capaz de fluir por acción de su propio peso, resistente a la segregación y capaz de autoconsolidarse, ejerciendo poca o nula acción mecánica a través densos armados de acero de refuerzo. Asimismo, gracias a su alta fluidez y viscosidad, es posible alcanzar una excelente reproducibilidad de formas y texturas sin presentar inconsistencias en su homogeneidad.

El CAC se ha vuelto popular en la industria de los elementos de concreto prefabricados. En cambio, en el sector del concreto premezclado el CAC se ha abierto campo lentamente en el mercado, debido a que requiere que los productores inviertan tiempo familiarizándose con una gran cantidad de variables que pueden tener un impacto importante en las propiedades finales del concreto. La principal razón de esto es que la combinación de los materiales constituyentes de un CAC producen un balance delicado entre la deformabilidad, cohesividad y resistencia a la segregación, haciendo que mínimas variaciones en sus dosificaciones o procedimiento de mezclado que podrían ser tolerables para el Concreto Vibrado Convencional (CVC), podrían cambiar por completo el comportamiento del CAC. Por consecuencia, se crean problemas de aceptación y uniformidad de sus propiedades durante la producción o durante su entrega en los sitios de trabajo trayendo consigo pérdidas económicas y ecológicas. Por lo tanto, para incrementar la aceptación y aplicación de esta tecnología en la industria del concreto premezclado, es necesario producir CAC robustos.

1.2. La importancia de la robustez del concreto autocompactable

La robustez del CAC es la capacidad de que una mezcla tolere cambios y variaciones en los materiales y procedimiento de producción que son inevitables durante su elaboración a cualquier escala, sin que se alteren de forma significativa sus propiedades de auto-compactibilidad hasta que sea concluida su colocación. El estudio de la robustez es específico para cada diseño de mezcla pues depende de los materiales disponibles de cada región y sus características particulares; sin embargo las metodologías de evaluación empleadas son aplicables a cualquier diseño de mezcla de CAC. Asimismo, resulta de gran utilidad conocer el efecto que tienen los materiales locales en la reología del CAC de tal forma que la optimización de las propiedades deseadas para una aplicación dada, sean obtenidas en menor tiempo y con menor esfuerzo debido a la reducción del número de mezclas de prueba necesarias para alcanzarlas.

En la actualidad existen reportados en la literatura relativamente pocos trabajos enfocados al estudio de la robustez de CAC. La mayoría de estos trabajos han sido desarrollados durante la última década en países europeos y Estados Unidos. Esto se debe a que en estos países, el CAC ha ganado más aceptación en la industria del concreto premezclado debido a las ventajas tecnológicas y económicas que este material de construcción brinda. Por otro lado, en México solo algunas empresas manejan esta tecnología, la cual aún no es muy demandada principalmente por el costo que representan este tipo de concretos en relación al CVC. El costo no solo aumenta debido al contenido de cemento y aditivos usados, sino también por la elevada probabilidad de que el concreto no cumpla con los requisitos mínimos de aceptación al momento de ser entregado obra y el lote sea rechazado por la supervisión de esta.

1.3. Alcance del proyecto

En este trabajo de investigación se evaluó la robustez de un CAC de alta fluidez producido con materiales localmente disponibles, ante posibles variaciones en sus propiedades en estado fresco producidas por fluctuaciones en la dosificación de sus materiales constituyentes. Las variables de estudio fueron delimitadas a la dosificación del agua de mezcla, contenido superfluidificante (SP) y distribución granulométrica del agregado fino debido a la importancia que tienen en las propiedades en estado fresco del CAC, con la intención de proveer a través de un enfoque técnico y científico un mayor entendimiento a la industria y tecnólogos del concreto sobre los retos que esta tecnología de reciente introducción en México supone.

La metodología empleada se basa en cuantificar la influencia que tienen las variables estudiadas, cuando su rango de fluctuación se encuentra fuera de las tolerancias establecidas en las normas ASTM C94-09, NMX- ONNCCE-C155 y ASTM C33-09 para concreto premezclado. Para ello, se hizo uso de diversas pruebas empíricas estandarizadas aplicables al CAC y de la medición directa de los parámetros reológicos del mismo con un reómetro portátil especial para concreto.

En función de la repetibilidad de la mezcla de referencia, se generaron intervalos de confianza que delimitaran la tolerancia del CAC diseñado ante fluctuaciones en las variables de estudio, ante la cual sus propiedades de autocompactibilidad no sufren cambios significativos. Por último, se evaluó de manera cuantitativa mediante un índice de robustez, la sensibilidad del CAC a cambios en cada una de las variables de estudio.

Capítulo 2

Antecedentes

2.1.1. Concreto Autocompactable (CAC)

El CAC fue desarrollado en Japón a finales de la década de 1980 por el profesor Okamura de la Universidad de Tokio [1]. La necesidad de la creación de un concreto que no dependiera de la habilidad de la mano de obra que lo coloca tuvo auge a principios de la década 1980 debido a que una marcada disminución de trabajadores experimentados de la industria de la construcción redujo de manera similar la calidad de las obras construidas. El primer prototipo del CAC fue completado en 1988 usando materiales que ya estaban disponibles en el mercado [1]. Su diseño está basado en incrementar la cantidad de polvos y/o agregado fino sin cambiar el contenido de agua relativo al presente en el CVC compensando la demanda extra de agua con el uso de aditivos SP. La aplicación de esta tecnología trae significativas ventajas desde los puntos de vista económico, constructivo y estético respecto del CVC figurando entre las principales:

- Incremento de la velocidad de colocación.
- Compactación y adherencia mejorada alrededor del acero de refuerzo.
- Mejor uniformidad y acabado.
- Reducción del tiempo de construcción.
- Facilidad de llenado en secciones difíciles de alcanzar.
- Ahorro en mano de obra.
- Capacidad de incluir materiales cementantes suplementarios
- Incremento de la seguridad en sitio de trabajo.

Sin embargo, el CAC también presenta desventajas como cualquier otra tecnología, entre ellas figuran:

- Incremento en el costo del concreto, especialmente debido a los aditivos, volumen de materiales cementantes y sobre costo relacionado con el riesgo de no cumplir con los requisitos solicitados.
- Incremento en el costo de las cimbras debido a que la presión ejercida en ellas puede ser más alta.
- Se requiere de un mayor conocimiento técnico para diseñar y controlar las mezclas producidas.
- Incremento en la variabilidad de las propiedades, en especial la trabajabilidad.
- Se requiere de un mayor control de calidad.
- Retardo en tiempos de fraguado en algunos casos por el uso de aditivos.
- Incremento en el riesgo e incertidumbre asociados con el uso y dominio de un nuevo producto.

Usualmente el CAC no es especificado por su resistencia a la compresión como es el caso del CVC [1]. Debido a las altas cantidades de material cementante utilizadas y las bajas relaciones agua-material cementante (a/cm), la resistencia a la compresión no suele ser un problema para aplicaciones normales [1]. El CAC suele especificarse en función de las propiedades en estado fresco que el concreto debe cumplir. El nivel de fluidez necesario para colocar el concreto depende del tipo de construcción, complejidad de la cimbra y congestión del acero refuerzo [2]. El ACI 237 recomienda 3 rangos de flujo de revenimiento para diversas aplicaciones y se resumen en la Tabla 1 la cual es una versión extendida de la mostrada en el reporte del comité 237 del ACI [3]. Los recuadros de color gris indican que para tal característica y nivel de

acentuación, el parámetro (flujo de revenimiento, T_{50} , caja L y embudo V) elegido no es aplicable. También es posible observar en la tabla anteriormente mencionada que no hay restricciones de aplicabilidad para flujos de revenimiento superiores a 650 mm.

Tabla 1. Flujos de revenimiento objetivo y otros parámetros recomendados para distintas características del elemento a fabricar [3].

Características del elemento		Flujo de revenimiento (mm)			T_{50} (s)			Caja L (%)			Embudo V (s)		
		<550	550 - 650	>650	<3	3 - 5	>5	<75	75 - 90	>90	<6	6 - 10	>10
Nivel de Refuerzo	Bajo												
	Medio												
	Alto												
Complejidad de la cimbra	Bajo												
	Medio												
	Alto												
Profundidad del elemento	Bajo												
	Medio												
	Alto												
Importancia del acabado superficial	Bajo												
	Medio												
	Alto												
Longitud del elemento	Bajo												
	Medio												
	Alto												
Espesor del muro	Bajo												
	Medio												
	Alto												
Contenido de agregado grueso	Bajo												
	Medio												
	Alto												
Energía de colocación	Bajo												
	Medio												
	Alto												

De igual forma, la norma europea para especificación, producción y uso de concreto autocompactable provista por la EFNARC clasifica al flujo de revenimiento del CAC en 3 clases [4]:

- SF1 (550 – 650 mm): Apropriado para:
 - Estructuras de concreto con poco o nulo acero de refuerzo que son coladas desde su parte superior con un desplazamiento libre del punto de descarga del CAC. (ej. losas de viviendas)
 - Colado por medio de sistemas de inyección por bomba. (ej. revestimiento de túneles)
 - Secciones que son lo suficientemente pequeñas como para evitar el flujo horizontal prolongado (ej. pilas y cimentaciones profundas)
- SF2 (660 – 750 mm): Apropriado para la mayoría de las aplicaciones normales (muros y columnas)
- SF3 (760 – 850 mm): Típicamente producido con tamaños máximos del agregado (TMA) menores que 16 mm y usado para aplicaciones verticales con armados de acero de refuerzo altamente congestionados, estructuras con formas complejas o para llenado de cimbras desde la parte inferior. La clase SF3 proveerá mejor acabado en su superficie que el SF2 para aplicaciones verticales normales, pero la resistencia a la segregación es más difícil de controlar.

Una vez definida la fluidez objetivo requerida por el tipo de elemento a colar, se debe seleccionar el método que será empleado para conferir estabilidad (resistencia a la segregación) a la mezcla, y de acuerdo a este, el CAC puede ser clasificado como sigue [4]:

- CAC del tipo polvo: Se caracteriza por el uso de grandes cantidades de polvo (materiales con tamaño máximo $\leq 125 \mu\text{m}$) los cuales usualmente están dentro del rango de los 550 a 650 kg/m^3 . La cantidad de polvo se establece en función de la requerida para proveer la viscosidad plástica necesaria que produzca una mezcla resistente a la segregación para la fluidez deseada. El punto de fluencia es ajustado mediante la dosificación de SP.
- CAC del tipo AMV: El contenido de polvos va desde 350 hasta 450 kg/m^3 . La segregación es controlada principalmente por la adición de AMV y el punto de fluencia por la adición de SP.
- CAC del tipo combinado: El contenido de polvos varía entre 450 y 550 kg/m^3 y la resistencia a la segregación es conferida por una dosificación de AMV que varía de moderada a baja.

La pasta se conforma por todos los polvos $\leq 125 \mu\text{m}$, agua, aditivos y aire, y es el medio por el cual se transporta el agregado. Por lo tanto, para alcanzar el flujo de revenimiento deseado, es importante contar con la cantidad de polvos justa que provea suficiente movilidad, estabilidad y economía a la mezcla. Para conferir movilidad a la mezcla, el volumen de pasta debe de ser mayor que el volumen de vacíos en el agregado de tal forma que las partículas de agregado estén completamente cubiertas y lubricadas por una capa de pasta [5]. Usualmente, a mayor flujo de revenimiento, mayor es el volumen de pasta necesario para mantener la homogeneidad de la mezcla [2]. El comité 237 del ACI, provee una tabla en la cual sugiere el contenido de polvos necesario para distintos rangos de flujo de revenimiento (tabla 2) [2].

Tabla 2. Contenido de polvos para rangos de flujo de revenimiento de acuerdo al ACI 237 [2].

Flujo de revenimiento (mm)	Contenido de polvo (kg/m ³ de concreto)
<550	355 – 385
550 a 650	385 – 445
>650	>445

Sin embargo, los valores sugeridos solamente sirven como aproximación inicial y deben ser optimizados por medio de mezclas de prueba mediante un ajuste en su contenido o la inclusión de AMV para garantizar la estabilidad requerida.

2.1.2. Materiales para la producción de CAC

Básicamente los materiales que se utilizan en el CVC pueden ser utilizados para la producción de CAC [2, 5]. Sin embargo, es necesario entender que las propiedades combinadas de todos los materiales involucrados en un diseño de mezcla en particular, son los responsables de su desempeño. Por lo tanto, para alcanzar las propiedades de autocompactibilidad deseadas es responsabilidad del productor conocer la influencia de cada material involucrado en el desempeño final, sus limitaciones e interacciones entre sí. Para este trabajo de investigación, los materiales se engloban en 3 grupos: polvos, agregados y aditivos químicos.

Polvos

Un polvo es un material cuyo tamaño máximo sea $\leq 125 \mu\text{m}$ que es adicionado intencionalmente para incrementar el volumen de pasta o mejorar la reología de ésta [6]. Los polvos son de extrema importancia en el CAC debido a que en conjunto con el agua, aditivos y aire componen la pasta, la cual es la responsable de proveer movilidad a la mezcla. Dentro de esta clasificación recae el cemento, materiales cementantes suplementarios (MCS) y adiciones minerales inertes (“*fillers*”), sus propiedades físicas tales como finura, distribución de tamaño de partículas, absorción, forma de partícula,

composición, reactividad y densidad afectan las propiedades en estado fresco del CAC y tienen influencia en el flujo de revenimiento, demanda de SP, retención de trabajabilidad, estabilidad, viscosidad y sangrado [6]. Es importante tener en cuenta que la densidad de la mayoría de los polvos difiere sustancialmente de la densidad típica del cemento Portland. Normalmente los remplazos de cemento por algún otro polvo (puzolanas, fillers, escorias, etc.) se realizan en masa. Por lo tanto, cuando las propiedades en estado fresco o endurecido de alguna mezcla en particular son evaluadas, este efecto debe ser considerado durante el diseño experimental o de lo contrario, se podría llegar a conclusiones erróneas [6-8] ya que las variaciones en las fracciones volumétricas de los materiales constituyentes afectan directamente a las propiedades del CVC y el CAC, tanto en estado fresco como endurecido.

Aditivos químicos

Básicamente cualquier tipo de aditivo químico que se use en el CVC es factible usarlo en el CAC. En la práctica, los SP y los aditivos modificadores de la viscosidad (AMV) son los más comúnmente utilizados para la producción de CAC, sin embargo solo los SP son imprescindibles [6]. Los aditivos modificadores de la viscosidad (AMV) suelen ser usados para reducir la segregación y sensibilidad a la humedad de los agregados, así como también cuando se requiera compensar la falta de polvos que confieran más viscosidad a la pasta por lo que su utilización no siempre es necesaria.

Los SP son aditivos reductores de agua de alto rango capaces de reducir la demanda de agua hasta en un 40%. Dependiendo de su base química, su funcionamiento está basado principalmente en dos mecanismos de dispersión: repulsión electrostática y/o impedimento estérico. Cuando el cemento entra en contacto con el agua, éste se aglomera alrededor del agua formando grumos. Las moléculas de los aditivos SP están

diseñadas para dispersar las partículas de cemento, evitando así su aglomeración y permitiendo que el agua libre fluidifique la mezcla.

Los SP son esenciales en la producción de CAC. Actualmente existe una gran cantidad de este tipo de aditivos en el mercado, pero los aditivos SP a base de Éter de Policarboxilato (PCE) son usados preferencialmente por sus ventajas sobre los SP a base de sulfonatos [2, 9, 10]. Aun así, la efectividad de los SP a base de PCE para fluidificar las mezclas de concreto y mantener la trabajabilidad se ven influenciadas por la temperatura ambiente, la relación volumen de agua-volumen de polvos (V_w/V_p) [11], la compatibilidad con el cemento [12] y demás MCS empleados. La compatibilidad del cemento con algún SP determinado, se ve influenciada por propiedades físicas y químicas del cemento tales como el área superficial, contenido de álcalis, contenido de C_3A , contenido de SO_3 y tipo de SO_3 ($CaSO_4 \cdot \frac{1}{2}H_2O$, $CaSO_4 \cdot 2H_2O$, $CaSO_4$) [13]. Por ende, cuando sea posible es recomendable probar distintas combinaciones de cementos y SP disponibles en el mercado para encontrar la combinación que provea el mejor desempeño.

Los AMV fueron empleados originalmente como aditivos anti-lavado, ya que reducen la pérdida de masa del concreto cuando este es colocado bajo del agua. En los CAC, los AVM son usados para reducir la segregación, mitigar el efecto de las variaciones en los materiales y proporciones así como también para permitir el uso de granulometrías deficientes y agregados manufacturados problemáticos [5, 9]. Aunque su uso también puede ser aminorado optimizando el diseño de mezcla para conferir mayor estabilidad con la inclusión de más polvos o reduciendo el tamaño máximo del agregado para disminuir la segregación.

Los AMV comúnmente están compuestos de polisacáridos de fuentes microbianas o derivados de la celulosa. Estos polímeros son solubles en agua y forman soluciones viscosas que enlazan una parte del agua de mezcla en el concreto fresco mejorando la viscosidad plástica y el valor de fluencia de la pasta [14]. Koehler E. P., en su tesis doctoral [9], hace referencia a un trabajo de Berke *et al* publicado en el año 2002, en el cual se sugiere que el CAC debe ser producido sin AMV cuando sea posible, pero que un AMV puede ser necesario bajo ciertas circunstancias tales como cuando la humedad del agregado no puede ser controlada adecuadamente, se tienen agregados con una mala distribución granulométrica o ante bajos contenidos de polvo. De igual manera, la EFNARC (*European Federation of National Associations Representing producers and applicators of specialist building products for Concrete*) [5] advierte que los AMV no deben de ser empleados como una manera de evadir la necesidad de hacer un buen diseño de mezcla o una cuidadosa selección de los demás constituyentes del CAC.

Agregados

Contrario al CVC, el CAC tiene un menor contenido total de agregados, una relación agregado fino – agregado más alta y el tamaño máximo del agregado suele ser no mayor que 25 mm (Figura 1). Aun así, los agregados deben de ser seleccionados de tal forma que se maximice su volumen dentro de la mezcla tanto como sea posible porque son el componente de menor costo (además del agua), también un mayor volumen de agregados es usualmente asociado con mejores propiedades mecánicas. Propiedades de autocompactibilidad como la habilidad de paso, la habilidad de llenado y la resistencia a la segregación, están influenciadas por características de los agregados tales como la forma, angulosidad, textura, granulometría, contenido de polvos de tamaños $\leq 125 \mu\text{m}$, entre otras [9]. Por lo tanto, se debe hacer una selección

cuidadosa del tipo y volumen que los agregados ocuparán dentro del concreto para alcanzar las propiedades de autocompactabilidad deseadas y mantenerlas constantes durante la producción. Koehler, E. P., encontró que los agregados naturales, arenas y agregados gruesos manufacturados con buena forma, exhiben un bajo volumen de vacíos cuando son compactados y baja fricción entre partículas, lo que disminuye la demanda de SP, la viscosidad plástica y el bloqueo.

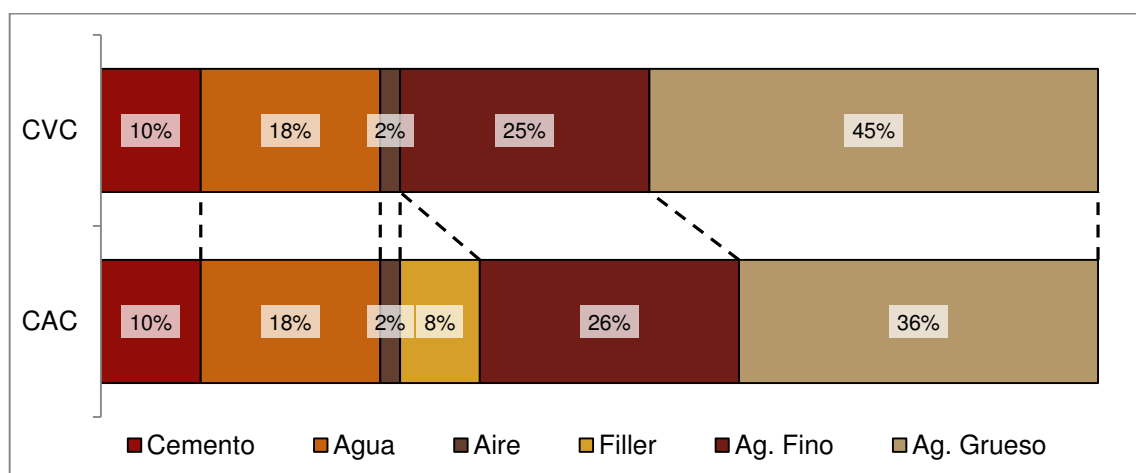


Figura 1. Ejemplo de las fracciones volumétricas de los materiales usados en el CAC comparadas con las del CVC [15].

Por otra parte, cuando se usan agregados manufacturados con un alto contenido de microfinos (definido en su trabajo como polvos $<75\ \mu\text{m}$ producto de la fracturación de las rocas durante el proceso de trituración para manufactura de agregado), incrementa la demanda de SP; sin embargo, este efecto es aminorado cuando los microfinos son considerados como parte de la pasta manteniendo un volumen constante, debido a que no se modifica la V_w/V_p . Por otro lado, cuando los microfinos son considerados como parte del agregado, se incrementa la demanda de SP debido a la reducción de la V_w/V_p aun cuando la fluidez es compensada parcialmente por el aumento de volumen de pasta (Figura 2) [9]; sin embargo, en el primer caso el aumento en el costo debido a la demanda de SP se compensa totalmente con el ahorro de cementantes.

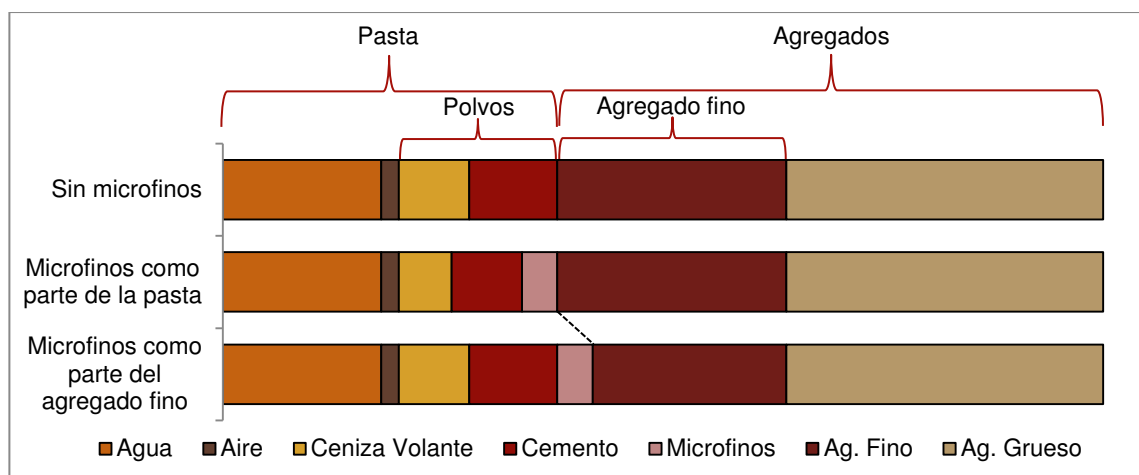


Figura 2. Efecto de los microfinos en las fracciones volumétricas del CAC.

2.1.3. Reología del CAC

La reología es la ciencia que estudia la deformación y flujo de la materia [16] y es ampliamente usada por la industria de alimentos, polímeros y pinturas. Por otro lado, el uso de la reología en la industria del concreto ha sido muy limitado; sin embargo, con el desarrollo del concreto autocompactable y concretos de alto comportamiento con composiciones más complejas (concreto lanzado, concreto anti-lavado, concreto bombeable, etc.) su aplicación ha cobrado importancia [17], permitiendo optimizar las mezclas de concreto con un nivel mayor de precisión y lograr una mejor evaluación de sus propiedades en estado fresco, así como también comprender la influencia de los materiales constituyentes y sus proporciones en el comportamiento en estado fresco.

En la industria de la construcción, términos como “trabajabilidad”, “fluidez”, “bombeable” y “cohesivo”, son usados para describir el comportamiento del concreto mientras este fluye. No obstante; son términos que su definición depende completamente de la percepción del observador [17, 18]. En un intento de no calificar el concreto de forma subjetiva, se han desarrollado más de 100 métodos empíricos de distintos tipos y calidad (revenimiento, embudo V, t_{50} , prueba Ve-be, etc.) y cuyo

propósito ha sido describir indirectamente las propiedades reológicas de concreto [19]. El problema principal con los métodos empíricos, es que los resultados de las pruebas empíricas pueden ser influenciados por las condiciones del sitio de trabajo y la habilidad del técnico a cargo de la ejecución de las mismas. Aunado a lo anterior, los métodos empíricos solamente cuantifican de forma indirecta alguna propiedad reológica del concreto y con frecuencia el resultado no es suficiente para caracterizar o predecir apropiadamente el flujo de un concreto, ni tampoco es fácilmente relacionable a algún parámetro reológico [17, 20]. Por lo tanto, para obtener una verdadera descripción del flujo del concreto, es necesario caracterizar directamente sus características reológicas.

El concreto en estado fresco puede ser considerado como un fluido que se compone por una suspensión concentrada de agregados inmersos en una matriz de pasta de cemento, la cual a su vez, es una suspensión concentrada de polvos inmersos en agua [17]. Debido a lo anterior, la caracterización de sus propiedades reológicas se complica bastante debido al amplio rango de tamaño de partículas que conforman su composición (desde 1 μm hasta partículas $\geq 10\text{ mm}$) y por si fuese poco, posee propiedades dependientes del tiempo a causa de la hidratación del cemento y el desarrollo de tixotropía [17, 21]. Por lo tanto, se ha vuelto necesario hacer uso de equipos más sofisticados para entender y predecir con más exactitud el comportamiento de los concretos de alto comportamiento en estado fresco.

Los conceptos de reología empezaron a aplicarse a la tecnología del concreto en la década de 1970; no obstante, fue hasta 1973 que Tattersall, G. H., y Banfill, P. F. G. lograron extraer el esfuerzo de fluencia y la viscosidad plástica con el reómetro conocido como Mk II diseñado por ellos mismos [18]. En paralelo con el desarrollo de nuevos reómetros para concreto, la determinación directa de los parámetros reológicos

fundamentales del concreto ha demostrado ser una estrategia muy útil y sensible para controlar su calidad y optimizar su proceso productivo. Teniendo en cuenta la alta sensibilidad que presenta el CAC a pequeñas variaciones en las proporciones de sus materiales constituyentes, la caracterización directa de los parámetros reológicos resulta ser una herramienta de alta calidad para la detección de potenciales desviaciones de las características especificadas por el constructor [22]. Por desgracia, aun es una práctica desarrollada mayormente con fines de investigación y no como una herramienta de control de calidad.

Actualmente existen varios tipos de reómetros para concreto y se clasifican de acuerdo a su geometría en 3 categorías: placas paralelas, cilindros coaxiales y de paleta [19]. En la Figura 3 se puede observar un ejemplo de un reómetro perteneciente a cada una de las categorías mencionadas.



Figura 3. Reómetros para concreto. De izquierda a derecha, BTRHEOM (placas paralelas), ConTec BML Viscometer (coaxial) e IBB Rheometer (paleta).

Los reómetros suelen medir torque (T) y frecuencia rotacional (N). Estas mediciones dependen de la geometría del aparato utilizado (altura y longitud de la paleta, radio de los cilindros interior y exterior, radio de los platos paralelos, etc.). Si la geometría del aparato no resulta demasiado compleja o existe algún método de calibración, es

posible transformar el torque y la frecuencia rotacional en unidades físicas de esfuerzo y viscosidad, las cuales en teoría no dependen del tipo de reómetro utilizado [9, 18]. Wallevik, O.H y Wallevik, J.E., hacen referencia a una comparación efectuada en el año 2001 entre los resultados del reómetro BTRHEOM, Mk II y ConTec BML Viscometer llevada a cabo por Banfill, P.F.G., *et. al.* En dicha comparación, se evaluaron simultáneamente muestras de concreto de la misma batchada en los 3 equipos. Como resultado, los 3 equipos detectaban las mismas tendencias en el comportamiento observado (Figura 4) [18], aunque los valores absolutos diferían entre sí. No obstante, existía más concordancia entre los resultados del Contec BML Viscometer y el Mk II, que los obtenidos con el BTRHEOM el cual generalmente tendió a mostrar valores más altos respecto de los demás.

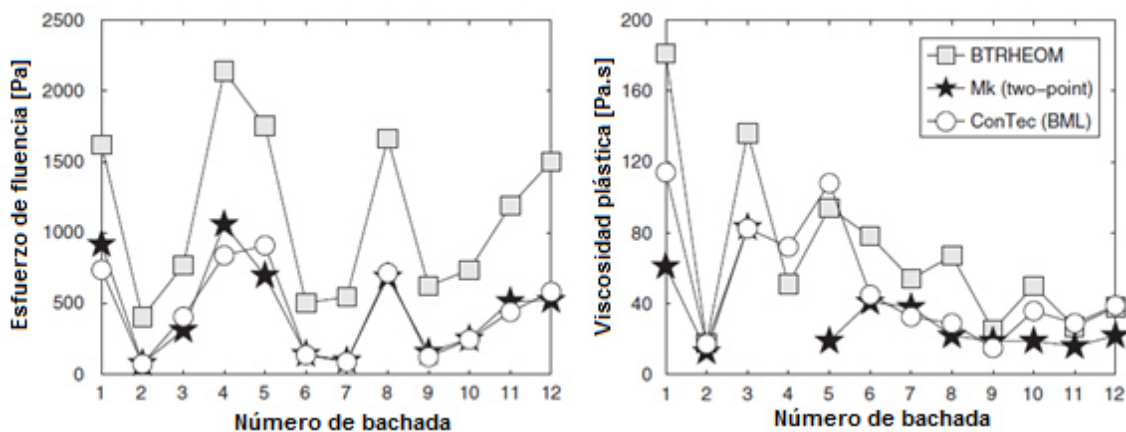


Figura 4. Comparación de los resultados obtenidos por diferentes reómetros de muestras extraídas de las mismas mezclas de concreto [18].

La aplicación de la reología del concreto se ha limitado por muchos años principalmente a actividades de investigación debido a que los reómetros para concreto son equipos costosos, sensibles y requieren de personal especializado para la interpretación de los datos, por lo que no es habitual verlos operar en campo ni en la industria [23]. En vías de cerrar la brecha entre la aplicación de la reología del concreto

y las necesidades en campo, se han desarrollado reómetros portátiles de paleta tales como el ConTec Rheometer-4SCC y el ICAR RHM-3000 (Figura 5) del Centro Internacional de Investigación de Agregados (ICAR, por sus siglas en ingles) de la Universidad de Texas en Austin. Ambos reómetros requieren de una computadora para procesar los datos obtenidos y determinar cualitativamente las propiedades reológicas en unidades relativas a la configuración geométrica del contenedor y la paleta usada; sin embargo, solo los datos del RHM-3000 pueden ser transformados a unidades físicas fundamentales [21] debido a que la rotación de su paleta de geometría simple describe un cilindro imaginario, asemejándolo a los reómetros de cilindros coaxiales.



Figura 5. Rheometer-4SCC (izquierda) e ICAR RHM-3000 (derecha)

Aunque el software del RHM-3000 está diseñado para mostrar los resultados automáticamente una vez concluidas las pruebas, este presenta muchas limitaciones técnicas e incluso puede mostrar resultados erróneos. No obstante, el software permite al usuario la capacidad de almacenar los datos adquiridos durante la ejecución de la prueba en un archivo RAW, haciendo posible un análisis más minucioso y preciso.

2.1.3.1. Modelos reológicos

Para efectuar la caracterización reológica de un fluido, es necesario determinar la relación existente entre el esfuerzo de corte y la rapidez de deformación mediante un reograma o “curva de flujo” y compararla contra un modelo reológico. Los tipos de flujo más aplicables para el concreto son los esquematizados en la Figura 6, la cual fue extraída del reporte del comité 238 del ACI [24].

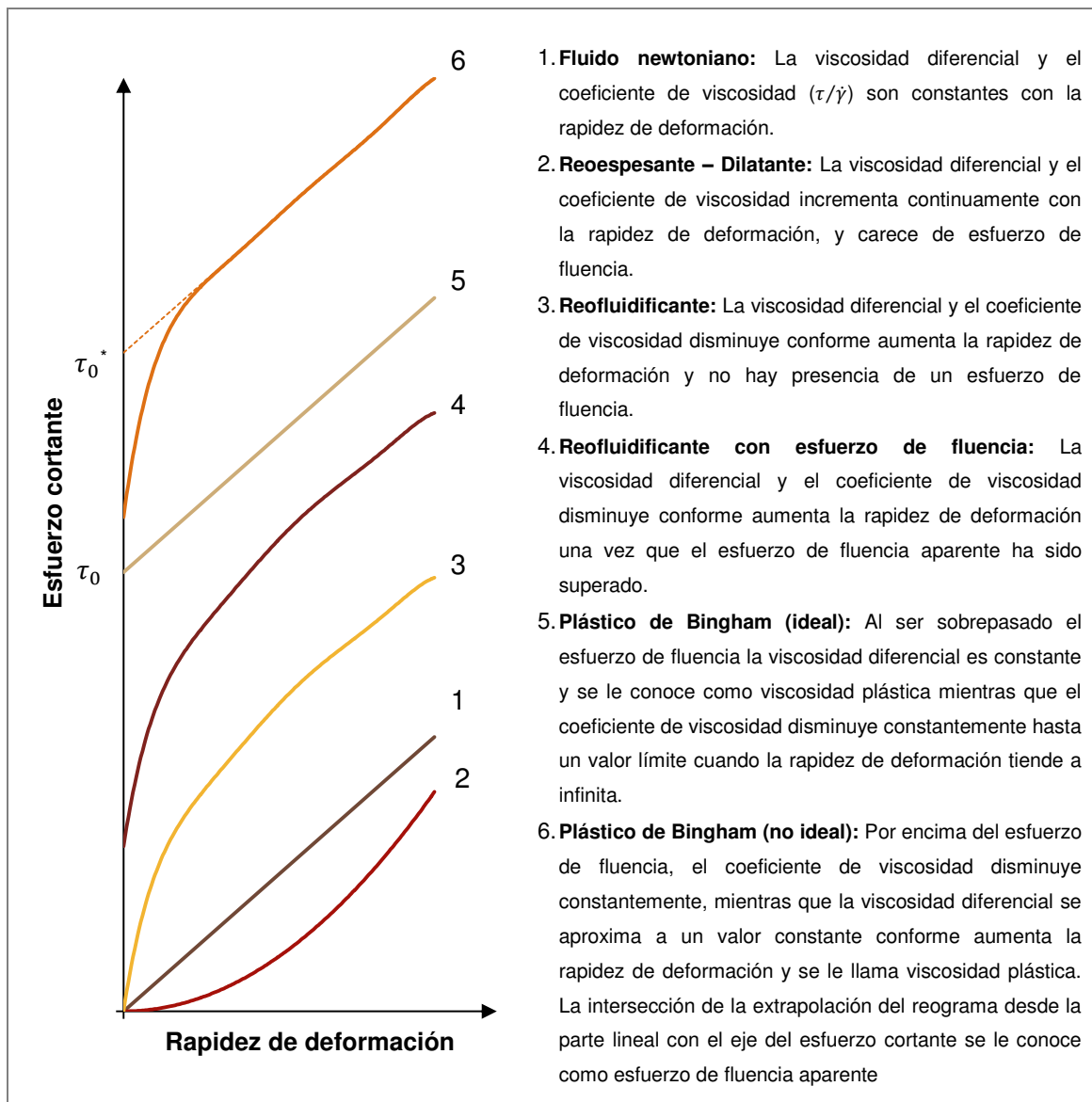


Figura 6. Identificación de distintos reogramas de acuerdo a su forma característica.

Las ecuaciones constitutivas de los modelos reológicos que permiten describir los comportamientos de la Figura 6 se presentan en la Tabla 3 [24].

Tabla 3. Modelos reológicos usados para describir el flujo del concreto

Materiales sin esfuerzo de fluencia	
Ley de Newton	$\tau = \eta \dot{\gamma}$
Ley de la potencia	$\tau = K \dot{\gamma}^n$
Materiales con esfuerzo de fluencia	
Bingham	$\tau = \tau_0 + \mu_p \dot{\gamma}$
Bingham modificado	$\tau = \tau_0 + \mu_p \dot{\gamma} + c \dot{\gamma}^2$
Hershel-Bulkley	$\tau = \tau_0 + K \dot{\gamma}^n$
Casson	$\tau = \tau_0 + \eta_\infty \dot{\gamma} + 2(\sqrt{\tau_0 \eta_\infty}) \sqrt{\dot{\gamma}}$
De Kee	$\tau = \tau_0 + \mu_p \dot{\gamma} e^{-\alpha \dot{\gamma}}$
Yahia - Khayat	$\tau = \tau_0 + 2(\sqrt{\tau_0 \eta_\infty}) \sqrt{\dot{\gamma}} e^{-\alpha \dot{\gamma}}$

Dónde:

τ =	Esfuerzo cortante (Pa)	τ_0 =	Esfuerzo de fluencia (Pa)
η =	Viscosidad (Pa.s)	μ_p =	Viscosidad plástica (Pa.s)
$\dot{\gamma}$ =	Rapidez de deformación (s^{-1})	c =	Término de segundo orden
K =	Consistencia	α =	Parámetro dependiente del tiempo
n =	Potencia que representa la desviación respecto de un fluido newtoniano	η_∞ =	Viscosidad aparente a una rapidez de deformación muy elevada

El modelo reológico de Newton se incluye solo para fines de comparación ya que éste no es capaz de describir el flujo del concreto. El concreto en estado fresco posee una propiedad reológica denominada “esfuerzo de fluencia”, que representa un esfuerzo cortante umbral que debe ser excedido para inicializar el flujo [25]. Este fenómeno es el que se ha observado por más de 100 años con la prueba del revenimiento. Al levantar el molde en dicha prueba, el peso del concreto hace colapsar la forma adoptada del molde bajo acción de la gravedad [26]. Concretos con menores esfuerzos de fluencia tenderán a deformarse más (mayor revenimiento) y viceversa. En el pasado ya se ha intentado correlacionar el revenimiento del concreto con el esfuerzo de fluencia pero se

tenían discrepancias entre los resultados obtenidos al usar las diferentes metodologías propuestas [19]. Para el caso del concreto autocompactable, Rousell, N., et. al., desarrollaron una expresión matemática (ecuación 2.1) para predecir y determinar el esfuerzo de fluencia de concretos autocompactables o de morteros y pastas con consistencia autocompactable en función del radio del flujo de revenimiento obtenido [27].

$$\tau_0 = \frac{225\rho gV^2}{128\pi^2 R^5} \quad 2.1$$

Dónde:

τ_0 = Esfuerzo de fluencia

ρ = Densidad

g = Gravedad

V = Volumen de la muestra

R = Radio de esparcimiento de la muestra

La presencia del esfuerzo de fluencia convierte al concreto en estado fresco en un fluido viscoplástico, por lo tanto es una propiedad reológica cuya caracterización es de carácter indispensable. Las mezclas de concreto normalmente exhiben dos tipos diferentes de esfuerzo de fluencia: estático y dinámico. La diferencia entre estas dos propiedades reológicas es que el esfuerzo de fluencia estático está influenciado por la tixotropía [26]. La tixotropía es una propiedad que se manifiesta como un aumento en la viscosidad, reversible y dependiente del tiempo. La tixotropía es una propiedad típica del concreto y otras suspensiones, y puede ser detectada como una diferencia entre el esfuerzo de fluencia estático y dinámico [26]. La tixotropía se presenta cuando un fluido es dejado en reposo por un tiempo determinado y luego es sometido a un incremento de esfuerzo cortante o rapidez de deformación. Durante el reposo, las partículas pequeñas que conforman a la suspensión generan una red de interacciones coloidales (promovidas por fuerzas Brownianas, hidrodinámicas y de van der Waals) formando flóculos. Por lo tanto, entre mayor sea el tiempo de reposo, un mayor número de

conexiones interparticulares son formadas y por lo tanto, se experimenta el incremento en la viscosidad aparente del material [28]. Para poder inicializar el flujo, la estructuración alcanzada por las partículas debe romperse y es entonces cuando un descenso en la viscosidad es experimentado [25]. Una vez excedido el esfuerzo de fluencia estático, el esfuerzo de fluencia dinámico es el esfuerzo mínimo necesario que debe mantenerse para que el material continúe fluyendo [26] y se calcula mediante la extrapolación del reograma hacia el eje del esfuerzo.

A lo largo de las investigaciones relacionadas con la reología del concreto, se ha encontrado que el modelo reológico de Bingham representa muy bien el flujo del concreto en estado fresco (ecuación 2.2) [17-19, 22-24, 26, 27]. Aunque a raíz del desarrollo de los concretos de alto comportamiento, desviaciones del modelo reológico de Bingham se han observado [29 - 31].

$$\tau = \tau_0 + \mu_p \dot{\gamma} \quad 2.2$$

Dónde:

τ = Esfuerzo cortante

τ_0 = Esfuerzo de fluencia

μ_p = Viscosidad plástica

$\dot{\gamma}$ = Rapidez de deformación

En un material de Bingham ideal, una vez excedido el esfuerzo de fluencia (τ_0) la viscosidad plástica (μ_p) es igual a la viscosidad diferencial ($\eta_{diff} = \partial\tau/\partial\dot{\gamma}$) para toda rapidez de deformación ($\dot{\gamma}$) que promueva un flujo laminar estable (equilibrio). La rapidez de deformación es la tasa de cambio de la deformación por corte respecto del tiempo ($d\gamma/dt$) cuando un esfuerzo cortante es aplicado (Figura 7) [18]. En el caso del CAC, el esfuerzo de fluencia es disminuido hasta valores cercanos a cero ($\tau_0 < 60$ Pa) relativamente hablando, con SP para asegurar que el peso del mismo concreto sea suficiente para promover el flujo y por ende, la autocompactibilidad del mismo.

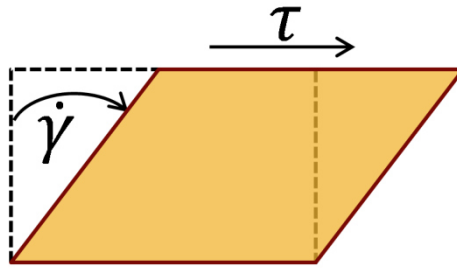


Figura 7. Deformación de un cuerpo sometido a un esfuerzo de corte.

A consecuencia de esto, es necesario mantener alta a la viscosidad para asegurar su estabilidad ($15 \leq \mu_p \leq 120$ Pa.s) [32]. Debido al bajo esfuerzo de fluencia del CAC, se ha observado con frecuencia una relación no lineal entre el esfuerzo cortante y la rapidez de deformación ocasionando que al aplicar el modelo reológico de Bingham, el esfuerzo de fluencia dinámico resulte en valores negativos, lo cual es físicamente imposible [29-31, 33] (Figura 8). En la misma figura, también se puede apreciar que el grupo de datos presentado sigue un comportamiento más acorde al de los fluidos “reoespesantes – dilatantes” (representado por una línea discontinua). Ante tal caso, es necesario hacer uso de otro modelo reológico como el de “Herschel-Bulkley” (HB) o el Modelo reológico de Bingham Modificado (MBM) (Tabla 3). En la Figura 9 se muestra una comparación de resultados entre el modelo reológico de HB y MBM. Aunque los dos modelos toman en cuenta el comportamiento reoespesante del material después de que el esfuerzo de fluencia ha sido excedido, el modelo de HB presenta dos desventajas [34]:

- Sobrestima el valor del esfuerzo de fluencia debido a que la pendiente de la curva generada tiende a cero cuando los valores de la rapidez de deformación son muy bajos.
- Resulta difícil interpretar el significado físico del parámetro “ K ” debido a que su dimensión es variable debido a su dependencia del parámetro “ n ” (Pa.s ^{n}).

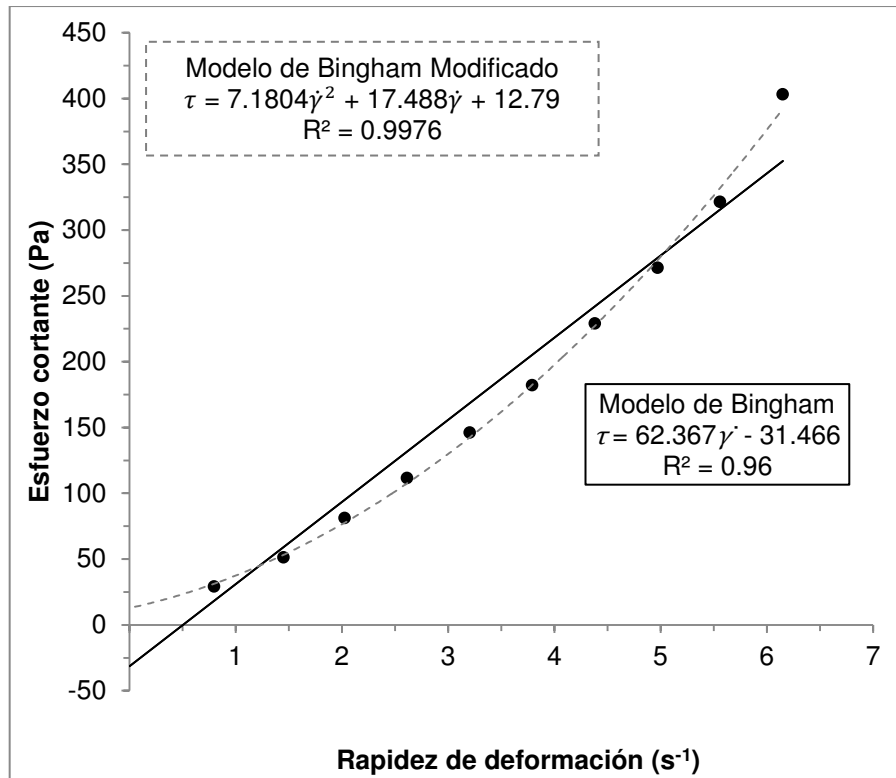


Figura 8. Desviación del modelo de Bingham (línea continua) detectada en CAC.

