

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL



CONCRETO AUTOCOMPACTABLE: PROPUESTA PARA EL DISEÑO DE
MEZCLA. BENEFICIOS TÉCNICOS Y CONSIDERACIONES BÁSICAS
PARA SU IMPLEMENTACIÓN EN EL SALVADOR.

PRESENTADO POR:

SELMA IDALIA GONZÁLEZ MORÁN
ALBAMARIA LANDAVERDE MARTÍNEZ
CLAUDIA IVELISSE ROMERO LÓPEZ

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

INGENIERA CIVIL

CIUDAD UNIVERSITARIA, JUNIO DE 2005

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTORA :

Dra. María Isabel Rodríguez

SECRETARIA GENERAL :

Licda. Alicia Margarita Rivas de Recinos

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

DECANO :

Ing. Mario Roberto Nieto Lovo

SECRETARIO :

Ing. Oscar Eduardo Marroquín Hernández

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

DIRECTOR :

Ing. Luis Rodolfo Nosiglia Durán

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL**

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

INGENIERA CIVIL

Título :

**CONCRETO AUTOCOMPACTABLE: PROPUESTA PARA EL DISEÑO DE
MEZCLA. BENEFICIOS TÉCNICOS Y CONSIDERACIONES BÁSICAS PARA SU
IMPLEMENTACIÓN EN EL SALVADOR.**

Presentado por :

**SELMA IDALIA GONZÁLEZ MORÁN
ALBAMARIA LANDAVERDE MARTÍNEZ
CLAUDIA IVELISSE ROMERO LÓPEZ**

Trabajo de Graduación aprobado por :

Docente Director :

ING. LESLY EMIDALIA MENDOZA MEJÍA

Docente Director Externo :

ING. MAURICIO ISAÍAS VELÁSQUEZ PAZ

Docente Director Externo :

ING. PORFIRIO LAGOS VENTURA

San Salvador, Junio de 2005

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docentes Directores :

ING. LESLY EMIDALIA MENDOZA MEJÍA

ING. MAURICIO ISAÍAS VELÁSQUEZ PAZ

ING. PORFIRIO LAGOS VENTURA

AGRADECIMIENTOS

Queremos agradecer de manera especial todas las contribuciones y apoyo técnico efectuado por Profesionales y Miembros de Instituciones que de manera desinteresada colaboraron para la culminación del presente Trabajo de Graduación:

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
CATEDRÁTICOS DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
DOCENTES DIRECTORES DEL PRESENTE TRABAJO DE GRADUACIÓN

(Ing. Lesly Emidalia Mendoza Mejía)

(Ing. Mauricio Isaías Velásquez Paz)

(Ing. Porfirio Lagos Ventura)

MIEMBROS DE LA DIVISIÓN DE GEOTECNIA DE LA UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
PERSONAL DEL LABORATORIO DE SUELOS Y MATERIALES “MARIO ÁNGEL GUZMÁN URBINA”
PERSONAL ADMINISTRATIVO DE LA ESCUELA DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

CONCRETERA SALVADOREÑA S. A. de C. V.

(Ing. José Guillermo Flores)

(Personal de Laboratorio. Plantel Central)

CEMENTO DE EL SALVADOR S. A. de C.V. (CESSA)

(Ing. Hugo Edgardo Bonilla Hernández)

INSTITUTO SALVADOREÑO DEL CEMENTO Y EL CONCRETO (ISCYC)

(Ing. Rafael Alejandro González Magaña)

(Ing. Carlos Antonio Quintanilla Rodríguez)

ADITIVOS DE EL SALVADOR

(Ing. Alfredo Sagastume Henríquez)

INTERNATIONAL MATERIALS INDUSTRIES, L.L.C. (IMI)

Y

ROBERTO ARMANDO ZAVALA

Selma Idalia, Claudia Ivelisse y Albamaria

DEDICATORIA

A **Dios Todopoderoso** por haber iluminado mi vida y haberme mostrado tu amor y tu misericordia, por haber sido mi fuerza en momentos de debilidad y mi esperanza en tiempos de angustia te agradezco a Tí y a tu hijo el **Señor Jesucristo** por estar a mi lado en cada paso de este camino.

A mi hija **Nicole** porque le diste a mi vida la razón de dar un paso cada día y el impulso para no desfallecer, porque te robe el tiempo para estar juntas y darte mis cuidados y mi amor.