Por otra parte, el MBM ($\tau = \tau_0 + \mu_p \dot{\gamma} + c \dot{\gamma}^2$) provee un esfuerzo de fluencia positivo, posee un término lineal positivo en la rapidez de deformación el cual previene que la pendiente adopte el valor de cero cuando la rapidez de deformación es muy baja y todos sus parámetros tienen dimensiones fijas lo cual facilita su interpretación física [34, 35]. En el MBM, se ha probado por medio de análisis matemáticos que c/μ_p expresa la intensidad de la curvatura respecto de un fluido newtoniano, es decir, es el análogo de “ n ” en el modelo de HB. Si $c > 0$, el fluido es reoespesante, si $c < 0$, el comportamiento corresponde al de un fluido reofluidificante, y cuando $c = 0$, se obtiene nuevamente el modelo de Bingham [34].

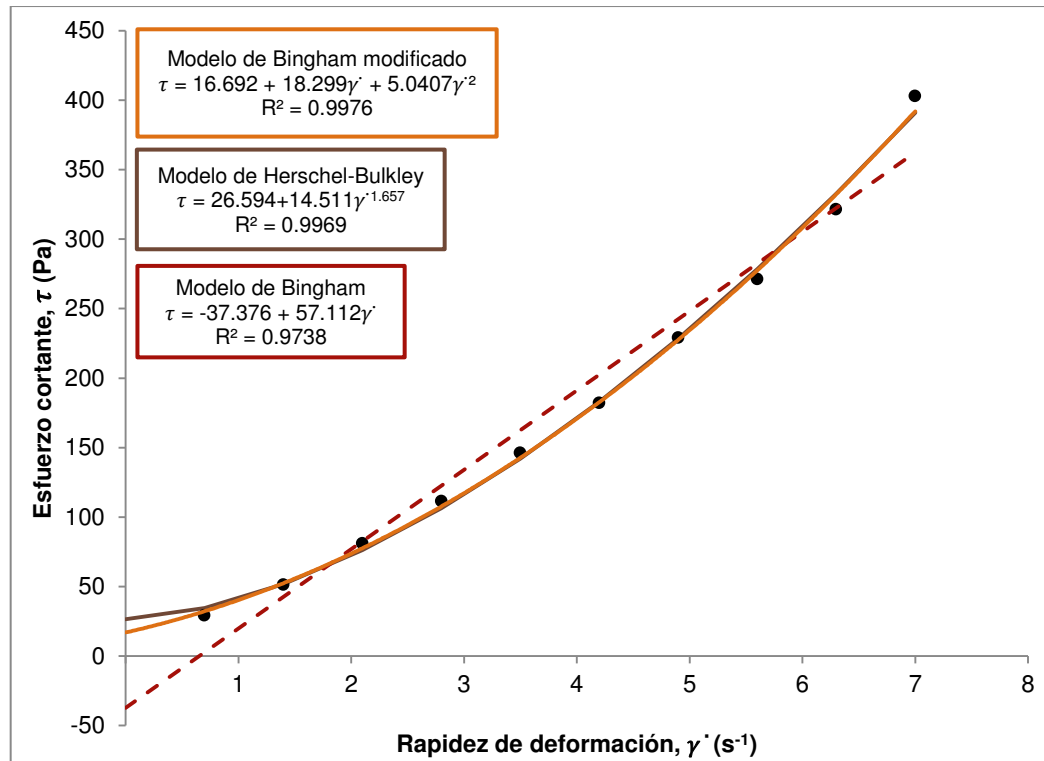


Figura 9. Comparación entre el modelo reológico de Bingham, Herschel-Bulkley y Bingham modificado

Una desventaja de utilizar un modelo no lineal para encontrar las propiedades reológicas del concreto, es la dificultad para definir el valor de la viscosidad debido a que esta depende de la rapidez de deformación. Una alternativa para sobrellevar la desventaja mencionada es reportar el valor de la viscosidad como viscosidad diferencial (ecuación 2.3), la cual representa la inclinación de la curva a una rapidez de deformación dada (que puede ser seleccionada en función de la aplicación deseada). No obstante, es recomendable usar los modelos no lineales solo cuando son estrictamente necesarios [36].

$$\frac{d\tau}{d\dot{\gamma}} = \mu + 2c\dot{\gamma} \quad 2.3$$

Dónde:

$\frac{d\tau}{d\dot{\gamma}}$ = Viscosidad diferencial

μ = Coeficiente de viscosidad

$\dot{\gamma}$ = Rapidez de deformación

c = Coeficiente del termino de segundo orden del modelo de Bingham modificado

2.1.3.2. Comportamiento reoespesante del CAC

En la mayoría de la literatura el término “dilatante” es empleado para referirse a los fluidos reoespesantes (*shear-thickening*) debido a que anteriormente, el comportamiento reoespesante se asociaba con una expansión de volumen de la fracción solida de una suspensión para lograr inicializar el flujo, el término “dilatante” era usado para describir ambos fenómenos [37], y hoy en día en la práctica se sigue haciendo. Sin embargo, los términos “reoespesante” y “dilatante” son términos que describen dos efectos distintos y son independientes entre uno del otro [26]. Por lo tanto, usar el término “dilatante” para referirse a un fluido reoespesante es incorrecto [25]. El origen de la “dilatancia” yace en el hecho de que las interacciones entre las partículas de una suspensión muy saturada, requiere que las partículas expandan su volumen total para fluir [38]. De forma más específica, Feys, D., et al, revisaron dos teorías mediante las cuales el comportamiento reoespesante de CAC podría ser explicado: La primera atribuye el origen del comportamiento reoespesante a la formación de *hidroclusters*. De acuerdo a esta teoría, el comportamiento reoespesante inicia en cierto esfuerzo cortante crítico, en el cual las fuerzas de lubricación hidrodinámicas entre las partículas dominan sobre las fuerzas de repulsión causando que las partículas se aglomeren temporalmente formando “agregados” de mayor tamaño (Figura 10), que al incrementarse en número, pueden incluso trabar el flujo haciendo que la viscosidad tienda a infinito [39].

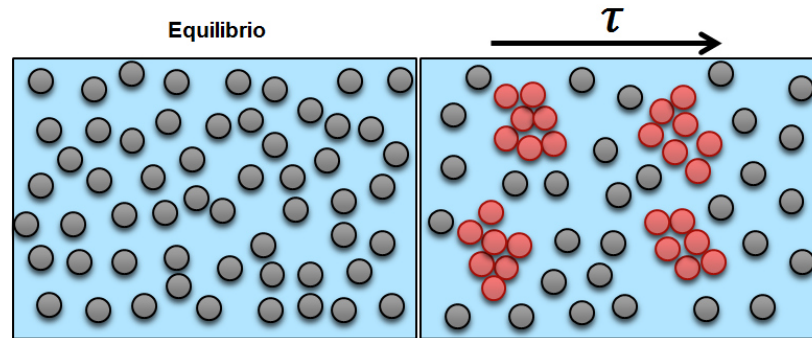


Figura 10. Representación de los “hidrocúmulos” formados por las partículas bajo acción de un esfuerzo cortante [39].

El esfuerzo cortante crítico aumenta al disminuir el tamaño de partículas, aumentando la polidispersión del tamaño de partículas y también debido a recubrimientos poliméricos (ej. superfluidificantes), mientras que la intensidad del efecto incrementa con un aumento de la fracción de volumen de sólidos (relativa a la fracción de volumen máxima) y es dependiente del tipo de fuerzas de repulsión. La segunda teoría es llamada “inercia de grano”, en la cual se establece que el efecto reoespesante puede ser causado por la transferencia de cantidad de movimiento entre las partículas suspendidas [31]. Esto es causado por la inercia de las partículas mediante la cual, una parte de la cantidad de movimiento es transferida directamente entre ellas. Para determinar si la inercia domina sobre las fuerzas viscosas, el número de Reynolds (relación entre la inercia y la viscosidad) puede ser calculado. Si el número de Reynolds es menor que 0.1, la inercia es totalmente dominada por las fuerzas viscosas y puede ser despreciada. Por otro lado, la importancia de la inercia de grano se incrementa conforme el radio de la partícula aumenta, por lo tanto las partículas grandes serían las responsables del efecto reoespesante. Un incremento en la intensidad del comportamiento reoespesante en el CAC debido a la inercia de grado es improbable debido al espaciamiento entre las partículas de agregado grueso. Los agregados con tamaños superiores a 8 mm no tienen una fuerza de inercia

despreciable y pueden romper los *hidroclusters* formados a su alrededor haciendo que la intensidad del comportamiento reoespesante disminuya [31].

El comportamiento reoespesante solo puede ser observado si el CAC es propenso a ello. Para esto, es necesario contar con la suficiente cantidad de pequeñas partículas en conjunto con una baja cantidad de agregado grueso y por último, exceder el esfuerzo cortante crítico (sin generar segregación) a partir del cual este fenómeno se presenta [31]. Un concreto reoespesante presenta más desventajas que ventajas debido a que dos procesos importantes para la industria del concreto ocurren a alta rapidez de deformación, el mezclado y el bombeo [31, 38]. No considerar el efecto reoespesante y su intensidad puede conllevar a la destrucción de equipos, pérdidas económicas y aumentar el riesgo en el sitio de trabajo [31].

2.1.4. Robustez del CAC

La robustez de una mezcla de concreto es la tolerancia total de sus propiedades en estado fresco a fluctuaciones causadas por variaciones en los materiales constituyentes, condiciones de humedad de los agregados, temperatura del concreto o alguna combinación de estas. Las mezclas de CAC son mucho más sensibles a fluctuaciones en su consistencia durante la producción que el CVC [2].

Muchas plantas de producción de concreto han mostrado que el CAC es muy sensible a inconsistencias en las características de los agregados propias de su naturaleza [40]. Adolecer de la falta de robustez puede resultar en un sangrado y segregación significativos. Un CAC robusto permite que el productor sea más consistente respecto de las propiedades del concreto que entrega debido a que su producto es menos susceptible a variaciones debido a fluctuaciones en las propiedades de los materiales y proceso de producción [41]. Por lo tanto, para los productores de concreto

premezclado resulta más problemático aceptar esta tecnología debido a que hay más factores en juego que requieren ser controlados con más precisión y monitoreados con más frecuencia durante la producción. Entre algunos de estos factores figuran:

- Distribución granulometría de los agregados
- Humedad de los agregados
- Densidad de la pasta
- Secuencia de mezclado
- Energía de mezclado
- Humedad de los agregados
- Imprecisión al dosificar los ingredientes
- Cambio de lote de materiales en mezclas sucesivas

En comparación con el CVC, pequeñas variaciones en los factores mencionados si tienen efectos significativos en la estabilidad e uniformidad de las propiedades del CAC, por lo que se recomienda ampliamente que durante el proceso de evaluación de un diseño de mezcla dado, se investigue la sensibilidad de las fluctuaciones en el nivel de fluidez y contenido de agua para el diseño de mezcla en cuestión y los materiales empleados [2, 5].

Las tolerancias permisibles en la variación de los constituyentes de CVC están establecidas por diferentes códigos y normatividades. Algunas de ellas se presentan en la Tabla 4. Al momento aún se desconoce si las tolerancias bajo las cuales trabajan las plantas de concreto premezclado convencionales sean apropiadas para la producción de CAC robusto [42].

Tabla 4. Tolerancias especificadas por distintos códigos para variaciones en dosificadoras de concreto premezclado

Material	Tolerancia (% en peso)			
	ASTM C94	ACI	EC	NMX-C155
Cemento	±1	±1	±3	±1
Agregado fino	±2	±2	±3	±2
Agregado grueso	±2	±3	±3	±2
Agua	±3	±3	±3	±1
Aditivos (líquidos)	±3	±3	±5	±3

2.1.4.1. Evaluación de la robustez de los CAC

La EFNARC, (2005), estableció que evaluar la robustez es un paso importante en el proceso de diseño de mezcla. Por lo tanto, sugirió que una mezcla robusta debe tolerar cambios en su dosificación de agua de mezcla de hasta ± 10 litros/m³ de agua sin quedar fuera de los límites especificados para que pueda considerarse como tal, fundamentado en que algún cambio en los constituyentes de la mezcla puede traducirse en un cambio en la demanda de agua [5]. Nunes S., *et al* (2006), dentro del esquema de trabajo de un proyecto nacional en Portugal, notaron que variaciones en el cemento o aditivos minerales debido a cambios en el proceso de producción, así como también cambios de banco de agregados causaban grandes variaciones en las propiedades en estado fresco del CAC reconociendo con ello la importancia de contar con una mezcla robusta que sea afectada tan poco como sea posible por fuentes externas de variación. En este trabajo se propuso un diseño de experimentos factorial fraccional en conjunto con una técnica estadística de remuestreo (*bootstrapping*), para investigar la interacción de 5 variables (V_w/V_p , W_f/W_c , SP/V_p , V_s/V_m , V_{ap}) y sus efectos en el flujo de revenimiento, t_{50} , tiempo de embudo V , altura de llenado y la resistencia a la compresión del CAC analizado fueron comparados contra intervalos de confianza al 95% [43]. Dentro de sus aportaciones figura que la resistencia a la compresión fue la más afectada por las variaciones efectuadas. Como desventaja, la

metodología de Nunes S. et al resulta muy complicada. Por otro lado, Domone, P.L. (2006) [44], presentó una recopilación de resultados de diversas investigaciones con las cuales construyó la Figura 11, en la cual se puede notar que las mezclas sin AMV presentan una pendiente más pronunciada por lo que son consideradas por el autor como más sensibles a cambios en el agua de mezcla equivalentes a 1% de la humedad del agregado (asumiendo un volumen de agregado dentro de un rango típico), confirmando el incremento de robustez de las mezclas que incluyen AMV reportado numerosas veces en la literatura.

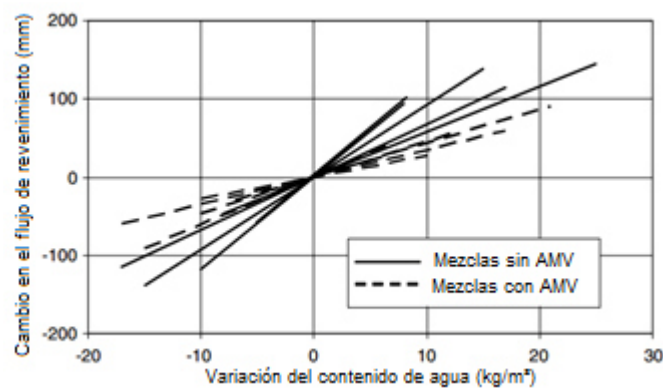


Figura 11. Efecto de la variación del contenido de agua en el flujo de revenimiento de mezclas de SCC con y sin AMV [44].

Bonen, D., et al (2007), basándose en una extensa revisión de la literatura, concluyeron que las variaciones en las propiedades del CAC se atribuyen a efectos específicos de los ingredientes en las propiedades reológicas de la mezcla, densidad y tamaño del agregado, densidad de la pasta, tipo de mezcladora, secuencia, tiempo y energía total de mezclado. De igual manera, concluyen que la robustez depende también de la tixotropía y de la aplicación para cual se diseñe el concreto. Por ejemplo, mezclas que podrían ser robustas visualmente para trabajos al nivel de piso, podrían volverse no robustas si se les coloca verticalmente en muros. Por último, en base a sus observaciones, proponen que la estrategia a seguir para aumentar la robustez es

aumentar la viscosidad a costa de restar un poco de SP, adicionar AMV, aumentar la densidad de la pasta y disminución del tamaño máximo del agregado [45]. Shen, L., *et al* (2007), midieron la robustez de la resistencia a la segregación ante variaciones de la a/cm haciendo uso de una sonda de segregación en distintas mezclas de CAC (Figura 12). Por medio de una comparación entre las pendientes de las lecturas generadas por la sonda de segregación, los autores concluyeron que la resistencia a la segregación de las mezclas del tipo AMV es más tolerante a variaciones en la a/cm que la de las fabricadas a base de inclusión de polvos [46].

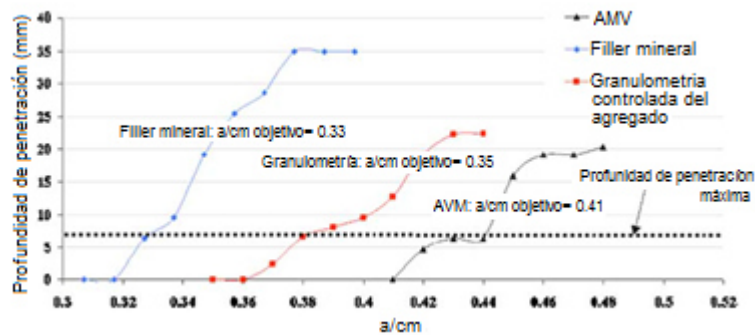


Figura 12. Resultados típicos de una prueba de robustez usando la probeta de segregación de Lin Shen [46].

Billberg, P.H., (2008), evaluó el efecto de variaciones en la humedad del agregado fino, la temperatura y el contenido de agregado fino de mortero equivalente a concreto en los parámetros reológicos de la mezcla. Como puede observarse en la Figura 13, la humedad del agregado es el factor que presenta una razón de cambio más pronunciada respecto de la temperatura y variación del contenido de finos tanto para el esfuerzo de fluencia y viscosidad plástica. En este estudio, la robustez de las mezclas producidas se evaluó a través de la comparación de las áreas relativas generadas a partir del cálculo del coeficiente de variación del esfuerzo de fluencia y de la viscosidad plástica como se muestra en la Figura 14. Entre más pequeña sea el área resultante, más robusta es la mezcla evaluada [47].

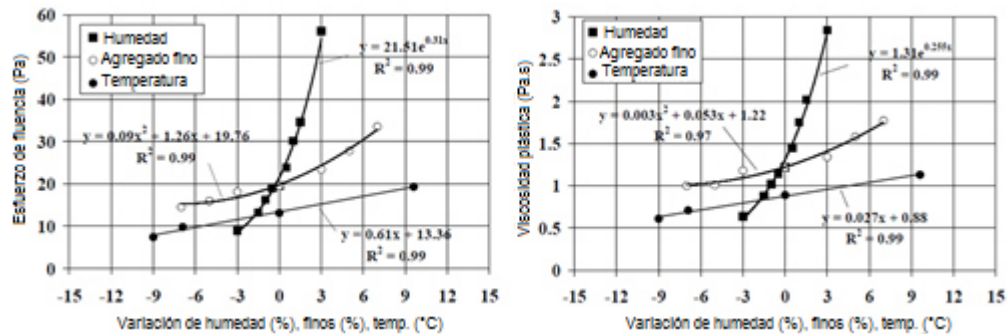


Figura 13. Efecto de la humedad del agregado, contenido de finos y temperatura en el esfuerzo de fluencia (izquierda) y viscosidad plástica (derecha) para mezclas de mortero equivalente a concreto sin AMV [47].

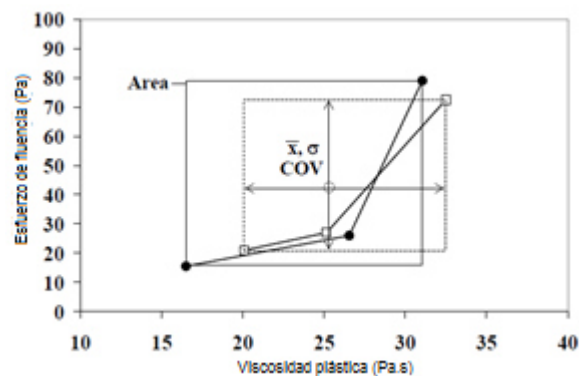


Figura 14. Cálculo de las áreas de robustez a partir del coeficiente de variación [47].

Rigueira, J. W., *et al* (2009), simularon errores en la dosificación de los materiales en producción a escala industrial en 6 mezclas de CAC y sus propiedades en estado fresco y endurecido fueron evaluadas por medio de análisis de varianza (ANOVA). En su estudio concluyeron que la precisión para controlar los finos totales y agua de mezcla son las únicas circunstancias que podían afectar seriamente el comportamiento de las mezclas que analizaron así como también que la adición de polvo extra para obtener una mejor estabilidad del flujo de revenimiento puede hacer que las mezclas se vuelvan más sensibles a errores en el contenido de agua mezcla, considerando las propiedades relacionadas con la viscosidad, por lo que la robustez también depende del tipo de diseño de mezcla [48]. Georgiadis, A. S., *et al* (2009), evaluaron la pérdida de revenimiento, robustez y presión en la cimbra del CAC fabricado con AMV y con

filler de caliza. Como conclusión, obtuvieron que las mezclas de CAC producidas con filler de caliza demostraron tener un mejor comportamiento reológico que las producidas con AMV. Por lo tanto, el AMV no siempre es capaz de compensar la falta de finos. Tal comportamiento se le atribuyó al AMV usado y la mala distribución granulométrica de la mezcla (bajo contenido de finos) la cual, en los casos más extremos se encontraba muy cerca de los 380 kg/m^3 de polvos [49]. Kwan, A. K., *et al* (2010), propusieron mejorar la robustez de mezclas CAC adicionando materiales cementantes suplementarios (ceniza volante y humo de sílice condensado) y evaluaron la efectividad de estos materiales en diferentes porcentajes de remplazo de cemento ante variaciones de SP. En su estudio, la robustez de las mezclas de CAC fue determinada al comparar los resultados obtenidos de flujo de revenimiento y resistencia a la segregación contra los de altura de llenado (caja “U”). De tal análisis se desprendió la dosificación máxima de SP que permitía mantener a la mezcla entre los rangos de aceptación establecidos (flujo de revenimiento $\geq 65 \text{ cm}$, resistencia a la segregación $\leq 20\%$) y que mantuvieran una altura de llenado $\geq 30 \text{ cm}$. La amplitud de dicho intervalo fue tomado como indicador cuantitativo de robustez. Con base en los resultados, los autores concluyeron que la dosificación óptima de SP para desempeño difiere de la dosificación óptima para robustez [50]. Chowdhury, S., & Basu, P. C. (2010), propusieron una metodología para el diseño de mezclas de CAC con CV. De acuerdo con los autores, la metodología propuesta generó una mezcla de CAC “tipo polvo” de la cual se espera que no sea susceptible a problemas de robustez, y debido a que una parte sustancial del cemento es remplazada por de ceniza volante es posible obtener mezclas más robustas sin elevar el costo del concreto [51]. Sin embargo, aun cuando es factible aumentar la robustez de un CAC elevando el contenido de polvos por m^3 de concreto debido al aumento del volumen de pasta, en el antecedente citado

no se muestra evidencia alguna de que se hayan conducido experimentos que cuantificaran la sensibilidad de los CAC evaluados. Frunz, L., *et al* (2010), evaluaron el efecto de 3 tipos de SP a base de éter de policarboxilato en la robustez del CAC. Su trabajo se basó en que en la práctica el agua de mezcla suele ser ajustada en función de la lectura del amperímetro del camión revolvedor, y de acuerdo con los autores esta lectura es un indicador de la viscosidad de la mezcla. Ajustar la viscosidad de la mezcla controlando la cantidad de agua adicionada contrarresta las posibles variaciones producto de algún cambio en la composición de la mezcla que tengan impacto en su trabajabilidad (granulometría, humedad de los agregados, contenido de sulfatos del cemento, etc.). Sin embargo, los autores estiman que la precisión de lectura del amperímetro puede oscilar en un $\pm 20\%$, lo cual en su estudio equivale a una variación de 0.02 de la w/cm . Por lo tanto, la robustez de las mezclas hechas con distintos SP fue evaluada en función de la relación existente entre esfuerzo de fluencia (medido indirectamente a través del flujo de revenimiento) y la viscosidad (Figura 15) ante variaciones de la w/cm dentro del rango de ± 0.02 y concluyeron que entre menos relacionados estén el esfuerzo de fluencia y la viscosidad, mayor es la robustez de la mezcla y que dicha relación se ve influenciada por el tipo de polímero del SP utilizado [52].

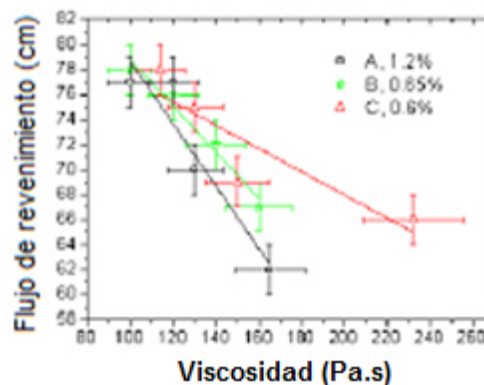


Figura 15. El flujo de revenimiento de las mezclas elaboradas con el SP “C” demostró tener un menor rango de respuesta ante variaciones en la viscosidad [52].

Simonsson, P., & Emborg, M. (2011), realizaron un estudio que tenía como objetivo desarrollar una serie de recomendaciones para producir CAC robustos. La robustez fue evaluada solo de forma cualitativa inspeccionando visualmente la razón de cambio entre distintas propiedades en estado fresco (flujo de revenimiento, t_{50} , esfuerzo de fluencia y viscosidad) influenciada por variaciones de humedad en el agregado, granulometría y contenido de filler. Entre sus aportes, determinaron que las mezclas elaboradas fueron insensibles a las variaciones de humedad y granulometría lo cual se le atribuyó al alto volumen de polvos utilizado (cemento + filler). Asimismo, encontraron que una reducción del contenido de filler conlleva a una degradación en la calidad del concreto fresco, siendo la viscosidad de la mezcla la propiedad más afectada, sin embargo; mencionan que podría ser posible prescindir de hasta un 50% de filler cuando un AMV es incorporado a la mezcla sin demeritar la calidad del concreto [53].

Naji, S., *et al* (2011), llevaron a cabo un programa experimental cuyo objetivo era evaluar la robustez de mezclas de CAC cuando son sujetas a variaciones de $\pm 1\%$ de humedad del agregado fino. Las mezclas estaban elaboradas con combinaciones de AMVs y SPs de distinta base química. La robustez de las mezclas se clasificó en función de su coeficiente de variación generado a partir de las 20 propiedades monitoreadas. Como conclusión, se obtuvo que los SP a base de polinaftalen sulfonado producen mezclas de CAC más robustas que los SP a base éter de policarboxilato y que las pruebas más adecuadas para evaluar la robustez son, contenido de aire, anillo J, asentamiento superficial, reología, resistencia a la flexión y resistencia a la compresión [42]. En otro estudio de Nunes, S., *et al* (2011), se evaluaron las fluctuaciones en la trabajabilidad de pastas y morteros autocompactables ante cambios entre distintos tipos y lotes de cemento, provenientes de la misma planta cementera para identificar los constituyentes del cemento responsables de causar

variabilidad (Figura 16). Producto de un análisis estadístico se determinó que el SO_3 y $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ son las propiedades del cemento más relevantes que ocasionan desviaciones de los comportamientos en estado fresco esperados. Dicho comportamiento se le atribuye a que las cadenas laterales de los polímeros de policarboxilato se encojen al usar agua de mezcla con una alta concentración de iones, de tal forma que el efecto dispersante se ve reducido [54].

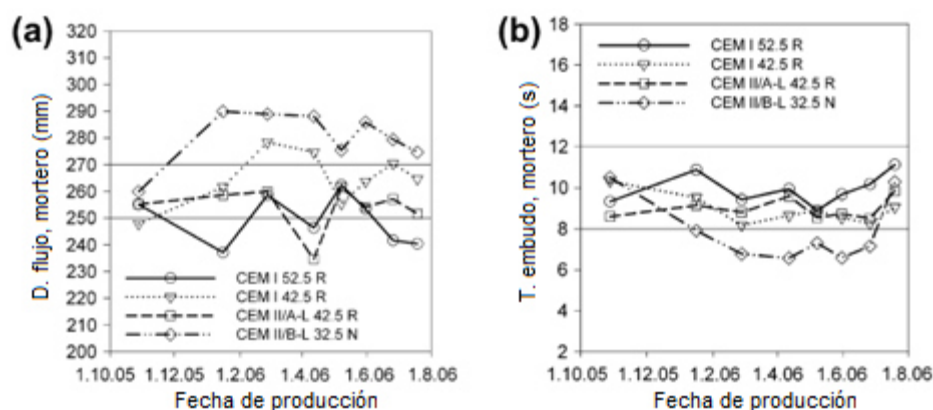


Figura 16. Variación de (a) flujo de revenimiento y (b) tiempo de embudo V en función de distintos lotes de cemento [54].

Posteriormente, Nunes, S., *et al* (2012), usaron como estrategia para incrementar la robustez la evaluación de distintos diseños de mezcla, partiendo de ligeras modificaciones de un diseño base con base en 6 criterios establecidos para obtener una mezcla de CAC que presentara el mejor balance entre la selección y el proporcionamiento de los materiales constituyentes. La robustez de las mezclas producidas se evaluó de acuerdo a lo sugerido por la EFNARC [5] y con una metodología que los mismos autores desarrollaron en un trabajo previo [43]. Como resultado, obtuvieron que minimizar la dosificación de SP es el mejor criterio de optimización en términos de robustez bajo las condiciones del estudio realizado. Por lo tanto, los autores sugieren proveer la mayor parte de la fluidez del CAC a través del aumento de volumen de pasta (aumentando el contenido de filler para mantener una

a/c constante) de tal forma que se compense la pérdida de fluidez producto de la reducción de SP [55]. García, L., *et al* (2012), compararon la robustez de un concreto tipo AVM con bajo contenido de filler contra la obtenida de un CAC con alto contenido de filler y bajo consumo de cemento. La evaluación de la robustez se realizó a partir de la generación de intervalos de confianza al 95% y fueron establecidos para cada propiedad medida (flujo de revenimiento, t_{50} , tiempo de embudo V, habilidad de paso por anillo J, resistencia a la segregación y resistencia a la compresión), ante variaciones de agua dentro del rango de $\pm 7.5\%$ del agua de mezcla (Figura 17). Entre los aportes de su trabajo de investigación, destaca que la metodología empleada resulta de utilidad para determinar si una mezcla dada, cumple con los requisitos de robustez solicitados, así como también para comparar y seleccionar entre distintos diseños de mezcla antes de su producción industrializada [56].

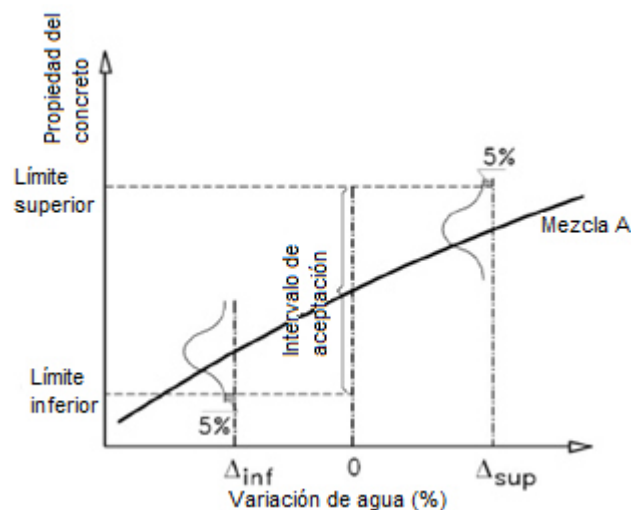


Figura 17. Esquematización del modelo de análisis para calcular el porcentaje de variación de agua permisible [56].

Shen, L., *et al* (2014), haciendo uso de una sonda de segregación modificada y de la medición directa de propiedades reológicas, evaluaron el efecto de cambios en el volumen de pasta, dosificación de SP, flujo de revenimiento, reducción del tamaño

máximo del agregado, granulometría mejorada y grado de empaquetamiento de partículas, y concluyeron que aumentar el volumen de pasta, reducir el tamaño máximo del agregado, y utilizar agregados con buena granulometría, mejoran la resistencia a la segregación. En cuanto a los parámetros reológicos, los autores no encontraron una relación directa entre los resultados medidos y la robustez de las mezclas [57].

Van Der Vurst, F., & De Schutter, G. (2014), probaron la posibilidad de incrementar la robustez de morteros equivalentes a concreto con consistencia autocompactable añadiendo solamente pequeñas cantidades de distintos polvos (arcillas purificadas, ceniza volante, humo de sílice, escoria granulada de alto horno y cinoptilolita). Asimismo, también evaluaron el efecto de dos AMV a base de diferentes polímeros (goma gellan y goma diutan) en bajas dosificaciones. Los morteros equivalentes a CAC fueron probados ante variaciones en el agua de mezcla en el rango de $\pm 5 \text{ L/m}^3$ y su flujo de revenimiento, tiempo de embudo V y contenido de aire fueron medidos. La robustez se cuantificó de acuerdo a la ecuación 2.4, en la cual la robustez es expresada como 100 dividido entre el producto de los intervalos dentro de los cuales las propiedades medidas varían ante un cambio en el contenido de agua [58].

$$R = \frac{100}{(SF_{+5} - SF_{-5}) \cdot (VF_{-5} - VF_{+5}) \cdot (AC_{-5} - AC_{+5})} \quad 2.4$$

Dónde:

R = Robustez

SF = Flujo de revenimiento

VF = Tiempo de embudo V

AC = Contenido de aire

Tal enfoque le permitió a los autores cuantificar y discernir entre la eficacia de las adiciones efectuadas para limitar los cambios producto de una variación de agua de mezcla, encontrando que una pequeña adición de escoria granulada de alto horno y ambos AMV pueden ser usados para mejorar la robustez de los morteros equivalentes

a CAC [58]. Feys, D., *et al*, (2014), evaluaron la robustez cuantificando cuan repetibles son las propiedades reológicas en estado fresco de mezclas de referencia y generando intervalos de confianza al 90% a partir de la repetibilidad observada como patrón de comparación para las variaciones implementadas. Un extenso número de variables fue evaluado a nivel de pastas con consistencia autocompactante y las de mayor impacto fueron validadas a nivel concreto. De tal forma que a nivel concreto, se investigó la influencia de las variaciones de agua, secuencia y energía de mezclado (evaluada a partir de una variación en el tiempo y/o la velocidad de mezclado) en las propiedades reológicas de los CAC. Con base en los resultados obtenidos, se concluyó que el agua de mezcla y velocidad de mezclado son los principales factores que afectan la trabajabilidad de las mezclas, así como también debe tenerse particular cuidado en el tiempo de adición del SP y la corrección de humedad cuando los agregados son usados por debajo del estado saturado superficialmente seco (SSS) [36]. Ghoddousi, P., & Salehi, A. M. (2015), compararon una técnica estadística conocida como “*Multi-attribute decision making*” (MADM) y la técnica propuesta por Naji, S. *et al* [42] para evaluar la robustez obtenida de 4 mezclas de CAC. Los diseños de mezcla de prueba giraron en torno a un diseño de referencia con buenas propiedades de autocompactibilidad, del cual se desprenden 3 mezclas a las cuales se le incremento su habilidad de llenado, redujo la habilidad de paso y redujo resistencia a la segregación. Cada una de las mezclas fue sometida a variaciones del agua de mezcla dentro del rango de $\pm 6\%$ respecto del contenido en la referencia. Con base en su metodología, los autores concluyeron que las mezclas menos robustas resultaron ser las más propensas a segregarse y con habilidad de paso reducida [59]. Debido a que con frecuencia se reporta en la literatura que los AMV incrementan la robustez de las mezclas de CAC, Van Der Vurst, F., *et al* (2015), evaluaron posibles conexiones entre

la reología, tixotropía y robustez de morteros autocompactables con varios AMV de distinta base química (arcilla purificada, goma diatum, fécula de maíz y carbonato de propileno) midiendo las variaciones en el flujo de revenimiento, tiempo de embudo V y los parámetros de Bingham ante $\pm 5 \text{ L/m}^3$. De acuerdo a los resultados experimentales, los AMV evaluados incrementaron la robustez del flujo de revenimiento y de la viscosidad plástica. a velocidad de rompimiento de la tixotropía afecta la relación entre el esfuerzo de fluencia y flujo de revenimiento, aunque no se detectó una relación evidente con la robustez del flujo de revenimiento. El mecanismo de acción de los distintos AMV afecta la robustez de la viscosidad plástica de los morteros autocompactables [60].

Con base en lo anterior, se puede notar que en los últimos 10 años ha existido un esfuerzo por parte de diversos investigadores por cuantificar la robustez de los CAC, así como también delimitar rangos de fluctuación para una gran diversidad de variables y materiales de distintas características en los cuales las mezclas mantienen sus propiedades. Como factor común, se destaca la existencia de una combinación de métodos empíricos y estadísticos para lograr identificar los límites máximos de tolerancia dentro de los cuales las mezclas se mantienen robustas. Además, se destaca el uso de la evaluación directa de parámetros reológicos para caracterizar el impacto de las inconsistencias presentes en varias etapas del proceso de producción y en las propiedades de los materiales en el flujo del CAC. No obstante, después de la reciente introducción del CAC en el mercado mexicano, aun no hay un precedente en México que aborte este tipo de problemática.

Capítulo 3

Justificación, hipótesis y objetivos

3.1. Justificación

El CAC es un tipo de concreto que provee importantes ventajas técnicas, económicas y ecológicas en comparación al CVC. Sin embargo, su introducción al mercado mexicano aún es muy reciente y debido a que el CAC es también conocido por su alta sensibilidad a pequeños cambios en su proporcionamiento, características de los materiales constituyentes y/o proceso productivo, su desempeño puede verse seriamente afectado, lo cual continuaría fomentando la resistencia por parte de la industria de la construcción en México a la adopción de esta nueva tecnología. La robustez del CAC depende en gran parte de los materiales que se utilizan para su formulación y de las características de los mismos. Al no contar con un control de calidad adecuado, cada mezcla presentará un comportamiento diferente, por lo que para este tipo de concretos, no solo bastará con medir una propiedad como criterio de aceptación en el sitio de trabajo, tal como es el paradigma actual del CVC. En la actualidad, en México no existen trabajos de investigación que aborden el problema de la robustez de los CAC fabricados con materiales locales y que sirvan de antecedentes para tener una mejor comprensión del problema de la robustez, acortando así el proceso paulatino de adopción de esta tecnología por el que otros países ya pasaron. Por ende, surge la necesidad de hacer un estudio metodológico que permita desde un punto de vista técnico y científico identificar el impacto que tienen algunos de los factores clave en la producción de CAC.

3.2. Hipótesis

La evaluación de la robustez de una mezcla de CAC puede ser una herramienta confiable para identificar los rangos de tolerancia por variaciones en las dosificaciones de agua de mezcla y contenido de SP, así como en la granulometría del agregado fino, sin que las propiedades de autocompactibilidad en estado fresco cambien de manera significativa.

3.3. Objetivos

3.3.1. Objetivo general

Analizar la robustez de un CAC del tipo polvo elaborado con materiales disponibles en la región ante variaciones en la dosificación de agua de mezcla, en el contenido de SP y en la granulometría del agregado fino, a través de pruebas empíricas estandarizadas y de la medición directa de sus propiedades reológicas para identificar los límites de tolerancia dentro de los cuales la variación de sus propiedades no es significativa.

3.3.2. Objetivos particulares

- Caracterizar todas las propiedades físicas necesarias de los materiales para el diseño de un CAC (densidades, absorciones, humedad de agregados, contenido de sólidos del aditivo SP y, distribuciones granulométricas de polvos y agregados).
- Diseñar como mezcla de referencia, un CAC del tipo polvo con una extensibilidad objetivo de 720 ± 20 mm (Clase SF2) y 0% de segregación, usando CV como remplazo parcial de cemento, agregados a base de caliza triturada con T.M.A. de 25 mm y un aditivo SP apropiado para CAC.

- Caracterizar las propiedades del CAC de referencia mediante:
 - Flujo de revenimiento
 - T_{50}
 - Índice de estabilidad visual
 - Embudo V
 - Habilidad de paso con Anillo “J”
 - Contenido de aire
 - Resistencia a la segregación
 - Tiempos de fraguado
 - Deformación autógena
 - Propiedades reológicas (Esfuerzo de fluencia y viscosidad)
 - Resistencia a la compresión a 1, 3, 7 y 28 días de edad.
- Evaluar la repetibilidad del CAC de referencia mediante el monitoreo de las variaciones de sus propiedades bajo condiciones de laboratorio mediante la reproducción de 5 mezclas para calcular los intervalos de confianza del 95% a partir de la desviación estándar obtenida para cada una de las pruebas efectuadas.
- Identificar los límites de tolerancia dentro de los cuales pueden variar: la dosificación del agua de mezcla, contenido de SP y granulometría del agregado fino, sin que las propiedades del CAC cambien significativamente con relación a un nivel de confianza del 95%.
- Analizar el impacto que tienen las variaciones en la dosificación del agua de mezcla y aditivo SP en el desempeño del CAC utilizando rangos de variación similares a los que rigen en la producción de concreto premezclado.
- Evaluar cuantitativamente el efecto de las variaciones en la granulometría del agregado fino local en el desempeño del CAC.

Capítulo 4

Materiales

4.1. Descripción de materiales

4.1.1. Cemento Portland

Un cemento portland marca Moctezuma tipo III o CPO 40, de acuerdo a las especificaciones ASTM C150-09 [61] y NMX-C-414-2004 [62] respectivamente, fue empleado para la ejecución del plan experimental de este proyecto. Es importante tener en cuenta que las características del cemento que tienen influencia en las propiedades reológicas de concretos con aditivos SP son principalmente el contenido de $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$, C_3A y área superficial por lo que deben ser tomadas en consideración al hacer comparaciones entre cementos [63, 64].

4.1.2. Ceniza volante

La ceniza volante (CV) es un subproducto proveniente de la quema de carbón en plantas carboeléctrica para la producción de energía y debido a su composición química y finura presenta actividad puzolanica por lo que suele ser utilizada como material cementante suplementario en mezclas de concreto base CP [65]. Además de su capacidad para reaccionar con el hidróxido de calcio y producir nuevos compuestos con capacidad cementante, la CV puede ser utilizada para incrementar el empaquetamiento granular, la fluidez, la cohesividad y la viscosidad del concreto [66 - 70], al mismo tiempo que disminuye el costo y el impacto ambiental al conducir a una reducción del consumo de cemento [71]. Por lo tanto, desde el punto de vista del desarrollo sostenible, tecnológico y económico, la incorporación de CV en concretos autocompactables resulta particularmente beneficiosa.

La CV que se utilizó en este proyecto fue recolectada en la planta carboeléctrica de Nava, Coahuila; México y cumple con lo especificaciones relativas a composición química, finura, índice de actividad a la resistencia (IAR) y perdida por ignición en la norma ASTM C618-08 [72]. Con el objetivo de mejorar su desempeño y reducir su impacto en la variación de los resultados, la CV fue cribada mecánicamente con un equipo marca SWEQUIPOS modelo LS30C666, haciéndola pasar a través de una malla No. 100 para remover la fracción de partículas con tamaños mayores a 150 μm [73]. En la Figura 18 se puede observar la apariencia de la CV sin cribar (CVSC) y la CV que pasa la malla No. 100 (CVP100), en la cual se redujo el contenido de carbón sin quemar. El carbón sin quemar tiene una gran área superficial debido a su estructura altamente porosa y su presencia puede conllevar a interacciones indeseables tanto con los aditivos SP como con los aditivos inclusores de aire [65, 74].

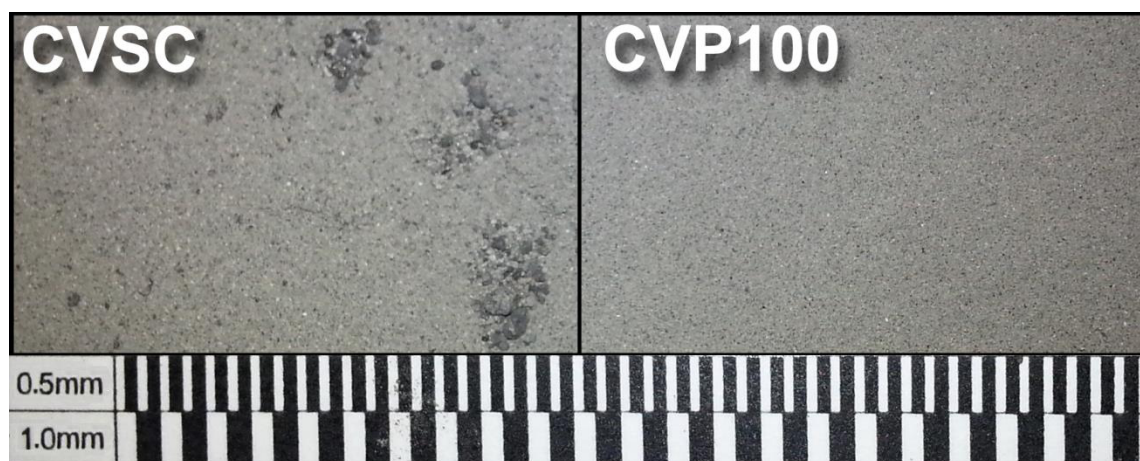


Figura 18. Apariencia de la CV antes (CVSC) y después (CVP100) del cribado a través de la malla No. 100 (150 μm).

4.1.3. Agregado grueso

De acuerdo a lo establecido por la norma NMX-C-111, el agregado grueso se define como el material obtenido de forma natural o por trituración de rocas, escoria de alto horno, escoria volcánica, concreto reciclado o una combinación de estos u algún otro. Estos agregados deben ser retenidos en la malla no. 4 (4.75 mm) y pasar a través de la malla con abertura de 90 mm (3½") [75]. La caliza triturada es el agregado más comúnmente usado en la región que se realiza este trabajo de investigación y presenta una morfología de partícula elongada y angulosa (Figura 19). Tal característica limita la fluidez y habilidad de paso del CAC al incrementar la resistencia interna a fluir por el bloqueo y fricción entre partículas [9, 76]. De acuerdo con el proveedor del material, el tamaño máximo nominal es 19 mm aunque no es raro encontrar partículas retenidas en la malla de 19 mm (¾"), esto se debe a que en el análisis granulométrico por medio de tamices el tamaño medido de partícula es el tamaño de su dimensión intermedia porque una partícula puede pasar a través de la abertura de una malla en una orientación tal que su dimensión más grande (largo) quede perpendicular a la malla [9].