A mi compañero de vida **Roberto** por ser mi apoyo y mi consuelo cuando estuviste a mi lado, por tu amor, tu paciencia y tu confianza y por tu ayuda incondicional gracias.

A mis padres **Martha Alicia y Salvador** porque han estado a mi lado a lo largo de mi vida y han sido mi apoyo, porque nunca perdieron su confianza en mi, porque se gozaron en mis triunfos y se entristecieron en mis fracasos y me dieron fuerzas para continuar cada día gracias.

A mis hermanos **Alfredo, Enrique, Williams y Nery Odely** por su ayuda incondicional en su momento, porque mis triunfos han sido los suyos y mis alegrías sus alegrías gracias.

A mis compañeras **Claudia y Albamaria** por el esfuerzo que cada una de ustedes incluyo en este trabajo, por su comprensión y su apoyo para mi, se que cada momento compartido no solo nos permitió ser compañeras sino amigas, por su confianza y su cariño gracias.

Selma.

DEDICATORIA

“A Dios doy gracias por escucharme y manifestarse en todos los momentos de mi vida”

Agradezco la colaboración durante mi carrera y la realización de este trabajo muy especialmente a Mi Familia:

Mi Padre: **Juan José Landaverde Erazo**

Mi Madre: **Dora Consuelo Martínez de Landaverde**

Mi Hermana: **Issa Iveth Landaverde Martínez**

Mis Hermanos: **Juan Carlos y José Francisco, Landaverde Martínez**

Agradezco el aporte intelectual de:

Los Catedráticos de la Universidad de El Salvador

Ing. Lesly Mendoza Mejía. (Muy especialmente)

Agradezco a mis amigas y compañeras de Tesis, sin olvidar hacer mención a sus respectivas Familias:

Claudia Ivelisse Romero López

Selma Idalia Gonzáles Morán

Y comparto esta satisfacción con todas aquellas personas que me brindaron su amistad como apoyo.

Albamaría.

DEDICATORIA

A **Jesús**, mi gran maestro, porque con tu amor y enseñanza has trazado un camino en el cual me has hecho ver que la perseverancia y responsabilidad son fruto de los dones dados por Dios.

A **María**, auxilio en todo momento, has sido siempre esa luz para que nunca pierda el sentido de este camino. Gracias por guiar cada uno de mis pasos.

A mi madre, **Cony**, que con tanto amor, fortaleza y oración, me has sostenido como pilar fuerte, gracias mamá por enseñarme a amar a Dios y por todos estos años de educación, has sido el mejor ejemplo de perseverancia, el apoyo más grande e incondicional.

A mi padre, **Ricardo**, por enseñarme la disciplina y el trabajo, llevo en mi alma tus palabras de enseñanza. Papá, envió una mirada al cielo y con una oración te doy por siempre las gracias.

A mis hermanas, **Karla y Florence**, por ser amigas, consejeras y apoyo. Gracias por estar incondicionalmente en los momentos difíciles y celebrar con tanto cariño mis triunfos y anhelos, sé que siempre estoy al “centro” de ustedes.

A **Carlos**, mi esposo, por hacer de mis sueños los tuyos, por compartir con tanta dulzura y paciencia todos mis proyectos. Gracias por ser mi amigo y compañero. Pero sobre todo gracias por llevar a cabo conmigo el mejor de los proyectos: ser familia.

A mi pequeña, te siento y te doy gracias porque ahora eres la razón de todo lo que hago.

A mis compañeras **Albamaría y Selma**, valoro cada esfuerzo que juntas colocamos en este trabajo. Alba, gracias por compartir tantos momentos, he ganado una amiga. Selma gracias por fortalecer nuestra amistad. A ambas gracias por todo su apoyo.

Y a todos aquellos que no menciono, que de alguna manera directa o indirecta contribuyeron para que este paso de mi vida se lleve a cabo; les doy eternas gracias.

Claudia.

ÍNDICE GENERAL

CONTENIDO	PÁG.
- RESUMEN GENERAL	28
CAPÍTULO I: GENERALIDADES DEL PROYECTO	30
1.1 INTRODUCCIÓN	31
1.2 ANTECEDENTES	32
1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	36
1.4 OBJETIVOS	38
1.5 ALCANCES Y LIMITACIONES	39
1.6 JUSTIFICACIÓN	41
CAPÍTULO II: TECNOLOGÍA DEL CONCRETO. MARCO CONCEPTUAL	42
2.1 INTRODUCCIÓN	43
2.2 COMPONENTES DEL CONCRETO	44
2.2.1 CEMENTANTES	44
2.2.1.1 CEMENTOS CON CLINKER PÓRTLAND	45
2.2.1.2 CEMENTOS ESPECIALES	47
2.2.1.3 CARACTERÍSTICAS ESENCIALES DEL CEMENTO	48
2.2.2 AGREGADOS	52
2.2.2.1 GRANULOMETRÍA	53
2.2.2.2 MATERIALES CONTAMINANTES	54
2.2.2.3 DENSIDAD (GRAVEDAD ESPECÍFICA O PESO ESPECÍFICO)	54

2.2.2.4	SANIDAD	55
2.2.2.5	ABSORCIÓN Y POROSIDAD	55
2.2.2.6	FORMA Y TEXTURA SUPERFICIAL DE LAS PARTÍCULAS	55
2.2.2.7	TAMAÑO MÁXIMO DE LAS PARTÍCULAS	56
2.2.2.8	MÓDULO DE ELASTICIDAD	56
2.2.2.9	RESISTENCIA A LA ABRASIÓN	56
2.2.3	AGUA	57
2.2.4	ADITIVOS	58
2.2.5	ADICIONES	60
2.3	CONCRETO EN ESTADO FRESCO	60
2.3.1	ESTADO FRESCO DEL CONCRETO	61
2.3.1.1	LIMITES DEL ESTADO FRESCO DEL CONCRETO	61
2.3.1.2	ATRIBUTOS DEL CONCRETO FRESCO	62
2.3.1.3	REOLOGÍA DEL CONCRETO EN ESTADO FRESCO	63
2.3.1.4	ASPECTOS QUE DEFINEN LA TRABAJABILIDAD DEL CONCRETO FRESCO	70
2.3.1.5	MEDIOS PARA EVALUAR LA TRABAJABILIDAD DEL CONCRETO FRESCO	70
2.3.2	ETAPA DE FRAGUADO DEL CONCRETO	80
2.3.2.1	ETAPAS DEL PROCESO DE FRAGUADO	80
2.3.2.2	EVOLUCIÓN DEL FRAGUADO	80
2.3.3	ENDURECIMIENTO DEL CONCRETO	82
2.4	CONCRETO EN ESTADO ENDURECIDO	83
2.4.1	DEFINICIÓN Y PROPIEDADES DEL CONCRETO ENDURECIDO	83
2.4.2	RESISTENCIA MECÁNICA	85

2.4.3	DEFORMABILIDAD BAJO CARGA	92
2.4.4	ADHERENCIA CON EL ACERO DE REFUERZO	94
2.4.5	CAMBIOS VOLUMÉTRICOS	95
2.4.6	PERMEABILIDAD AL AGUA	96
2.5	MEZCLADO, TRANSPORTE Y BOMBEO DEL CONCRETO	97
2.6	PUESTA EN OBRA DEL CONCRETO	98
2.7	TIPOS ESPECIALES DE CONCRETO	99
2.7.1	CONCRETO CELULAR	100
2.7.2	CONCRETO LANZADO	101
2.7.3	CONCRETO BAJO AGUA	101
CAPÍTULO III: CONCRETO AUTOCOMPACTABLE		102
3.1	INTRODUCCIÓN	103
3.2	GENERALIDADES DEL CONCRETO AUTOCOMPACTABLE	104
3.2.1	EVOLUCIÓN Y DESARROLLO	104
3.2.2	CARACTERÍSTICAS	109
3.2.3	APLICACIONES	110
3.2.4	VENTAJAS Y LIMITACIONES	111
3.3	COMPONENTES DEL CONCRETO AUTOCOMPACTABLE	113
3.3.1	CEMENTANTES	114
3.3.2	AGREGADOS	114
3.3.3	AGUA	116
3.3.4	ADITIVOS	117