Figura 19. Muestra del agregado grueso típico regional utilizado en el proyecto

4.1.4. Agregado fino

El agregado fino se define como el material obtenido de forma natural o por medio de la trituración de rocas, escoria volcánica, concreto reciclado o una combinación de estos u otros, asimismo debe pasar por la malla de 4.75 mm (No. 4) y retenerse en la de 75 μm (No. 200), todo esto en conformidad a la norma NMX-C-111 [75]. Al igual que el agregado grueso, el agregado fino de la región se manufactura a partir del trituramiento de piedra caliza (Figura 20). A causa del proceso de trituramiento, el agregado regional suele tener un contenido de microfinos (definidos en este trabajo de investigación como partículas de polvo $\leq 125 \mu\text{m}$ contenidas en el agregado fino) de hasta 15.09 % y debido a su área superficial, la demanda de agua y de SP aumenta [77, 78]. En mezclas de concreto normal, esto se traduce en un aumento de consumo de cemento para alcanzar una trabajabilidad deseada [77] lo cual no representa ningún beneficio económico, sin embargo; el CAC necesita de un volumen de polvos elevado para conferir deformabilidad, viscosidad plástica y estabilidad adecuadas para alguna aplicación dada [2], por lo que los polvos aportados por el agregado fino local resultan beneficiosos para este tipo de concretos [79].



Figura 20. Muestra del agregado fino típico regional usado en el proyecto

4.1.5. Aditivo superfluidificante

Para alcanzar la fluidez característica de los concretos CAC, un aditivo SP a base policarboxilatos fue utilizado. Comercialmente se encuentra disponible bajo el nombre Glenium 3400NV producido por la compañía BASF, el cual de acuerdo con su ficha técnica cumple con las especificaciones de la norma ASTM C494-10 [80] para las clases A y F, así como también se oferta como un aditivo apto para producir mezclas de CAC y compatible con cementantes suplementarios como la microsílíce y la CV. De igual forma, la ficha técnica recomienda utilizar este aditivo en una dosificación dentro del rango de 1.3 a 7.8 ml/kg de material cementante (cm).

4.2. Caracterización de materiales

4.2.1. Materiales cementantes

Solo las propiedades físicas necesarias de los materiales cementantes para el diseño de mezcla fueron determinadas así como también su distribución de tamaños de partícula e Índice de Actividad a la Resistencia (IAR) de la CV sin cribar (CVSC) y la CV que pasa la malla 100 (CVP100). En cuanto a las propiedades químicas, las pruebas se limitaron a la determinación de la composición química por medio de fluorescencia de rayos X de energía dispersiva (ED-XRF) y determinación de fases mineralógicas por difracción de rayos X de polvos (XRD) para la CVSC y CVP100.

Densidad

La densidad del cemento se obtuvo mediante el uso del frasco de Le Chatelier acorde al procedimiento ASTM C188-09 [81] como puede observarse en la Figura 21. En el caso de la CVP100, el mismo procedimiento fue seguido a excepción de que el líquido

en el que se sumergió el material fue agua ya que este no presenta ningún compuesto capaz de formar fases cementantes al contacto con el agua.



Figura 21. Determinación de la densidad del cemento

Distribución de tamaño de partícula

La distribución de tamaño de partícula (DTP) se obtuvo por difracción de rayo láser con un equipo marca MICROTRAC modelo S3500 (Figura 22). Se utilizó alcohol isopropílico con grado de pureza de 99.5% en conjunto con ultrasonido para dispersar posibles flóculos de material que el equipo pudiera interpretar como partículas de mayor tamaño.

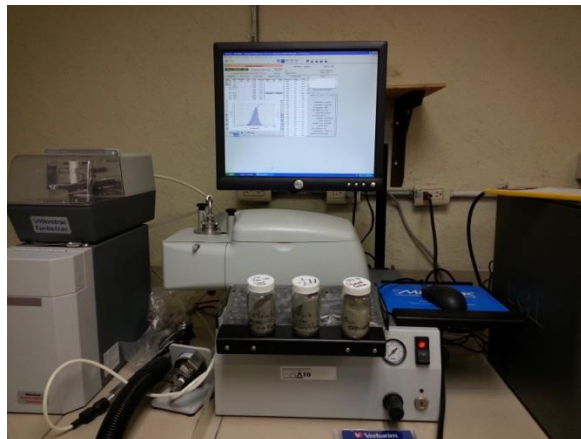


Figura 22. Analizador de DTP marca MICROTRAC modelo S3500

Índice de actividad a la resistencia

Una de las características claves de la CV es su capacidad de desarrollar una reacción puzolánica con el hidróxido de calcio producido durante la reacción de hidratación del cemento para generar más silicato de calcio hidratado (CSH), lo cual normalmente incrementa la resistencia a la compresión y disminuye las propiedades de transporte de la matriz cementante [7]. El Índice de actividad a la resistencia especificado en la norma ASTM C311-09 [82] provee una evaluación indirecta de la reacción anteriormente descrita evaluando la tasa de ganancia de resistencia a compresión de un mortero a base cemento portland y puzolana respecto de un mortero de control con solo cemento a 7 y 28 días. El procedimiento estandarizado (ASTM C311-09) para la determinación del Índice de Actividad a la Resistencia (IAR) se modificó para evitar la influencia de la diferencia de densidades entre la CV y el cemento en el volumen de pasta, así como también evitar variaciones inducidas a la a/cm consecuencia de mantener una fluidez constante como se requiere en el procedimiento estándar. La modificación consistió en efectuar el remplazo de CV en volumen y mantener el volumen de agua. De esta forma, el aporte a la resistencia a la compresión de la CV por el efecto filler es minimizado así como también se elimina la variación en la a/cm al ajustar el contenido de agua para alcanzar una fluidez objetivo obteniendo como resultado solamente el aporte a la resistencia a compresión por consecuencia de la reacción puzolánica [7, 8]. Esta prueba se efectuó para la CVSC y CVP100 a 7 y 28 días de edad solamente y los resultados se compararon con los límites especificados en el procedimiento estándar.

Composición química

La composición química de los materiales cementantes se obtuvo mediante fluorescencia de rayos X por energía dispersiva (ED-XRF) haciendo uso de un equipo marca PANalytical modelo Epsilon3-XL (Figura 23). En el caso del cemento, estos resultados se emplearon para determinar la composición potencial de fases por medio de las ecuaciones de Bogue.

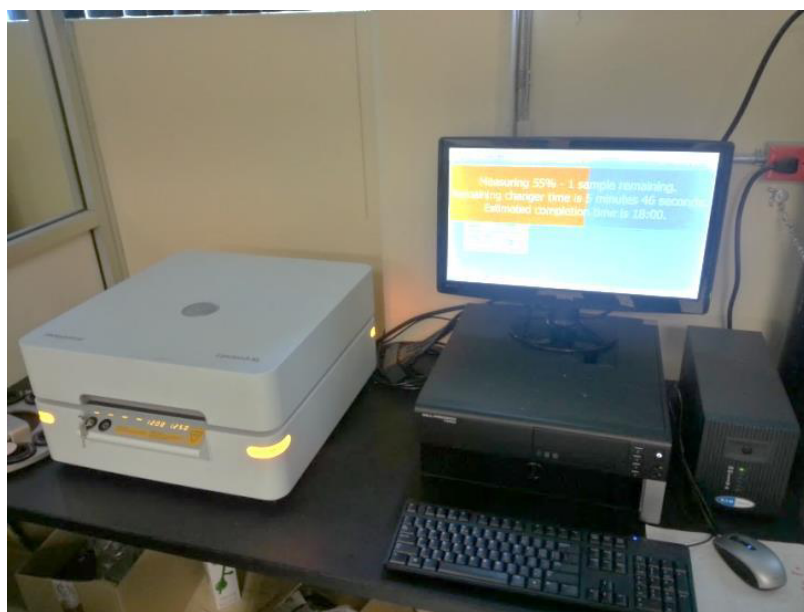


Figura 23. Analizador de ED-XRF PANalytical Epsilon 3-XL

Pérdida por ignición

Esta prueba solo se realizó para los materiales CVSC y CVP100. La prueba se desarrolló haciendo uso de dos muestras representativas de 10 g de cada material secadas previamente a 105°C por 24 h en crisoles de porcelana descubiertos. Las muestras se calentaron hasta 750°C en una mufla y el porcentaje de pérdida por ignición se calculó de acuerdo a la norma ASTM C311-07[82].

Fases mineralógicas

La CVSC y CVP100 fueron sometidas a un análisis de difracción de rayos X (XRD) para determinar las fases cristalinas presentes así como para evaluar visualmente el cambio en la fracción amorfa de la CVSC respecto de CVP100. El difractómetro de rayos X es marca Bruker modelo D8 Advance con radiación de CuK α de 1.5406 Å y un detector marca Vantec de alta velocidad equipado con filtros de níquel. Las pruebas se ejecutaron dentro de un rango de 10 a 70° 2 θ , con una velocidad de rotación de 15 rpm y un tamaño de paso de 0.0508714° 2 θ .

4.2.2. Agregados

Densidad y absorción

La densidad y absorción de los agregados fino y grueso se determinaron de acuerdo a los procedimientos de las normas ASTM C128-07^a [83] y ASTM C127-07 [84] respectivamente.

Distribución granulométrica

La distribución granulométrica de los agregados fino y grueso se determinó conforme a los procedimientos establecidos en la norma ASTM C33M-08 [85]. Adicionalmente, para complementar la curva granulométrica de la arena la distribución de tamaño de partículas del polvo de caliza menor que 150 μ m resultado de su proceso de manufactura, fue determinado por difracción de rayo láser.

4.2.3. Aditivo superfluidificante

Densidad

La densidad del aditivo SP se obtuvo dividiendo el peso de 100 ml de SP dentro de un matraz llenado hasta la marca de aforo (Figura 24).



Figura 24. Determinación de la densidad del aditivo SP

Contenido de sólidos

Esta propiedad se obtuvo calentando una muestra de 100 gr de SP a 105°C por 24 horas. Posteriormente, se calculó el contenido de sólidos dividiendo el peso del residuo sólido entre el peso inicial de la muestra. Se asumió que la pérdida de peso se debe únicamente a la evaporación del agua. Por lo tanto, solo el porcentaje de agua del aditivo SP utilizado en las mezclas es utilizado para para corregir el agua de reacción en el diseño de mezcla, de tal forma que la a/cm no se vea alterada.

Capítulo 5

Metodología experimental

5.1. Matriz de experimentos

El desarrollo experimental contempló el estudio de 3 variables: Dosificación del agua de mezcla, dosificación de SP y granulometría del agregado fino. Para ello, se diseñó un CAC del tipo polvo con fluidez clase SF2 (flujo de revenimiento objetivo: 720 ± 20 mm) usando un 20% de remplazo de volumen de cemento por ceniza volante con tamaño de partícula menor que $150 \mu\text{m}$. La repetibilidad de la mezcla de referencia se evaluó con 5 mezclas de 80 litros. Las pruebas realizadas para la determinación de sus propiedades fueron: Flujo de revenimiento, t_{50} , embudo V, anillo J, contenido de aire por método de presión, densidad, tiempos de fraguado, deformación autógena, propiedades reológicas en estado fresco y resistencia a la compresión a 1, 3, 7 y 28 días.

Con la finalidad de evaluar la influencia que tienen las variables estudiadas en cada una de las propiedades en estado fresco y endurecido, se construyeron intervalos de confianza del 95% a partir de la desviación estándar resultante de la repetibilidad de cada propiedad evaluada [59]. De esta manera, se incluyen dentro de los intervalos errores pequeños debido a variaciones en las proporciones de los materiales atribuibles a la precisión de las básculas del laboratorio, muestreo, variaciones en la secuencia de prueba, energía de mezclado, factores ambientales, etc. Por lo tanto, si las propiedades medidas en las mezclas de prueba quedan por fuera de los intervalos de confianza, la probabilidad de que dicha variación sea significativa es grande [36].

Las variables “dosificación de agua de mezcla” y “contenido de SP” fueron evaluadas individualmente a partir de ligeras alteraciones al diseño de mezcla de referencia correspondientes al ± 3 y $\pm 6\%$ del contenido total de cada variable (ver sección 2.1.4), de tal forma que los resultados provenientes de la evaluación de sus propiedades en estado fresco y endurecido reflejaran la influencia de la alteración efectuada. La variación de la granulometría del agregado fino se hizo reproduciendo los límites granulométricos señalados en la norma ASTM C33-09. Tomando en cuenta las mezclas referentes a la repetibilidad de la referencia y las variaciones efectuadas en el agua de mezcla, contenido de superplastificante y granulometría del agregado fino, un total de 16 mezclas fueron realizadas (Figura 25).

Normalmente, en las plantas de concreto premezclado, la densidad y absorción de los agregados es una propiedad que es determinada cada vez que se recibe un lote de agregados nuevos. Por lo tanto, para cada distribución granulométrica se determinaron las propiedades anteriormente mencionadas y los diseños de mezcla G-L1, G-L2 y GL3 fueron calculados tomando en cuenta esta práctica de campo habitual. Por lo tanto, el error a investigar yace en el hecho de que pocas veces se considera en la práctica las variaciones en la granulometría de los agregados durante la producción de concreto premezclado; sin embargo, este proyecto se acotó a estudiar solamente el impacto de las variaciones en la granulometría del agregado fino.

Por último, los resultados de las variaciones inducidas se graficaron en conjunto con los intervalos de confianza para identificar los límites de tolerancia en los que la mezcla de CAC aún puede mantener sus propiedades dentro en los rangos demarcados por la variabilidad de la referencia. Es importante señalar que los límites definidos con este trabajo de investigación son solamente válidos para el diseño de mezcla estudiado. No obstante, esta metodología puede ser replicada para establecer rangos de tolerancia

específicos para una determinada mezcla, de tal forma que facilite la identificación de posibles problemas de robustez.

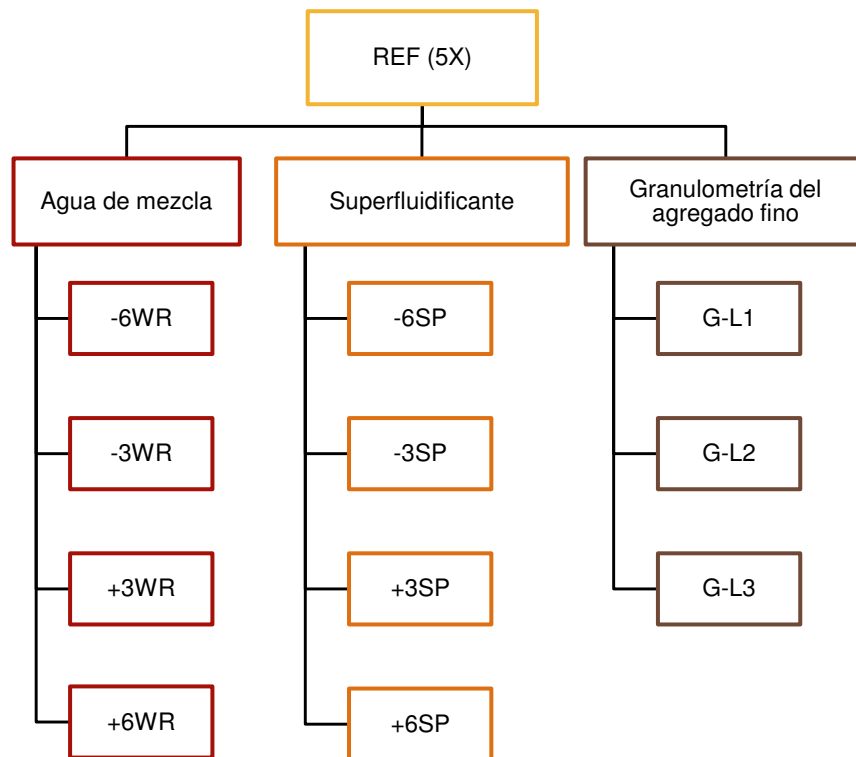


Figura 25. Esquematización de las mezclas realizadas

5.2. Métodos de prueba

Las propiedades reológicas del concreto en estado fresco son dependientes del tiempo debido a la pérdida de trabajabilidad y desarrollo de la reacción de hidratación. Por lo tanto, el protocolo de experimental no solo debe ser consistente en los procesos de ejecución de las pruebas, sino también en la secuencia y tiempo en el que éstas se desarrollen, de lo contrario los resultados podrían no ser comparables entre sí. Inmediatamente después terminar la etapa de mezclado, se abrieron 5 equipos de trabajo que se encargaron obtener el volumen de muestra de CAC requerido para dar secuencia a cada uno de los frentes mostrados en la Figura 26.

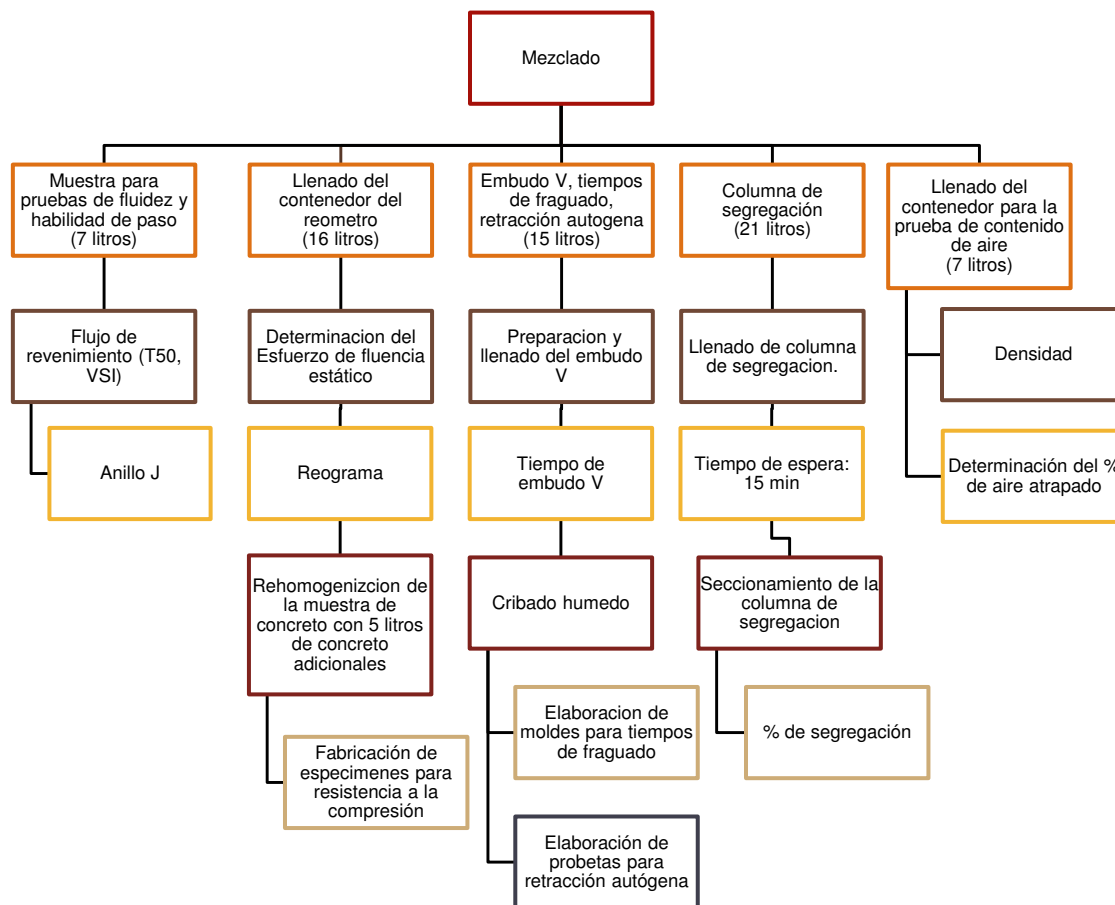


Figura 26. Secuencia de ejecución de los métodos de prueba

5.2.1. Flujo de revenimiento, T_{50} e Índice de estabilidad visual

El flujo de revenimiento evalúa la habilidad del CAC de fluir bajo acción de su propio peso sin confinamiento. La prueba de flujo de revenimiento implica el llenado del cono de revenimiento con CAC, levantar el cono y tomar dos medidas de la distancia que el concreto se esparció que sean perpendiculares entre sí (Figura 27) [86]. El procedimiento está basado en la norma ASTM C1611-09b [87] y es fácil de llevar a cabo en el campo o laboratorio. El valor del flujo de revenimiento permite la comparación del flujo lateral y la habilidad de llenado potencial entre distintas mezclas. Entre mayor sea el flujo de revenimiento, más lejos puede el CAC fluir por acción de su propio peso desde un punto dado de descarga y más rápido puede llenar una cimbra o





molde [2]. Al ejecutar la prueba de flujo de revenimiento, con un cronómetro se mide el tiempo que le toma a la masa de concreto extenderse desde un diámetro inicial de 20 cm, hasta un diámetro de 50 cm. Por lo tanto, un T_{50} mayor indica que la mezcla tiene una viscosidad más alta mientras que el caso contrario, indicaría baja viscosidad [2]



Figura 27. Flujo de revenimiento

El índice de estabilidad visual (VSI, por sus siglas en inglés) consiste en asignar un valor de estabilidad de acuerdo a los criterios de la Tabla 5 a la masa de CAC esparcida después de haber ejecutado la prueba de flujo de revenimiento. Este valor se usa para evaluar de forma cualitativa la estabilidad entre mezclas de CAC iguales o similares. Un VSI de 0 ó 1 es una indicación de la que mezcla puede ser usada para el propósito para el cual se diseñó, mientras que valores de 2 y 3 indican potencial segregación y que el diseño de mezcla requiere ser ajustado. Debido a que la medición de VSI se determina de forma visual, puede ser subjetivo. Por lo tanto, esta prueba solo aplica para control de calidad y no debe ser usada para aceptar o rechazar un lote de CAC [2].

Tabla 5. Criterios para asignación del VSI [88]

Clase	Características	Ejemplo
VSI 0 Altamente estable	Sin evidencia de segregación o sangrado	
VSI 1 Estable	Sin evidencia de segregación pero ligero sangrado observado como un brillo en la superficie de la masa del concreto	
VSI 2 Inestable	Se puede apreciar un ligero halo de mortero (≤ 10 mm) y/o un ligero apilamiento de agregados en el centro de la masa de concreto	
VSI 3 Altamente inestable	Se observa segregación evidente, un halo de mortero >10 mm y/o una pila grande de agregados en el centro de la masa de concreto	

5.2.2. Anillo J

La evaluación de la habilidad de paso haciendo uso por del anillo J se encuentra estandarizado por la norma ASTM C1621/1621M-09b [89]. En esta prueba el CAC es forzado a pasar entre un anillo de barras de acero las cuales simulan el refuerzo presente en las estructuras. Dicho anillo se usa en conjunto con el cono de Abrams, colocándolo de tal forma que el concreto fluya desde el interior hacia el exterior del

anillo al momento de que el cono es levantado [88]. La diferencia entre el flujo de revenimiento con y sin Anillo “J” es indicador de la habilidad de paso del CAC y el valor resultante se interpreta de acuerdo a lo establecido en la norma anteriormente mencionada (Tabla 6).

Tabla 6. Evaluación del bloqueo de acuerdo a ASTM C1621/1621M-09b

Diferencia entre flujo de revenimiento con y sin anillo “J”	Evaluación del bloqueo
0 a 25 mm	Sin bloqueo visible
>25 a 50 mm	Bloqueo mínimo a notable
>50 mm	Bloqueo mínimo a extremo

5.2.3. Embudo V

En este método de prueba se hace fluir el CAC a través de un orificio bajo acción de su propio peso. La prueba consiste en verter aproximadamente 12 litros de concreto dentro del aparato sin aplicar ningún tipo de vibración o agitación y se enrasa. El CAC depositado en el interior se deja reposar durante 10 segundos. Después, se abre la compuerta localizada en la parte inferior del embudo y se mide el tiempo que tarda el concreto en fluir a través del aparato hasta que sea posible ver verticalmente a través de la abertura. De forma análoga a la prueba de T_{50} , el tiempo de embudo V se encuentra relacionado con la viscosidad del concreto [90].

5.2.4. Densidad y contenido de aire (método de presión)

La densidad del concreto fue determinada en el contenedor (calibrando previamente su volumen) del dispositivo para medición del porcentaje de aire y posteriormente, se continuó con el procedimiento para la determinación del porcentaje de aire atrapado. Ambas pruebas se realizaron de acuerdo a la normas ASTM C138/C138M-09 [91] y ASTM C231/C231M-09b [92], respectivamente. Debido a que la densidad del concreto

se calculó haciendo uso del recipiente del aparato para medición de aire por el método de presión, la muestra de concreto utilizada fue la misma en ambos métodos.

5.2.5. Caracterización de parámetros reológicos

No existe un método único para el análisis de datos obtenidos por un reómetro. El procedimiento a seguir depende totalmente del analista y el grado de precisión deseado. Debido a lo anterior, esta sección explica a detalle: la configuración inicial, obtención de la muestra, ejecución de las pruebas, análisis de datos y correcciones por zonas muertas durante la ejecución de las pruebas con el reómetro RHM-3000.

5.2.5.1. Reómetro

Se utilizó un reómetro RHM-3000 de Germann Instruments cuya configuración corresponde a la de un reómetro de paletas de deformación controlada. Al girar, la geometría de su paleta describe el contorno de un cilindro imaginario, por lo tanto el análisis de resultados se realiza como si se tratase de un reómetro de cilindros coaxiales. La paleta tiene un radio (R_i) de 62.5 mm y una altura (h) de 125 mm. El contenedor en el cual se deposita la muestra de concreto durante la prueba actúa como el cilindro exterior (R_o). Para evitar que el concreto se deslice sobre la superficie del contenedor y con la finalidad de conferir rugosidad a la pared que estará en contacto con el concreto, el contenedor está texturizado con barras de polietileno de alta densidad (PEAD). El radio del cilindro exterior (R_o) se define por la distancia existente entre las barras de PEAD dividida entre dos. El diámetro del contenedor que se utilizó en esta investigación es de 286 mm y es el recomendado por el fabricante para concretos con agregados de tamaño máximo nominal de 19 mm. Por lo tanto, el valor de R_o es igual a 143 mm.

5.2.5.2. Muestreo del concreto

El llenado del contenedor se realizó descargando concreto directamente dentro del mismo desde la revolvedora hasta alcanzar la altura demarcada por la paleta del reómetro. Para eliminar el efecto de la pérdida de trabajabilidad, todas las pruebas se realizaron en el minuto 12, tomando como referencia la hora de contacto entre el agua y el cemento. El fabricante indica que el contenedor debe llenarse hasta la altura de las barras de PEAD; sin embargo, si el cilindro interior está sumergido dentro del concreto, es evidente que existe torque adicional actuando en la cara superior e inferior del cilindro. La ecuación de Reiner-Riwlin (ver ecuación 5.1 más adelante) para transformar las unidades relativas a unidades físicas fundamentales consideran que solamente existe flujo en el espacio anular formado entre los cilindros interior y exterior. Por lo tanto, el torque ejercido por la cara inferior y superior del cilindro interno debería ser descontado de la lectura de torque global. Koehler, E. P., durante el diseño del RHM-3000, determinó que si bien existía una contribución al torque por parte de las caras extremas del cilindro, esta era despreciable mientras la relación de la altura y diámetro de la paleta no fuera menor que 2 [26]. No obstante, para tener más precisión en las mediciones, el contenedor fue llenado solamente hasta la altura de la paleta con aproximadamente 16 litros de concreto, erradicando así el torque parasito generado en el área superior del cilindro interior (Figura 28). Debido al diseño del RHM-3000, no es posible experimentalmente eliminar el torque generado en el fondo del cilindro interior.



Figura 28. Contenedor llenado parcialmente para suprimir el torque generado en la cara superior del cilindro interior.

5.2.5.3. Adquisición de datos

El reómetro RHM-3000 es controlado mediante un software en el cual se le indican diversos parámetros tales como la geometría de la paleta y del contenedor, y demás parámetros propios de las pruebas a ejecutar que se explican con detalle en el manual del equipo. El RHM-3000 está diseñado para realizar dos pruebas básicas: Determinar el esfuerzo de fluencia estático realizando una prueba de incremento de esfuerzos y calcular el reograma del concreto en unidades relativas ($Nm - rps$), lo cual implica la determinación de la resistencia al flujo “G” (Nm) y el factor viscosidad “H” ($Nm.s$); tanto “G” como “H”, son posteriormente transformados a unidades físicas fundamentales de esfuerzo y viscosidad haciendo uso de la ecuación de Reiner-Riwlin (ecuación 5.1), la cual está basada en el modelo reológico de Bingham [35].

$$\Omega_o = \frac{T}{4\pi\mu h} \left(\frac{1}{R_i^2} - \frac{1}{R_s^2} \right) - \frac{\tau_0}{\mu} \ln \left(\frac{R_s}{R_i} \right) \quad 5.1$$

Dónde:

- Ω_o = Velocidad angular en el radio exterior (rad/s)
- T = Torque (N.m)
- h = Altura del cilindro interior (m)
- R_i = Radio del cilindro interior (m)
- R_s = Radio efectivo (Si no existen zonas muertas, $R_s = R_o$)
- τ_0 = Esfuerzo de fluencia (Pa)
- μ = Viscosidad (Pa.s)

El software del RHM-3000 presenta diversas limitaciones de las cuales el usuario debe estar consciente. Durante la obtención del reograma, el software registra la evolución del torque respecto del tiempo durante distintas frecuencias rotacionales evaluadas de forma escalonada. Posteriormente, descarta los datos de torque y frecuencia rotacional adquiridos durante el primer segundo de cada escalón para “asegurar” que la medición de los valores de torque se obtenga a partir de una condición estable (equilibrio) y calcula el valor promedio del conjunto de datos que conforman cada escalón para construir el reograma. Sin embargo, esta acción se ejecuta de forma predeterminada sin que el usuario tenga la certeza de que el torque efectivamente alcanzó la estabilidad durante el tiempo restante del escalón medido. Si el torque no alcanza la estabilidad en uno o varios escalones durante el tiempo que se efectúa la medición, el reograma resultante podría ser confundido con el de un fluido reoespesante y la caracterización de sus propiedades sería errónea (Figura 29) [22].

Otra desventaja de confiar ciegamente en el software del equipo recae en el hecho de que solo calcula los parámetros reológicos fundamentales con base en el modelo de Bingham. Adicionalmente, cuando el esfuerzo de fluencia es bajo, la extrapolación para el cálculo de la intersección del reograma con el eje del torque puede conllevar a un valor de torque negativo, el cual es convertido erróneamente a $\tau_0 = 0.1$ Pa por el software y por último, el esfuerzo de fluencia estático es calculado a partir del valor

más alto registrado durante la prueba “incremento de esfuerzo” sin tomar en cuenta la dispersión de los datos a causa de los agregados.

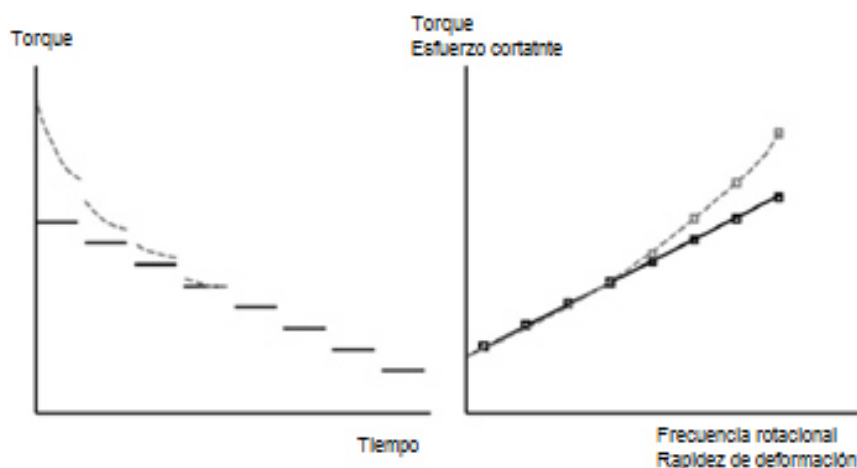


Figura 29. La falta de estabilidad (línea gris) en las mediciones de torque (lado izquierdo) puede conllevar a la conclusión errónea de que el material evaluado es reoespesante [22].

Para lidiar con estas desventajas, es absolutamente necesario restablecer el torque a cero (“torque reset”) con el contenedor vacío antes de probar cada mezcla y guardar el archivo RAW de cada prueba efectuada para realizar un análisis de los datos independiente al realizado por el software. Es importante notar que en el archivo RAW, para un tiempo igual a 0, el torque nunca es igual a 0, sino más bien fluctúa entre valores positivos y negativos. De acuerdo con el fabricante del equipo, es normal que exista una variación en el sensor del torque de ± 0.1 Nm debido a que el reómetro no está perfectamente libre de fricción. No obstante, durante esta investigación se observó en los archivos RAW que los valores de torque iniciales pueden fluctuar entre -0.8 y 1.31 Nm, aun después de haber restablecido el torque. Por lo tanto, se probaron varias estrategias de corrección y la que aparentemente dio mejor resultado fue tomar el valor de torque más pequeño registrado durante la medición y convertirlo en el cero relativo sustrayéndolo de las lecturas de torque restantes. Si no se realiza la corrección del desfase del torque, los resultados obtenidos no serán correctos y carecerán de sentido

completamente al compararse entre sí. Esta anomalía solo tiene efecto sobre la determinación de los esfuerzos de fluencia (estático y dinámico) ya que la viscosidad depende de la relación existente entre el esfuerzo y la rapidez de deformación, y aunque el torque se encuentre desfasado, la relación es proporcional.

5.2.5.4. Determinación del esfuerzo de fluencia estático

Esta prueba consiste en hacer girar dentro de una muestra de concreto la paleta del reómetro a una velocidad constante. La frecuencia rotacional utilizada para todas las pruebas fue de 0.025 rps. Una vez iniciada la prueba, el reómetro gira a una frecuencia constante y mide la evolución del torque respecto del tiempo. Esta prueba se ejecutó por 20 segundos y durante un análisis posterior de datos, se calculó la línea de tendencia que tuviera el mejor ajuste por medio de una regresión no lineal. Con base en los coeficientes de la regresión efectuada, se estimó el valor máximo de torque necesario para hacer fluir a la mezcla de concreto. Después de identificar el torque máximo (T-max), el esfuerzo de fluencia estático se calcula con la ecuación 5.2. Para ilustrar mejor al lector, un resultado típico de esta prueba y el resultado posterior al análisis de datos se muestran en la Figura 30. Nótese la gran dispersión de la nube de datos. De no calcular la línea de tendencia, el software del reómetro simplemente calcularía el esfuerzo de fluencia estático usando el punto más alto resaltado en color amarillo en la figura anteriormente mencionada.

$$\tau_0 = \frac{T}{2\pi R_i^2 h} \quad 5.2$$

Dónde:

τ_0 = Esfuerzo de fluencia

T = Densidad

R_i = Radio interior

h = Altura del cilindro interior

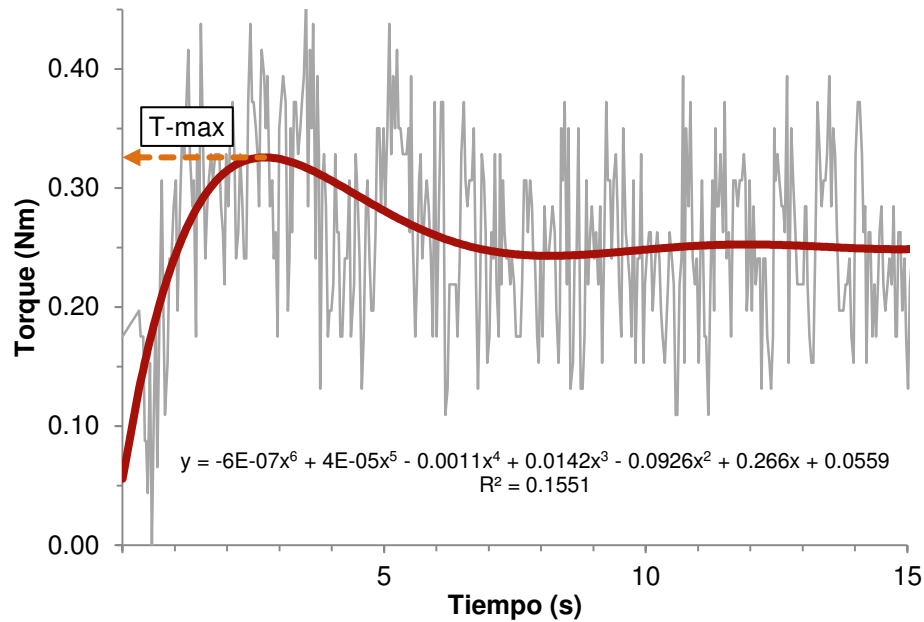


Figura 30. El incremento gradual del torque como consecuencia de una frecuencia rotacional baja y constante permite identificar el esfuerzo máximo a partir del cual el concreto se deforma plásticamente.

5.2.5.5. Reograma

Esta prueba consiste en determinar la relación existente entre el esfuerzo cortante y la rapidez de deformación. Como resultado se obtiene el reograma a partir del cual se puede calcular el esfuerzo de fluencia dinámico y la viscosidad plástica en función de un modelo reológico conocido. Para ello, es necesario registrar las mediciones de torque generadas a distintas frecuencias rotacionales de forma escalonada y decreciente. Los parámetros utilizados para el desarrollo de esta prueba se encuentran en la Tabla 7.

Tabla 7. Configuración de parámetros para obtención del reograma con el reómetro RHM-3000

Frecuencia rotacional para rompimiento estructural :		0.50 rps
Tiempo de ruptura :		20 s
Frecuencia rotacional:	Inicial:	0.50 rps
	Final:	0.03 rps
Número de puntos:		10
Tiempo por punto:		5 s

En la Figura 31 se esquematiza el procedimiento experimental para la obtención del reograma. Para eliminar el efecto de la tixotropía, se hizo girar el cilindro interior dentro de la muestra de concreto por un periodo de 20 segundos a la frecuencia rotacional máxima del rango empleado (0.5 rps). Durante este periodo, el torque alcanza un valor máximo casi de forma instantánea y comienza a descender gradualmente hasta alcanzar la estabilidad, lo cual refleja el rompimiento las fuerzas interparticulares responsables del incremento de la viscosidad aparente cuando el material se encuentra en reposo (tixotropía). Después de los 20 segundos iniciales, se registraron los datos de torque por 5 segundos para cada escalón efectuado por la frecuencia rotacional. Los datos recopilados durante el primer segundo de cada escalón (franjas grises) fueron descartados debido a que es el tiempo de transición entre una frecuencia rotacional y otra. Si durante los 4 segundos restantes de cada escalón las lecturas de torque se encuentran estables, para cada uno de ellos se calcula el torque y la frecuencia rotacional promedio. Hasta cierto punto, es normal que los datos de torque presenten dispersión, aun y cuando estén en equilibrio; sin embargo, si la dispersión es excesiva, los datos que más se alejen del conjunto deben ser eliminados. Si bien, la inspección individual de cada escalón es una tarea ardua, desarrollando los algoritmos correctos en una hoja de cálculo, el filtrado de los datos puede hacerse de forma automatizada. La regla de filtrado aplicada en esta investigación consistió en eliminar todos los datos que excedan por más de ± 1.5 la desviación estándar (σ) del conjunto de datos original que constituyan a un determinado escalón. Por ejemplo, en el escalón 3 de la Figura 31 se puede apreciar que las últimas lecturas de torque están muy elevadas respecto del resto de los datos que lo integran. La Figura 32 muestra la aplicación de la regla de filtrado en el escalón 3 y su efectividad para descartar los datos ubicados en los extremos. El mismo procedimiento fue seguido para la frecuencia rotacional.

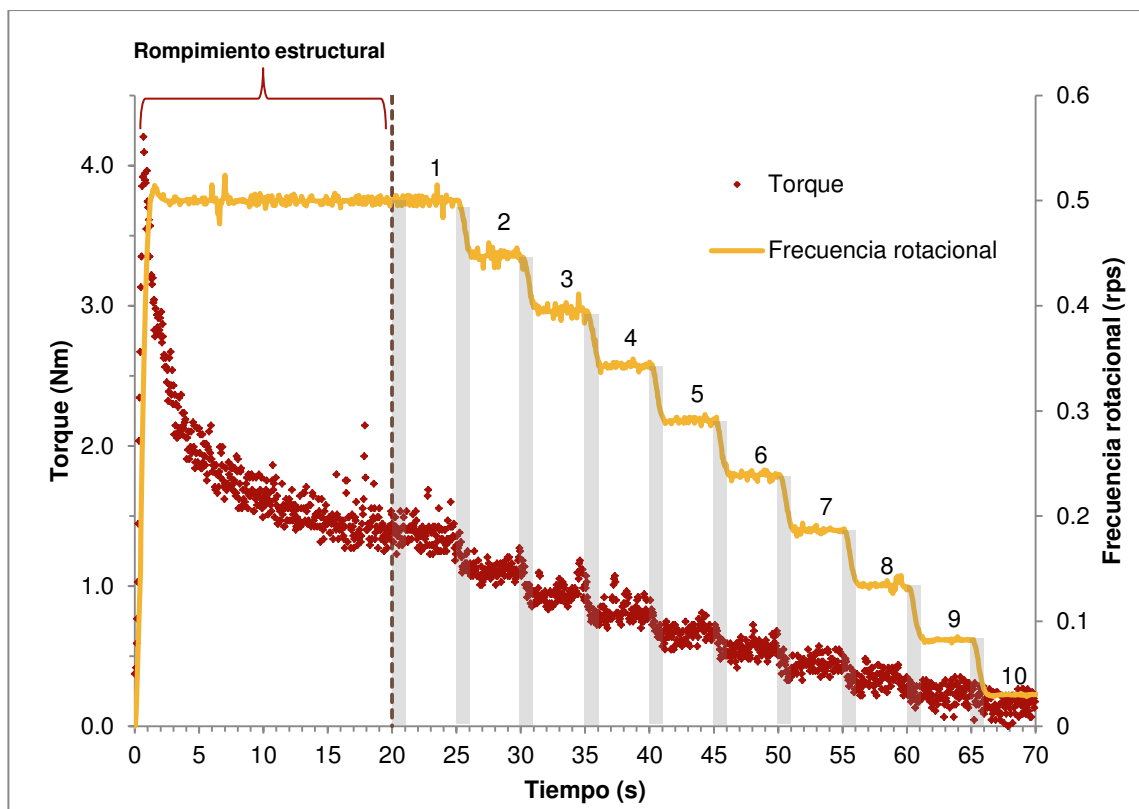


Figura 31. Datos adquiridos para determinación del reograma.

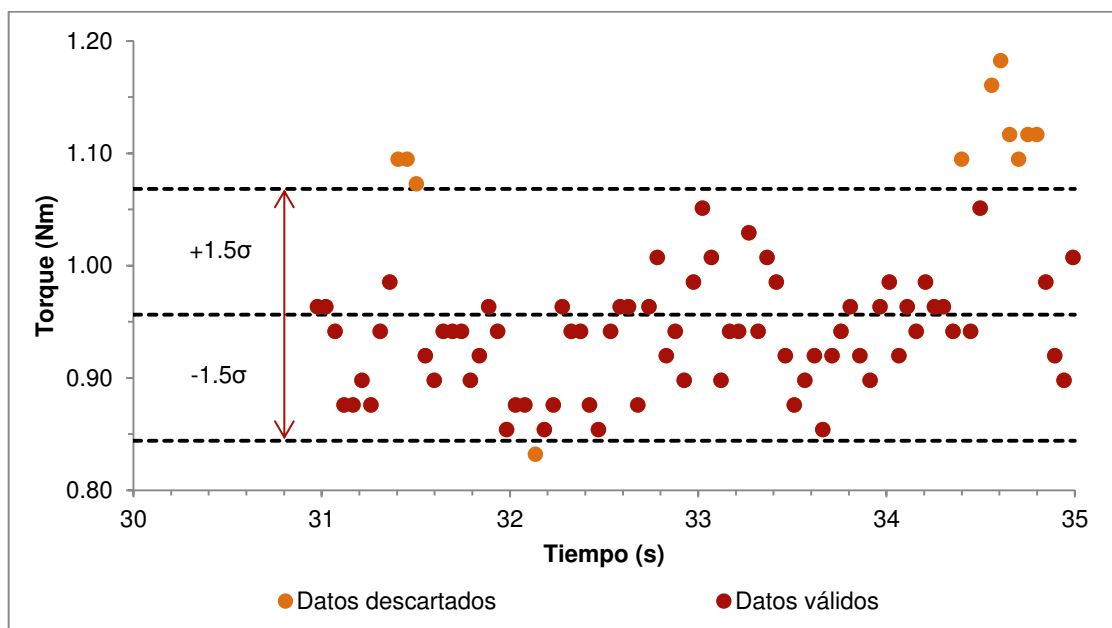


Figura 32. Filtrado de datos debido a dispersión excesiva.