3.3.5	ADICIONES	121
3.4	CONCRETO AUTOCOMPACTABLE EN ESTADO FRESCO	123
3.4.1	REOLOGÍA DEL CONCRETO AUTOCOMPACTABLE EN ESTADO FRESCO	124
3.4.2	LA TRABAJABILIDAD DEL CONCRETO AUTOCOMPACTABLE	128
3.4.3	MÉTODOS DE ENSAYO PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL CONCRETO AUTOCOMPACTABLE	134
3.5	CONSIDERACIONES BÁSICAS EN EL DISEÑO DE MEZCLA DE CONCRETO AUTOCOMPACTABLE	162
3.5.1	GENERALIDADES SOBRE EL PROCEDIMIENTO PARA LA PROPORCIÓN DE MEZCLA	162
3.5.2	PROCEDIMIENTOS MAS UTILIZADOS PARA EL DISEÑO DE MEZCLA DE CONCRETO AUTOCOMPACTABLE	165
3.5.3	COMPOSICIÓN DE LA MEZCLA	173
3.5.4	DISEÑO DE LA MEZCLA	174
3.5.5	AJUSTE DE LA MEZCLA	175
3.5.6	COMPROBACIÓN ANTES DE LA COLOCACIÓN	176
3.6	MEZCLADO, TRANSPORTE Y BOMBEO DEL CONCRETO AUTOCOMPACTABLE	178
3.6.1	GENERALIDADES	178
3.6.2	EFFECTOS DEL MEZCLADO, TRANSPORTE Y BOMBEO EN LAS PROPIEDADES DEL CONCRETO AUTOCOMPACTABLE EN ESTADO FRESCO	178
3.6.3	MEZCLADO	179
3.6.4	TRANSPORTE	189
3.6.5	BOMBEO	194
3.7	PUESTA EN OBRA DEL CONCRETO AUTOCOMPACTABLE	196
3.8	CONCRETO AUTOCOMPACTABLE EN ESTADO ENDURECIDO	202
3.8.1	PROPIEDADES DEL CONCRETO AUTOCOMPACTABLE EN ESTADO ENDURECIDO	203

3.8.1.1	RESISTENCIA MECÁNICA	203
3.8.1.2	RESISTENCIA A LA FLEXIÓN	205
3.8.1.3	DEFORMABILIDAD BAJO CARGA	207
3.8.1.4	CONTRACCIÓN	209
3.8.1.5	RESISTENCIA GRADUAL	212
3.8.1.6	VACÍOS DE AIRE EN EL CONCRETO ENDURECIDO	213
3.8.1.7	FACTOR DE DURABILIDAD DE HIELO - DESHIELO	214
3.8.1.8	ADHERENCIA	214
3.8.1.9	UNIÓN PARA CARGAS MONOLÍTICAS	216
 CAPÍTULO IV: PROPUESTA PARA EL DISEÑO DE MEZCLA DEL CONCRETO AUTOCOMPACTABLE		221
4.1	INTRODUCCIÓN	222
4.2	DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO EXPERIMENTAL	223
4.3	CONTROL DE CALIDAD Y PRUEBAS DE LABORATORIO A LOS COMPONENTES DE LA MEZCLA	225
4.3.1	AGREGADO	226
4.3.1.1	DESCRIPCIÓN DEL AGREGADO	227
4.3.1.2	ENSAYOS REALIZADOS AL MATERIAL	228
4.3.2	CEMENTO	243
4.3.3	AGUA	243
4.3.4	ADITIVOS	243
4.4	CÁLCULO TEÓRICO EXPERIMENTAL DEL DISEÑO DE MEZCLA DE CONCRETO AUTOCOMPACTABLE	244
4.4.1	ANTECEDENTES EXTRANJEROS EN EL DISEÑO DE MEZCLA PARA CONCRETO AUTOCOMPACTABLE	245

4.4.2	PROCEDIMIENTO DE DISEÑO	247
4.4.2.1	DEFINICIÓN DEL CONTENIDO DE AIRE	248
4.4.2.2	DETERMINACIÓN DEL VOLUMEN DE AGREGADO GRUESO Y CONTENIDO DE ARENA	248
4.4.2.3	DISEÑO DE LA COMPOSICIÓN DE LA PASTA	252
4.4.2.4	DETERMINACIÓN DE LA RELACIÓN ÓPTIMA AGUA/FINOS Y LA DOSIFICACIÓN DEL SUPERPLASTIFICANTE EN EL MORTERO	258
4.4.2.5	AJUSTE EN LA MEZCLA DE CONCRETO	263
4.5	REPRODUCCIÓN DE LAS MEZCLAS ÓPTIMAS Y CONTROL DE CALIDAD DEL CONCRETO AUTOCOMPACTABLE EN ESTADO FRESCO Y ENDURECIDO	267
4.5.1	CONCRETO FRESCO	268
4.5.1.1	DOSIFICACIÓN Y MEZCLADO DEL CONCRETO	268
4.5.1.2	ENSAYOS PARA LA DETERMINACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE AUTOCOMPACTABILIDAD	268
4.5.1.3	ENSAYOS DE CONTENIDO DE AIRE, TEMPERATURA, PESO UNITARIO Y FRAGUADO DEL CONCRETO	272
4.5.2	CONCRETO ENDURECIDO	279
4.5.2.1	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN	279
4.5.2.2	RESISTENCIA A LA TENSIÓN POR FLEXIÓN	284
CAPÍTULO V: ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS		286
5.1	INTRODUCCIÓN	287
5.2	GENERALIDADES DEL TRABAJO EXPERIMENTAL	288
5.3	CONTROL DE CALIDAD Y PRUEBAS DE LABORATORIO A LOS COMPONENTES DE LA MEZCLA	289
5.3.1	AGREGADO	289
5.3.2	CEMENTO	291

5.3.3	ADITIVO	291
5.4	DISEÑO DE MEZCLA DE CONCRETO AUTOCOMPACTABLE	291
5.5	ANÁLISIS DE LA REPRODUCCIÓN DE MEZCLAS DE CONCRETO AUTOCOMPACTABLE	295
5.5.1	COMPORTAMIENTO EN ESTADO FRESCO DEL CONCRETO AUTOCOMPACTABLE	295
5.5.1.1	DOSIFICACIÓN Y MEZCLADO	295
5.5.1.2	CARACTERÍSTICAS DE AUTOCOMPACTABILIDAD Y ENSAYOS COMPLEMENTARIOS EN EL CONCRETO FRESCO	296
5.5.2	COMPORTAMIENTO EN ESTADO ENDURECIDO DEL CONCRETO AUTOCOMPACTABLE	305
5.5.2.1	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN OBTENIDA A DIFERENTES EJEMPLARES	305
5.5.2.2	RESISTENCIA A LA TENSIÓN POR FLEXIÓN	313
-	CONCLUSIONES	316
-	RECOMENDACIONES	324
-	BIBLIOGRAFÍA GENERAL	329
-	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	333
-	GLOSARIO	341
-	ANEXO A: ANÁLISIS DE CALIDAD DE LA GRAVA 3/8"	
-	ANEXO B: ANÁLISIS DE CALIDAD DE LA ARENA	
-	ANEXO C: CONTROL DE GRANULOMETRÍA Y PROPIEDADES FÍSICAS DE LA GRAVA 3/8"	
-	ANEXO D: CONTROL DE GRANULOMETRÍA Y PROPIEDADES FÍSICAS DE LA ARENA	
-	ANEXO E: CONTROL DE CALIDAD DEL CEMENTO	
-	ANEXO F: CONTROL DE CALIDAD DEL ADITIVO SIKA	
-	ANEXO G: CONTROL DE CALIDAD DEL ADITIVO IMI	

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA	TITULO	PÁG.
1	Lapsos y actividades características en los diferentes estados de un concreto convencional a temperatura normal	62
2	Representación esquemática de tres pastas con diferente concentración de cemento por unidad de volumen	65
3	Diagramas reológicos característicos de un fluido newtoniano y de un fluido de Bingham	66
4	Representación esquemática de tres mezclas de concreto con diferente concentración de agregados	68
5	Intervalos de consistencia para diferentes tipos de concreto fresco en los cuales son aplicables los procedimientos de medición de uso común	74
6	Representación esquemática de la prueba de revenimiento en mezclas de concreto fluido	75
7	Representación esquemática de tres mezclas de concreto convencional con el mismo revenimiento, pero con diferente cohesividad	75
8	Variación del revenimiento al aumentar el contenido de agua en el concreto	77
9	Influencia de la temperatura del concreto en el revenimiento y en el ajuste del requerimiento de agua de mezclado	78
10	Gráfico de las etapas de fraguado del concreto utilizando las agujas de Vicat	81
11	Representación esquemática de los procedimientos usuales para determinar la resistencia a tensión del concreto	91
12	Representación esquemática de las deformaciones de un espécimen cilíndrico	93
13	Especímenes para pruebas de adherencia de varillas por extracción, conforme al método de prueba ASTM C 234	95
14	Puente Hakashi-Kaikyo (Hakashi Straits)	107
15	Tanque LNG	108