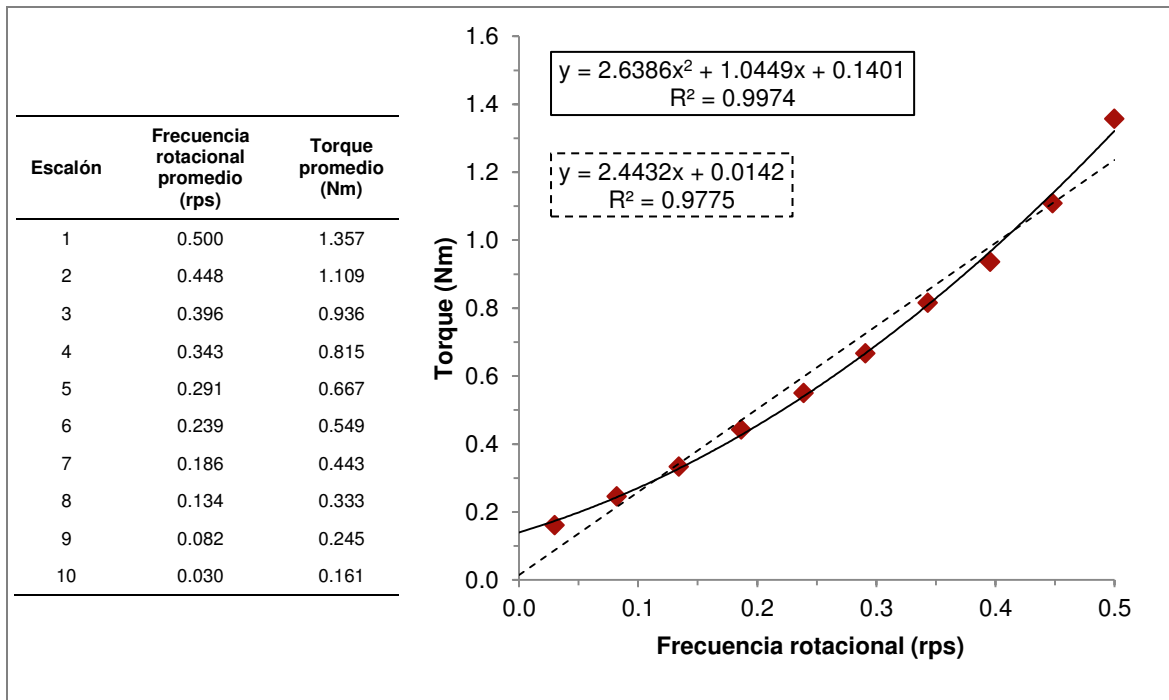


Figura 33. Diagrama T(N)

En la Figura 33 se puede ver claramente el comportamiento del CAC usado para este ejemplo corresponde al de un material reoespesante el cual tendrá que ser analizado por medio del modelo reológico de Bingham modificado. De los coeficientes de la ecuación cuadrática generada a partir de una regresión no lineal, podemos identificar G, H y C (ecuación 5.3).

$$T = G + HN + CN^2 \quad 5.3$$

Dónde:

T = Torque

N = Frecuencia rotacional

G = Intersección del reograma T(N) con el eje T

H = Coeficiente del término de primer orden en el reograma T(N)

C = Coeficiente del termino de segundo orden en el reograma T(N)

Feys, D. *et al*, determinaron recientemente la extensión de la ecuación de Reiner-Riwlin para el modelo reológico de Bingham modificado (ecuación 5.4) haciendo

posible transformar G, H y C a unidades reológicas fundamentales que no dependan de la geometría del equipo con el que se midieron [35].

$$T = \frac{4\pi h \ln\left(\frac{R_s}{R_i}\right)}{\left(\frac{1}{R_i^2} - \frac{1}{R_s^2}\right)} \tau_0 + \frac{8\pi^2 h}{\left(\frac{1}{R_i^2} - \frac{1}{R_o^2}\right)} \mu N + \frac{8\pi^3 h}{\left(\frac{1}{R_i^2} - \frac{1}{R_s^2}\right)} \left(\frac{R_s + R_i}{R_s - R_i}\right) c N^2 \quad 5.4$$

Dónde:

T = Torque (Nm)

N = Frecuencia rotacional (s^{-1})

τ_0 = Esfuerzo de fluencia (Pa)

μ = Término lineal del modelo de Bingham modificado (Pa.s)

c = Término de segundo orden del modelo de Bingham modificado (Pa.s²)

h = Altura del cilindro interior (m)

R_i = Radio del cilindro interior (m)

R_s = Radio que delimita la frontera entre el material deformado y sin deformar (radio de “zona muerta”) (m)

Si la relación entre el torque (T) y la frecuencia rotacional (N) se define como se planteó en la ecuación 5.3, entonces G, H y C pueden transformarse usando las ecuaciones de la Tabla 8 solo si todo el material dentro del espacio existente entre R_i y R_o fluye ($R_s > R_o$) [35].

Tabla 8. Ecuaciones para transformar G, H y C a unidades reológicas fundamentales

Unidades relativas	Unidades fundamentales
G (Nm)	$\tau_0(Pa) = \frac{\left(\frac{1}{R_i^2} - \frac{1}{R_o^2}\right)}{4\pi h \ln\left(\frac{R_o}{R_i}\right)} G$
H (Nm.s)	$\mu(Pa.s) = \frac{\left(\frac{1}{R_i^2} - \frac{1}{R_o^2}\right)}{8\pi^2 h} H$
C (Nm.s ²)	$c(Pa.s^2) = \frac{\left(\frac{1}{R_i^2} - \frac{1}{R_o^2}\right) (R_o - R_i)}{8\pi^3 h (R_o + R_i)} C$

Dando continuidad al ejemplo anterior, al sustituir los valores obtenidos en las ecuaciones de la Tabla 8, tenemos que $\tau_0 = 21.525 \text{ Pa}$, $\mu = 20.747 \text{ Pa.s}$, y $c = 6.420 \text{ Pa.s}^2$, pero debido a que esta transformación solo es válida si todo el concreto entre R_i y R_o fluye, es necesario verificar si dicha condición se cumple. La presencia de zonas sin fluir dentro de un reómetro de cilindros coaxiales se debe al esfuerzo de fluencia del material y usualmente se presenta durante las frecuencias rotacionales más bajas. Por definición, el flujo cesa cuando $\tau < \tau_0$. Cuando el cilindro interior es el que gira (como es el caso del RHM-3000), el esfuerzo cortante (τ) disminuye a lo largo de todo el espacio conformado entre R_i y R_o siendo máximo en R_i . Por lo tanto, si τ en R_o no es superior al esfuerzo de fluencia del material (τ_0), se presentará una zona de radio R_s dentro del espacio anular existente entre R_o - R_i que permanece sin deformarse. En la literatura se le conoce a este efecto como “zona muerta” [26] o también como “*plug flow*” [35]. El radio de la zona muerta o radio de “*plug flow*” se define mediante la ecuación 5.5, de tal forma que para determinar R_s , es necesario conocer con anticipación τ_0 , el cual de inicio es desconocido.

$$R_s = \sqrt{\frac{T}{2\pi h \tau_0}} \quad 5.5$$

Dónde:

- R_s = Radio que delimita la frontera entre el material deformado y sin deformar (radio de “zona muerta”) (m)
- T = Torque (Nm)
- τ_0 = Esfuerzo de fluencia (Pa)
- h = Altura del cilindro interior (m)

Por lo tanto, es necesario determinar si durante la prueba, el esfuerzo cortante ejercido por el reómetro fue suficientemente grande como para hacer fluir al concreto en todo momento dentro del espacio anular R_o - R_i . Para ello, basta con comparar si R_s es superior a R_o para todos los valores de T obtenidos. Como se observa en la Figura 34 se muestra la presencia de zonas muertas para los escalones 8, 9 y 10. Por lo tanto,

las propiedades reológicas determinadas anteriormente (τ_0 , μ y c) son inválidas y requieren ser corregidas. Para efectuar la corrección es necesario que los resultados tomen en cuenta el efecto de la zona muerta, y esto se logra variando de forma iterativa los valores de τ_0 , μ y c para modificar la distribución de la rapidez de deformación ($\dot{\gamma}$) a lo largo del espacio anular, de tal forma que incorpore a R_s en los puntos afectados. En la literatura solo se menciona la factibilidad de efectuar esta corrección en el modelo de Bingham Modificado [22, 35], mas nunca se ha detallado el procedimiento a seguir. Es por eso que en la siguiente sección se detalla el proceso de corrección paso a paso (solo hasta la primera iteración).

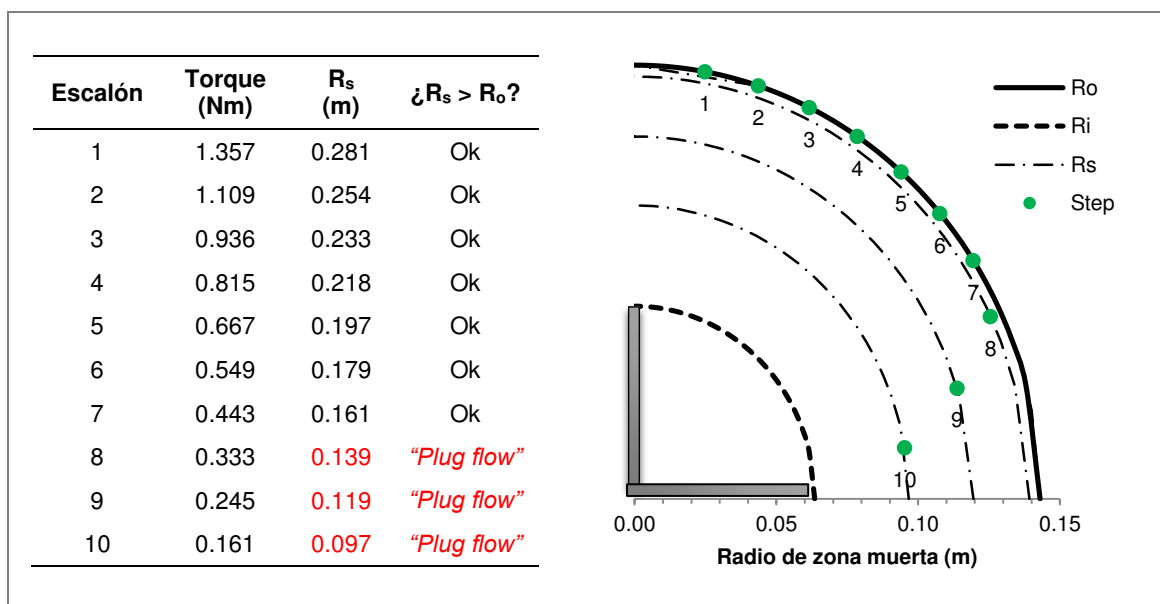


Figura 34. Determinación de la existencia de zonas muertas en el espacio anular $R_o - R_i$

Corrección por zonas muertas (plug flow)

Para incorporar el efecto de zonas muertas en la solución se puede hacer uso de la ecuación 5.4, la cual es válida para todos los puntos [35]; sin embargo, se requiere el conocimiento previo de τ_0 , μ y c . Entonces, para poder incluir el efecto de las zonas muertas en las propiedades reológicas es necesario variar los valores de τ_0 , μ , c y R_s

en la ecuación 5.4 mediante un proceso iterativo, tomando como valores iniciales los obtenidos en la primera aproximación. Se debe tener presente que R_s es un radio imaginario que aunque numéricamente puede tomar un valor superior a R_o , la siguiente regla debe ser aplicada: Si, $R_s > R_o$, entonces $R_s = R_o$, si no, $R_s = R_s$.

Una vez obtenido el torque calculado (T') para cada escalón, se calcula el esfuerzo cortante (τ') ejercido en el cilindro interior con la ecuación 5.6 y la rapidez de deformación corregida ($\dot{\gamma}_{corr}$) con la ecuación 5.7, quedando la serie de cálculos como se muestra en la Tabla 9.

$$\tau = \frac{T}{2\pi r^2 h} \quad 5.6$$

Dónde:

- τ = Esfuerzo cortante (Pa)
- T = Torque (Nm)
- r = Radio del cilindro interior (Pa)
- h = Altura del cilindro interior (m)

$$\dot{\gamma}_{corr} = \frac{-\mu + \sqrt{\mu^2 - 4c(\tau_0 - \tau')}}{2c} \quad 5.7$$

Dónde:

- $\dot{\gamma}_{corr}$ = Rapidez de deformación corregida (s^{-1})
- μ = Coeficiente de viscosidad inicial (Pa.s)
- c = Parámetro de segundo orden inicial (Pa.s²)
- τ_0 = Esfuerzo de fluencia inicial (m)
- τ' = Esfuerzo cortante calculado (Pa)

Ahora, es necesario recalcular τ_0 , μ , y c realizando una regresión no lineal de $\tau(\dot{\gamma}_{corr})$ como se muestra en la Figura 35. Con los valores resultantes de τ_0 , μ , y c , se calcula la diferencia absoluta entre los valores iniciales y los resultantes como se muestra en la

Tabla 10. Si no hay convergencia entre ellos, se concluye con la primera iteración y se da paso a la siguiente.

Tabla 9. Parámetros calculados durante la primera iteración.

Escalón	T (Nm)	τ (Pa)	R_s (m)	T' (Nm)	τ' (Pa)	$\dot{\gamma}_{corr}$ (s ⁻¹)
<i>Ecuación</i>		5.6	5.5	5.4	5.6	5.7
1	1.357	421.701	0.143	1.322	410.876	6.338
2	1.109	344.544	0.143	1.137	353.486	5.754
3	0.936	290.898	0.143	0.966	300.363	5.170
4	0.815	253.362	0.143	0.809	251.561	4.584
5	0.667	207.152	0.143	0.667	207.247	4.000
6	0.549	170.768	0.143	0.540	167.905	3.425
7	0.443	137.564	0.143	0.427	132.581	2.846
8	0.333	103.449	0.139	0.329	102.224	2.280
9	0.245	76.194	0.119	0.243	75.566	1.705
10	0.161	49.933	0.097	0.153	47.463	0.963

Tabla 10. Verificación de convergencia entre valores iniciales (valores de entrada) y el resultado de la corrección (valores de salida).

Valores iniciales		Resultado		Diferencia absoluta
τ_0 (Pa)	21.525	τ_0 (Pa)	28.713	7.188
μ (Pa.s)	20.747	μ (Pa.s)	17.156	3.592
c (Pa.s ²)	6.442	c (Pa.s ²)	6.827	0.407
Suma a minimizar:				11.187

El objetivo del proceso iterativo es variar constantemente los valores de τ_0 , μ , y c hasta que la suma de la diferencia absoluta existente entre los valores iniciales y resultados en un valor < 0.001 . Para ello, todo el procedimiento debe ser programado en una hoja de cálculo y utilizar un algoritmo de optimización no lineal como Excel Solver® que cambie constantemente los parámetros iniciales hasta lograr la convergencia. En el ejemplo anterior, después de 15 iteraciones el algoritmo de optimización convergió al resultado de la Tabla 11, los cuales son los verdaderos parámetros reológicos del material y pueden ser empleados para la construcción del reograma que caracteriza su flujo (Figura 36).

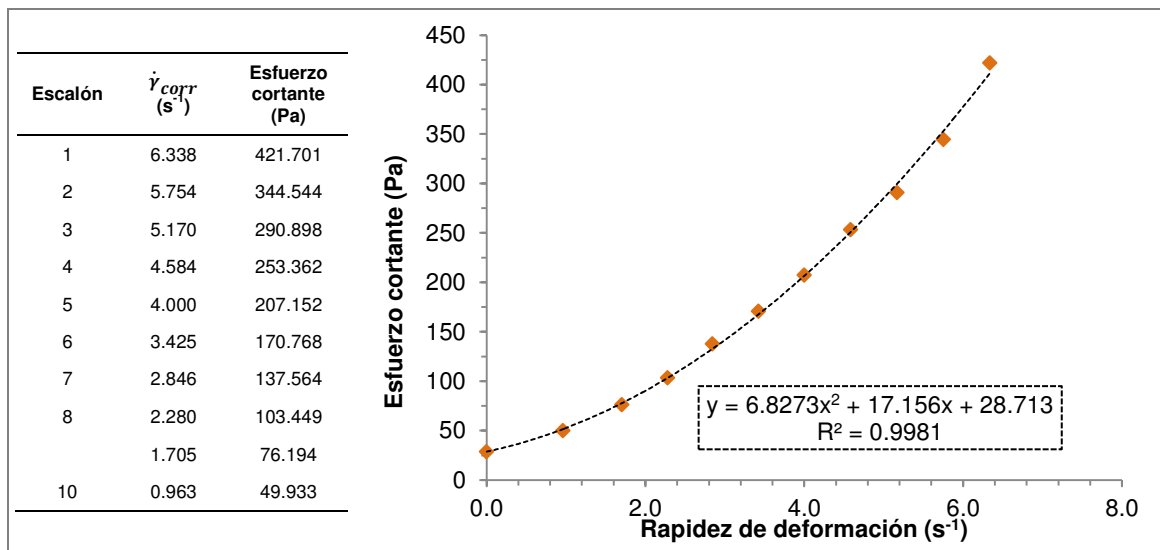


Figura 35. Resultado de la primera iteración de la corrección por zonas muertas.

Tabla 11. Fin del proceso iterativo y obtención de los parámetros reológicos verdaderos.

Valores iterativos		Resultado		Diferencia absoluta
τ_0 (Pa)	24.902128	τ_0 (Pa)	24.902150	0.000021
μ (Pa.s)	17.526642	μ (Pa.s)	17.526702	0.000060
c (Pa.s ²)	7.035711	c (Pa.s ²)	7.036406	0.000698
Suma a minimizar:				0.000779

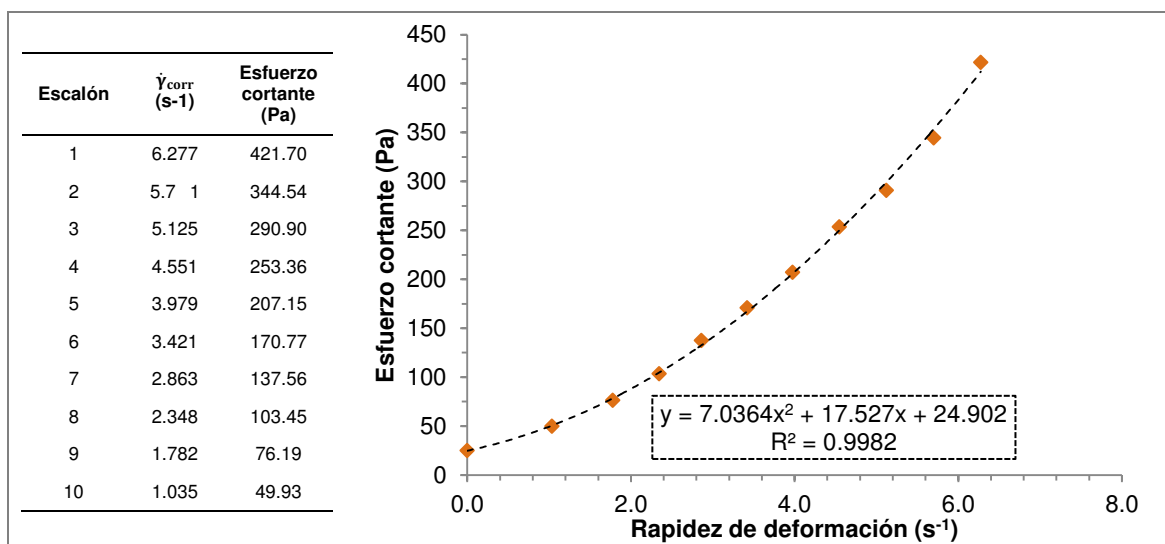


Figura 36. Reograma corregido por efecto de zonas muertas expresando los parámetros reológicos correspondientes a la mezcla de concreto

En el modelo de Bingham modificado, la viscosidad depende de la rapidez de deformación, es decir, la pendiente del reograma no es constante como en el caso del modelo de Bingham convencional. Por lo tanto, los resultados de viscosidad en esta investigación se reportan como viscosidad diferencial usando la ecuación 2.3 a una rapidez de deformación de 3.109 s^{-1} , dicho valor corresponde a la rapidez de deformación promedio de todas las mediciones efectuadas durante la investigación.

5.2.6. Resistencia a la segregación estática

La resistencia a la segregación estática se midió usando la técnica de la columna de segregación especificada por la norma ASTM C1610M-14 [93] (Figura 37). En esta prueba se colocan aproximadamente 20 litros de concreto de un molde cilíndrico vertical sin compactar o ejercer vibración alguna y se dejan reposar durante 15 minutos. Después, la columna es seccionada en 3 partes. El concreto del primer y último cuarto de la altura de la columna es recuperado y lavado a través de una malla de 4.75 mm para recuperar el agregado grueso. Una vez retirado todo el mortero de las partículas de agregado grueso, este es pesado en condición saturada superficialmente seca y el porcentaje de segregación es calculado de acuerdo a la norma citada.



Figura 37. Columna de segregación

5.2.7. Deformación autógena

La deformación autógena se determinó mediante el procedimiento especificado en ASTM C1698-09 [94] (Figura 38). Para ello se crearon 2 especímenes dentro de moldes corrugados sellados que ofrecen poca resistencia a la deformación, a partir de la muestra de mortero obtenida para determinación de los tiempos de fraguado. El llenado fue asistido por una mesa vibratoria ajustada a potencia media para retirar la mayor cantidad de aire atrapado posible. Una vez alcanzado el fraguado final, los especímenes para deformación autógena fueron medidos con un micrómetro montado en un marco de referencia por periodos regulares de tiempo hasta alcanzar la edad de 28 días y después los datos fueron utilizados para calcular la deformación promedio de ambos especímenes.



Figura 38. Dispositivo para medición de la deformación autógena.

5.2.8. Tiempos de fraguado

Los tiempos de fraguado fueron determinados conforme a la norma ASTM C403-08. Para ello, se obtuvo una muestra de mortero por medio de cribado en húmedo. El mortero fue colocado en un contenedor y almacenado en un cuarto de humedad y temperatura controlada protegidos de la pérdida excesiva de humedad. Después, se midió la resistencia a la penetración del mortero con las agujas y aparato especificados

por el método a intervalos regulares de tiempo dejando 25 mm de espaciamento entre cada medición como se muestra en la Figura 39.



Figura 39. Determinación de los tiempos de fraguado

5.2.9. Resistencia a la compresión

Se fabricaron 12 especímenes por cada mezcla realizada para la determinación de la resistencia a la compresión de acuerdo a la norma ASTM C31-09 [95]. Los especímenes fueron llenados en moldes de 10 x 20 cm vertiendo el concreto directamente dentro de ellos. Ligeros golpes laterales fueron proporcionados al molde para facilitar el acomodo del concreto a causa de la alta viscosidad exhibida por algunas de las mezclas producidas. Posteriormente, se dejaron fraguar a temperatura ambiente protegidos de la pérdida de humedad con una membrana plástica por 24 horas. Después fueron desmoldados y colocados dentro de un cuarto de curado a 23 ± 2 °C con humedad relativa del 100% hasta alcanzar la edad de ensaye, a excepción de los cilindros que se ensayaron a 1 día de edad los cuales fueron cabeceados inmediatamente después de retirarlos del molde y ensayados después de que el azufre

ganara resistencia. Los especímenes fueron cabeceados con mortero de azufre y ensayados a una velocidad de carga de 200 kg/s.

5.3. Mezcla de referencia

El concreto autocompactable de referencia se diseñó para tener un flujo de revenimiento de 720 mm \pm 20 mm siguiendo las recomendaciones del comité 237 del ACI, así como también las provistas por el EFNARC. Los parámetros relación agregado fino – agregado total (A_f/A), dosificación de SP y contenido de cementante se ajustaron de manera simultánea mediante mezclas de prueba de 25 litros en una revolvedora de tambor convencional hasta lograr una adecuada fluidez, habilidad de paso, resistencia a la segregación y cohesividad. La a/cm se fijó en 0.40 ya que este es el valor máximo permisible que cubre las distintas clases de exposición establecidas en el ACI 318S-11 [96].

5.3.1. Contenido de cementante y contenido total de polvos

El comité 237 del ACI recomienda para flujos de revenimiento mayores que 650 mm un contenido de polvos superior a los 458 kg/m³. Con los materiales locales, el uso de tal contenido de polvos requeriría de un aditivo modificador de la viscosidad (AMV) para conferir estabilidad a la mezcla o bien de la adición de más polvos para incrementar la viscosidad o de lo contrario, habría segregación de los materiales constituyentes. El polvo de caliza menor que 125 μ m aportado por el agregado fino como sub-producto de su trituración es igual a 15.09% y se consideró como filler inerte en la composición de la pasta, eliminando la necesidad de incluir un AMV o polvos adicionales.

Mediante las mezclas de prueba se determinó que el volumen de material cementante necesario para alcanzar la fluidez objetivo (720 \pm 20 mm, VSI 0) equivale al volumen producido por 480 kg de cemento por m³/concreto. Fijando dicho volumen como

volumen de material cementante objetivo, la dosificación de CV se fijó en 20% de remplazo de volumen de cemento ya que se observó que un remplazo superior incrementa el comportamiento de fluido dilatante. Las proporciones finales de los polvos del CAC diseñado se encuentran en la Tabla 12.

Tabla 12. Proporción del material cementante y volumen total de polvos

Material	Masa (kg)	Volumen (L)
CPO 40	480.00	153.35
Remplazo de volumen: 20%		
80% CPO 40	384.00	122.68
20% CVP100	63.18	30.67
Material cementante total:	447.18	153.35
Filler (15.09% del Agregado fino)	177.67	67.81
Contenido de polvo/m ³ de concreto:	624.85	221.16

5.3.2. Dosificación de superfluidificante

La dosificación de SP se determinó de forma simultánea en las batchadas de prueba para la determinación del contenido de cementante. El criterio de optimización de la dosificación de SP fue el siguiente: Partiendo de una dosificación propuesta, se adicionó más SP hasta lograr el flujo de revenimiento objetivo con VSI = 0. Una vez cubiertos ambos parámetros, se reprodujo la mezcla de CAC con la nueva dosificación para descartar posibles efectos de pérdida de trabajabilidad y pérdida de material durante los tanteos.

5.3.3. Relación agregado fino – agregado (Af/A)

El ACI 237 recomienda que el agregado grueso ocupe hasta el 50% del volumen total de la mezcla cuando el tamaño máximo nominal sea de 10 mm (3/8"). El agregado grueso regional presenta un alto contenido de partículas elongadas y angulosas por lo que se decidió incrementar la Af/A para reducir la fracción volumétrica del agregado

grueso y con ello aumentar la habilidad de paso. Sin embargo, incrementar la A_f/A por encima de 0.7 disminuye la fluidez a causa del aumento del volumen de polvo de caliza aportado por el agregado fino e incrementa la demanda de SP.

5.3.4. Proporcionamiento final de la mezcla de referencia

El diseño de mezcla de referencia se estableció como se muestra en la Tabla 13. Para fines de comparación, la Tabla 14 muestra los principales parámetros del diseño de mezcla y los valores recomendados por el ACI 237 y el EFNARC. Se puede observar que la V_w/V_p está por debajo del rango recomendado, esto se debe a que volumen de arena utilizado para poder obtener la mejor habilidad de paso posible fue demasiado alto, por lo tanto su contribución al volumen de polvos fue más acentuada. Por último, en la Tabla 15 se muestra la secuencia de mezclado de los materiales.

Tabla 13. Diseño de mezcla de referencia

Material	Materiales secos sin agua de absorción (kg/m³)
Agua de reacción	177.90
Cemento	384.00
CVP100	63.18
SP ^{A,B}	1.706
Agregado grueso	518.24
Agregado fino	1,177.76
Aire (2.5%)	-

^A Contenido de sólidos: 43%

^B Dosificación: 3.5 ml/kg de cm

Tabla 14. Comparación de los parámetros de diseño de la mezcla de referencia contra los recomendados por el ACI 237-07 y EFNARC.

Parámetro	Mezcla de referencia	Valores recomendados	
		ACI 237 [2]	EFNARC [4, 5]
a/cm	0.40	0.32 – 0.45	
V_w/V_p	0.81		0.85 - 1.10
Polvos (kg/m ³)	625		350 - 650
Agua (L/m ³)	178.87		150 -210
Pasta (%/m ³)	42.51%	34 – 40%	30 – 38
Arena (% del peso total del agregado)	69.44%		48 – 55
Mortero (%/m ³)	73.95%	68 – 72	
Grava (%/m ³)	19.27%	28 – 32	27 – 36

Tabla 15. Secuencia de mezclado para mezclas de referencia y mezclas de prueba

Tarea	Tiempo	
	Parcial (mm:ss)	Acumulado (mm:ss)
Introducir a la mezcladora el agregado grueso seguido del agregado fino	--:--	--:--
Adicionar agua de absorción de los agregados	--:--	--:--
Mezclar agregados	01:00	01:00
Detener revolvedora	--:--	01:00
Diluir el SP con 1 litro del agua de reacción	--:--	01:00
Introducir cemento, ceniza volante y el resto del agua de reacción	--:--	01:00
Mezclar el concreto	00:30	01:30
Sin detener la revolvedora, adicionar el SP disuelto lentamente después de los primeros 30 s de mezclado	01:30	02:15
Continuar mezclado	02:15	04:00
Detener el mezclado y dejar reposar por 2 minutos	04:00	06:00
Mezclar	06:00	08:00

Capítulo 6

Resultados y discusión

6.1. Caracterización de materiales

La caracterización de los materiales utilizados consistió en determinar las propiedades físicas relevantes para el cálculo de un diseño de mezcla de CAC. Las propiedades químicas de los materiales se muestran de forma informativa para futuras comparaciones.

6.1.1. Cementantes

Las características de los materiales cementantes fueron obtenidas como se describe en el capítulo 4. La ceniza volante utilizada durante el desarrollo de la fase experimental fue tamizada por la malla de 150 μm ; también se muestran resultados de la caracterización correspondientes al antes (CVSC) y después de tamizar (CVP100) para fines comparativos.

6.1.1.1. Densidad

La densidad de los materiales listados en la Tabla 16 fue determinada por duplicado y se verificó que cumpliera con la sección 6.1 de la norma ASTM C188-09 [81], la cual especifica que el resultado de la prueba efectuada por un solo operador a un mismo material, no debe presentar una variación mayor a ± 0.03 .

Tabla 16. Densidades de los materiales cementantes

Material	Densidad (g/cm ³)
CPO 40	3.13
CVSC	1.99
CVP100	2.06

6.1.1.2. Distribución de tamaño de partículas

La Figura 40 muestra claramente un refinamiento de tamaño a lo largo de toda la distribución de la CVP100 comparada con la distribución de la CVSC. También puede observarse que antes del proceso de tamizado, el 25% de CVSC tiene un tamaño superior a 150 μm , mientras que después del tamizado, solo un 4% es mayor que 150 μm . No obstante, la CVP100 siguió siendo considerablemente más gruesa que el cemento.

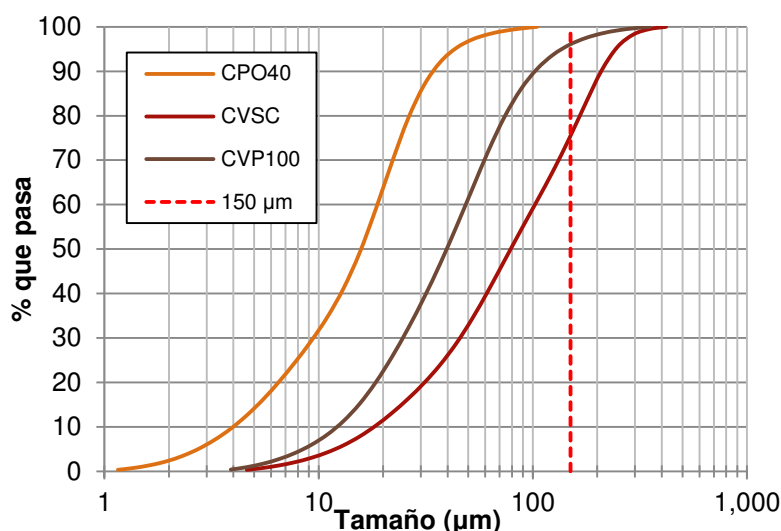


Figura 40. Distribución de tamaño de partículas

6.1.1.3. Fases minerales

Los picos característicos de las fases minerales del cemento obtenidos mediante difracción de rayos X (DRX) se muestran en la Figura 41, en la cual se identificó claramente la presencia de silicato tricálcico (C_3S), silicato dicálcico (C_2S), aluminato tricálcico (C_3A), ferroaluminato tetracálcico (C_4AF) y, yeso en sus fases hemihidrato ($\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$) y anhidrita (CaSO_4).

La Figura 42 muestra los difractogramas normalizados de la CV antes y después del proceso de tamizado. Como se puede observar, el halo amorfo centrado

aproximadamente a $23.5^\circ 2\theta$ es más prominente en la CVP100, lo cual sugiere que parte del material removido ($> 150 \mu\text{m}$) estaba conformado por fases cristalinas. Trabajos de investigación reportan que la mayoría de las CV contienen sílice cristalina (cuarzo) en proporciones que varían entre 2% - 25%. El cuarzo está presente en el carbón y debido a que el tiempo de permanencia de este último dentro del horno es muy corto y parte del cuarzo no se funde. Es importante tener en cuenta que cerca de la mitad del SiO_2 determinado analíticamente podría ser cuarzo [97]. Chancey, R. T., (2008), reporta que el aluminosilicato cristalino (mulita) existe en la mayoría de las CV, presentándose en mayor concentración en las CV con bajo contenido de calcio. La mulita es la principal fase contenedora de Al_2O_3 y se genera a partir de la cristalización del carbón fundido al enfriarse en el horno y pasar a través del escape. Aproximadamente un tercio del Al_2O_3 total podría pertenecer a esta fase no reactiva [97].

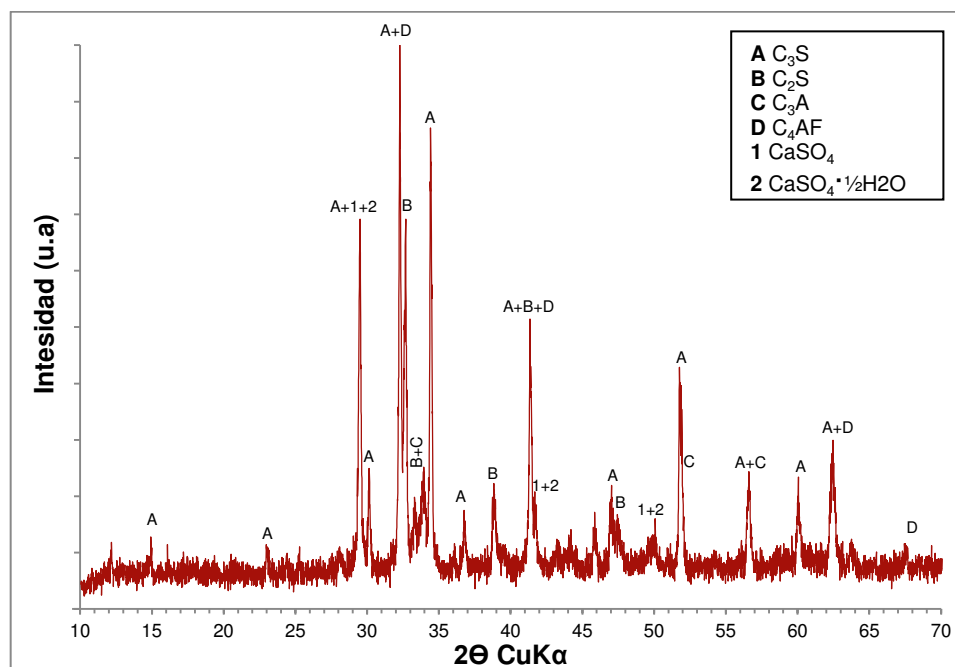


Figura 41. Difractograma del CPO40

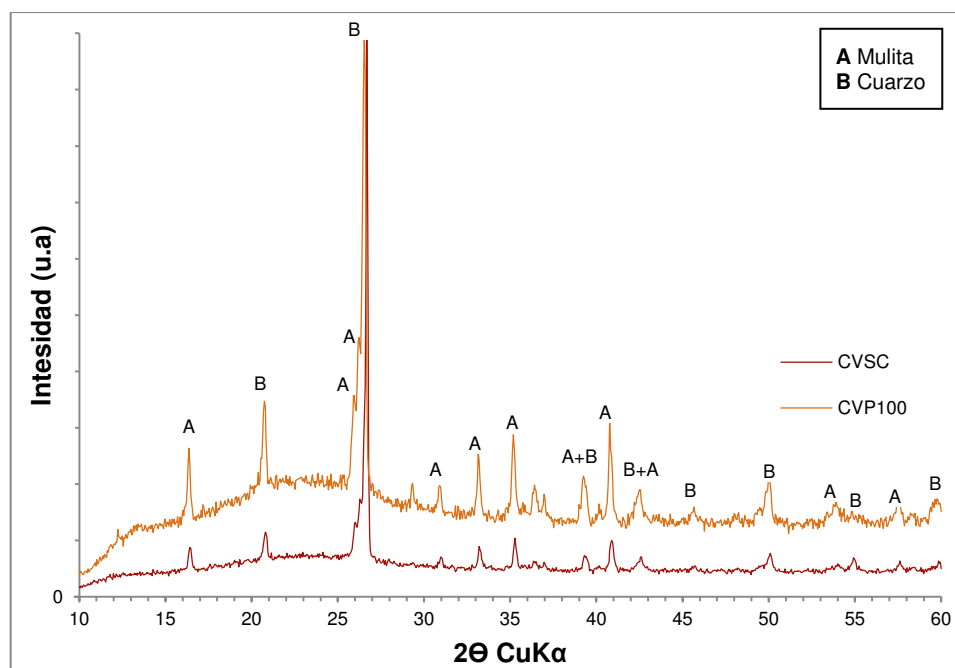


Figura 42. Difractograma de la CV antes (CVSC) y después del tamizado (CVP100) a través de la malla No. 100.

6.1.1.4. Composición química

La Tabla 17 presenta la composición química la cual fue determinada mediante fluorescencia de rayos “X” (FRX). En el caso de la CVSC, si bien la suma de SiO_2 , Al_2O_3 y Fe_2O_3 supera el límite del 70% especificado por la norma ASTM C618-08a, parte del SiO_2 y Al_2O_3 detectado es aportado por las fases cristalinas detectadas en el análisis de DRX.

Tabla 17. Composición química de los materiales cementantes

Material	Concentración (%)										
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	Na_2O	K_2O	TiO_2	P_2O_5	MnO
C40 40	17.665	4.718	2.263	63.678	1.202	5.116	0.659	0.743	0.235	0.092	0.078
CVSC	67.48	23.94	4.63	1.76	1.16	-	1.14	0.99	0.94	0.3	0.04

6.1.1.5. Morfología de la ceniza volante

La Figura 43 muestra dos micrográficas de la CVSC obtenidas con un microscopio electrónico de barrido (MEB). Del lado izquierdo, se observa la presencia de partículas

esféricas de apariencia sólida cuyo tamaño varía entre 5 y 50 μm , así como también partículas de carbón sin quemar con alta porosidad. Del lado derecho, se muestra una magnificación de la zona demarcada por el recuadro amarillo y se aprecia a detalle la estructura del carbón sin quemar el cual fue identificado mediante un análisis de Espectroscopia de Energía Dispersiva (EDS, por sus siglas en inglés) mostrado en la Figura 44.

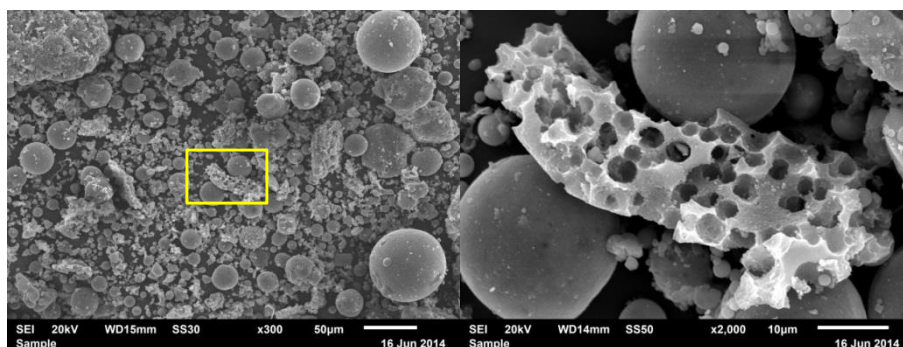
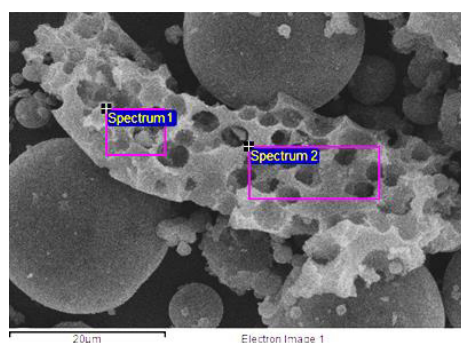


Figura 43. Morfología de las partículas de carbón sin quemar presentes en la CV.



Elemento	% en peso	
	EDS 1	EDS 2
C	79.44	85.15
O	15.58	12.53
Al	1.91	0.91
Si	3.07	1.41

Figura 44. Identificación por EDS de una partícula de carbón sin quemar.

6.1.1.6. Pérdida por ignición

Generalmente, la pérdida por ignición se emplea para estimar el contenido de carbón sin quemar de la CV. No obstante, la pérdida por ignición tiende a sobre estimar el contenido de carbón sin quemar [98]. La CVSC presentó una pérdida por ignición de

4.79% mientras que la CVP100 tuvo una pérdida de 3.12%. Por lo tanto, el tamizado por la malla No. 100 redujo en aproximadamente un 35% la pérdida por ignición.

6.1.1.7. Índice de actividad a la resistencia.

Se puede apreciar en la Figura 45 que la CVSC no cumple con el mínimo de 75% de IAR especificado por la norma ASTM C618-09a [99] mientras que la CVP100 excedió ligeramente el límite del 75% de IAR desde los 7 días.

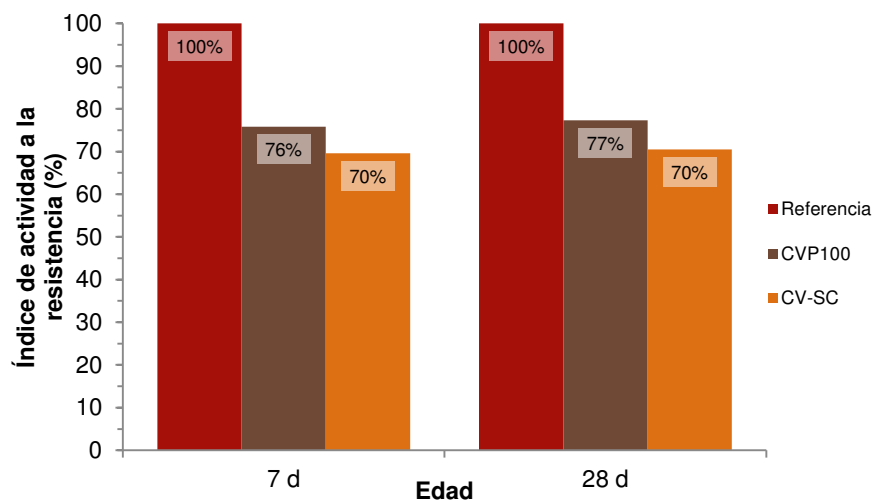


Figura 45. Índice de actividad a la resistencia

Posterior al ensaye de resistencia a compresión de los especímenes para IAR de 28 días, se recolectó un trozo de mortero perteneciente a la serie elaborada con CVSC y se analizó la zona de transición agregado–pasta y carbón-pasta mediante microscopia electrónica de barrido. Adicionalmente al incremento de finura producto del tamizado, otra razón por la cual la CVP100 muestra un mejor desarrollo de resistencia podría ser que la resistencia ganada no se reduce por la presencia del carbón sin quemar, el cual genera zonas de transición pasta-carbón muy porosas (Figura 46). Además, la resistencia mecánica del carbón presente en la CV es menor que la del agregado síliceo utilizado, por lo que su contribución a la resistencia del mortero es menor.

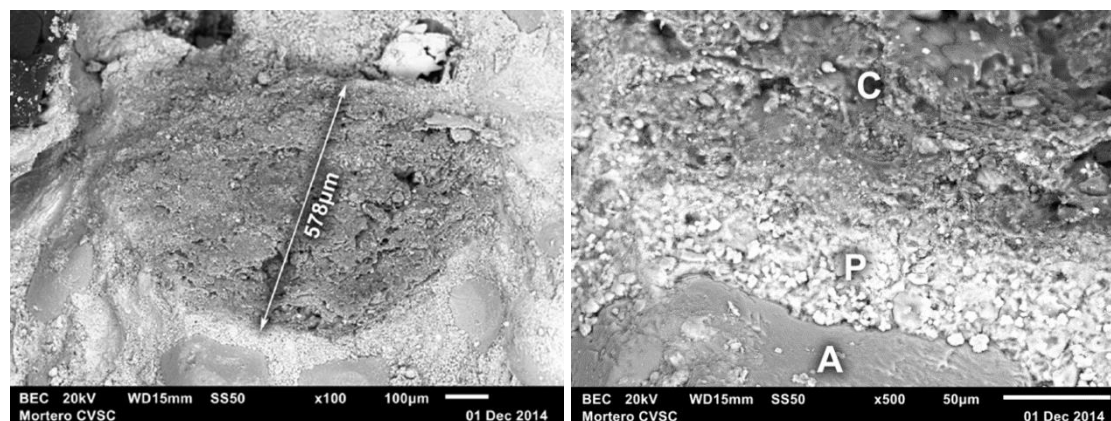


Figura 46. Comparado con la interfaz generada por el agregado (A), las partículas grandes de carbón residual (C) forman una zona de transición interfacial porosa con la pasta (P).

6.1.2. Agregados

6.1.2.1. Densidad y absorción

La densidad y absorción de los agregados utilizados para la producción de las mezclas de CAC se presentan en la Tabla 18. Debido a que la densidad y absorción varían en función de la distribución granulométrica, dichas propiedades fueron calculadas para la granulometría original del banco de materiales utilizado (G-BM) y para las demás distribuciones evaluadas. Las claves G-L1, G-L3 se refieren a los límites granulométricos mínimos y máximos establecidos por la norma ASTM C33-09 para el agregado fino, mientras que G-L2 se conforma por el promedio de ambos límites.

Tabla 18. Densidad y absorción de los agregados

Propiedad	Ag. fino				Ag. grueso
	G-BM	G-L1	G-L2	G-L3	
Densidad (g/cm ³)	2.62	2.60	2.59	2.37	2.69
Absorción (%)	1.58	1.55	2.41	2.57	0.4

6.1.2.2. Análisis granulométrico

La Figura 47 y Figura 48 presentan el resultado del análisis granulométrico del agregado fino y grueso respectivamente. En la Figura 47 puede observarse que 16.05% del material pasa la malla No. 100 ($150\ \mu\text{m}$). La distribución de tamaños en el material para los tamaños menores a $150\ \mu\text{m}$ se obtuvo mediante un análisis de DTP por difracción de rayo láser. El resultado del análisis de DTP se muestra combinado con la granulometría de las fracciones más gruesas ($>150\ \mu\text{m}$) de la arena en la Figura 49 y se observó que el 15.085% del agregado fino pasa el umbral de $125\ \mu\text{m}$. Por lo tanto el 15.085% del agregado fino se consideró como parte de la pasta [5].

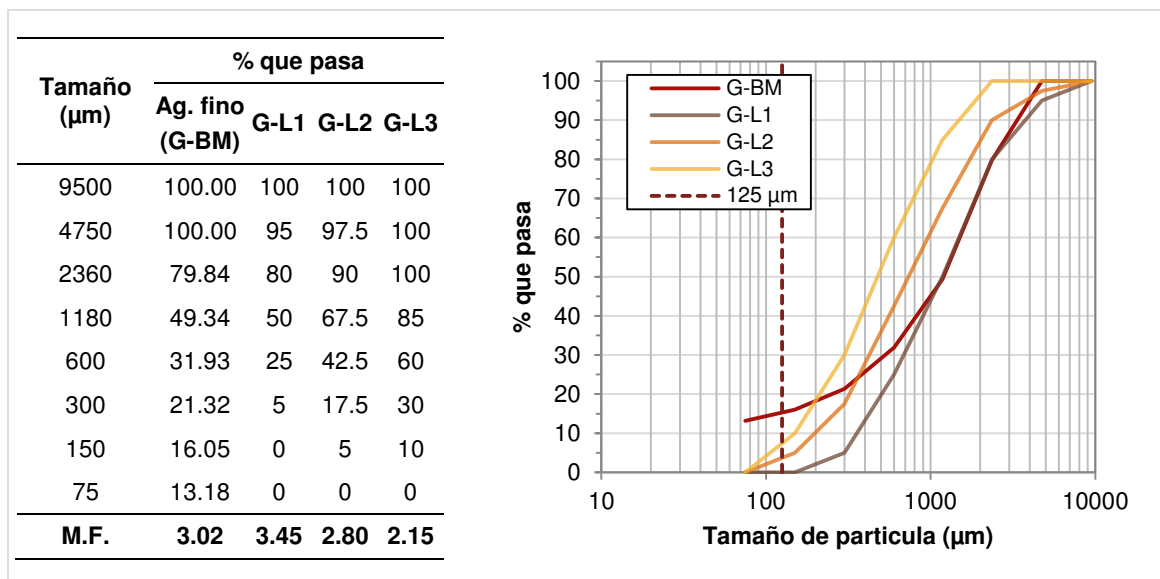


Figura 47. Análisis granulométrico del agregado fino.

Tamaño (μm)	% que pasa Ag. grueso
25000	100
19000	90.98
12500	48.52
9500	18.48
4750	1.66
2360	1.23
T.M.N.*	19 mm

*Tamaño máximo nominal

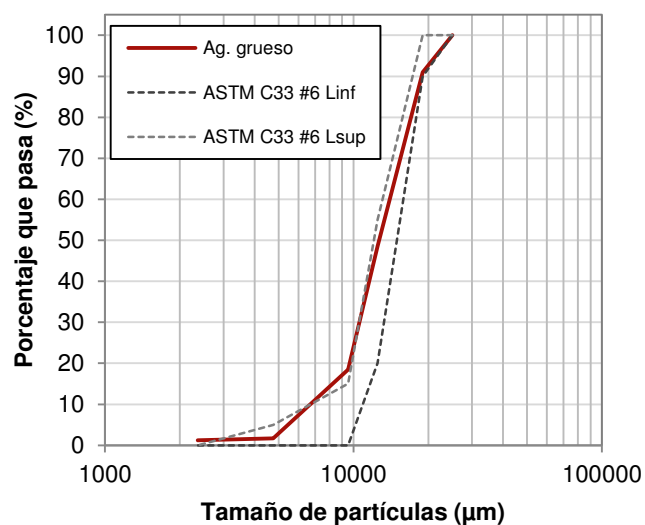


Figura 48. Análisis granulométrico del agregado grueso

Haciendo uso del coeficiente de determinación (R^2), se comparó cada una de las distribuciones granulométricas formadas por el esqueleto granular del diseño de mezcla referencia (G-BM) contra sus variaciones (G-L1, G-L2 y G-L3) con el modelo teórico de empaquetamiento de Andreasen y Andersen modificado (A&A mod) (Figura 50). La distribución G-BM arrojó el valor de R^2 mas alto (Tabla 19), lo que indica que posee una mayor similitud al modelo teórico de referencia, determinando así que la combinación de materiales en las proporciones de la mezcla de referencia posee un mejor grado de empaquetamiento en relación a las demás distribuciones granulométricas evaluadas [100].

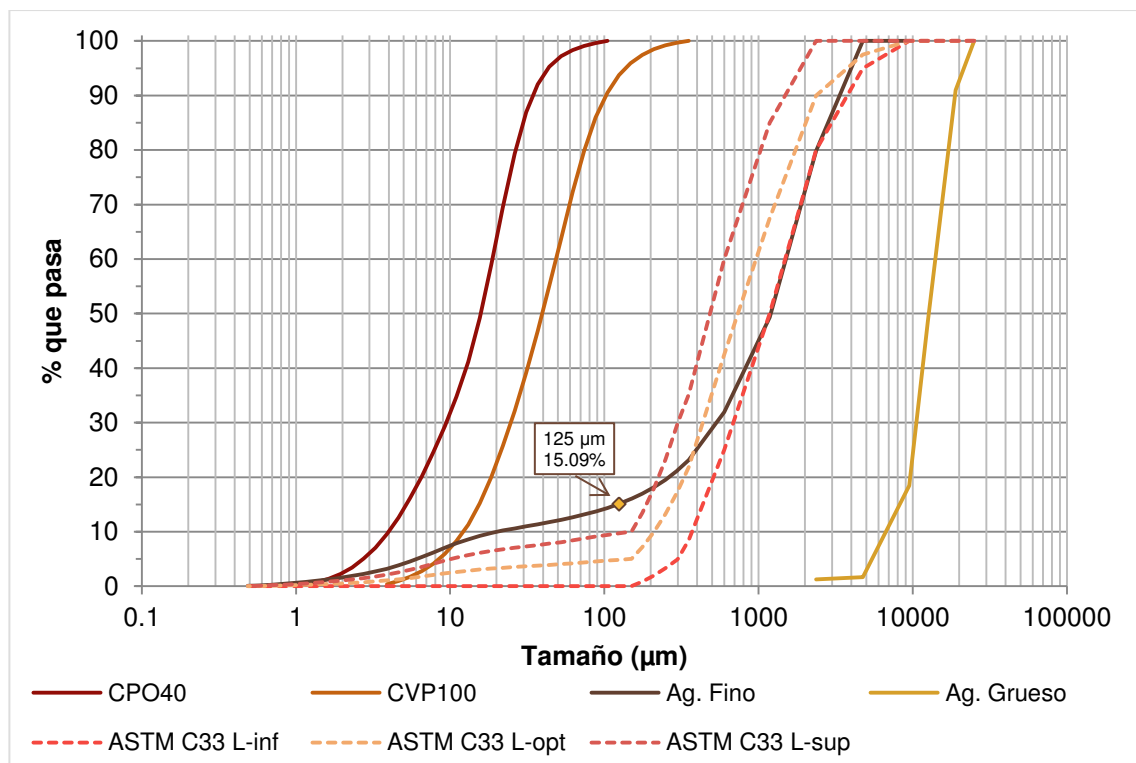


Figura 49. Distribución de tamaños de partícula de los materiales utilizados

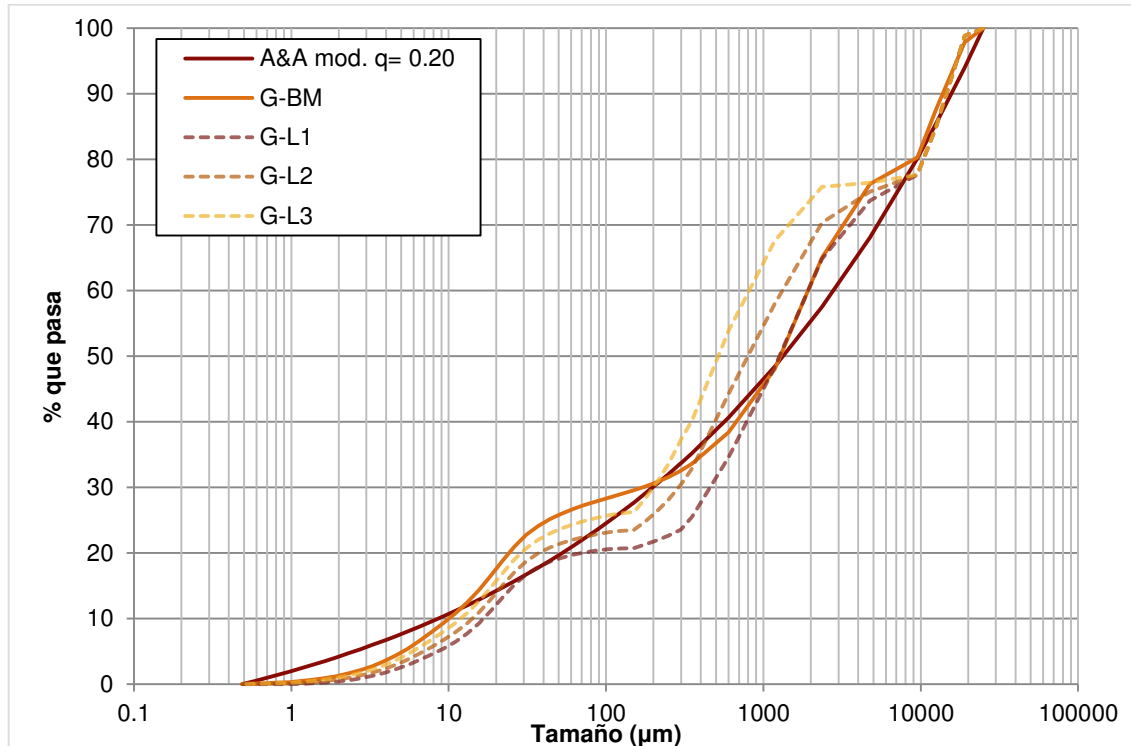


Figura 50. Esqueleto granular generado a partir del diseño de mezcla de referencia (G-BM) y sus variaciones producto de cambios en la distribución granulométrica de la arena (G-L1, G-L2 y G-L3).

Tabla 19. Comparación del coeficiente de determinación (R^2) generados a partir del modelo empaquetamiento teórico de Andreasen y Andersen modificado ($q = 0.20$).

Distribución granulométrica	G-BM	G-L1	G-L2	G-L3
Coeficiente R^2	0.9861	0.9819	0.9850	0.9729

6.1.3. Aditivo superfluidificante

6.1.3.1. Densidad y contenido de sólidos

La densidad del aditivo SP utilizado en esta investigación es de 1.09 g/cm^3 la cual es congruente con la información de la hoja de seguridad provista por el proveedor. El contenido de sólidos fue de 43%, el 57% restante se consideró como parte del agua de reacción.

6.2. Resultados experimentales

6.2.1. Propiedades de la mezcla de referencia

Las propiedades del CAC de referencia se muestran en la Tabla 20. La repetibilidad de las propiedades del CAC se evaluó efectuando 5 repeticiones y monitoreando las variaciones de sus propiedades en estado fresco (flujo de revenimiento, T_{50} , índice de estabilidad visual (VSI), tiempo de embudo V (VFt), anillo J, densidad y porcentaje de aire), deformación autógena y resistencia a la compresión. La densidad solo fue determinada para la determinación del esfuerzo de fluencia del flujo de revenimiento. La determinación de la repetibilidad de la mezcla tiene como objetivo tomar en cuenta las variaciones intrínsecas de los materiales, procedimiento de mezclado, y ambientales no consideradas en el plan experimental [36]. El promedio y la desviación estándar muestral de la repetibilidad de cada prueba se utilizó para la generación de los intervalos de confianza (IC) del 95%. Tanto como el flujo de revenimiento y resistencia a la segregación objetivo fueron alcanzados.

Tabla 20. Repetibilidad de las propiedades en estado fresco de la mezcla de referencia.

Mezcla	Flujo de revenimiento (mm)	T_{50} (s)	VSI	Embudo V (s)	Anillo J (mm)	Bloqueo (mm)	Aire (%)	Densidad (kg/m ³)	Segregación (%)
R1	730	1.74	0	17.98	615	115	2.3	2354	0
R2	720	3.87	0	18.08	620	100	2.9	2340	0
R3	740	3.79	0	20.94	615	125	2.5	2373	0
R4	720	5.51	1	26.26	670	50	3.3	2346	0
R5	710	3.17	0	25.08	655	55	1.8	2342	0
Repetibilidad									
Promedio	724.00	3.62		21.67	635	89.00	2.55	2351	0
Desv. Est.	11.40	1.36		3.86	25.74	34.53	0.57	13.20	-
+95% I.C.	738.15	5.30		26.46	667	131.87	3.26	2367	-
-95% I.C.	709.85	1.93		16.87	603	46.13	1.84	2335	-

Las clasificaciones de las características del CAC diseñado se muestran en la Tabla 21. La habilidad de paso es una característica importante que no pudo beneficiarse

más a pesar de haberse reducido sustancialmente la cantidad de agregado grueso. Esto se debe a que disminuir el contenido de agregado grueso aumenta la fracción volumétrica de la arena, la cual incluye una elevada fracción de polvo $<150\ \mu\text{m}$. Por lo tanto, la viscosidad de la mezcla aumenta y limita considerablemente la capacidad del CAC de fluir. Asimismo, la angulosidad del agregado grueso y el corto tiempo que tienen las partículas de agregado para alinearse en dirección al flujo durante la prueba de anillo J ocasionan un bloqueo extremo como el observado en la Figura 51. Aun así, el CAC de referencia diseñado tiene la capacidad de arrastrar partículas de agregado grueso del otro lado de las barras de refuerzo debido a su alta viscosidad. La alta fluidez y resistencia a la segregación del CAC de referencia lo vuelven adecuado para utilizarse en elementos que requieran un concreto auto-nivelante con bajo nivel de congestión de acero de refuerzo y elementos verticales u horizontales que no posean un espesor delgado [3].

Tabla 21. Clasificación de las propiedades del CAC de referencia de acuerdo a ASTM y EFNARC.

Característica del CAC	Método de prueba	Valor promedio	Desviación estándar	Clase
Habilidad de llenado	Flujo de revenimiento [87]	725 mm	11 mm	SF2
Habilidad de paso	Anillo J [89]	89 mm	35 mm	Bloqueo extremo
Viscosidad	T_{50} [87]	3.6 s	1.5 s	VS2
	Embudo V [5]	21.7 s	3.9 s	VF2
Resistencia a la segregación	Columna de segregación [93]	0%	-	$< 10\%$



Figura 51. Diferencia entre el diámetro del flujo de revenimiento con y sin anillo J del CAC.

Los tiempos de fraguado promedio del CAC de referencia se muestran en la Tabla 22 junto con sus IC. Puede observarse que solo la desviación estándar del tiempo de fraguado final permaneció dentro del límite especificado por la norma ASTM C403-08 (desviación estándar para multi-operador de tiempo de fraguado inicial y final, 6.9 y 10.1 minutos respectivamente). Las variaciones representadas por la desviación estándar resultaron 53% por arriba de las variaciones máximas indicadas por el método estándar para el fraguado inicial, lo cual es atribuible a la presencia del aditivo SP y a las probables variaciones entre mezclas en la cantidad de microfinos en el agregado fino. El aditivo SP produce un quelato como resultado de la interacción de los iones Ca^{2+} y las moléculas del SP, disminuyendo la concentración de iones Ca^{2+} [101, 102].

Tabla 22. Tiempos de fraguado del CAC de referencia

Mezcla	Tiempo de fraguado	
	Inicial (min)	Final (min)
R1	220	330
R2	221	348
R3	235	336
R4	240	334
R5	215	325
Repetibilidad		
Promedio	230	332
Desv. Est.	10.55	8.50
+95% I.C.	239	345
-95% I.C.	213	324

6.2.1.1. Caracterización de propiedades reológicas

6.2.1.1.1. Esfuerzo de fluencia estático

En la Tabla 23 se muestra la repetibilidad y los IC generados del esfuerzo de fluencia estático. El CAC de referencia mostró un esfuerzo de fluencia estático promedio de 100.15 Pa.

Tabla 23. Esfuerzo de fluencia estático del CAC de referencia

Mezcla	Esfuerzo de fluencia estático, τ_{0s} (Pa)
R1	101.229
R2	104.596
R3	95.280
R4	96.977
R5	102.649
Repetibilidad	
Promedio	100.146
Desv. Est.	3.904
+95% I.C.	104.993
-95% I.C.	95.299

6.2.1.1.2. Reograma

Los parámetros reológicos, esfuerzo de fluencia dinámico (τ_{0d}), coeficiente de viscosidad (μ), intensidad del comportamiento reoespesante (c/μ) y viscosidad diferencial, fueron determinados a partir de los reogramas resultantes de la evaluación de la repetibilidad de la mezcla de referencia (Anexo 1.1) y se presentan en la Tabla 24 junto con los IC calculados. Se puede observar que el parámetro “ c ” fue el que más presentó variación. Con los parámetros “ c ” y “ c/μ ” se puede constatar que el CAC de referencia sin duda exhibe el comportamiento reoespesante y el nivel de intensidad varía entre batchadas de la misma composición, lo cual podría ser un problema si el CAC en cuestión se intenta someter a valores de $\dot{\gamma}$ elevados (ej. bombeo, mezclado intensivo). En la Tabla 24 también se muestra el esfuerzo de fluencia calculado a partir del flujo de revenimiento con la ecuación 2.1.

Tabla 24. Parámetros reológicos que describen el flujo del CAC de referencia

Mezcla	τ_{0d} (Pa)	Flujo de revenimiento τ_{0FR} (Pa)	μ (Pa.s)	c (Pa.s ²)	c/μ	$\frac{d\tau}{d\dot{\gamma}}$ @ $\dot{\gamma}=3.1\text{s}^{-1}$ (Pa.s)
R1	23.209	19.205	25.200	9.107	0.361	81.827
R2	22.730	20.454	30.914	9.458	0.306	89.720
R3	25.272	18.087	26.421	12.357	0.468	103.254
R4	29.909	20.506	23.093	16.258	0.704	124.187
R5	25.496	21.954	27.478	17.918	0.652	138.890
Repetibilidad						
Promedio	25.323	20.041	26.621	13.020	0.498	107.575
Desv. Est.	2.840	1.466	2.901	3.966	0.175	23.754
+95% I.C.	28.849	21.857	30.223	17.943	0.716	137.065
-95% I.C.	21.798	18.224	23.019	8.096	0.281	78.086

Las curvas de los IC graficadas en los reogramas fueron calculadas sustituyendo los valores correspondientes en la ecuación constitutiva del modelo reológico de Bingham modificado para el rango de rapidez de deformación en el que se trabajó.

6.2.1.2. Deformación autógena

La Tabla 25 muestra los valores de la deformación autógena obtenida a 28 días del CAC de referencia en cada una de sus repeticiones efectuadas. En el Anexo 2.1 se pueden consultar las gráficas “deformación – tiempo transcurrido”. Cada uno de los 5 valores reportados en la Tabla 25 son el promedio de dos especímenes. Dado a que la mezcla de referencia tiene una a/cm de 0.40, no se esperaban altos valores de deformación. De acuerdo con Khayat, K. y Mitchell, D., las mezclas de CAC con altos contenidos de cementante y bajas a/cm desarrollan del 85 al 95% de su deformación autógena a los 28 días de edad la cual varía entre 100 y 350 $\mu m/m$ dependiendo de la composición de la mezcla [103]. La norma ASTM C1698-09 establece que la desviación estándar tolerada en especímenes de mortero para un solo operador es de 28 $\mu m/m$. La desviación estándar obtenida a partir de 10 mediciones efectuadas por el mismo operador fue de 19.76 $\mu m/m$, por lo tanto las mediciones son válidas.

Tabla 25. Deformación autógena del CAC de referencia

Mezcla	Deformación autógena a 28 días ($\mu m/m$)
R1	-285.25
R2	-283.02
R3	-251.10
R4	-256.14
R5	-241.15
Repetibilidad	
Promedio	-263.33
Desv. Est.	19.76
+95% I.C	-238.80
-95% I.C.	-287.86

6.2.1.3. Resistencia a la compresión

Los resultados de los ensayos de resistencia a la compresión y los intervalos de confianza calculados se muestran en la Tabla 26. La resistencia a la compresión se determinó en cada repetición de la mezcla de referencia para las edades de 1, 3, 7 y 28 días. La evaluación de la puzolanicidad de la CV en el CAC no está dentro del alcance de este proyecto, por lo tanto no se evaluaron edades posteriores a 28 días. Cada uno de los 5 valores reportados para cada edad en la Tabla 26 son el promedio de 3 especímenes.

Tabla 26. Resistencia a la compresión del CAC de referencia.

Mezcla	Resistencia a la compresión (kg/cm ²)			
	Edad (días)			
	1	3	7	28
R1	305.90	422.53	435.75	499.19
R2	300.12	421.79	422.32	504.68
R3	303.97	442.94	475.71	541.97
R4	293.13	411.61	445.38	493.65
R5	308.81	454.16	406.38	529.76
Repetibilidad				
Promedio	302.39	430.60	437.11	513.91
Desv. Est.	6.063	17.396	26.094	20.851
+95% I.C.	309.91	452.20	469.78	539.80
-95% I.C.	294.86	409.01	404.72	488.02

6.2.2. Variaciones efectuadas al diseño de mezcla de referencia

La influencia de las variables “dosificación de agua de mezcla”, “contenido de SP” y “granulometría del agregado fino” en la robustez de la mezcla de referencia se midió produciendo alteraciones al diseño de mezcla original sin compensar ningún parámetro, con la intención de simular un error durante la producción del CAC [104] producto de las fluctuaciones que podrían presentarse en una plana de concreto premezclado.

Dosificación de agua de mezcla

Las variaciones de agua se realizaron en función del agua de mezcla (A_{MZ}). En la Figura 52 se muestra el A_{MZ} que se calculó analíticamente ($A_{MZ} = \text{Agua de reacción } (A_{RX}) + \text{humedad de los agregados}$) comparado contra la cantidad de agua que realmente se dosificó al implementar las variaciones programadas. Las diferencias entre el agua de mezcla y el agua dosificada (Δ_{Agua}) se presentan en la Tabla 27 y corresponden a las variaciones de agua consideradas en la metodología experimental. Las variaciones entre los 5 valores de agua de mezcla que se reportan en la Tabla 27 son producto del contenido de humedad que tenían los agregados en la fecha en la que se hizo esa mezcla en particular.

Tabla 27. Contenido de agua dosificado para las mezclas de prueba

Mezcla	A_{MZ} (kg/m ³ de concreto)	Agua dosificada (kg/m ³ de concreto)	Δ_{Agua} (kg/m ³ de concreto)	$\Delta_{\text{Agua}}/A_{MZ}$	a/cm final
-6WR	195.19	183.48	-11.71	-6%	0.374
-3WR	195.19	189.33	-5.86	-3%	0.387
REF	192.09	192.09	0.00	0	0.400
+3WR	195.71	201.58	5.87	+3%	0.413
+6WR	193.93	205.56	11.64	+6%	0.426

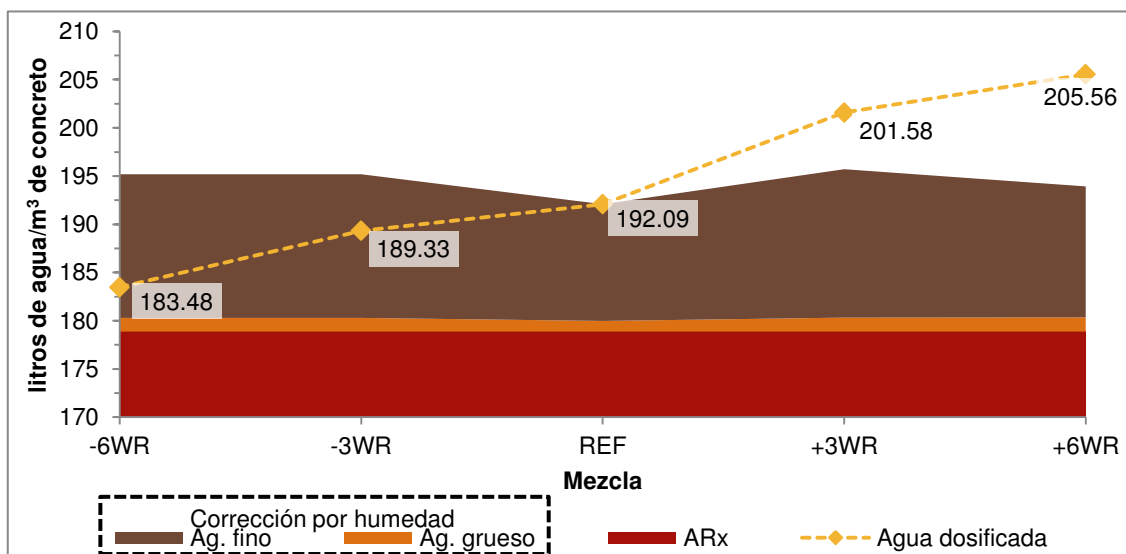


Figura 52. Variación del agua dosificada respecto del agua de mezcla

Contenido de superfluidificante

Las variaciones de aditivo SP se efectuaron en función del contenido de SP del CAC de referencia (1.706kg/m^3 de concreto) como se muestra en la Tabla 28.

Tabla 28. SP dosificado para las mezclas de prueba

Mezcla	SP_{REF} (kg/m^3 de concreto)	Δ_{SP}	SP dosificado (kg/m^3 de concreto)	$\Delta_{\text{SP}}/\text{SP}_{\text{REF}}$
-6SP	1.706	-0.102	1.604	-6%
-3SP	1.706	-0.051	1.655	-3%
REF	1.706	0.000	1.706	0%
+3SP	1.706	0.051	1.757	3%
+6SP	1.706	0.102	1.808	6%

Granulometría del agregado fino

Efectuar cambios en la distribución granulométrica de un agregado repercute en su densidad. Por lo tanto, se tuvo el cuidado de mantener un volumen constante de agregado fino (incluyendo microfinos) en las mezclas de G-L1, G-L2 y G-L3, sin embargo; como consecuencia de reproducir las curvas granulométricas de ASTM C33-09, la fracción volumétrica de los polvos aportados por el agregado fino disminuyó respecto de la granulometría original (G-BM) conforme la granulometría tendió a ser más gruesa (Figura 53). Debido a que los microfinos contenidos en el agregado deben ser considerados al calcular la V_w/V_p , el V_p disminuyó con la misma tendencia reduciendo el volumen de pasta. Con la finalidad de representar de manera más clara la información obtenida para estas mezclas se utilizó como variable de análisis la V_w/V_p .

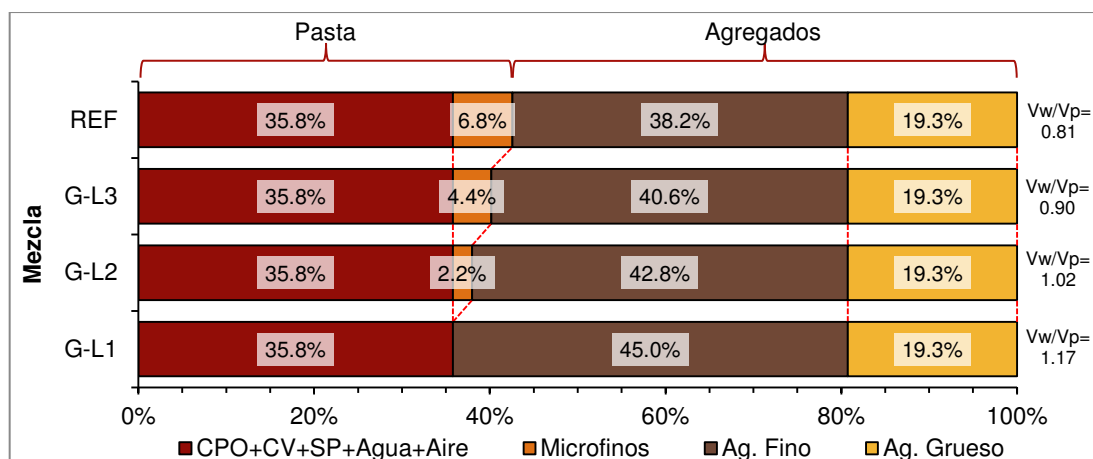


Figura 53. Fracciones volumétricas de fases del CAC para las mezclas G-L1, G-L2 y G-L3.

6.2.3. Robustez de la mezcla de referencia

Los resultados de las pruebas efectuadas para caracterizar el comportamiento en estado fresco del CAC se muestran en la Tabla 29. Con los resultados que aparecen en las secciones posteriores, se contrastó el comportamiento producto de la implementación de las variables estudiadas en el CAC contra los intervalos de confianza (IC) definidos por la repetibilidad de la referencia, los cuales son representados por un par de líneas discontinuas paralelas. En el caso de la evaluación de la segregación, todas las repeticiones de la mezcla de referencia mostraron 0% segregación en la prueba de la columna, por lo que no existen intervalos de confianza para la misma. En su lugar, se muestra el límite tolerable de segregación, el cual es del 10% [2].

Tabla 29. Resultados de las pruebas empíricas estandarizadas para las distintas mezclas del plan experimental.

Mezcla	Flujo de revenimiento (mm)	T ₅₀ (s)	VSI (-)	Embudo "V" (s)	Anillo J (mm)	Bloqueo (mm)	Aire (%)	Densidad (kg/m ³)	Segregación (%)
-6WR	630	11.06	0	67.37	522.5	108	2.3	2366	0.0
-3WR	680	6.29	0	45.91	570	110	2.9	2352	0.0
+3WR	785	1.60	2	5.41	712.5	73	2.7	2346	10.0
+6WR	800	2.20	3	9.31	782.5	18	2.8	2333	41.3
-6SP	630	5.21	0	26.3	510	120	4.0	2324	0.0
-3SP	685	4.22	0	21.91	610	75	2.7	2357	0.0
+3SP	780	2.85	2	14.93	705	75	2.0	2331	3.1
+6SP	830	2.00	3	9.6	760	70	2.0	2313	11.5
G-L3	600	3.36	1	13.8	545	55	6.0	2218	8.3
G-L2	695	0.39	2	4.9	660	35	6.2	2224	9.4
G-L1	838	0.40	3	9.51	740	98	-	2273	40.8

6.2.3.1. Flujo de revenimiento

Dentro de los límites de variación evaluados para el agua de mezcla y el aditivo SP, el flujo de revenimiento varió aproximadamente de forma lineal con una pendiente pronunciada saliéndose de los IC ante aproximadamente menos del $\pm 1\%$ de variación (Figura 54 y Figura 55). La pendiente pronunciada es un indicador de baja robustez.

Al disminuir el contenido de agua se disminuye el espaciamiento libre existente entre las partículas sólidas incrementando la fricción existente entre ellas y disminuyendo la fluidez total de la mezcla. En el caso contrario, al aumentar la cantidad de agua, la cohesividad de la mezcla se ve afectada debido a que el espacio entre las partículas sólidas incrementa y la fuerza de fricción actuante entre ellas disminuye, lo que resulta en un incremento de la fluidez y al mismo tiempo en una reducción de la estabilidad.

Cuando la cantidad de SP es reducida, también se reduce la cantidad de flóculos dispersados, por lo tanto hay una menor cantidad de agua disponible para fluidificar la mezcla. En el caso contrario, a causa de que la dosificación de SP de la mezcla de referencia difiere de la necesaria para alcanzar el punto de saturación, aumentar la

cantidad de SP ocasiona que el agua adicional se libere de los flóculos que originalmente no eran dispersados y que esté disponible para aumentar la fluidez a la mezcla.

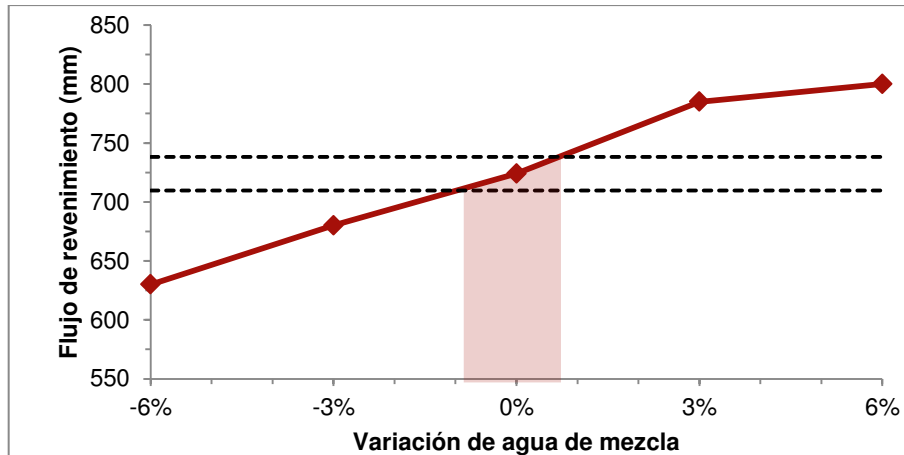


Figura 54. Efecto de las variaciones de agua de mezcla en el flujo del revenimiento

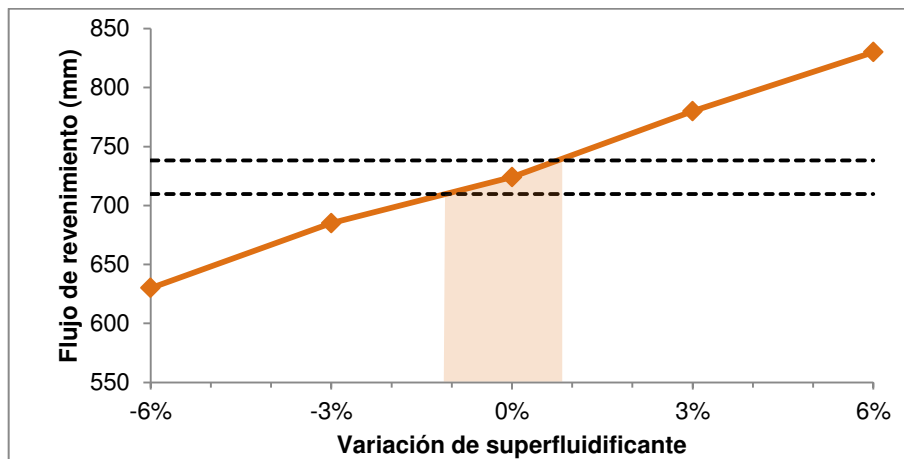


Figura 55. Efecto de las variaciones de superfluidificante en el flujo de revenimiento

En la Figura 56 se puede observar que el flujo de revenimiento primeramente disminuyó al aumentar la relación V_w/V_p para después aumentar conforme la relación V_w/V_p aumentaba. En la distribución granulometría de la arena G-L3, la discontinuidad entre los tamaños más grandes de la arena y los más pequeños de la grava se vuelve más marcada al disminuir la trabajabilidad de la mezcla e incrementar las zonas de

colisión entre las partículas de agregado grueso. Por otra parte, entre más se reduce la discontinuidad en esta zona (mezclas G-L2 y G-L1) la trabajabilidad aumenta. La mezcla G-L2 estuvo muy cerca de entrar dentro de los IC presentando una estabilidad regular ($VSI = 2$). En el caso de la mezcla G-L1, la carencia de polvos finos que mantuvieran la estabilidad de la misma, ocasionó una segregación severa. Por lo tanto, al efectuar la prueba los agregados se asentaron en el fondo del molde y solo el mortero fluyó hasta los extremos, dejando atrás a las fracciones más finas de la grava (Figura 57).

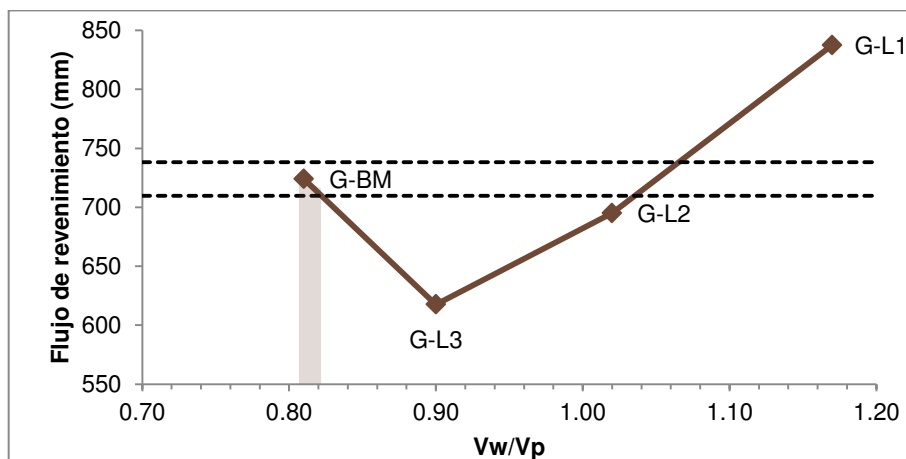


Figura 56. Efecto de la variación de la granulometría en el flujo de revenimiento



Figura 57. Flujo de revenimiento de la mezcla G-L1

6.2.3.2. T_{50}

La Figura 58 muestra que las variaciones de agua fueron tolerables en un -2% y 2.5%, lo que equivale a un -3.84 kg y 4.8 kg de A_{MZ}/m^3 de concreto. El comportamiento observado indica que reducir ligeramente el agua de mezcla puede triplicar T_{50} , trayendo como resultado un concreto difícil de trabajar y colocar. Al incrementar en 3% el agua de mezcla, se presenta una disminución en el T_{50} respecto de la referencia, sin embargo, incrementar al 6% el agua de mezcla no disminuyó el T_{50} respecto de la mezcla +3WR como se esperaba, sino que lo aumentó un poco. Esto se debe a la presencia de segregación dinámica al efectuar la prueba de flujo de revenimiento. Al separarse el mortero del agregado grueso durante el flujo, el mortero incrementa su capacidad de fluir [105].

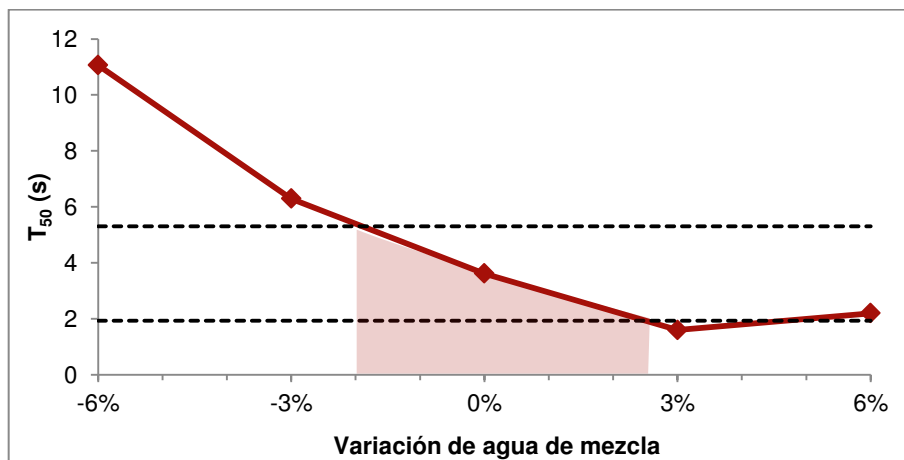


Figura 58. Efecto de las variaciones de agua de mezcla en el T_{50}

El efecto en las variaciones de aditivo SP en las mezclas de prueba se mantuvo dentro de los IC (Figura 59). El efecto principal del SP en la reología del concreto es reducir el esfuerzo de fluencia del concreto por acción de su efecto dispersante. La prueba de T_{50} es un complemento del flujo de revenimiento y su finalidad es cuantificar la viscosidad del concreto de forma indirecta, la desventaja principal es que pierde sensibilidad conforme las mezclas se vuelven más fluidas debido a que el tiempo registrado

depende del tiempo de reacción del operador. De acuerdo a la Figura 59, el SP utilizado tiene cierto efecto en el T_{50} de la mezcla, no obstante, la figura indica que dentro de los límites de variación evaluados, el T_{50} se mantiene robusto.

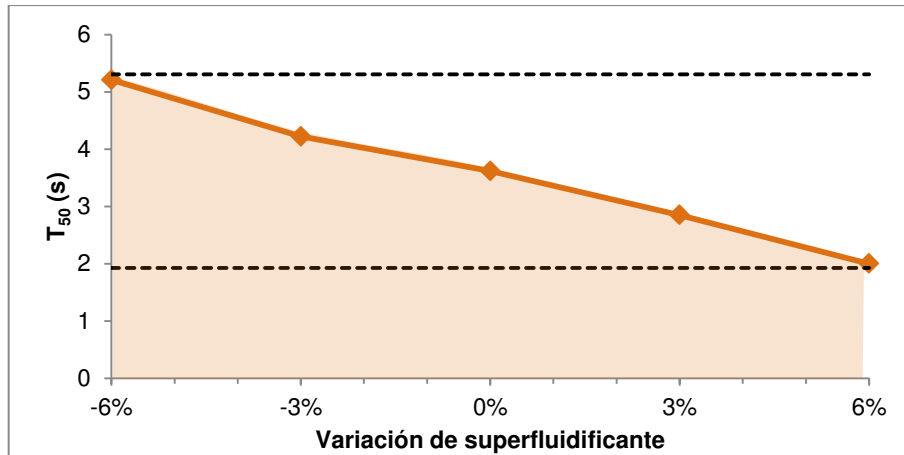


Figura 59. Efecto de las variaciones de superfluidificante de mezcla en el T_{50}

En la Figura 60 se observa que la granulometría del agregado fino juega un papel importante en el control de la resistencia a fluir del concreto. La mezcla G-L3 experimentó un leve descenso en el T_{50} mientras que la G-L2 obtuvo un T_{50} demasiado bajo como para ser medido con precisión (0.39 s) debido a su distribución granulométrica y aumento de la SP/p; sin embargo mostró un VSI = 2, lo que sugiere que el contenido óptimo de microfinos puede estar entre el 10 y 5%. La diferencia del T_{50} de la mezcla GL-2 y G-L1 es de apenas 0.01 s. No obstante, el contenido de polvos de la mezcla G-L2 le confirió estabilidad. En la mezcla G-L1, la discontinuidad entre el agregado fino y grueso en la curva granulométrica, la total carencia de microfinos y el aumento de la SP/p ocasionó un descenso en T_{50} de la misma respecto de la mezcla de referencia llevándola a una consistencia líquida e inestable.

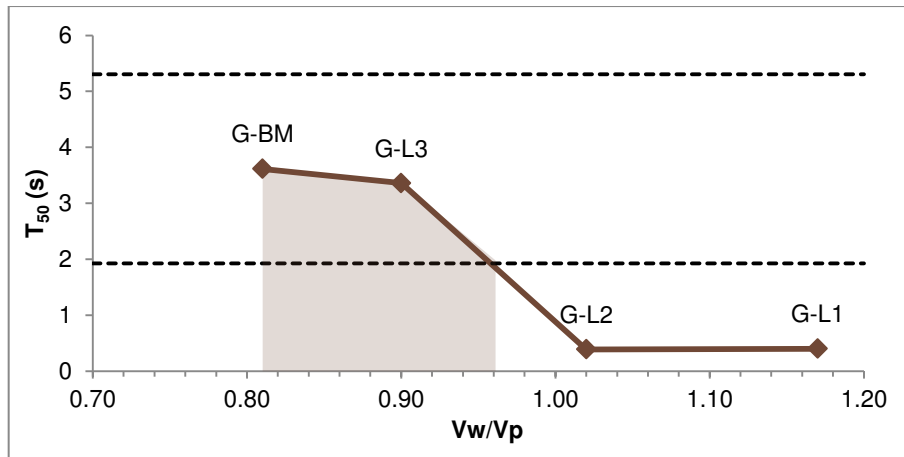


Figura 60. Efecto de las variaciones de la granulometría del agregado fino en el T_{50}

6.2.3.3. Anillo J

La habilidad de paso se puede cuantificar como la diferencia entre el flujo de revenimiento y el flujo de revenimiento con anillo J (bloqueo). La Figura 61 muestra que al reducir el agua de mezcla hasta en un -6% se produce un aumento en el bloqueo de 107.5 mm. Por otro lado, el CAC de referencia solo toleró un aumento de poco más de 4% de agua de mezcla. Aumentar el agua reduce el bloqueo producido al incrementar la fluidez del concreto debido a que el agua aumenta el espaciamiento entre partículas, reduciendo la fricción que actúa entre ellas. Aunado a lo anterior, la reducción en la viscosidad, producto de un aumento en el agua de mezcla, redujo la estabilidad del concreto y dificultó la obtención de una muestra de concreto homogénea (Figura 62). Por lo tanto, el mortero y las partículas de agregado grueso más pequeñas lograron pasar fácilmente a través de las barras del anillo J, produciendo una extensibilidad final más alta, lo cual se traduce como una reducción del bloqueo medido.

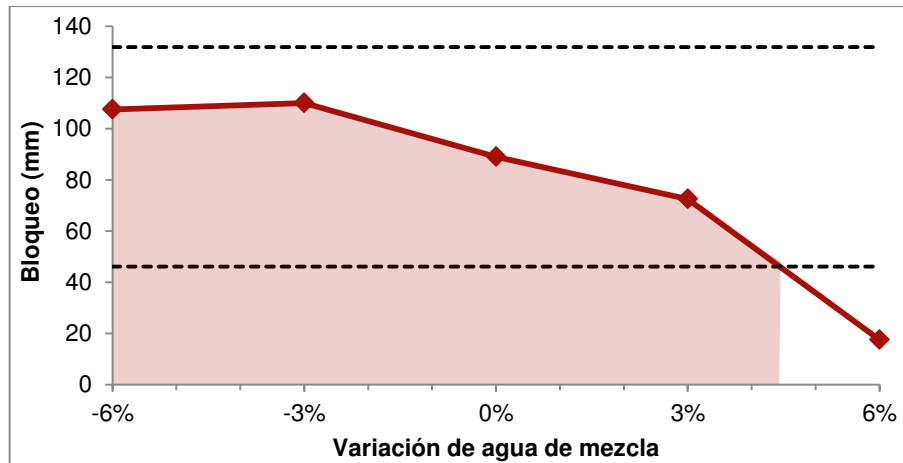


Figura 61. Efecto de las variaciones de agua en el bloqueo medido con el anillo J



Figura 62. Prueba de Anillo J ejecutada en una muestra no homogénea de la mezcla +6WR.

La Figura 63 muestra que el incremento de SP redujo ligeramente el bloqueo medido con el anillo J dentro del intervalo de variación evaluado, manteniéndose en todo momento dentro de los IC. Si bien es cierto que se experimenta un cambio en la fluidez de las mezclas ante el aumento o reducción del SP, este cambio se mantiene proporcional entre el flujo de revenimiento y el flujo de revenimiento con anillo J (Figura 64).