FIGURA	TITULO	PÁG.
16	Capacidad de sangrado en función del revenimiento para concretos que no contienen aditivos (contenido de cemento en kg/m^3)	118
17	Capacidad de sangrado en función del revenimiento para concretos que contienen superplastificante. (contenido de cemento en kg/m^3)	119
18	(A) Aglomeración, (B) Dispersión de las partículas de cemento producido por el superplastificante	120
19	Flujo de Binham y flujo Newtoniano	125
20	Comportamiento de la mezcla con agua y con aditivo superplastificante	126
21	Relación entre el volumen de pasta y la relación agua/finos	130
22	Efecto del contenido de superplastificante en la fluidez y viscosidad	131
23	Comportamiento interno de la mezcla	132
24	Esfuerzo normal generado en el mortero debido a la proximidad del agregado grueso	133
25	Equipo para ensayo de flujo de asentamiento y resultado de la prueba	138
26	Caja en L	142
27	Caja en U	144
28	Vista frontal y lateral de caja de relleno	147
29	Embudo en V	149
30	Aparato para ensayo Orimet	153
31	Anillo en J utilizado conjuntamente con el flujo de asentamiento	156

FIGURA	TITULO	PÁG.
32	Modelo para el diseño de la mezcla de concreto autocompactable	162
33	Ejemplo del gráfico para la determinación de la relación agua/finos para un flujo cero	167
34	Cono de flujo y embudo V, para la determinación óptima de agua/finos y superplastificante	168
35	Ensayo para la dosificación de superplastificante utilizando el cono Marsh	170
36	Gráfica $\log(T)$ -sp/c, para la determinación del punto de saturación del superplastificante	171
37	Equipo para el ensayo mini slump	172
38	Procedimiento para el diseño de mezcla	174
39	Procedimiento para el ajuste de la mezcla	175
40	Planta de concreto tipo horizontal	180
41	Planta de concreto tipo vertical	180
42	Mezclador de tambor rotatorio	181
43	Mezclador tipo planetario	182
44	Camión concretero	183
45	Ejemplo de sucesiones de mezclas para un mezclador forzado (F) y un mezclador de gravedad (G). Basado en Figura de Takada et. al. (1998)	185
46	Ejemplo de sucesiones de mezcla en laboratorio según el Khayat et. al. (1999) y Edamatsu et. al. (1999)	185
47	Adición del superplastificante y su efecto a través del tiempo, Domone y Jin (1999)	186

FIGURA	TITULO	PÁG.
48	Ejemplos de sucesiones de mezcla para las condiciones de escala completa, de Petersson (1998)	187
49	Ejemplos de sucesiones de mezcla informadas dentro de los proyectos. A-Universidad de Paisley, B- Norrköping, C-Startboxen, D-Millenium y Frösundaport, E-Bretonneau , F-Bunol	188
50	Valores de flujo de revenimiento en planta y en sitio, producción a escala completa, Gävle Suecia, Billberg, et. al. (1999)	190
51	Ejemplo de pérdida de flujo de revenimiento	191
52	Ejemplo de pérdida del flujo de revenimiento entre la planta y el sitio	192
53	Relación entre la pérdida de presión y la proporción de descarga en la cañería de 410 m de largo y 12.5 cm de diámetro, Matabee et. al	195
54	Colocación de concreto autocompactable, a través de canaletas	197
55	Vaciado de concreto autocompactable directo mediante canastilla	198
56	Comparación del encofrado para concreto normal vrs concreto autocompactable	199
57	Método de ensayo para el total de concreto	200
58	Desarrollo de la resistencia en las mezclas	204
59	Eficiencia del cemento en el comportamiento del concreto convencional y el concreto autocompactable	205
60	Cilindros de mezclas con contenidos de fly ash, sometidos a fuerza de tensión	206
61	Módulo de elasticidad para un concreto convencional y un concreto autocompactable	208
62	Carga eléctrica (coulombs) de muestras con proporciones de mezcla diferentes	209
63	Evolución de las contracciones en el concreto	211

FIGURA	TITULO	PÁG.
64	Contracción de muestras con diferentes proporciones de mezcla	212
65	Especímen de concreto autocompactable, sometido al ensayo de adherencia entre el acero y el concreto	215
66	Máquina de prueba electromecánica	215
67	Desarrollo de la adherencia del acero sometido a cargas de tensión	216
68	Prueba de dos capas	218
69	Distribución de las muestras en el ensayo a la compresión	218
70	Distribución de las muestras en el ensayo a tensión	219
71	Carga aplicada en el medio de la capa de concreto autocompactable	219
72	Carga aplicada en el medio de la capa de concreto viejo	220
73	Carga aplicada perpendicularmente entre los dos materiales	220
74	Acopio de grava y arena utilizada en los ensayos de mezcla de concreto autocompactable	226
75	Gráfico de variación de la granulometría durante los muestreos periódicos para la grava 3/8"	231
76	Gráfico de variación de la granulometría durante los muestreos periódicos para la arena de Aguilares (Parte 1)	233
77	Gráfico de variación de la granulometría durante los muestreos periódicos para la arena de Aguilares (Parte 2)	234
78	Gráfico de variación de las propiedades físicas durante los muestreos periódicos para la grava 3/8" (Parte 1)	238
79	Gráfico de variación de las propiedades físicas durante los muestreos periódicos para la grava 3/8" (Parte 2)	239

FIGURA	TITULO	PÁG.
80	Gráfico de variación de las propiedades físicas durante los muestreos periódicos para la arena de Aguilares (Parte 1)	241
81	Gráfico de variación de las propiedades físicas durante los muestreos periódicos para la arena de Aguilares (Parte 2)	242
82	Proceso de mezclado y llenado de la grava y arena para el procedimiento experimental del esqueleto granular	250
83	Proceso de mezclado y lectura de la extensión de la pasta	253
84	Gráfico de flujo relativo vrs agua/finos	256
85	Gráfico de flujo relativo vrs agua/finos	256
86	Ensayo de fluidez y proceso de llenado y apertura del embudo en V	259
87	Proceso de mezclado en concretera de sitio, para concreto autocompactable	264
88	Ensayo de Cono Abrahams y Caja en L, para concreto autocompactable	264
89	Fluidez del concreto autocompactable en la mezcla A	270
90	Fluidez del concreto autocompactable en la mezcla B	270
91	Ensayo de caja en L realizado al concreto autocompactable	270
92	Sucesión de pasos en el ensayo de estabilidad del Tamiz GTM que se realizó al concreto autocompactable	272
93	Equipo de presión utilizado en el ensayo para la determinación del contenido de aire del concreto autocompactable	273
94	Equipo utilizado en el ensayo del peso unitario del concreto autocompactable	275
95	Equipo y prueba realizada en el ensayo de fraguado del concreto autocompactable	276

FIGURA	TITULO	PÁG.
96	Vertido del concreto para elaborar los especímenes de prueba a compresión del concreto autocompactable	280
97	Especímenes de prueba moldeados	280
98	Pila de curado utilizada para los especímenes de prueba	281
99	Ensayo a compresión realizado al concreto autocompactable, y el cabeceo utilizado	281
100	Especímenes de prueba a flexión del concreto autocompactable	284
101	Curva de fraguado ensayo 1, mezcla A	302
102	Curva de fraguado ensayo 2 , mezcla A	302
103	Curva de fraguado ensayo 3, mezcla A	303
104	Curva de fraguado ensayo 1, mezcla B	303
105	Curva de fraguado ensayo 2, mezcla B	304
106	Curva de fraguado ensayo 3, mezcla B	304
107	Gráfico de la resistencia a la compresión de las diferentes batchadas de la mezcla A	307
108	Gráfico de la resistencia a la compresión de las diferentes batchadas de la mezcla B	308
109	Curva de edad - resistencia a la compresión, mezcla A	310
110	Curva de edad - resistencia a la compresión, mezcla B	311
111	Curva de edad - resistencia a la compresión, mezclas A y B	311

FIGURA	TITULO	PÁG.
112	Acabado en la superficie de los especímenes de concreto autocompactable	312
113	Distribución de los agregados en la matriz de los especímenes de concreto autocompactable	312
114	Falla observada en los especímenes de prueba a compresión	313
115	Falla observada en las viguetas sometidas al ensayo de flexión realizado al concreto autocompactable	314
116	Curva de edad-resistencia a la tensión por flexión, mezcla A y B	315