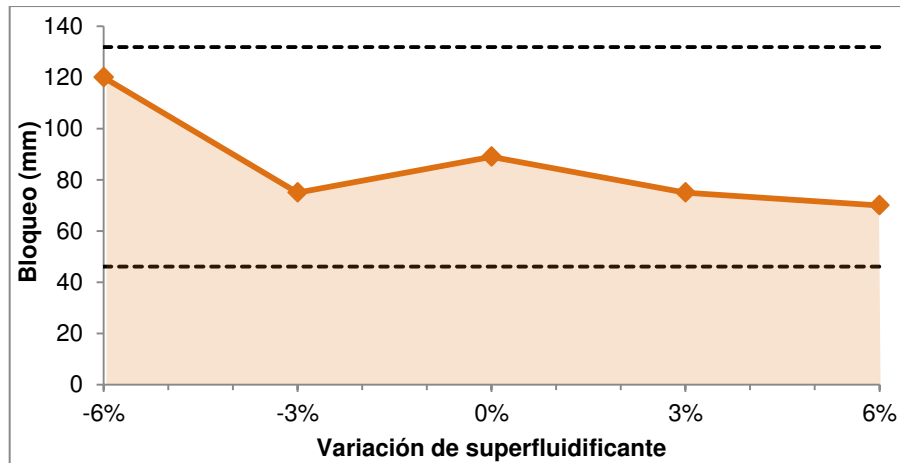


Figura 63. Efecto de las variaciones de superfluidificante en el bloqueo medido con el anillo J

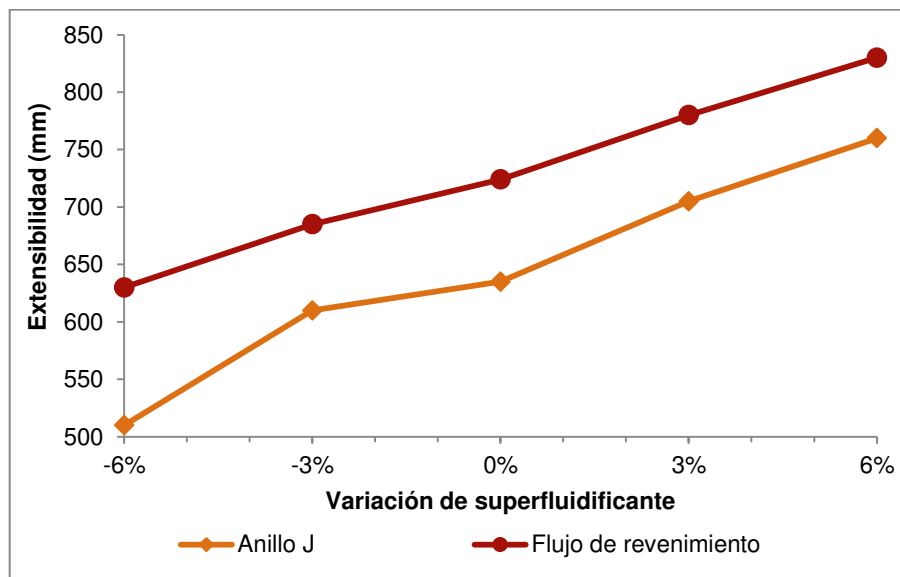


Figura 64. Cambio proporcional entre el flujo de revenimiento con y sin anillo J ante variaciones de superfluidificante

La Figura 65 muestra que el incremento de la V_w/V_p redujo el bloqueo producido en las mezclas G-L3 y G-L2 respecto el medido en la referencia. Se observa también que el menor bloqueo producido por la distribución granulométrica de la mezcla G-L2. Al ser un material bien graduado la habilidad de paso de las mezclas se mejora considerablemente. Por otro lado, la granulometría discontinua de la mezcla G-L1 y la inestabilidad (Figura 66) producida por la carencia de microfinos, redujo la

extensibilidad con anillo J, incrementando el bloqueo hasta valores similares a los de la referencia.

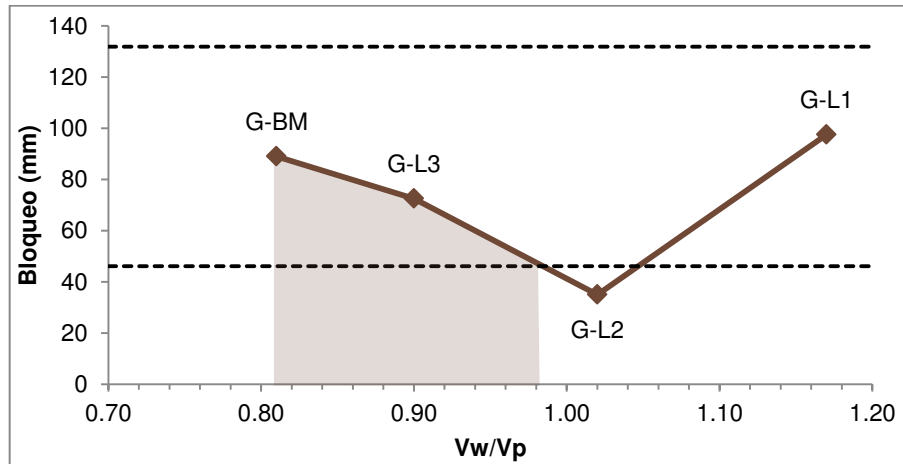


Figura 65. Efecto de las variaciones de la granulometría del agregado fino en el bloqueo medido con el anillo J



Figura 66. Prueba de Anillo J de la mezcla G-L1

6.2.3.4. Embudo V

El embudo V es una prueba que mide indirectamente la viscosidad relativa del concreto. La Figura 67 muestra que el tiempo de embudo V disminuye al aumentar la cantidad de agua de mezcla. Este comportamiento se debe a que aumentar el contenido de agua incrementa el espacio que separa a las partículas que forman la suspensión, reduciendo la fricción entre las mismas y por ende, la viscosidad del concreto decrece. Asimismo, la pendiente de la Figura 69 muestra que la viscosidad del CAC diseñado es muy sensible a pequeñas variaciones en el agua de mezcla, lo que repercute en un rango de tolerancia de $\pm 1\%$ de variación. Una desventaja de disminuir demasiado la viscosidad del CAC es que compromete la estabilidad. Debido a esto, la mezcla +6WR presentó un aumento en el tiempo de embudo V, ya que la sedimentación de las partículas más grandes cerca de la abertura del embudo restringen el flujo del concreto.

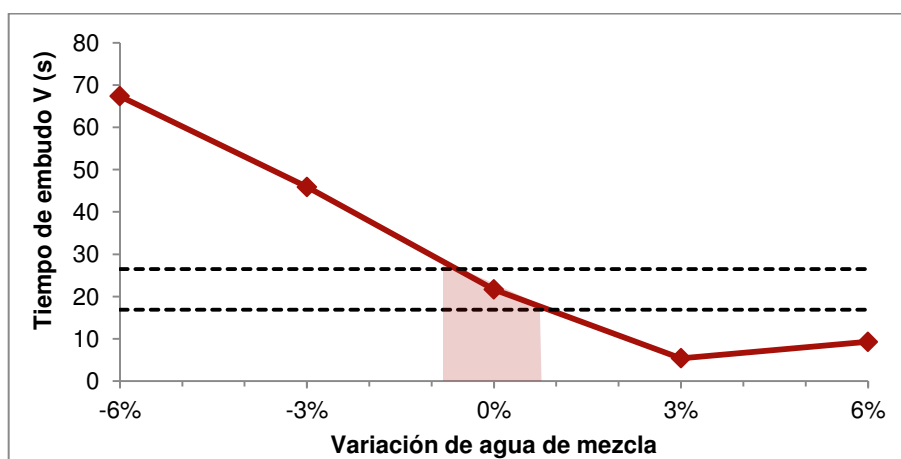


Figura 67. Efecto de las variaciones de agua de mezcla en el tiempo de embudo V.

La Figura 68 muestra que el SP usado tiene impacto en la viscosidad del concreto, reduciendo el tiempo de embudo V al aumentar su contenido. Cuando se redujo el SP la mezcla se mantuvo dentro de los IC, y cuando se aumentó el SP solo toleró hasta el 2% de aumento para mantenerse dentro de los IC. Esto se debe a que a mayor

contenido de SP la cantidad de flóculos dispersados es mayor. Por lo tanto, existe más agua libre capaz de aportar fluidez y reducir la fricción entre las partículas sólidas.

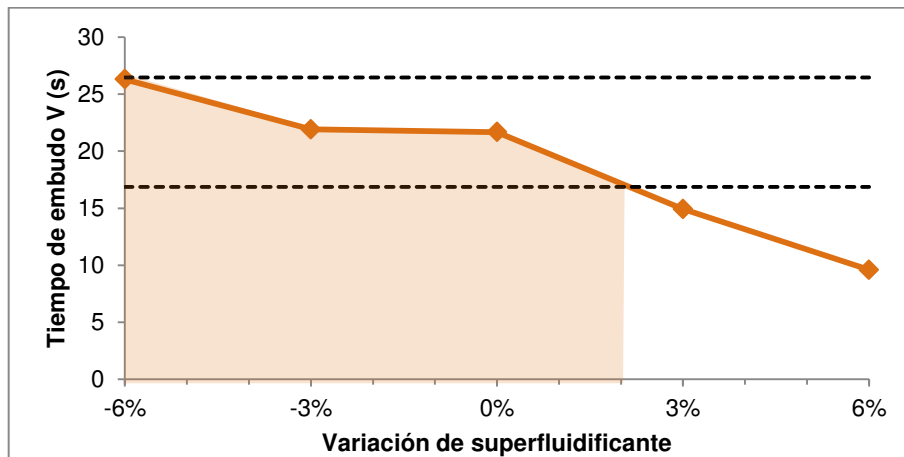


Figura 68. Efecto de las variaciones de superfluidificante en el tiempo de embudo V.

Las distribuciones granulométricas de ASTM C33-09 para agregado fino G-L2 y G-L3 redujeron en un 36% y 77% el tiempo de embudo V de referencia respectivamente (Figura 69), debido a que el agregado bien graduado favorece el flujo del concreto. Esto se le atribuye a que al aumentar la V_w/V_p origina la presencia de una mayor cantidad de agua disponible para lubricar la fricción entre partículas de agregado, favoreciendo el flujo de la mezcla.

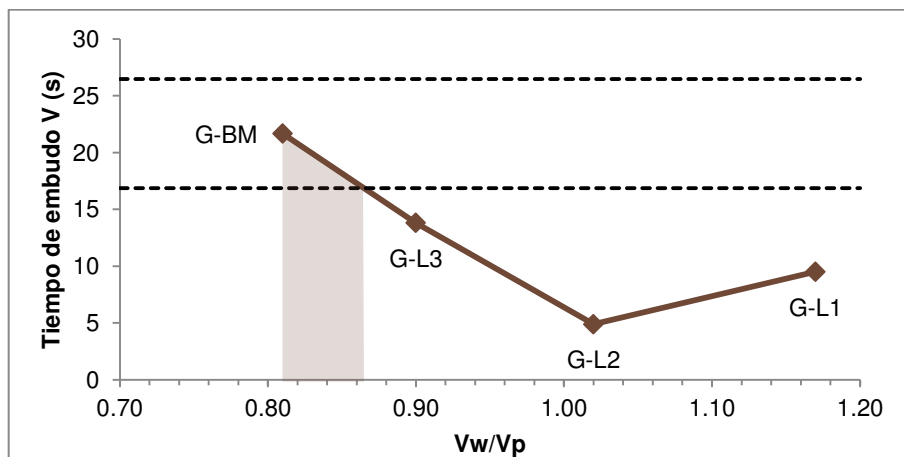


Figura 69. Efecto de las variaciones de granulometría en el tiempo de embudo V

6.2.3.5. Columna de segregación

La columna de segregación es una prueba que cuantifica la estabilidad del CAC bajo condiciones estáticas. La Figura 70 muestra que el CAC diseñado solo tolera hasta un 3% de variación del agua de mezcla antes de que la segregación estática se vuelva significativa. Aumentar la cantidad de agua reduce el esfuerzo de fluencia del CAC y disminuye la densidad de la pasta reduciendo la flotabilidad del agregado. Por consiguiente, para determinado diámetro de partículas de agregado se alcanza un punto crítico a partir del cual, el esfuerzo de fluencia ya no es capaz de compensar la diferencia de densidades entre la pasta y el agregado [106].

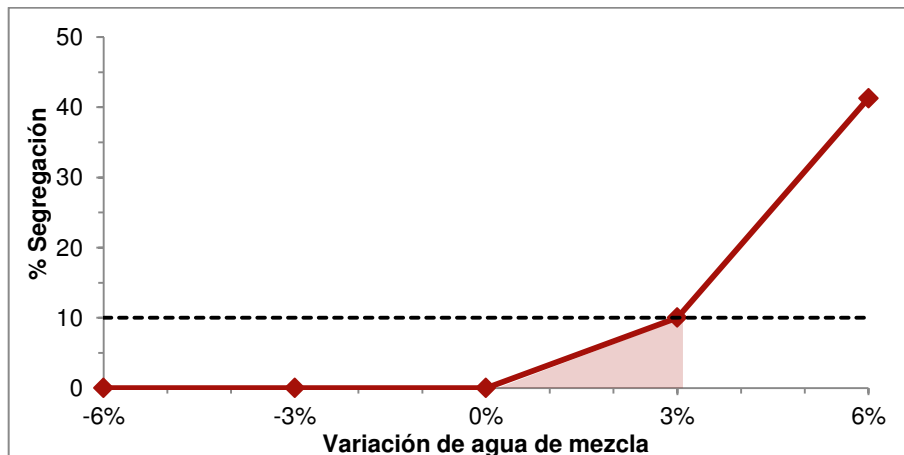


Figura 70. Efecto de las variaciones de agua de mezcla en el porcentaje de segregación.

La Figura 71 muestra que al aumentar el contenido de SP se incrementa el porcentaje de segregación. Esto se le atribuye a la reducción del esfuerzo de fluencia, ya que esta propiedad reológica controla la sedimentación del agregado grueso en conjunto con la densidad y el tamaño de las partículas [106].

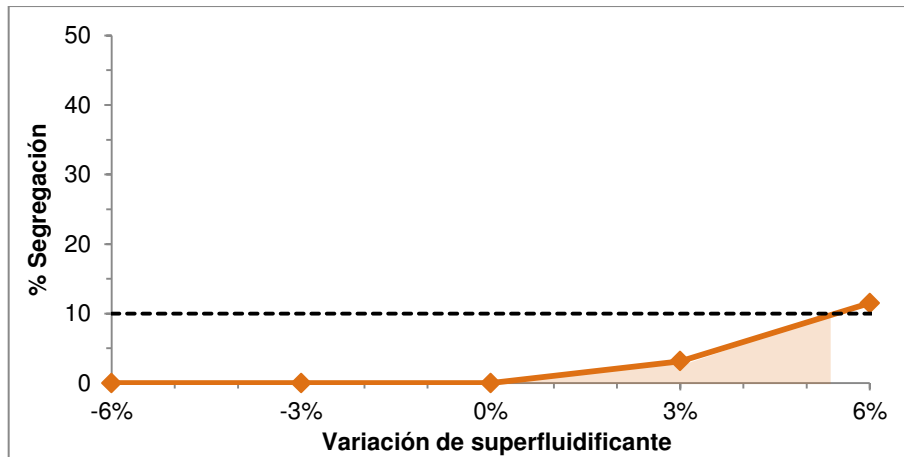


Figura 71. Efecto de las variaciones de superfluidificante en el porcentaje de segregación

Como se puede observar en la Figura 72, las mezclas G-L2 y G-L3 se mantuvieron dentro del nivel de tolerancia demarcado por el ACI 237. Por otro lado, el incremento de la relación V_w/V_p a valores mayores del 1.02 como resultado de la modificación de la granulometría del agregado fino condujo a un aumento excesivo en el porcentaje de segregación de la mezcla G-L1, debido a la carencia de polvos con tamaños entre 150 y 50 μm que mantuvieran en suspensión a las partículas de agregado más gruesas. Por ejemplo, una partícula de 4 mm es estable en una matriz con un $\tau_0 = 30$ Pa. Si existe un suficiente número de partículas de 4 mm, es posible frenar la sedimentación de una partícula de 16 mm. Del mismo modo, el suficiente número de partículas de 2 mm frenaría la sedimentación de una partícula de 4 mm y así sucesivamente. A este efecto se le conoce en inglés como “*lattice effect*” [32], y es responsable de contribuir a la estabilidad de las mezclas de CAC.

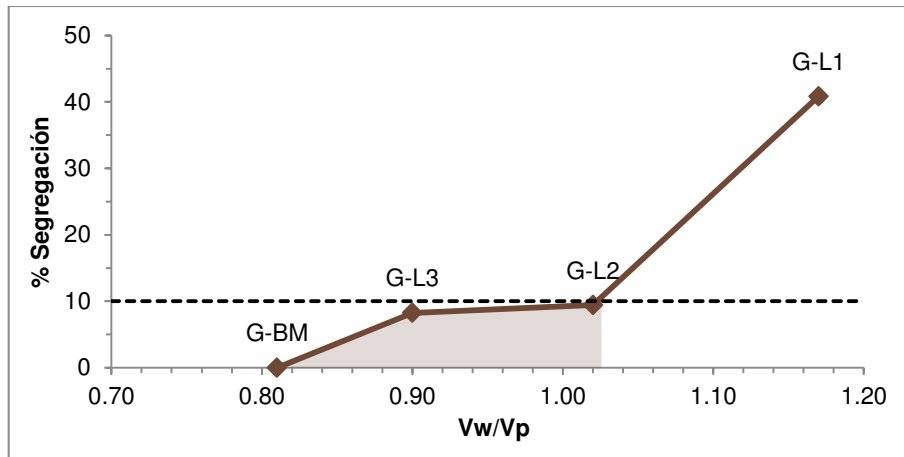


Figura 72. Efecto de las variaciones de granulometría en el porcentaje de segregación

6.2.3.6. Contenido de aire

De acuerdo con la Figura 73, los porcentajes de variación de agua de mezcla evaluados dentro del rango de -4.5% al 6% no originaron variaciones significativas en el contenido de aire, excepto para la mezcla -6WR. Al reducir el volumen de agua, la viscosidad y el esfuerzo de fluencia del concreto aumentan, lo cual dificulta que el concreto expulse el aire atrapado sin ayuda de una energía de compactación adicional [107, 108].

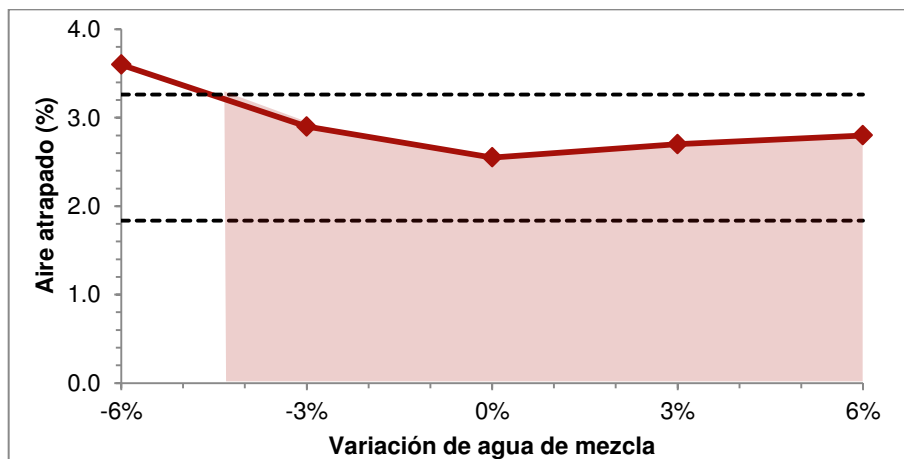


Figura 73. Efecto de las variaciones de agua de mezcla en el porcentaje de aire atrapado

En el caso de las variaciones de SP, los resultados en la Figura 74 muestran que al aumentar el contenido de SP se reduce el contenido de aire atrapado. Por otro lado, cuando el SP es reducido en cantidades menores al -4.2%, el contenido de aire sobrepasa los límites establecidos por los IC debido a que el incremento en el esfuerzo de fluencia contribuye a que las burbujas de aire atrapado no logran ser expulsadas [107, 108].

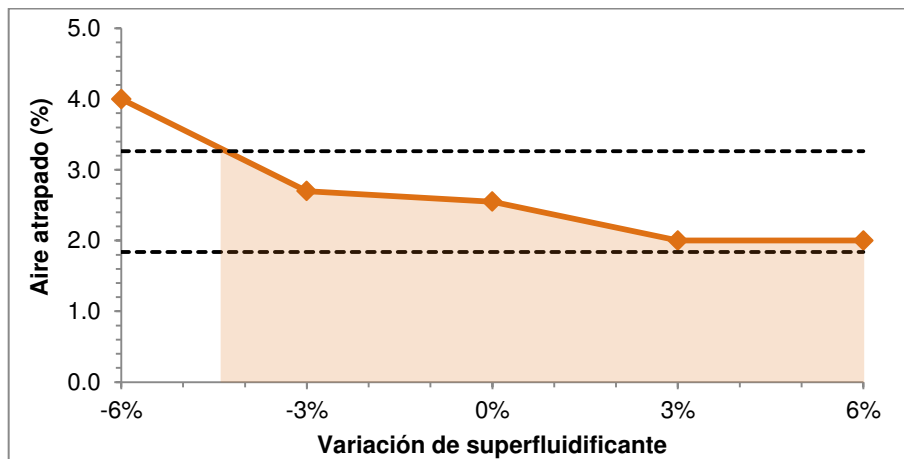


Figura 74. Efecto de las variaciones de superfluidificante en el porcentaje de aire atrapado

La reducción de la fracción volumétrica de polvos ocasiono un aumento considerable en el contenido de aire atrapado de las mezclas G-L3 y G-L2. Incluso fue tan alto, que resultó imposible medir el contenido de aire de la mezcla G-L1 debido a la presencia de una gran cantidad de burbujas que al final del mezclado, se apreciaron sobre la superficie del concreto. La presencia de aire fue tan evidente que aun después de haber llenado y enrasado el concreto en el contenedor del medidor de aire, al finalizar la prueba, una vez retirada la tapa del medidor fue evidente un gran vacío en el interior invalidando por completo el resultado (Figura 75). La dosificación de SP originalmente se estimó para proveer fluidez a un CAC con 624 kg/m^3 de polvo. Al variar la granulometría respecto a la del banco de materiales original (G-BM) y mantener constante la dosificación de aditivo, el contenido de polvos finos $<150 \mu\text{m}$ se vio

reducido a 562.83, 505.47 y 447.18 kg/m³ para las mezclas G-L3, G-L2 y G-L1, respectivamente. Tal reducción en el contenido de polvo provocó una sobredosificación gradual de SP y un aumento de la inestabilidad del CAC. Al reducir el volumen de polvos, el espaciamiento entre las partículas aumenta para una misma cantidad de agua y al existir mayor espacio entre ellas, se requiere de una menor fuerza dispersante para mantenerlas separadas. Al utilizar un aditivo SP, como efecto secundario se reduce la tensión superficial del agua en la mezcla, lo cual favorece la formación de burbujas [109, 110]. Por lo tanto, al incurrir en un exceso de SP, se incrementó la cantidad de aire atrapado.



Figura 75. Estado del contenedor del dispositivo para medición de aire después de efectuada la prueba en la mezcla G-L1

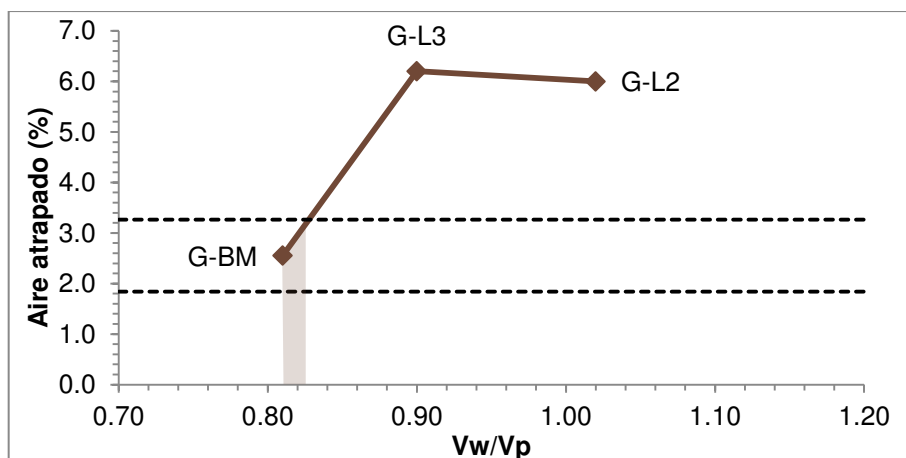


Figura 76. Efecto de la variación de la granulometría del agregado fino en el contenido de aire atrapado.

6.2.3.7. Tiempos de fraguado

Se observa en la Figura 77 que la reducción del agua de mezcla acelera el tiempo de fraguado inicial. En cambio, al aumentar el agua de mezcla el fraguado inicial se retrasa. Esto se le atribuye a que entre mayor sea el volumen de agua, más separadas se encuentran las partículas de cemento unas de otras [102]. Por lo tanto, el tiempo en el que una cantidad dada de CSH logra enlazarse para formar una matriz suficientemente resistente como para oponer resistencia a la penetración es más prolongado.

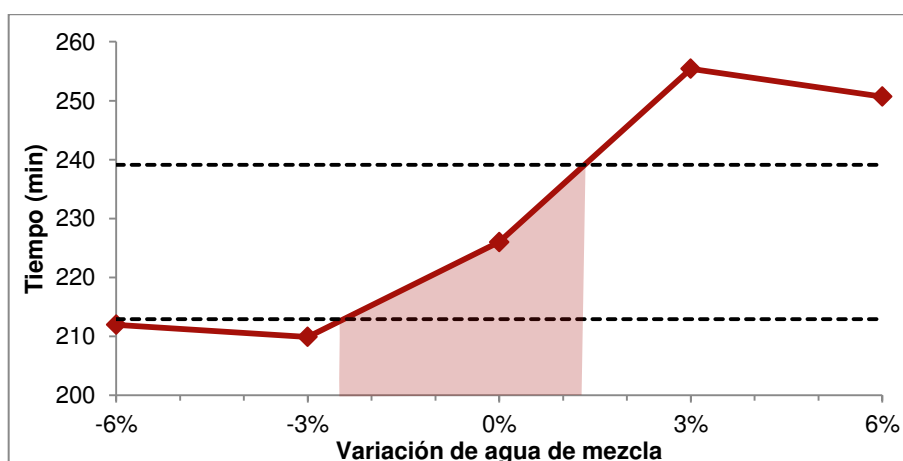


Figura 77. Efecto de las variaciones de agua de mezcla en el tiempo de fraguado inicial

Si bien esta tendencia no se observa de manera muy clara en la medición del fraguado inicial, esto puede deberse a pequeñas variaciones de la temperatura y pérdida de humedad del concreto durante la ejecución de la prueba. No obstante, se puede observar que para el tiempo del fraguado final (Figura 78) el comportamiento mostrado es acorde al esperado, exhibiendo una tolerancia de -1.8% y 1.8% de variación.

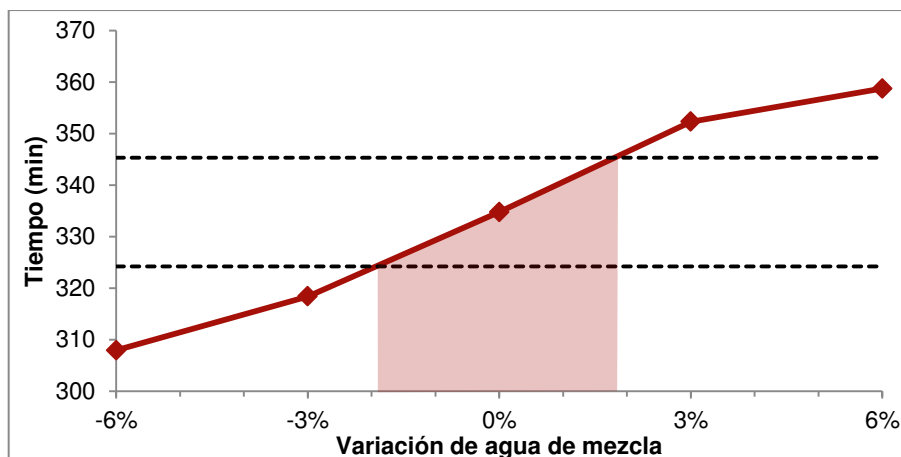


Figura 78. Efecto de las variaciones de agua de mezcla en el tiempo de fraguado final

Las variaciones de SP tuvieron impacto en el fraguado inicial cuando la cantidad dosificada adquiere valores menores al -2.5% y mayores que 3%. La misma manera que en el caso de las variaciones de agua, el fraguado inicial no mostró una tendencia clara (Figura 79).

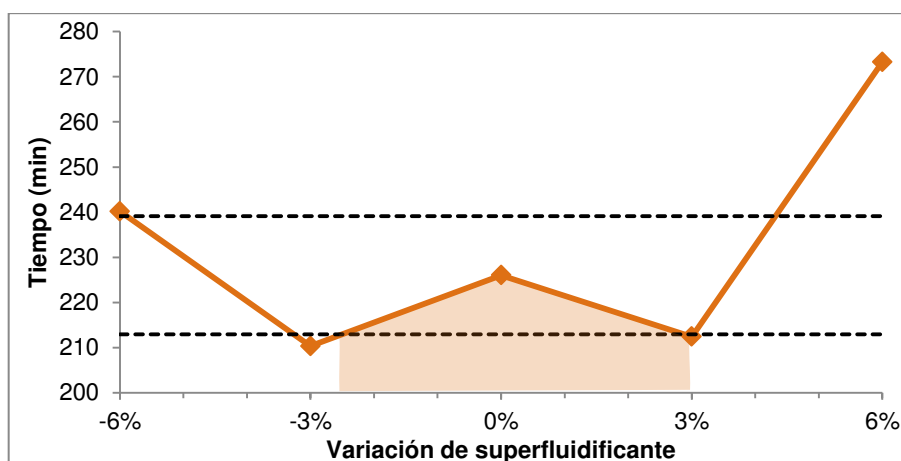


Figura 79. Efecto de las variaciones de superfluidificante en el tiempo de fraguado inicial

Por otro lado, el efecto del SP en el fraguado final es más notorio. De antemano, se esperaba que a mayor contenido de SP, mayor fuera el tiempo de fraguado. No obstante, como puede observarse en la Figura 80, las variaciones dentro del rango de -6% a 3.8% de contenido de SP mantuvieron un tiempo de fraguado final dentro del IC

demarcado por la mezcla de referencia. Por otro lado, la mezcla +6SP fue la única que presento un retardo significativo, lo cual es un reflejo de una sobredosis de SP. El retraso en el fraguado es más pronunciado a altas dosis de SP ya que afecta la difusión de la pasta hidratada, la nucleación y el crecimiento de productos de hidratación [101, 111]. Este efecto se debe a la formación de un quelato producto de la interacción de los iones Ca^{2+} y las moléculas del aditivo, lo cual disminuye la concentración de iones Ca^{2+} en el sistema y entorpece la nucleación de las fases sólidas y por tanto, el crecimiento de los productos de hidratación [101, 102].

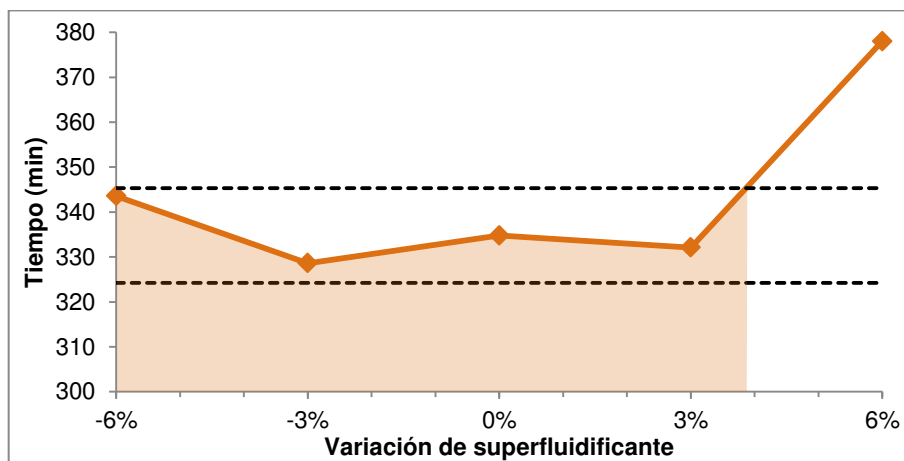


Figura 80. Efecto de las variaciones de superfluidificante en el tiempo de fraguado final

En la Figura 81 se observa que el incremento en la V_w/V_p aumenta el tiempo de fraguado inicial. Cuando el polvo de caliza es utilizado como filler, este actúa como un acelerante de la reacción de hidratación y reduce los tiempos de fraguado. Debido a que el aumento en la V_w/V_p corresponde a la reducción de los microfinos contenidos en el agregado fino. El incremento del tiempo de fraguado inicial se le atribuye a la reducción de centros de nucleación, lo que en consecuencia repercute en una disminución del crecimiento de los productos de hidratación.

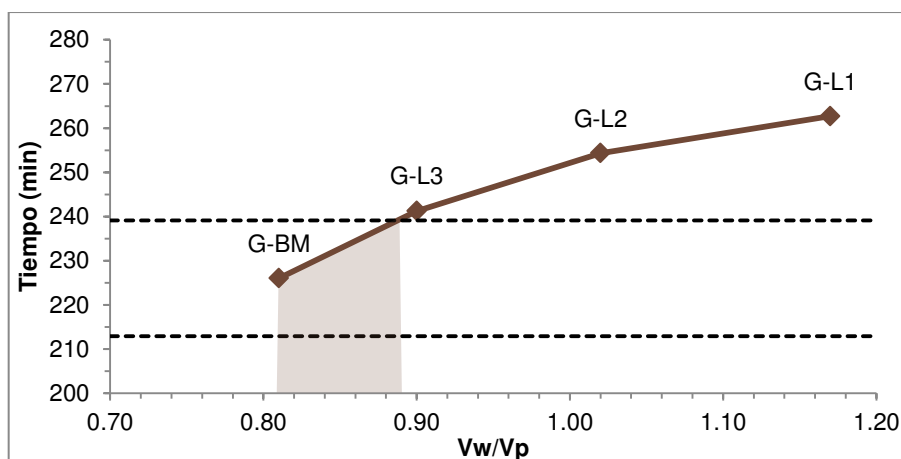


Figura 81. Efecto de la variación de la granulometría del agregado fino en el tiempo de fraguado inicial

El mismo efecto puede observarse en el tiempo de fraguado final. La Figura 82 muestra que cuando por lo menos el 5% del agregado fino a base caliza triturada (G-L2) está compuesto por partículas menores a 150 μm , el tiempo de fraguado final permanece dentro de los IC. Por otra parte, la mezcla G-L1 no se recuperó.

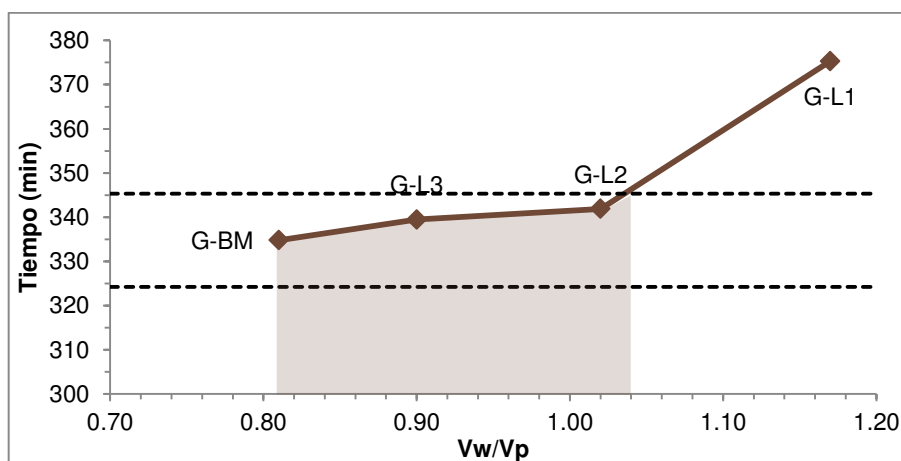


Figura 82. Efecto de la variación de la granulometría en el tiempo de fraguado final

6.2.3.8. Determinación directa de parámetros reológicos

Los reogramas correspondientes a las mezclas efectuadas se encuentran en los anexos Anexo 1.2, Anexo 1.3 y Anexo 1.4. El análisis de resultados se realizó de forma

individual para cada uno de los parámetros reológicos determinados con la finalidad de discutirse con más claridad y se muestran en las secciones siguientes.

6.2.3.8.1. Esfuerzo de fluencia estático

El esfuerzo de fluencia estático (τ_{0s}) se determinó a los 12 minutos de que el agua entró en contacto con el cemento. La Figura 83 muestra que el τ_{0s} es bastante sensible a las variaciones de agua. Variaciones menores al -0.4% y superiores al 0.4% son suficientes para incrementar el τ_{0s} de manera significativa. Al aumentar la cantidad de agua, disminuye la resistencia a fluir de las mezclas debido a que se reduce la concentración de sólidos en la suspensión, aumentando la trabajabilidad hasta el punto en el que la segregación se vuelve un problema [26]. Por otro lado, el esfuerzo de fluencia estático del concreto también depende de la tixotropía. El grado de estructuración de las partículas debido a interacciones coloidales (fuerzas hidrodinámicas, Brownianas y de Van der Waals) es más alto cuando la concentración de sólidos en la pasta es mayor (ej., reducción de la a/c). De acuerdo a Roussel, N., *et al*, las interacciones coloidales dominan la respuesta tixotrópica del material durante los primeros segundos de reposo, posteriormente las fuerzas dominante estarán constituidas por los puentes de CSH que se forman preferencialmente entre las zonas de contacto que existen entre las partículas de cemento. Si la mezcla de concreto se deja en reposo por un tiempo determinado, la rigidización aparente del concreto solo será reversible mientras el esfuerzo cortante ejercido sea lo suficientemente grande como para romper los puentes de CSH [112]. Por lo tanto, cuando la concentración de sólidos se incrementa, las zonas de contacto entre las partículas serán mayores y un mayor número de enlaces (coloidales o químicos) tendrán que romperse para dar inicio al flujo del material, lo que se traducirá en valores de τ_{0s} más altos [113]. Al sobrepasar el +3% de adición de agua de mezcla, se puede apreciar un leve incremento en el τ_{0s}

el cual puede deberse a un aumento en la concentración de agregado grueso que se presenta en el fondo del contenedor del reómetro, debido a la presencia de segregación.

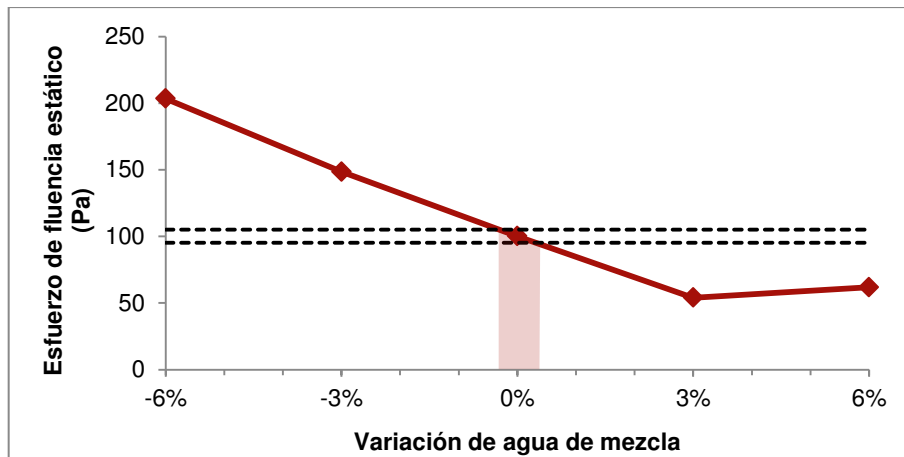


Figura 83. Efecto de las variaciones de agua de mezcla en el esfuerzo de fluencia estático

La Figura 84 muestra que el τ_{0s} del CAC de referencia es tolerable a variaciones de no menos de 1.7% y no más de 0.75% de contenido de aditivo SP. Se puede observar que conforme el contenido de SP aumenta, el τ_{0s} disminuye. Este comportamiento se explica por la adsorción del SP en la superficie del cemento. La superficie cubierta por el polímero afecta a las fuerzas interparticulares y la probabilidad de que ocurra nucleación de productos de hidratación sobre la superficie. Entre más grande sea la superficie cubierta por el polímero, el espesor de la capa para el que los mecanismos de repulsión del SP son efectivos aumentará y reducirá la atracción máxima entre las partículas. De tal forma que el número de sitios disponibles para la nucleación disminuye y la distancia para generar enlaces interparticulares aumenta, traduciéndose en un τ_{0s} menor y una reducción de la tixotropía del concreto [114].

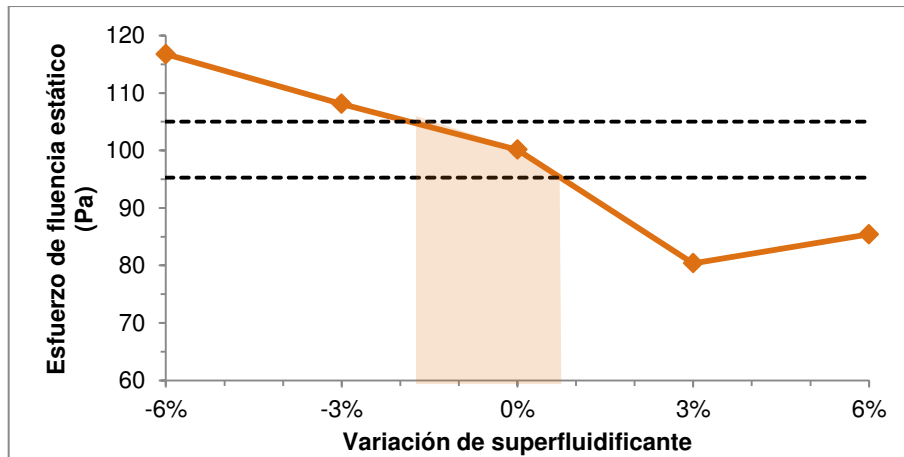


Figura 84. Efecto de las variaciones de superfluidificante en el esfuerzo de fluencia estático

Se puede observar en la Figura 85 que el τ_{0s} aumentó cuando se utilizó la granulometría más fina (G-L3) para posteriormente reducirse al utilizar el agregado fino con la distribución granulométrica central (G-L2) de ASTM C33-09. Esto se debe a que los agregados con una distribución de tamaños más uniforme requieren menos pasta para alcanzar una misma trabajabilidad, debido a que se mejora su habilidad para rellenar los espacios entre las partículas más grandes. Al existir menos vacíos que deban ser rellenados por la pasta, la pasta provee una mayor trabajabilidad [115]. En la Figura 50 se observa que en el esqueleto granular de la mezcla G-L3 hay una discontinuidad muy marcada entre los tamaños de 9.5 y 2.36 mm (3/8" y No. 8) debido a la carencia total de material de 47.5 mm (No. 4). Por lo tanto, un volumen de pasta se ocupará de rellenar esas deficiencias en lugar de proveer lubricación entre las demás fracciones del agregado. Aunado a lo anterior, para una misma cantidad de agua de mezcla, la reducción en la fracción del volumen de polvos, disminuirá las fuerzas interparticulares ocasionando que el SP dosificado incremente su efecto dispersante y conduzca a una segregación severa, al tal grado que en el caso de la mezcla G-L1, no fue posible medir sus parámetros reológicos debido a que la muestra no permaneció homogénea durante el tiempo que dura la prueba.

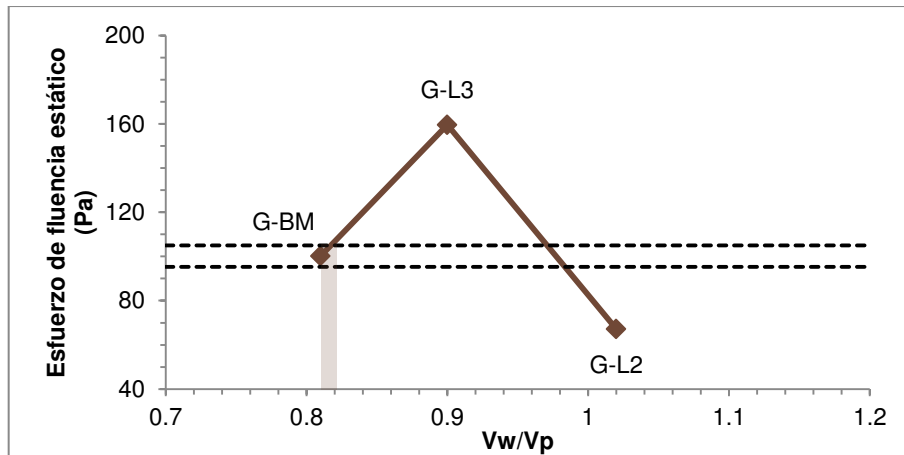


Figura 85. Efecto de la variación de la granulometría de agregado fino en el esfuerzo de fluencia estático

6.2.3.8.2. Esfuerzo de fluencia dinámico

En la Figura 86 se muestran las variaciones en el esfuerzo de fluencia dinámico en función de las variaciones de agua de mezcla. El rango de tolerancia para esta propiedad es de -3% a 4% de variación de agua de mezcla. Como se puede observar, la tendencia de los cambios en el esfuerzo de fluencia dinámico, medida con el reómetro es congruente con la tendencia que presenta el esfuerzo de fluencia calculado con la prueba de flujo de revenimiento; sin embargo, es de esperarse que los valores difieran entre si debido a la diferencia en las condiciones en las que se ejecuta cada prueba. La tendencia observada se le atribuye a que al incrementar el volumen de agua de mezcla, el espaciamiento entre partículas se incrementa, es decir, la concentración de sólidos en la suspensión disminuye, de tal manera que se genera un menor número de interacciones interparticulares lo que disminuye el umbral del esfuerzo para el cual el flujo se detiene. El resultado de la mezcla -6WR no se pudo obtener ya que el reómetro no tuvo suficiente fuerza para girar a la frecuencia de 0.5 rps, probablemente por un incremento en la intensidad del efecto reoespesante como consecuencia de haber aumentado la concentración de sólidos dentro de la suspensión (menor V_w/V_p).

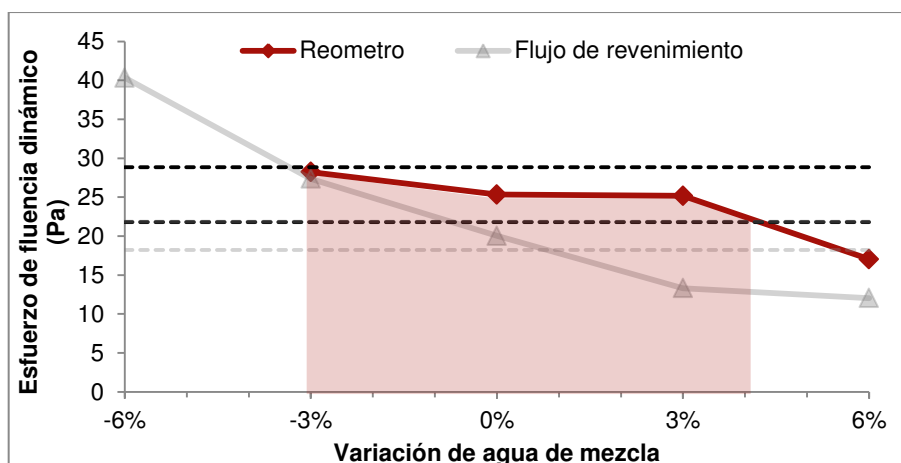


Figura 86. Efecto de las variaciones de agua de mezcla en el esfuerzo de fluencia dinámico

En el caso del efecto de las variaciones de SP en el esfuerzo de fluencia dinámico, la Figura 87 muestra que el reómetro no detectó cambios significativos en esta propiedad y que el esfuerzo de fluencia dinámico es robusto dentro de todo el rango de variación evaluado; sin embargo, si existieron cambios significativos en el flujo de revenimiento debidos a que al incrementar el contenido de SP, aumenta el efecto dispersante, disminuyendo las interacciones entre las partículas que tienden a coagular y por ende el material experimenta una reducción en el esfuerzo de fluencia dinámico. Por lo tanto, esta discrepancia entre la tendencia esperada y la determinada experimentalmente, solo puede ser atribuible a un malfuncionamiento de la celda de torque del equipo, aspecto que no fue detectado sino hasta después de haber realizado un análisis minucioso de los datos.

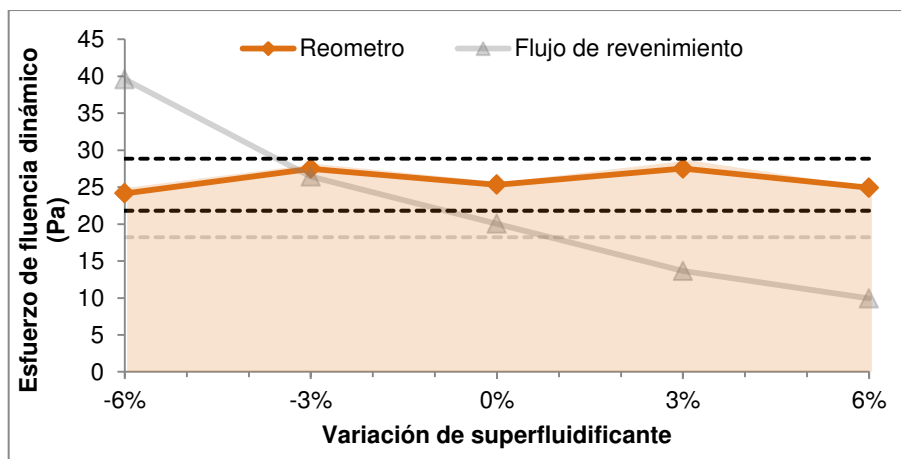


Figura 87. Efecto de las variaciones de superfluidificante en el esfuerzo de fluencia dinámico

Como se puede observar en la Figura 88, el incremento en la V_w/V_p como consecuencia de las variaciones de la granulometría siguió la misma tendencia que el esfuerzo de fluencia estático en respuesta por los mismos efectos físicos (Figura 85). La mezcla G-L3 elevó su esfuerzo de fluencia dinámico debido a que la discontinuidad que presenta en su esqueleto granular por la falta de partículas comprendidas entre los 9.5 y 2.36 mm (3/8 y No. 8) demanda una cantidad de pasta mayor. Por otro lado, la distribución granulométrica de la mezcla G-L2 favorece un mejor acomodo de las partículas, optimizando el volumen de pasta para proveer fluidez.

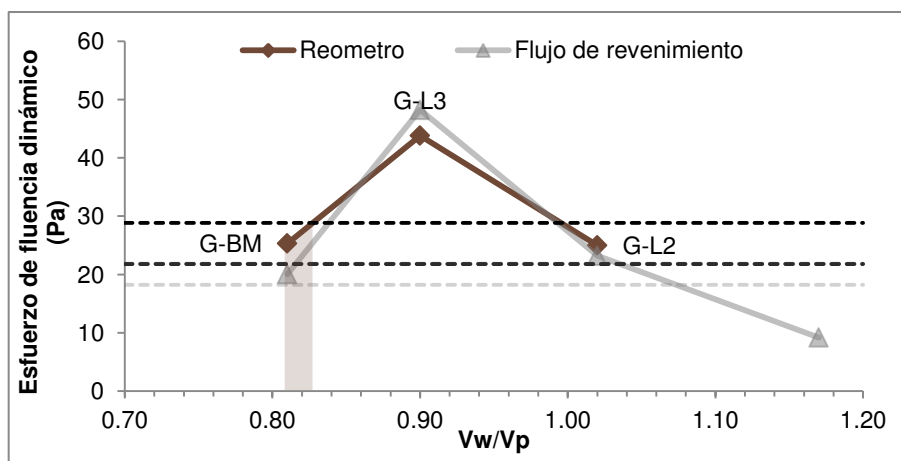


Figura 88. Efecto de las variaciones de granulometría en el esfuerzo de fluencia dinámico

6.2.3.8.3. Viscosidad diferencial

En la Figura 89 se puede observar que las variaciones de agua afectaron significativamente la viscosidad del concreto, tolerando un máximo de variación de $\pm 1\%$. La viscosidad diferencial del concreto tendió a aumentar cuando el contenido de agua disminuyó. Esta tendencia se le atribuye al aumento en los espacios existentes entre las partículas sólidas, lo cual reduce la fricción que actúa entre ellas cuando se produce el flujo.

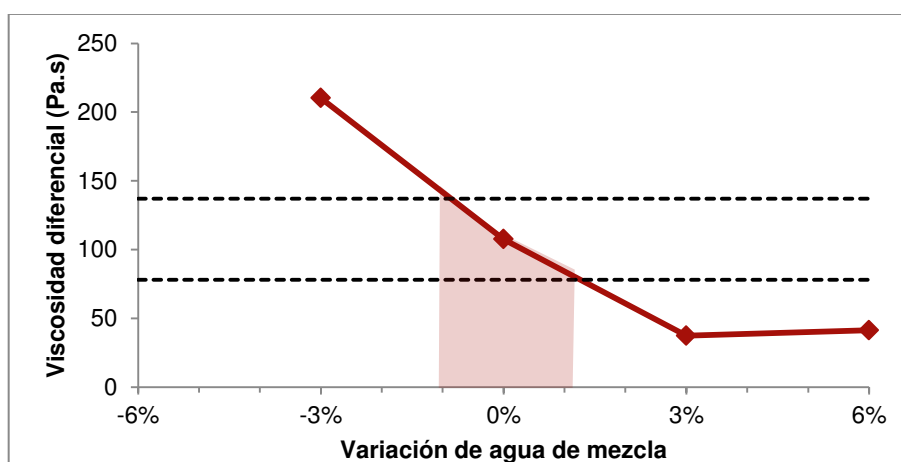


Figura 89. Efecto de las variaciones de agua de mezcla en la viscosidad diferencial

La influencia de las variaciones de SP en la viscosidad diferencial de los CAC evaluados se muestra en la Figura 90. La viscosidad plástica toleró un rango de variación de -6% al 2.5% de contenido de SP. No obstante, la reducción del SP afectó la viscosidad del concreto para dosificaciones mayores al 2.5%. Esto se le atribuye a que al aumentar la cantidad de SP, también se libera una mayor cantidad del agua que originalmente se encontraba atrapada dentro de los flóculos de cemento. El agua libre reduce la fricción entre las partículas de agregado más grandes y reduce la viscosidad total de la mezcla de concreto.

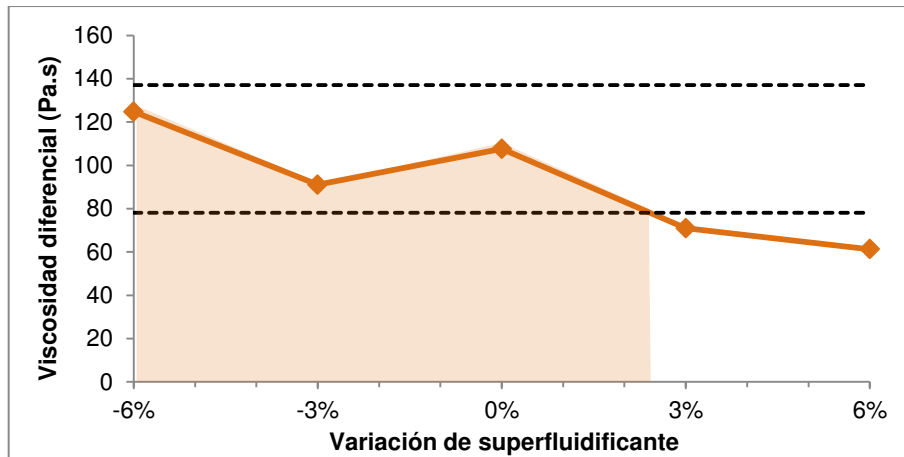


Figura 90. Efecto de las variaciones de superfluidificante en la viscosidad diferencial

La Figura 91 muestra que el aumento en la V_w/V_p producto de las variaciones de la granulometría redujo considerablemente la viscosidad diferencial. Esto se le atribuye a que la disminución de la concentración de sólidos disminuye las interacciones entre las partículas reduciendo así su resistencia al flujo. Asimismo, el agregado bien graduado de la mezcla G-L2 facilita el flujo del concreto al rellenar mejor el espacio entre las partículas de mayor tamaño, permitiendo que un mayor volumen de pasta esté disponible para lubricar la fricción entre las agregados más grandes [6, 9].

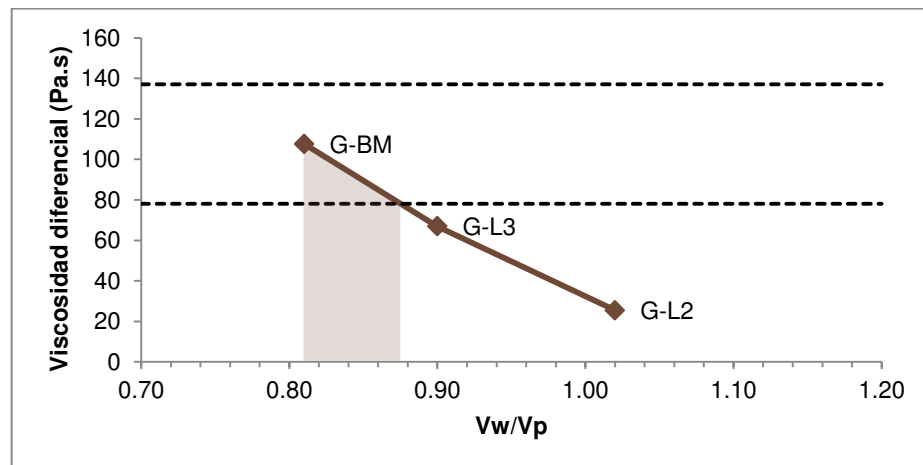


Figura 91. Efecto de las variaciones de granulometría en la viscosidad diferencial

6.2.3.8.4. Intensidad del comportamiento reoespesante

Una de las razones por las que la intensidad del comportamiento reoespesante se incrementa, se debe a que aumenta la proximidad de las partículas, lo que ocasiona que las fuerzas repulsivas resulten superadas por las fuerzas de lubricación hidrodinámicas, conduciendo a una aglomeración temporal de las partículas, lo que ante la acción de un esfuerzo genera *hidroclusters* [31, 116]. La cercanía entre las partículas sólidas está en función de su concentración dentro de la fase líquida. Por lo tanto, aumentar la a/cm conlleva a una disminución de la intensidad en el comportamiento reoespesante (Figura 92).

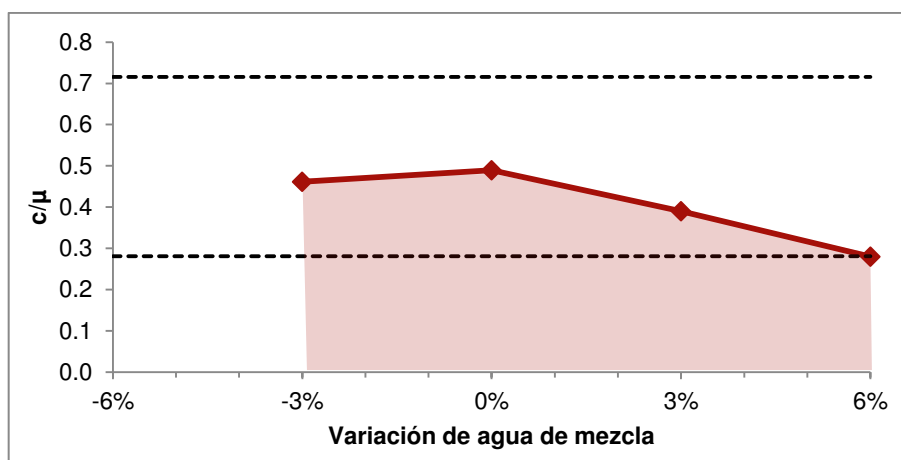


Figura 92. Efecto de las variaciones de agua de mezcla en la intensidad del comportamiento reoespesante

El comportamiento reoespesante solo se puede presentar en suspensiones dispersas que contengan un suficiente número de partículas susceptibles a aglomerarse ante fuerzas hidrodinámicas inducidas por un esfuerzo cortante [31, 117]. La Figura 93 muestra este comportamiento dentro del rango de variación de SP de -6% a 3%. La disminución en la intensidad del efecto reoespesante en la mezcla +6SP se le atribuye a que el incremento del radio aparente de las partículas recubiertas por el SP (Figura 94) disminuye el número de Péclet (Pe), el cual es una medida de la rapidez de

deformación adimensional y depende del tamaño de las partículas (entre más pequeñas sean las partículas, el Pe es mayor). Para altos valores de Pe (10^3), las fuerzas Brownianas son despreciables y los *hidroclusters* pueden formarse [31, 116].

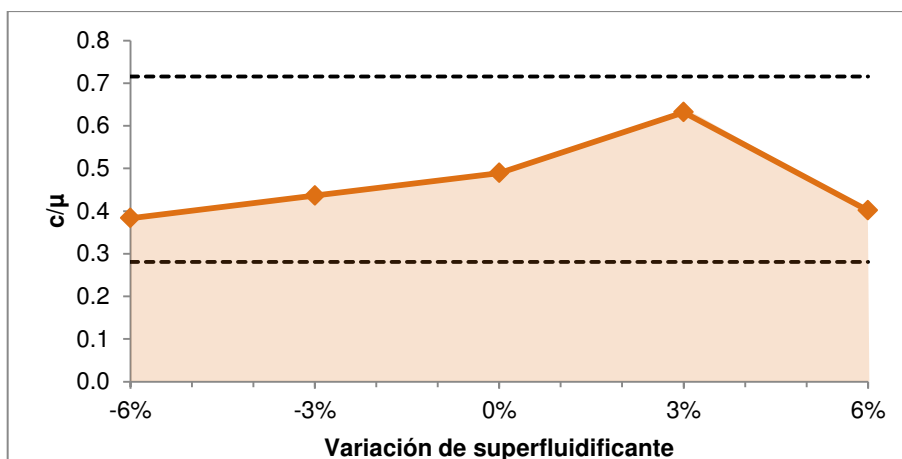


Figura 93. Efecto de las variaciones de superfluidificante en la intensidad del comportamiento reoespesante

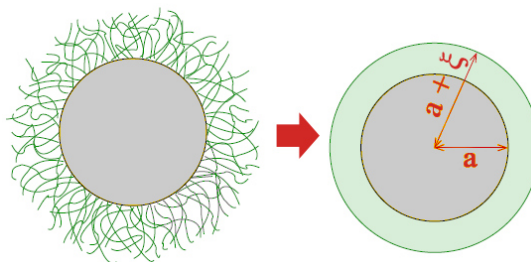


Figura 94. Incremento del radio aparente (a) de una partícula recubierta por un polímero ($a+\xi$)[116]

Al disminuir la concentración de partículas con tamaños $<150 \mu\text{m}$, las mezclas G-L3 y G-L2 se comportaron como un fluido de Bingham (ver los reogramas correspondientes en el Anexo 1.4). Tomando en cuenta que la granulometría del agregado fino utilizada en la mezcla G-L3 contiene un 10% de material $<150 \mu\text{m}$, el umbral a partir del cual se hace presente el efecto reoespesante se encuentra entre 10% (G-L3) y 16.09 % (G-BM) de partículas $<150 \mu\text{m}$. Esto puede deberse a que al reducir la presencia de material $<150 \mu\text{m}$, el grado de empaquetamiento de los polvos se reduce y por

consecuencia, el espaciamiento entre partículas coloidales aumenta, debilitando la existencia de interacciones hidrodinámicas entre ellas.

6.2.3.9. Deformación autógena

La fluctuación de la deformación autógena a 28 días de edad a causa de variaciones en la dosificación del agua de mezcla se muestra en la Figura 95, el desarrollo de la deformación autógena puede ser consultado en el Anexo 2.2. Como era de esperarse, la deformación autógena aumenta conforme el agua de mezcla disminuye. Esto se debe a que al existir una menor cantidad de agua disponible para la hidratación del cemento, la cantidad de agua en los poros capilares disminuye conforme avanza la reacción de hidratación, dando lugar a los meniscos en el interior de los poros que ejercen fuerzas de tensión dentro del concreto. Por otro lado, al incrementar la a/cm por arriba de 0.40 se reduce considerablemente la deformación autógena, ya que en esta condición la cantidad de agua en la pasta es suficiente para hidratar al cemento y no incurrir en la auto-desección de los poros capilares [103].

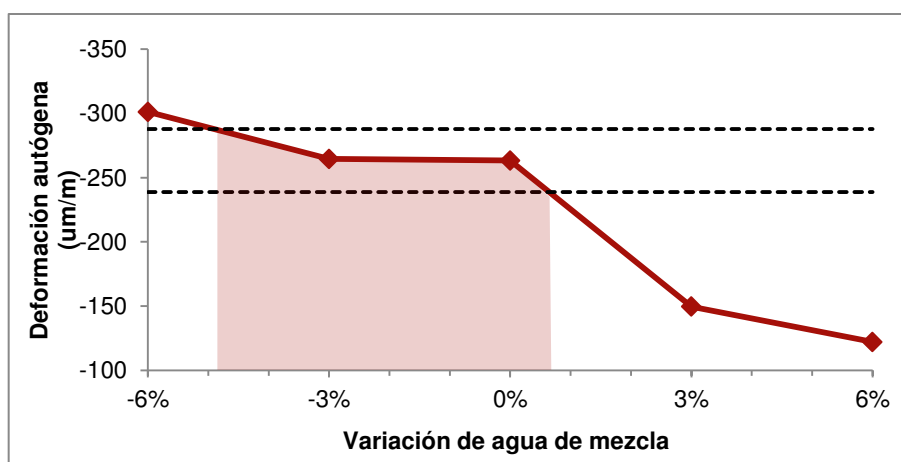


Figura 95. Efecto de las variaciones de agua de mezcla en la deformación autógena a 28 días

Como puede observarse en la Figura 96, la deformación autógena se reduce conforme el contenido de SP disminuye (el desarrollo de la deformación autógena ante

variaciones de SP puede ser consultado en el Anexo 2.3). Si bien, el SP origina retardo en el fraguado inicial, sin embargo, posteriormente el SP propicia que la reacción de hidratación se lleve a cabo de forma más eficiente [101]. Aumentar la cantidad de SP ocasiona que un mayor número de partículas de cemento se dispersen exponiendo más área superficial de cemento al contacto con el agua, lo cual favorece una hidratación más acelerada [118]. Por lo tanto, el agua presente en los poros capilares del concreto se consume más rápido, dando lugar a una contracción mayor debida a la tensión generada por los meniscos dentro de los poros capilares.

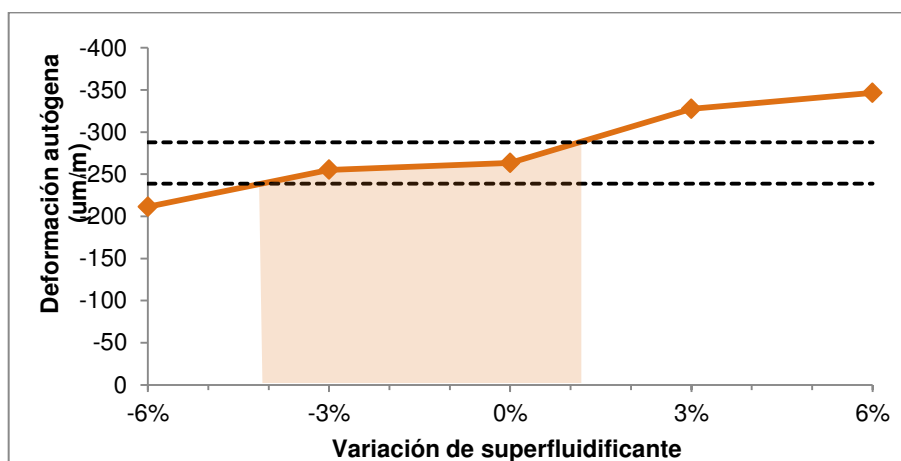


Figura 96. Efecto de las variaciones de superfluidificante en la deformación autógena a 28 días

La Figura 97 muestra que tanto la granulometría G-L3 y G-L2 no generaron cambios significativos en la deformación autógena. La mezcla G-L2 presentó una leve expansión durante las primeras horas de medición, la cual es atribuible a la formación de hidróxido de calcio, etringita y fases de carboaluminatos [119]. Por lo tanto, leves cambios en la granulometría del agregado fino no generan cambios importantes en la deformación autógena. En el caso de la mezcla G-L1, la medición de la deformación autógena fue invalidada debido un alto contenido de aire dentro de los especímenes.

Desde otro punto de vista, debido a que la deformación autógena se presenta en la pasta, al reducir el contenido de microfinos a 9.7 y 4.9% esto ocasionó que el volumen de pasta de las mezclas G-L3 y G-L2 disminuyera a 402 y 380 L/m³ de concreto respectivamente. Por lo tanto, si consideramos que la mezcla de referencia contó con un volumen de pasta de 426 L/m³ de concreto, una disminución de hasta 46 litros de pasta a causa de la reducción de microfinos no cambió significativamente la deformación autógena a 28 días de edad.

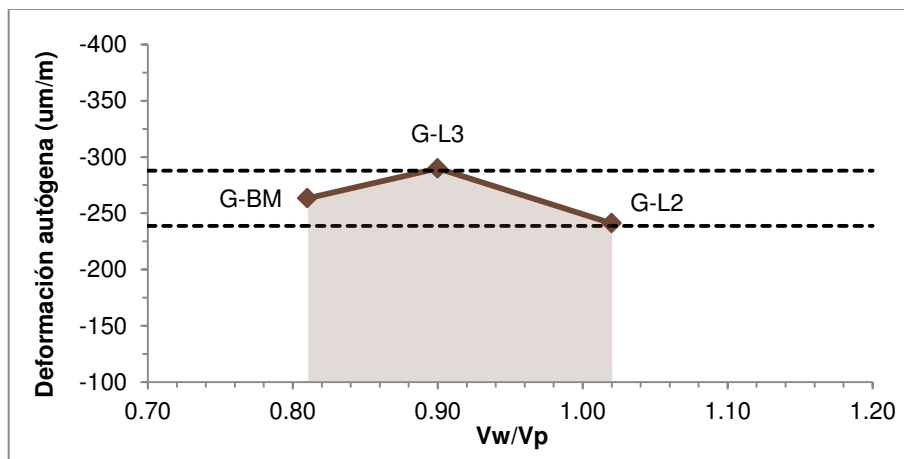


Figura 97. Efecto de la variación de la granulometría en la deformación autógena a 28 días

6.2.3.10. Resistencia a la compresión

El efecto de las variaciones de agua en la resistencia a compresión se muestra en la Figura 98. Como puede observarse, las reducciones de agua condujeron a un aumento significativo de la resistencia (respecto de la referencia) solo durante el primer día de edad. Esto se le atribuye a que al aumentar el esfuerzo de fluencia del CAC como consecuencia de la reducción del agua de mezcla, el concreto pierde habilidad de llenado. Por lo tanto, en ausencia de una energía externa de compactación como la ejercida en el CVC, el llenado de los moldes para fabricación de especímenes es más deficiente. Al mismo tiempo, el aumento en el esfuerzo de fluencia incrementa la capacidad del CAC para estabilizar burbujas de aire atrapado dentro de la pasta,

aumentando el volumen de vacíos y reduciendo la resistencia a compresión (Figura 99). De hecho, 1% de aire puede reducir hasta en 5% la resistencia a compresión [108].

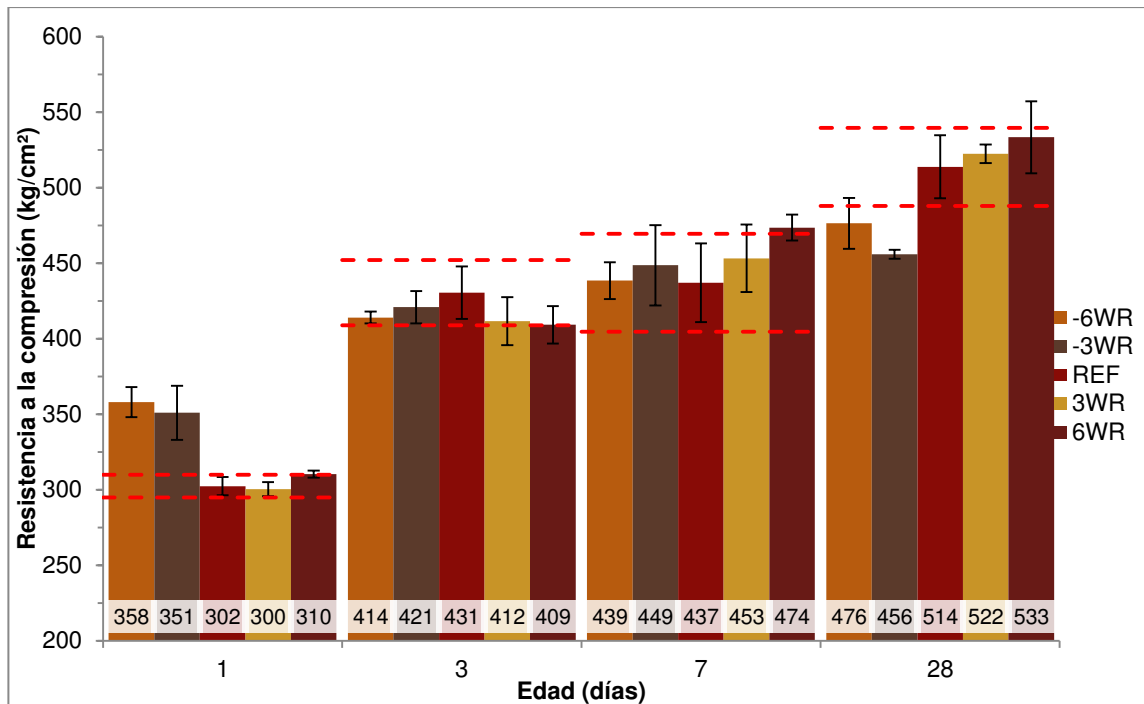


Figura 98. Efecto de las variaciones de agua de mezcla en la resistencia a compresión.

De acuerdo Kostrzanowska-Siedlarz, A., y Gołaszewski, J., el concreto autocompactable con una alta viscosidad y flujo de revenimiento menor que 650 mm tiene una baja capacidad para auto-ventilarse [120]. Por otro lado, aumentar el agua de mezcla propició el efecto contrario al descrito anteriormente el cual se mostró con más claridad a partir de los 7 días de edad. Las mezclas que contaban con agua adicional (+3WR y +6WR) respecto del CAC de referencia mostraron una mayor resistencia a la compresión debido al aumento de su habilidad de llenado por consecuencia de la disminución del esfuerzo de fluencia y la viscosidad, lo cual incrementó la capacidad de ventilar el aire atrapado durante el vertido del concreto dentro de los moldes cilíndricos de 10 x 20 cm. Como se puede observar, las variaciones en la cantidad de agua de

mezcla no influyeron de manera significativa en las resistencias a edades tempranas (3 y 7 días), ya que se mantuvieron prácticamente dentro de los rangos de los IC. Por otro lado, las disminuciones en el agua de mezcla del 3 y 6% condujeron a reducciones significativas en la resistencia a la compresión a 28 días, lo cual se atribuye al aire atrapado como consecuencia de una pobre auto-ventilación.



Figura 99. Aire atrapado en un espécimen para determinación de resistencia a la compresión de la mezcla -6WR.

La Figura 100 muestra los efectos de la variación del aditivo SP en la resistencia a la compresión. A la edad de 1 día, no se mostró una tendencia clara. Por otro lado, a 3 días se observa que a mayor contenido de SP, la resistencia tiende a aumentar; sin embargo esta tendencia comienza a revertirse a los 7 días. A los 28 días de edad, la tendencia indica que a mayor contenido de superplastificante, menor es la resistencia a la compresión, no obstante, la desviación estándar de los ensayos a compresión permaneció en todo momento dentro de los IC, con excepción de la mezcla +6SP. Usualmente la resistencia a compresión aumenta conforme se incrementa el contenido de SP (siempre y cuando no se produzca segregación) debido a que existe una mayor

dispersión de las partículas de cemento [121], lo cual provoca que la reacción de hidratación se lleve a cabo más rápido [101], pero debido a la inclusión de aire que se genera por el aumento del aditivo SP, la resistencia a compresión resulto reducida. Por otro lado, el contenido de aire medido disminuyó conforme el aditivo SP se incrementó (Figura 74) contraponiéndose a lo anteriormente expuesto. En comparación con el agua de mezcla, el aditivo SP no tiene un efecto tan grande en la viscosidad diferencial de la mezcla como lo tiene el agua de mezcla, por lo tanto la ventilación del aire atrapado al llenar los moldes de 10 x 20 cm para especímenes de resistencia a la compresión, no es tan efectiva como lo es en el contenedor del medidor de aire, dando lugar a mediciones de aire más bajas de las que realmente quedan atrapadas dentro de los especímenes para resistencia.

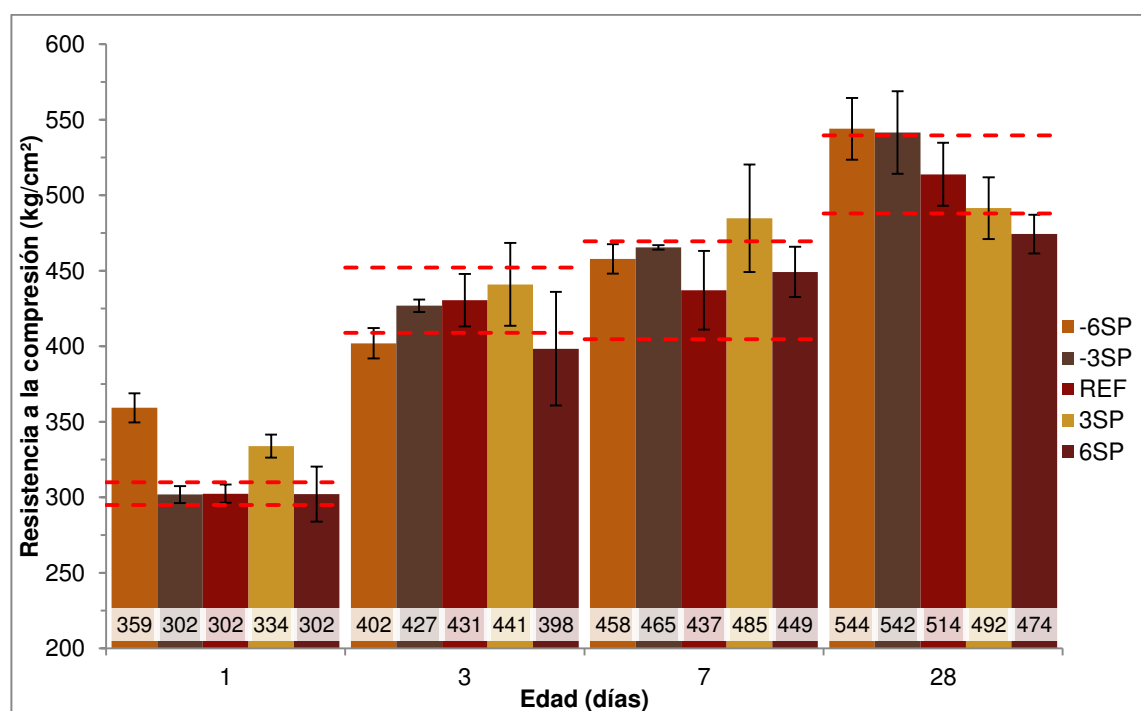


Figura 100. Efecto de las variaciones de superfluidificante en la resistencia a compresión

Como se puede observar en la Figura 101, la resistencia a la compresión fue menor para la mezcla G-L1, lo cual es atribuible a la alta cantidad de aire atrapado a causa de

la sobredosificación del SP por la carencia total de microfinos, y por la presencia de segregación severa (Figura 102). Por otro lado, las mezclas G-L2, G-L3 y G-BM exhibieron resistencias a la compresión muy similares a la edad de 7 días, manteniéndose dentro de los IC. A los 28 días de edad, los resultados muestran una tendencia clara y ascendente, lo que indica que la resistencia a la compresión se incrementa cuando se utiliza un mayor volumen de microfinos y disminuye V_w/V_p .

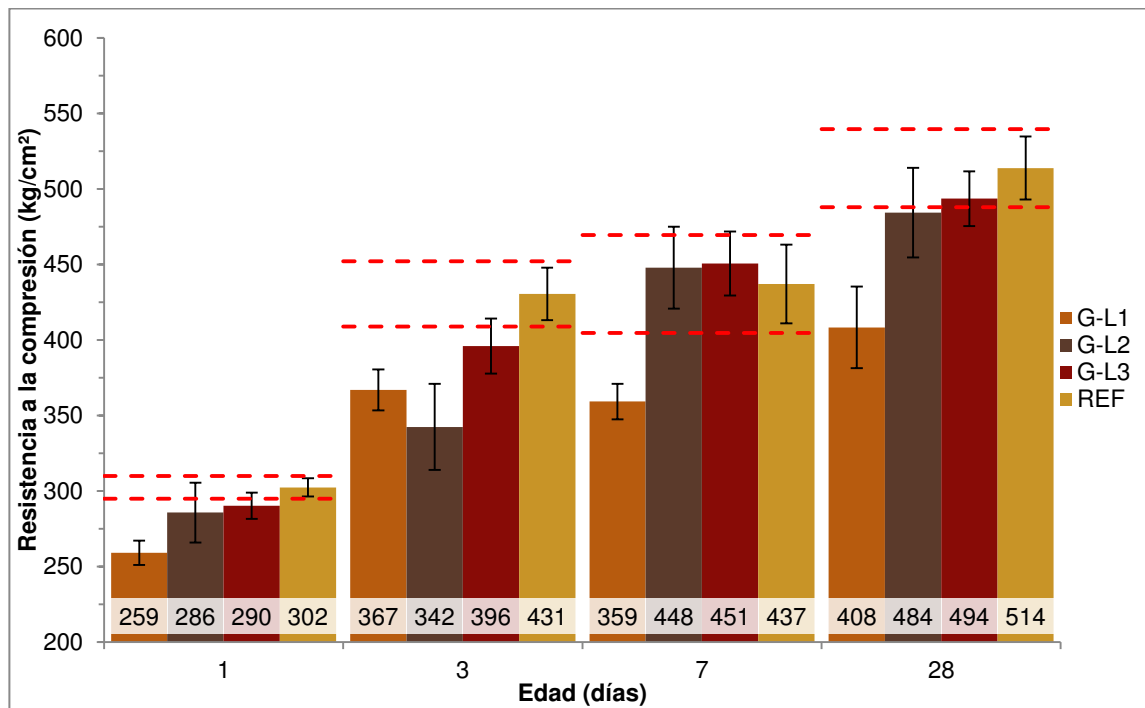


Figura 101. Efecto de las variaciones de la granulometría en la resistencia a compresión

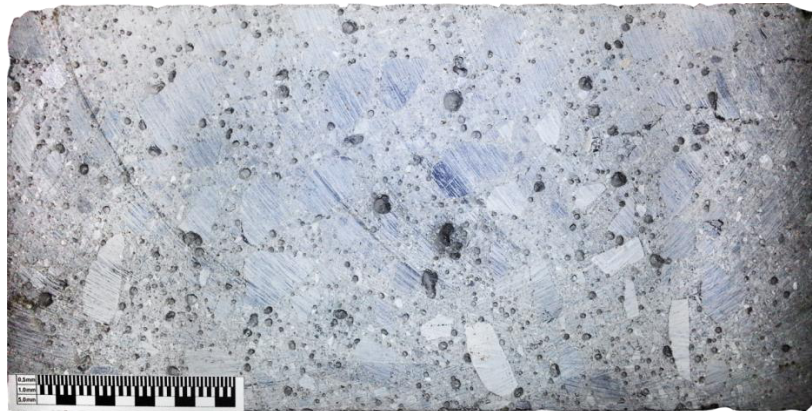


Figura 102. Sección longitudinal de un espécimen cilíndrico de la mezcla G-L1.

6.2.4. Evaluación de la robustez de las variables de estudio

Con la finalidad de establecer un parámetro que nos ayude a evaluar la robustez del CAC de manera cuantitativa, ante la diferencia en los resultados de cada una de las variables estudiadas, se calculó un índice de robustez mediante la ecuación 6.1, que reflejase la sensibilidad de una mezcla de CAC ante las variaciones implementadas. Para tres grupos de 17 pruebas ejecutadas (NPE), la Tabla 30 muestra las variables estudiadas y los rangos de tolerancia (RT) en los que el comportamiento observado se mantuvo dentro de los IC. Los límites establecidos para el estudio de estas variables se mantuvieron en $\pm 6\%$ de las dosificaciones de la mezcla de referencia, por lo que, para el rango establecido, cada prueba tiene un intervalo máximo de variación (IMV) de 12 puntos. El efecto de la granulometría del agregado fino se cuantificó con la V_w/V_p en un rango de 0.81 a 1.17, por lo tanto para poder compararlo con las otras dos variables su intervalo máximo de variación se normalizó a 12 puntos.

$$IR = \frac{\sum RT}{IMV * NPE} \times 100 \quad 6.1$$

Dónde:

IR = Índice de robustez

RT = Rango de tolerancia de cada prueba efectuada

IMV = Intervalo máximo de variación

NPE = Número de pruebas efectuadas

Como resultado, se obtuvo que la granulometría del agregado fino es más susceptible a generar desviaciones significativas de las propiedades de la mezcla de referencia ($IR = 32\%$), que la dosificación de agua de mezcla ($IR = 51\%$) y el superfluidificante ($IR = 69\%$). Entre más cercano sea el IR a 100% , mayor es la tolerancia de la variable a las fluctuaciones inducidas durante el programa experimental (Figura 103).

Tabla 30. Cálculo del índice de robustez de las variables estudiadas

Métodos y pruebas realizadas		Agua de mezcla			Superfluidificante			Granulometría del agregado fino (como Vw/Vp)		
		Tolerancia		RT	Tolerancia		RT	Tolerancia		RT
		-	+		-	+		-	+	
Flujo de revenimiento		0.80	0.70	1.50	1.10	0.80	1.90	0.81	0.82	0.33
T ₅₀		2.00	2.50	4.50	6.00	6.00	12.00	0.81	0.96	4.83
Bloqueo con anillo J		6.00	4.40	10.40	6.00	6.00	12.00	0.81	0.98	5.67
Embudo V		0.80	0.80	1.60	6.00	2.00	8.00	0.81	0.86	1.67
Columna de segregación		6.00	3.00	9.00	6.00	5.40	11.40	0.81	1.02	7.00
% de aire atrapado		4.50	6.00	10.50	4.40	6.00	10.40	0.81	0.83	0.67
Tiempos de fraguado	Inicial	2.50	1.30	3.80	2.50	2.90	5.40	0.81	0.99	5.83
	Final	1.90	1.80	3.70	6.00	3.80	9.80	0.81	1.04	7.67
Esfuerzo de fluencia	Estático	0.40	0.40	0.80	1.70	0.80	2.50	0.81	0.82	0.33
	Dinámico	3.00	4.20	7.20	6.00	6.00	12.00	0.81	0.83	0.67
Viscosidad diferencial		1.00	1.20	2.20	6.00	2.50	8.50	0.81	0.88	2.17
c/μ		3.00	6.00	9.00	6.00	6.00	12.00	0.81	0.81	0.00
Deformación autógena @ 28 días		4.80	0.80	5.60	4.00	1.20	5.20	0.81	1.02	7.00
Resistencia a la compresión	1 día	0.50	6.00	6.50	3.80	0.80	4.60	0.81	0.87	1.83
	3 días	6.00	6.00	12.00	5.00	5.10	10.10	0.81	0.86	1.67
	7 días	6.00	5.40	11.40	6.00	2.00	8.00	0.81	1.09	9.33
	28 días	1.20	6.00	4.80	2.90	3.50	6.40	0.81	1.03	7.33
Rango de tolerancia acumulado (Σ _{RT})				104.5	140.2			64.0		
Índice de robustez (IR):				51%	69%			31%		

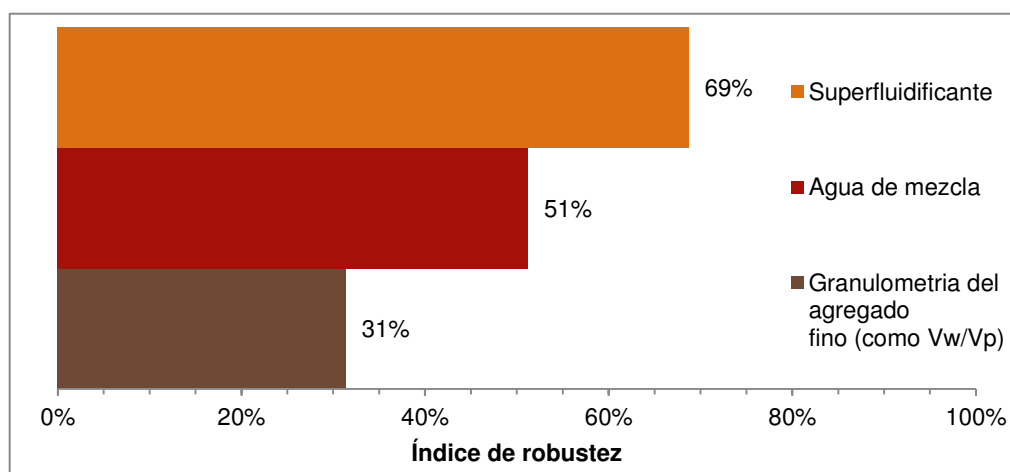


Figura 103. Índice de robustez

En la Tabla 30 se puede observar que las pruebas más sensibles para identificar problemas de robustez en las propiedades de los concretos autocompactables en estado fresco son el flujo de revenimiento, el embudo V, el esfuerzo de fluencia estático y la viscosidad diferencial.

Otra información útil que se puede distinguir, es la comparación de los rangos de tolerancia obtenidos con los IC al 95% y las tolerancias máximas permitidas por la norma NMX-ONNCCE-C155 y ASTM C94 en cuanto a la dosificación de los materiales en plantas de concreto premezclado (Tabla 4), como se muestra en la Tabla 31. Por ejemplo, si una planta de concreto premezclado que cumple con las tolerancias establecidas por la norma NMX-ONNCCE-C155 para las variaciones de peso en la dosificación de materiales produjera el CAC evaluado en este trabajo, se esperaría que sus variaciones de agua de mezcla ($\pm 1\%$) pudieran tener un impacto significativo en el flujo de revenimiento, tiempo de embudo V, esfuerzo de fluencia estático, deformación autógena y la resistencia a la compresión a 1 día de edad, cuando la variación presentada durante la dosificación, excediera el límite de tolerancia.

Tabla 31. Comparación de los resultados obtenidos con las tolerancias aceptadas en plantas de concreto premezclado.

Pruebas		Tolerancia			
		NMX-ONNCCE-C155		ASTM C94	
		Contenido de agua ($\pm 1\%$)	Aditivos líquidos ($\pm 3\%$)	Contenido de agua ($\pm 3\%$)	Aditivos líquidos ($\pm 3\%$)
Flujo de revenimiento		✗	✗	✗	✗
T ₅₀		✓	✓	✗	✓
Bloqueo con anillo J		✓	✓	✓	✓
Embudo V		✗	✗	✗	✗
Columna de segregación		✓	✓	✓	✓
% de aire atrapado		✓	✓	✓	✓
Tiempo de fraguado inicial	Inicial	✓	✗	✗	✗
	Final	✓	✓	✗	✓
Esfuerzo de fluencia	Estático	✗	✗	✗	✗
	Dinámico	✓	✓	✓	✓
Deformación autógena @ 28 días		✗	✓	✓	✓
Viscosidad diferencial		✓	✗	✗	✗
c/μ		✓	✓	✓	✓
Deformación autógena @ 28 días		✓	✗	✗	✗
Resistencia a la compresión	1 día	✗	✗	✗	✗
	3 días	✓	✓	✓	✓
	7 días	✓	✗	✓	✗
	28 días	✓	✗	✗	✗

Cumple: ✓

No cumple: ✗

Capítulo 7

Conclusiones y recomendaciones

Con base en los resultados experimentales obtenidos con este trabajo de investigación, las siguientes conclusiones fueron deducidas en función de la hipótesis y objetivos propuestos:

Propiedades en estado fresco

1. La prueba de flujo de revenimiento (en conjunto con el T_{50} y VSI) y el embudo V resultaron ser muy sensibles a cambios en la fluidez del concreto por lo que puede ser un indicador confiable para distinguir problemas de robustez en campo.
2. El embudo V demostró ser muy sensible a cambios en la viscosidad diferencial del concreto al detectar la misma tendencia que el reómetro.
3. En la etapa de diseño u optimización de las proporciones de un CAC, no es posible evaluar su robustez tan solo con una prueba. Por lo tanto, para evaluar de manera integral el comportamiento reológico mediante pruebas empíricas, además del flujo de revenimiento, el T_{50} y el VSI, será necesario incluir la evaluación de la estabilidad estática (columna de segregación), la habilidad de paso (anillo J), habilidad de llenado-viscosidad (embudo V).
4. Una vez transferida una mezcla de CAC a escala industrial, las pruebas apropiadas para la verificación de las propiedades objetivo en estado fresco son: flujo de revenimiento y el embudo V.
5. Entre más se aproxime la granulometría del agregado fino a la granulometría promedio de la norma ASTM C33, la viscosidad del CAC se reduce

sustancialmente así como también su susceptibilidad a presentar un comportamiento reoespesante.

6. Las propiedades de autocompactibilidad del CAC del tipo polvo con altos contenidos de polvo son muy sensibles a cambios en el agua de mezcla.
7. La granulometría del agregado fino resultó ser la variable más sensible de las 3 evaluadas, por lo tanto es un factor importante que debe ser controlado en la producción industrializada de CAC.
8. La habilidad de paso no cambió significativamente ante variaciones en el contenido de superfluidificante dentro del intervalo de variación evaluado.
9. El método para la determinación del contenido de aire no fue capaz de detectar el porcentaje de aire atrapado en los especímenes de resistencia a la compresión debido a que al usar un recipiente relativamente más grande para la medición del aire, el CAC utilizado tiene una mayor capacidad de auto-ventilarse.
10. La ventilación del aire atrapado en el CAC depende de las dimensiones de los moldes en los que se coloque y de sus propiedades reológicas. Entre más pequeño sea el espécimen, mayor será la cantidad de aire atrapado y las dimensiones de los vacíos. Por otro lado, a mayor viscosidad, mayor debe de ser la distancia necesaria que el CAC tenga que recorrer para liberar el aire atrapado.

Propiedades en estado endurecido

1. La deformación autógena aumenta de forma significativa cuando la a/cm disminuye a menos de 0.40.
2. El aumento en la dosificación de aditivo produce un incremento de la deformación autógena.
3. Las variaciones leves en la granulometría del agregado fino y cambios hasta de 10.8% de volumen de pasta producidos por la disminución de microfinos no cambiaron significativamente la deformación autógena.
4. La resistencia a la compresión puede verse afectada ante ligeras variaciones de los materiales constituyentes como resultado de las propiedades de autocompactibilidad (contenido de aire, viscosidad, estabilidad estática y fluidez) que exhiba la mezcla al momento en que los especímenes sean fabricados.
5. La auto-ventilación del CAC es un factor fundamental para disminuir la cantidad de aire atrapado y obtener las propiedades mecánicas objetivo.

Recomendaciones

1. Para reducir la sensibilidad del CAC se recomienda hacer un diseño de mezcla del tipo “combinado”. De tal forma que los microfinos incluidos en la arena sean aprovechados como filler e incluir un aditivo AMV para conferir mayor estabilidad ante cambios en el agua de mezcla. También se recomienda reducir el TMA cuando sea posible para minimizar el riesgo de segregación y bloqueo excesivo.
2. Como pruebas complementarias en campo resultaran de mucha utilidad la columna de segregación y el anillo J; sin embargo, estas pruebas pueden

excluirse si en la etapa de optimización se establecen las tolerancias para las cuales el flujo de revenimiento en conjunto con el tiempo embudo V no presenten segregación o bloqueo en exceso.

3. Se recomienda utilizar el aditivo SP en dosificaciones tan bajas como sea posible para evitar la inclusión de aire excesiva al buscar una fluidez objetivo. Para ello, la fluidez objetivo puede ser optimizada variando el porcentaje de pasta y su composición, así como también optimizando la granulometría.
4. Para incrementar la habilidad de paso del CAC no basta con reducir la fracción volumétrica del agregado grueso. El TMA debe ser reducido al mínimo siempre que sea posible para mantener la viscosidad en un rango moderado y un esfuerzo de fluencia bajo, de tal forma que la fluidez, habilidad de paso, habilidad de llenado y resistencia a la segregación sean aseguradas.
5. El aumentar el agua de mezcla incrementó la habilidad de paso a expensas de aumentar la segregación estática, por lo tanto si se planea mejorar la habilidad de paso aumentando la a/cm , será necesario verificar que la segregación estática se mantenga dentro del rango aceptable
6. Para la producción de un CAC con buenas propiedades de autocompactibilidad es necesario utilizar un agregado fino con una distribución granulométrica lo más apegada posible a la curva promedio de ASTM C33-09 y con un contenido de material $<150\ \mu m$ del 5 al 10%.

Trabajo futuro

- Investigar la factibilidad de producir un CAC robusto y sostenible del tipo combinado, con bajos consumos de cemento y microfinos producto de la trituración de los agregados como filler.
- Investigar la influencia del tipo de aditivo SP en el aire atrapado dentro del CAC, así como también la eficiencia de aditivos anti-espumantes para mejorar la auto-ventilación.
- Evaluar la influencia del tipo de cemento en la deformación autógena de morteros con consistencia autocompactable generada a partir de distintos tipos de superfluidificantes.

Bibliografía

1. Okamura, H., & Ouchi, M. (2003). Self-compacting concrete. *Journal of advanced concrete technology*, 1(1), 5-15.
2. ACI Committee 237 (2007). "Self-Consolidating Concrete". ACI 237-07, ACI Manual of Concrete Practice, Detroit, MI, USA.
3. Hwang, S. D., Khayat, K. H., & Bonneau, O. (2006). Performance-based specifications of self-consolidating concrete used in structural applications. *ACI materials journal*, 103(2).
4. EFNARC & EFCA (2006). Guidelines for viscosity modifying admixtures for concrete.
5. BIBM, CEMBUREAU, ERMCO, EFCA, and EFNARC (2005) "European Guidelines for Self Consolidating Concrete: Specification, Production and Use"
6. Daczko, J. A. (2012). Self-consolidating concrete: applying what we know. CRC Press.
7. Bentz, D. P., Durán-Herrera, A., & Gálvez-Moreno, D. (2012). Comparison of ASTM C311 strength activity index testing vs. testing based on constant volumetric proportions. *J ASTM Int*, 9(1), 7.
8. Bentz, D. P., Ferraris, C. F., & Snyder, K. A. (2013). Best practices guide for high-volume fly ash concretes: Assuring properties and performance.
9. Koehler, E. P. (2007). Aggregates in self-consolidating concrete. PhD dissertation. University of Texas at Austin, Austin, TX, USA.
10. Hwang, S. D., Mayen-Reyna, D., Bonneau, O., & Khayat, K. H. (2003). Performance of self-consolidating concrete made with various admixture combinations. In O.

- Wallevik, & I. Nielsson (Eds.), International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (pp. 467-478). RILEM Publications SARL.
11. Schmidt, W., Brouwers, H. J. H., Kühne, H. C., & Meng, B. (2014). Influences of superplasticizer modification and mixture composition on the performance of self-compacting concrete at varied ambient temperatures. *Cement and Concrete Composites*, 49, 111-126.
12. Flatt, R. J., & Houst, Y. F. (2001). A simplified view on chemical effects perturbing the action of superplasticizers. *Cement and concrete research*, 31(8), 1169-1176.
13. Roberts, L. R., & Taylor, P. C. (2007). Understanding cement-SCM-admixture interaction issues. *Concrete international*, 29 (1), 33-41.
14. Khayat, K. H. (1995). Effects of antiwashout admixtures on fresh concrete properties. *ACI Materials Journal*, 92(2).
15. Kosmatka, S. H., & Panarese, W. C. (2004). Diseño y control de mezclas de concreto.
16. Barnes, H. A., Hutton, J. F., & Walters, K. (1989). An introduction to rheology (Vol. 3). Elsevier.
17. Ferraris, C. F. (1999). Measurement of the rheological properties of high performance concrete: state of the art report. *Journal of research - National Institute of Standards and Technology (NIST)*, 104(5), 461-478.
18. Wallevik, O. H., & Wallevik, J. E. (2011). Rheology as a tool in concrete science: The use of rheographs and workability boxes. *Cement and Concrete Research*, 41(12), 1279-1288.
19. Roussel, N. (Ed.). (2011). Understanding the rheology of concrete. Elsevier.

20. Ferraris, C., De Larrard, F., & Martys, N. (2001). Fresh concrete rheology: recent developments. *Materials Science of Concrete VI*, Amer. Cer. Soc. Ed. S. Mindess, J. Skalny, 215-241.
21. Schmidt, W., Brouwers, J., Kühne, H. C., & Meng, B. (2010). Effects of Superplasticizer and Viscosity-Modifying Agent on Fresh Concrete Performance of SCC at Varied Ambient Temperatures. In *Design, Production and Placement of Self-Consolidating Concrete* (pp. 65-77). Springer Netherlands.
22. Wallevik, O. H., Feys, D., Wallevik, J. E., & Khayat, K. H. (2015). Avoiding inaccurate interpretations of rheological measurements for cement-based materials. *Cement and Concrete Research*.
23. Koehler, E. P., Fowler, D. W., Ferraris, C. F., & Amziane, S. (2005). A new, portable rheometer for fresh self-consolidating concrete. *ACI special publications*, 233, 97.
24. ACI Committee 238 (2008). "Report on Measurements of Workability and Rheology of Fresh Concrete". ACI 238-08, ACI Manual of Concrete Practice, Detroit, MI, USA
25. Hackley, V. A., & Ferraris, C. F. (2001). The Use of Nomenclature in Dispersion Science and Technology. NIST Recommended Practice Guide.
26. Koehler, E. P., & Fowler, D. W. (2004). Development of a portable rheometer for fresh portland cement concrete. MS Thesis, University of Texas at Austin.
27. Roussel, N., Stefani, C., & Leroy, R. (2005). From mini-cone test to Abrams cone test: measurement of cement-based materials yield stress using slump tests. *Cement and Concrete Research*, 35(5), 817-822.
28. Roussel, N., Ovarlez, G., Garrault, S., & Brumaud, C. (2012). The origins of thixotropy of fresh cement pastes. *Cement and Concrete Research*, 42(1), 148-157.
29. De Larrard, F., Ferraris, C. F., & Sedran, T. (1998). Fresh concrete: a Herschel-Bulkley material. *Materials and Structures*, 31(7), 494-498.

30. Feys, D., Verhoeven, R., & De Schutter, G. (2008). Fresh self compacting concrete, a shear thickening material. *Cement and Concrete Research*, 38(7), 920-929.
31. Feys, D., Verhoeven, R., & De Schutter, G. (2009). Why is fresh self-compacting concrete shear thickening?. *Cement and concrete Research*, 39(6), 510-523.
32. Wallevik, O. H. (2003). Rheology—a scientific approach to develop self-compacting concrete. In *Proceedings of the 3rd international RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete* (pp. 23-31)
33. Heirman, G., Vandewalle, L., Van Gemert, D., & Wallevik, O. (2008). Integration approach of the Couette inverse problem of powder type self-compacting concrete in a wide-gap concentric cylinder rheometer. *Journal of non-Newtonian fluid mechanics*, 150(2), 93-103.
34. Rubio-Hernández, F. J., Velázquez-Navarro, J. F., & Ordóñez-Belloc, L. M. (2013). Rheology of concrete: a study case based upon the use of the concrete equivalent mortar. *Materials and structures*, 46(4), 587-605.
35. Feys, D., Wallevik, J. E., Yahia, A., Khayat, K. H., & Wallevik, O. H. (2013). Extension of the Reiner–Riwlin equation to determine modified Bingham parameters measured in coaxial cylinders rheometers. *Materials and structures*, 46(1-2), 289-311.
36. Feys, D., Asghari, A., Ghafari, E., Hernandez, A. M. L., Van Der Vurst, F., & De Schutter, G. (2014). Influence of Mixing Procedure on Robustness of Self-Consolidating Concrete (No. NUTC R333).
37. Mewis, J. (2002). Shear thickening effects in concentrated suspensions. In *Structure and Dynamics of Polymer and Colloidal Systems* (pp. 333-362). Springer Netherlands.

38. Mewis, J., & Wagner, N. J. (2012). Colloidal suspension rheology. Cambridge University Press.
39. Ding, J., Tracey, P., Li, W., Peng, G., Whitten, P. G., & Wallace, G. G. (2013). Review on Shear Thickening Fluids and Applications. Textiles and Light Industrial Science and Technology.
40. Emborg, M., & Hedin, C. (1999). Production of self-compacting concrete for civil engineering: Case studies. In International RILEM symposium on self-compacting concrete (pp. 733-742).
41. Khayat, K. H., Hu, C., & Monty, H. (1999). Stability of self-consolidating concrete, advantages, and potential applications. In Self-Compacting Concrete: Proceedings of the First International RILEM Symposium (pp. 143-152).
42. Naji, S., Hwang, S. D., & Khayat, K. H. (2011). Robustness of self-consolidating concrete incorporating different viscosity-enhancing admixtures. *ACI materials journal*, 108(4).
43. Nunes, S., Figueiras, H., Oliveira, P. M., Coutinho, J. S., & Figueiras, J. (2006). A methodology to assess robustness of SCC mixtures. *Cement and Concrete Research*, 36(12), 2115-2122.
44. Domone, P. L. (2006). Self-compacting concrete: An analysis of 11 years of case studies. *Cement and Concrete Composites*, 28(2), 197-208.
45. Bonen, D., Deshpande, Y., Olek, J., Shen, L., Struble, L., Lange, D., & Khayat, K. (2007). Robustness of self-consolidating concrete. In G. De Schutter, & V. Boel (Eds.), *Proceedings of the Fifth International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete* (pp. 33-42).

46. Shen, L., Struble, L., & Lange, D. (2007). New method for measuring static segregation of self-consolidating concrete. *Journal of Testing and Evaluation*, 35(3), 303.
47. Billberg, P., & Westerholm, M. (2008). Robustness of fresh VMA-modified SCC to varying aggregate moisture. *Nordic Concrete Research*, 38(2), 103-119.
48. Rigueira, J. W., García-Taengua, E., & Serna-Ros, P. (2009). Self-consolidating concrete robustness in continuous production regarding fresh and hardened state properties. *ACI Materials Journal*, 106(3).
49. Georgiadis, A. S., Sideris, K. K., & Anagnostopoulos, N. S. (2009). Properties of SCC produced with limestone filler or viscosity modifying admixture. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 22(4), 352-360.
50. Kwan, A. K., & Ng, I. Y. (2010). Improving performance and robustness of SCC by adding supplementary cementitious materials. *Construction and Building Materials*, 24(11), 2260-2266.
51. Chowdhury, S., & Basu, P. C. (2010). New Methodology to proportion self-consolidating concrete with high-volume fly ash. *ACI Materials Journal*, 107(3).
52. Frunz, L., Lootens, D., Flatt, R. J., Wombacher, F., & Velten, U. (2010). Smart Polycarboxylate Design for SCC in Precast Applications. In *Design, Production and Placement of Self-Consolidating Concrete* (pp. 53-63). Springer Netherlands.
53. Simonsson, P., & Emborg, M. (2011). Robust self-compacting concrete for bridge construction. *Nordic Concrete Research*, 2011(44).
54. Nunes, S., Oliveira, P. M., Coutinho, J. S., & Figueiras, J. (2011). Rheological characterization of SCC mortars and pastes with changes induced by cement delivery. *Cement and Concrete Composites*, 33(1), 103-115.

55. Nunes, S., Milheiro-Oliveira, P., Coutinho, J. S., & Figueiras, J. (2012). Robust SCC mixes through mix design. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 25(2), 183-193.
56. García, L., Valcuende, M., Balasch, S., & Fernández-LLebrez, J. (2012). Study of robustness of self-compacting concretes made with low fines content. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 25(4), 497-503.
57. Shen, L., Jovein, H. B., Shen, S., & Li, M. (2014). Effects of Aggregate Properties and Concrete Rheology on Stability Robustness of Self-Consolidating Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27(5), 04014159.
58. Van Der Vurst, F., & De Schutter, G. (2014). Improving the robustness of fresh self-compacting concrete using small quantities of fine additions. In *3rd International Symposium on Design, Performance and Use of Self-Consolidating Concrete (SCC-2014)* (pp. 195-204). RILEM Publications SARL.
59. Ghoddousi, P., & Salehi, A. M. (2015). Effect of mix proportion on robustness of self-compacting concrete. *Građevinar*, 67(01.), 1-9.
60. Van Der Vurst, F., Grünewald, S., & De Schutter, G. (2015). The Impact of VMA on the Rheology, Thixotropy and Robustness of Self-compacting Mortars. In *Calcined Clays for Sustainable Concrete* (pp. 159-167). Springer Netherlands.
61. ASTM C150 / C150M-09, (2009) Standard Specification for Portland Cement, ASTM International, West Conshohocken, PA.
62. NMX-C-414-ONNCCE-1999 (1999) "Industria de la construcción – cementos hidráulicos – especiaciones y métodos de prueba"
63. Gołaszewski, J. (2008). Influence of cement properties on rheology of fresh cement mortars without and with superplasticizer. *Architecture Civil Engineering Environment*, 1(4), 49-66.

64. Grzeszczyk, S. & Kucharska, L. (1992), Rheology of fresh cement and concrete. (ed. P.F.G. Banfill), E&FN Spon, London, p. 315-322.
65. Thomas, M. D. A. (2007) "Optimizing the use of fly ash in concrete". PCA IS548. Portland Cement Association.
66. Fraay, A. L. A., Bijen, J. M., & De Haan, Y. M. (1989). The reaction of fly ash in concrete a critical examination. Cement and concrete research, 19(2), 235-246.
67. Khurana, R., & Saccone, R. (2001). Fly ash in self-compacting concrete. ACI Special Publication, 199.
68. Edamatsu, Y., Nishida, N., & Ouchi, M. (1999). A rational mix-design method for self-compacting concrete considering interaction between coarse aggregate and mortar particles. In Proceedings of the First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (pp. 309-320).
69. Khayat, K. H., & Guizani, Z. (1997). Use of viscosity-modifying admixture to enhance stability of fluid concrete. ACI Materials Journal, 94(4).
70. Khayat, K. H. (1998). Use of viscosity-modifying admixture to reduce top-bar effect of anchored bars cast with fluid concrete. ACI Materials Journal, 95(2).
71. Mehta, P.K. (2004). High performance, high volume fly ash concrete for sustainable development. In: Proceedings of the International Workshop on Sustainable Development and Concrete Technology, University of California, Berkeley, USA.
72. ASTM C618-08a (2008), Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA.
73. Chindaprasirt, P., Jaturapitakkul, C., & Sinsiri, T. (2007). Effect of fly ash fineness on microstructure of blended cement paste. Construction and Building Materials, 21(7), 1534-1541

74. Ramezaniapour, A. A. (2014), Cement Replacement Materials: Properties, Durability, Sustainability, chapter 2, p 73. Springer-Verlag Berlin Heidelberg
75. NMX-C-111-ONNCCE-2004 (2004) "Industria de la construcción – agregados para concreto hidráulico – especificaciones y métodos de prueba"
76. Khaleel, O. R., Al-Mishhadani, S. A., & Razak, H. A. (2011). The effect of coarse aggregate on fresh and hardened properties of self-compacting concrete (SCC). *Procedia Engineering*, 14, 805-813
77. Ho, D. W. S., Sheinn, A. M. M., Ng, C. C., & Tam, C. T. (2002). The use of quarry dust for SCC applications. *Cement and Concrete Research*, 32(4), 505-511.
78. Quiroga, P. N., Ahn, N., & Fowler, D. W. (2006). Concrete mixtures with high microfines. *ACI materials journal*, 103(4).
79. Nanthagopalan, P., & Santhanam, M. (2011). Fresh and hardened properties of self-compacting concrete produced with manufactured sand. *Cement and Concrete Composites*, 33(3), 353-358.
80. ASTM C494M-10 (2010). Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete. ASTM International, West Conshohocken, PA.
81. ASTM C188-09 (2009). Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement. ASTM International, West Conshohocken, PA.
82. ASTM C311-07 (2007). Standard Test Methods for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for Use in Portland-Cement Concrete. ASTM International, West Conshohocken, PA
83. ASTM C128-07a. (2007). Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate. ASTM International, West Conshohocken, PA

84. ASTM C127-07. (2007). Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate. ASTM International, West Conshohocken, PA
85. ASTM C33M-08. (2008). Standard Specification for Concrete Aggregates. ASTM International, West Conshohocken, PA
86. Koehler, E. P., & Fowler, D. W. (2007). Inspection manual for self-consolidating concrete in precast members (No. 0-5134-P1). Center for Transportation Research, University of Texas at Austin.
87. ASTM C1611 / C1611M-09b. (2009). Standard Test Method for Slump Flow of Self-Consolidating Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA.
88. RMCAO. (2009). Best Practices Guidelines for Self-Consolidating Concrete. Appendix A. Ontario, Canada.
89. ASTM C1621 / C1621M-09b. (2009). Standard Test Method for Passing Ability of Self-Consolidating Concrete by J-Ring, ASTM International, West Conshohocken, PA.
90. Benaicha, M., Jalbaud, O., Alaoui, A.H. & Burtschell, Y. (2013). Correlation between viscosity and V-funnel flow time. International Journal of Advanced Technology & Engineering Research, 3(1), 103–108.
91. ASTM C138 / C138M-09 (2009). Standard Test Method for Density (Unit Weight), Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA.
92. ASTM C231 / C231M-09b (2009). Standard Test Method for Air Content of Freshly Mixed Concrete by the Pressure Method, ASTM International, West Conshohocken, PA.

93. ASTM C1610 / C1610M-14 (2014). Standard Test Method for Static Segregation of Self-Consolidating Concrete Using Column Technique, ASTM International, West Conshohocken, PA.
94. ASTM C1698-09 (2009), Standard Test Method for Autogenous Strain of Cement Paste and Mortar, ASTM International, West Conshohocken, PA.
95. ASTM C31 / C31M-09 (2009). Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Field, ASTM International, West Conshohocken, PA.
96. ACI comité 318. (2011). Requisitos de reglamento para concreto estructural. Farmington Hills, MI: ACI 318S-11.
97. Chancey, R. T. (2008). Characterization of crystalline and amorphous phases and respective reactivities in a Class F fly ash. PhD dissertation, University of Texas at Austin, Austin, TX, USA.
98. Fan, M., & Brown, R. C. (2001). Comparison of the loss-on-ignition and thermogravimetric analysis techniques in measuring unburned carbon in coal fly ash. *Energy & fuels*, 15(6), 1414-1417.
99. ASTM C618a-08. (2008). Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. ASTM International, West Conshohocken, PA.
100. Hunger, M., & Brouwers, H. J. H. (2008). Natural stone waste powders applied to SCC mix design. *Restoration of Buildings and Monuments*, 14(2), 131-140.
101. Puertas, F., Santos, H., Palacios, M., & Martínez-Ramírez, S. (2005). Polycarboxylate superplasticiser admixtures: effect on hydration, microstructure and rheological behaviour in cement pastes. *Advances in Cement Research*, 17(2), 77-89.

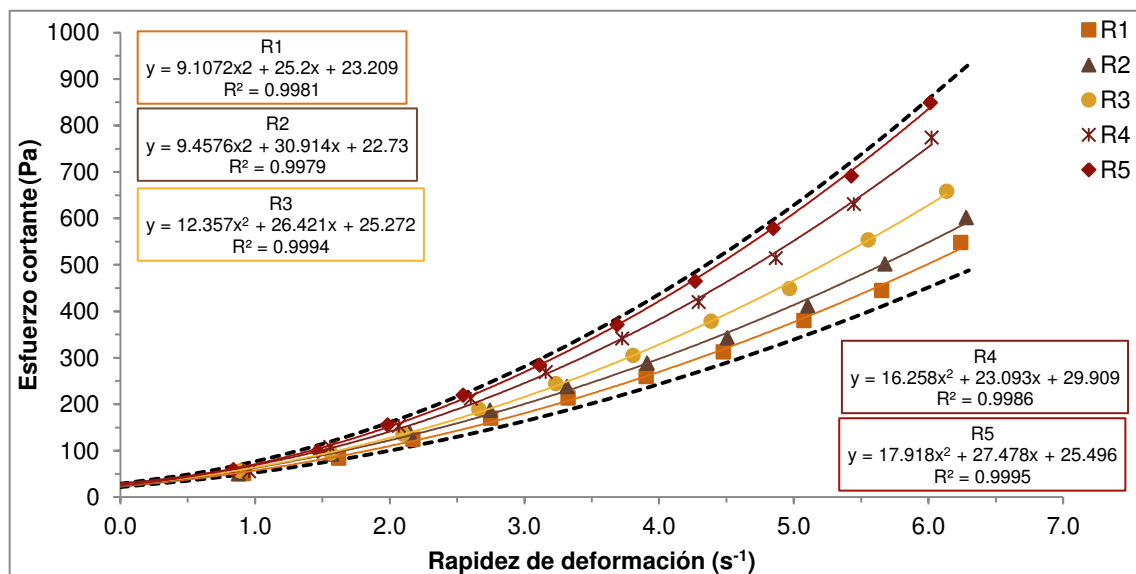
102. Zhang, M. H., Sisomphon, K., Ng, T. S., & Sun, D. J. (2010). Effect of superplasticizers on workability retention and initial setting time of cement pastes. *Construction and Building Materials*, 24(9), 1700-1707.
103. Khayat, K., & Mitchell, D. (2009). Self-consolidating concrete for precast, prestressed concrete bridge elements (Vol. 628). Transportation Research Board.
104. Utsi, S., Emborg, M., & Carlswärd, J. (2003). Relation between workability and rheological parameters. In O. Wallevik, & I. Nielsson (Eds.), *Third international RILEM symposium, RILEM Pub. PRO* (Vol. 33, pp. 154-164).
105. Tregger, N., Gregori, A., Ferrara, L., & Shah, S. (2012). Correlating dynamic segregation of self-consolidating concrete to the slump-flow test. *Construction and Building Materials*, 28(1), 499-505.
106. Shen, L., Struble, L., & Lange, D. (2009). Modeling static segregation of self-consolidating concrete. *ACI Materials Journal*, 106(4).
107. Kostrzanowska-Siedlarz, A., & Gołaszewski, J. (2015). Rheological properties and the air content in fresh concrete for self compacting high performance concrete. *Construction and Building Materials*, 94, 555-564.
108. Łaźniewska-Piekarczyk, B. (2014). The methodology for assessing the impact of new generation superplasticizers on air content in self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 53, 488-502.
109. Szwabowski, J., & Łaźniewska-Piekarczyk, B. (2008). The increase of air content in SCC mixes under the influence of carboxylate superplasticizer. *Cement Wapno Beton*, 13, 205-215.
110. Szwabowski, J., & Łaźniewska-Piekarczyk, B. (2009). Air-entrainment problem in self-compacting concrete. *Journal of Civil Engineering and Management*, 15(2), 137-147.

111. El-Gamal, S. M., Al-Nowaiser, F. M., & Al-Baity, A. O. (2012). Effect of superplasticizers on the hydration kinetic and mechanical properties of Portland cement pastes. *Journal of Advanced Research*, 3(2), 119-124.
112. Roussel, N., Ovarlez, G., Garrault, S., & Brumaud, C. (2012). The origins of thixotropy of fresh cement pastes. *Cement and Concrete Research*, 42(1), 148-157.
113. Koehler, E., Jeknavorian, A., & Klaus, S. (2010). Selecting Admixtures to Achieve Application-Required Rheology. In *Design, Production and Placement of Self-Consolidating Concrete* (pp. 79-88). Springer Netherlands.
114. Lowke, D., Kränkel, T., Gehlen, C., & Schießl, P. (2010). Effect of cement on superplasticizer adsorption, yield stress, thixotropy and segregation resistance. In *Design, Production and Placement of Self-Consolidating Concrete* (pp. 91-101). Springer Netherlands.
115. Hu, J. (2005). A study of effects of aggregate on concrete rheology. PhD dissertation. Iowa State University, Ames, Iowa, USA.
116. Wagner, N. J., & Brady, J. F. (2009). Shear thickening in colloidal dispersions. *Physics Today*, 62(10), 27-32.
117. Barnes, H. A. (1989). Shear-Thickening ("Dilatancy") in Suspensions of Nonaggregating Solid Particles Dispersed in Newtonian Liquids. *Journal of Rheology* (1978-present), 33(2), 329-366.
118. Holt, E. E. (2001). Early age autogenous shrinkage of concrete (Vol. 446). Technical Research Centre of Finland.
119. Bentz, D. P., & Peltz, M. A. (2008). Reducing thermal and autogenous shrinkage contributions to early-age cracking. *ACI Materials Journal*, 105(4).

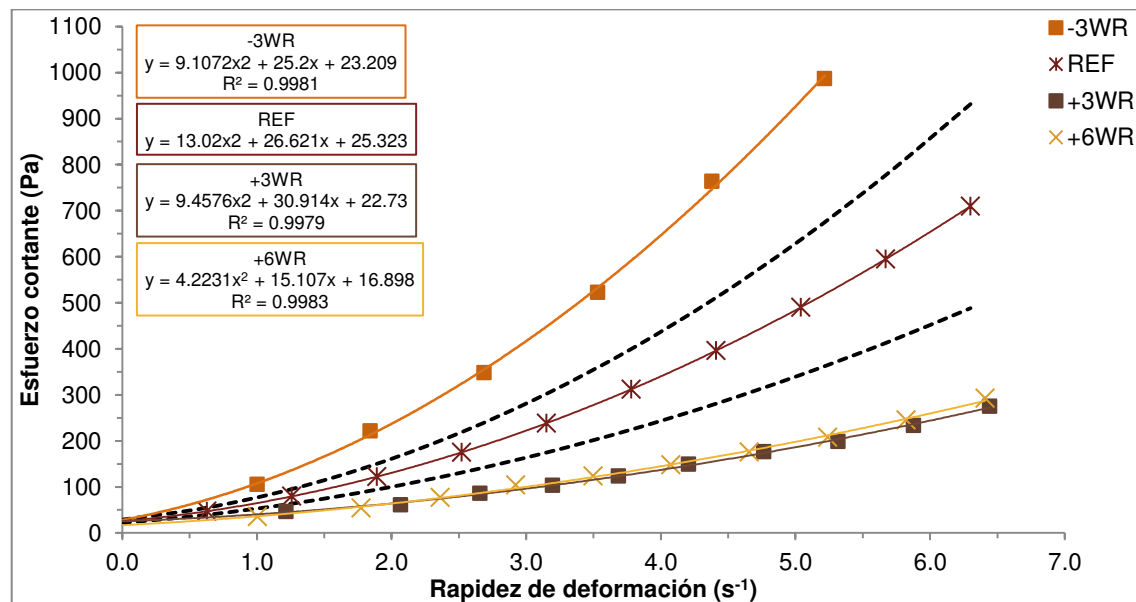
120. Kostrzanowska-Siedlarz, Aleksandra, and Jacek Gołaszewski. "Rheological properties and the air content in fresh concrete for self compacting high performance concrete." *Construction and Building Materials* 94 (2015): 555-564.
121. Khayat, K. H., & De Schutter, G. (2014). *Mechanical Properties of Self-Compacting Concrete*. RILEM State-of-the-art reports, Volume 14. p. 32.

Anexo 1

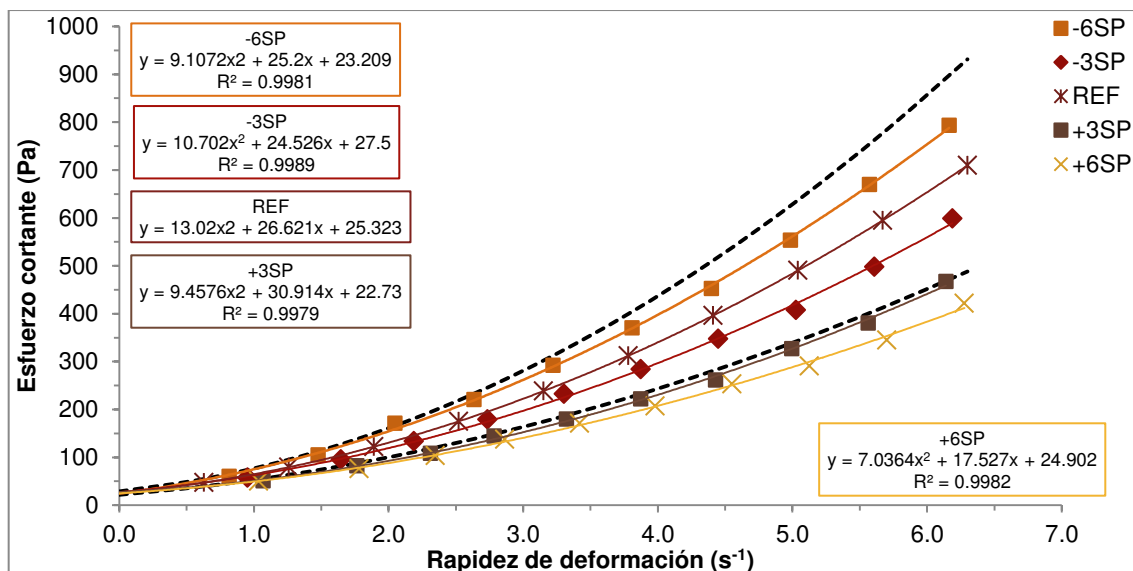
Reogramas



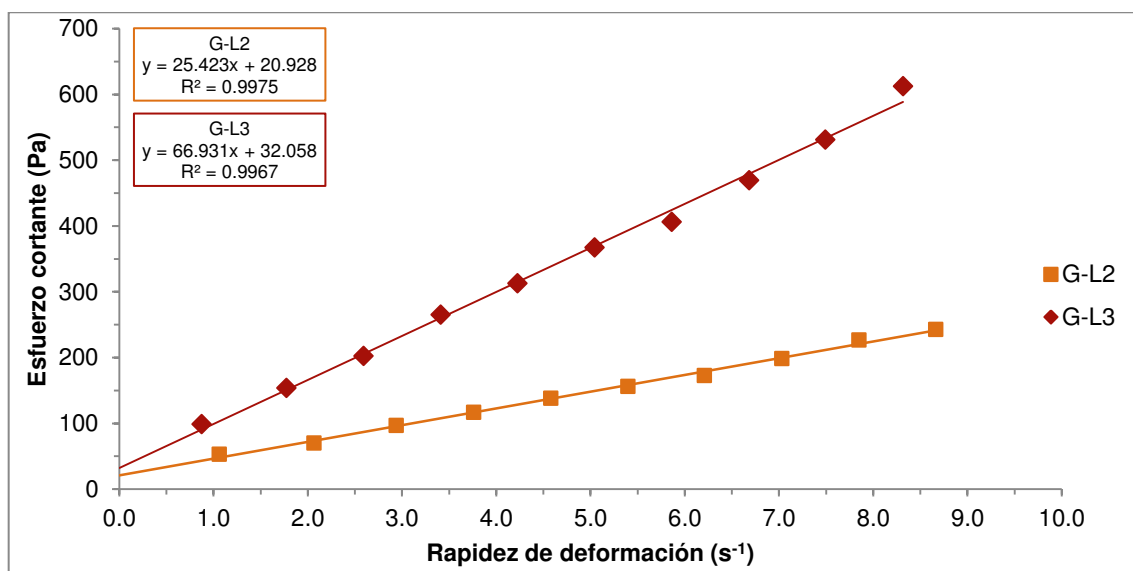
Anexo 1.1 Repetibilidad de las propiedades reológicas del CAC de referencia.



Anexo 1.2 Efecto de las variaciones de agua en las propiedades reológicas de la mezcla de referencia



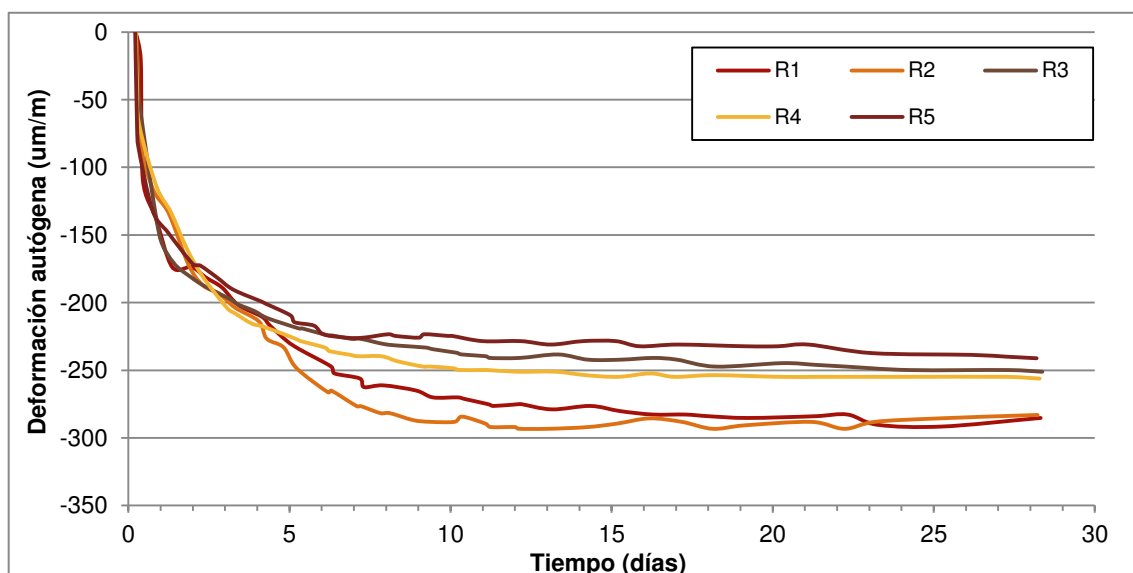
Anexo 1.3 Efecto de las variaciones de superfluidificante en las propiedades reológicas de la mezcla de referencia



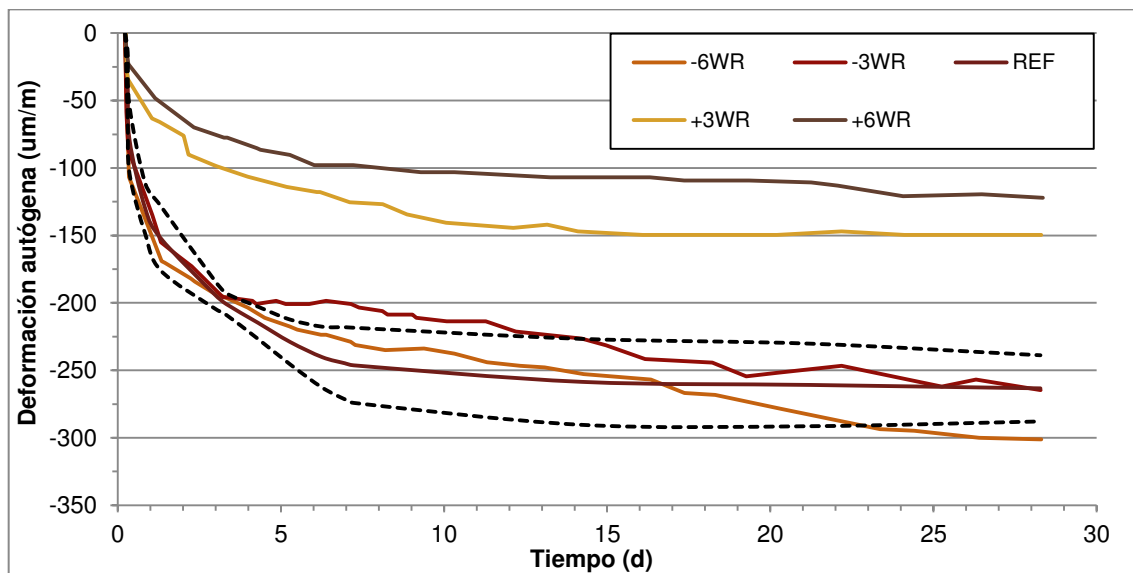
Anexo 1.4 Efecto de las variaciones de la granulometría del agregado fino en las propiedades reológicas de la mezcla de referencia

Anexo 2

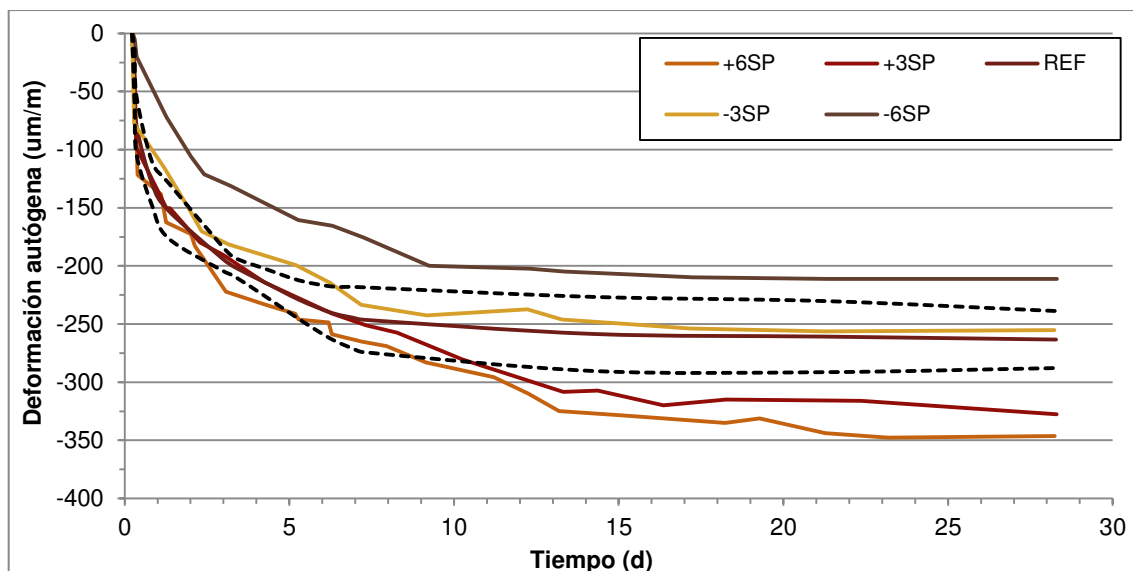
Deformación autógena



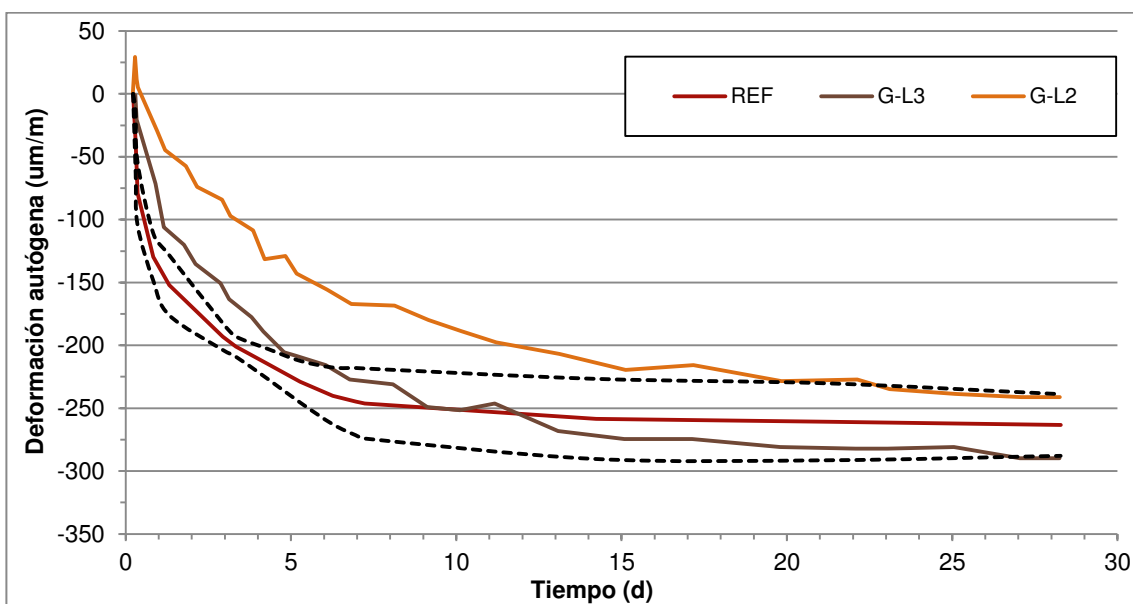
Anexo 2.1 Repetibilidad de la deformación autógena del CAC de referencia.



Anexo 2.2 Efecto de las variaciones de agua en la deformación autógena



Anexo 2.3 Efecto de las variaciones de superfluidificante en la deformación autógena



Anexo 2.4 Efecto de las variaciones granulometría del agregado fino en la deformación autógena

Resumen autobiográfico

Daniel Gálvez Moreno

Candidato para el Grado de Maestro en Ciencias con orientación a Materiales de Construcción

Campo de estudio: Materiales de construcción.

Biografía: Nacido en la ciudad de Los Mochis, Sinaloa, el 31 de octubre de 1988, hijo de José Luis Gálvez Cerecer y Patricia Moreno Palacios.

Educación: Egresado con mención honorífica de la Universidad Autónoma de Sinaloa, con el grado de Licenciado en Ingeniería Civil, en el año 2011. Durante sus estudios de licenciatura, en el año 2009 participó en la XIX edición del verano de investigación científica de la Academia Mexicana de Ciencias bajo la asesoría del Dr. Alejandro Durán Herrera en la Universidad Autónoma de Nuevo León. En el año 2010, participó en la IV edición del Verano Internacional de la Universidad Autónoma de Sinaloa bajo la asesoría de Dale P. Bentz en el *National Institute of Standards and Technology*.

Experiencia profesional: Auditor de obra pública adscrito a la Unidad de Transparencia y Rendición de Cuentas del Gobierno del Estado de Sinaloa desde mayo de 2011 hasta febrero de 2013. Ha asistido a los cursos: “*Fundamentals of Rheology and applications on cement-based materials*” en la *Missouri University of Science and Technology* (julio de 2014). “*Durability of Concrete*” impartido por el RILEM en Monterrey, N. L., dentro del cual ganó el segundo lugar por el mejor contenido técnico con el poster titulado “*Influence of Fly Ash on the rheological properties of self-consolidating concrete*” (agosto de 2014). Participó como ponente en la convención “*ACI Spring 2015*” en la sesión técnica “*Undergraduate Research on Concrete Materials, Structural Design, or Construction*” con el tema “*Strenght Activity Index assessment for puzzolans based on a constant volumen approach*” (abril de 2015).

Certificaciones: Técnico ACI grado I en pruebas al concreto en estado fresco, por segunda vez. Vigencia actual de la certificación: agosto/2015 – agosto/2020).

Idiomas: Español e inglés.