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA	TÍTULO	PÁG.
1	Diversas clases de cementos	45
2	Tipos de cemento Pórtland simple	46
3	Tipos de cemento mezclado	47
4	Clases de cementos expansivos	47
5	Influencia de las características del concreto	52
6	Factores que influyen en la consistencia del concreto fresco	76
7	Características y propiedades del concreto endurecido relacionadas con su funcionamiento estructural y su durabilidad	84
8	Condiciones y procedimientos normalizados para la determinación de la resistencia a compresión del concreto en especímenes representativos	86
9	Requisitos dimensionales de los especímenes cilíndricos especificados para determinar la resistencia a compresión del concreto, conforme a procedimientos normalizados	87
10	Resumen de requisitos usuales para la elaboración y curado de los especímenes para determinar la resistencia a compresión del concreto ...	88
11	Principales cambios volumétricos que suelen ocurrir en el concreto fresco y endurecido	96
12	Constantes de Binham para pastas con relación A/F de 0.36	127
13	Constantes de Binham sugeridas para un concreto autocompactable	128
14	Métodos de ensayo para las propiedades de trabajabilidad	136
15	Métodos de ensayo para cada propiedad del concreto autocompactable en estado fresco	136

TABLA	TITULO	PÁG.
16	Lista de comprobación de los requisitos del concreto autocompactable, antes de su puesta en obra	177
17	Módulo de elasticidad, de cubos con 28 días de edad	207
18	Resistencia gradual de las mezclas con escoria y PCS	213
19	Propiedades del concreto endurecido utilizando PCS	213
20	Resistencia al efecto de hielo y deshielo en el cemento y mezclas de cemento/PCS	214
21	Pruebas realizadas al agregado	228
22	Análisis granulométrico del muestreo periódico de la grava 3/8"	230
23	Análisis granulométrico del muestreo periódico de la arena de Aguilares	232
24	Análisis de las propiedades físicas de grava 3/8"	237
25	Análisis de las propiedades físicas de arena de Aguilares	240
26	Parámetros generales en los diseños de mezcla de concreto autocompactable de autores extranjeros	246
27	Combinaciones de material teórico para el diseño del esqueleto granular	250
28	Combinaciones de material ensayado para el diseño del esqueleto granular	251
29	Proporcionamiento para el diseño de pasta (CEMENTO CESSA 5000 ASTM C 150)	254
30	Resultados del diseño de pasta (CEMENTO CESSA 5000 ASTM C 150)	254
31	Proporcionamiento para el diseño de pasta (CEMENTO CESSA PORTLAND ASTM C 595)	255

TABLA	TITULO	PÁG.
32	Resultados del diseño de pasta (CEMENTO CESSA PÓRTLAND ASTM C 595)	255
33	Diseño de mortero y dosificación de superplastificante. Mezcla A (SIKA VISCOCRTE 5000)	261
34	Diseño de mortero y dosificación de superplastificante. Mezcla B (ULTRA FLOW)	262
35	Ajustes en mezclas de concreto. Mezcla A	265
36	Ajustes en mezclas de concreto. Mezcla B	266
37	Resultados de ensayos de las características del concreto autocompactable en estado fresco, mezcla A	269
38	Resultados de ensayos de las características del concreto autocompactable en estado fresco, mezcla B	269
39	Resultados de ensayos del tamiz GTM, mezcla A	271
40	Resultados de ensayos del tamiz GTM, mezcla B	271
41	Resultados contenido de aire del concreto autocompactable	273
42	Resultados del ensayo de peso unitario al concreto autocompactable	274
43	Resultados del ensayo 1 de fraguado al concreto autocompactable, mezcla A	276
44	Resultados del ensayo 2 de fraguado al concreto autocompactable, mezcla A	277
45	Resultados del ensayo 3 de fraguado al concreto autocompactable, mezcla A	277
46	Resultados del ensayo 1 de fraguado al concreto autocompactable, mezcla B	278
47	Resultados del ensayo 2 de fraguado al concreto autocompactable, mezcla B	278

TABLA	TITULO	PÁG.
48	Resultados del ensayo 3 de fraguado al concreto autocompactable, mezcla B	279
49	Resultados del ensayo de resistencia a la compresión al concreto autocompactable, mezcla A	282
50	Resultados del ensayo de resistencia a la compresión al concreto autocompactable, mezcla B	283
51	Resultados del ensayo de resistencia a la tensión al concreto autocompactable, mezcla A	285
52	Resultados del ensayo de resistencia a la tensión al concreto autocompactable, mezcla B	285
53	Resultados promedio de ensayos al concreto autocompactable en estado fresco	296
54	Resultado de la prueba empírica de pérdida de fluidez del concreto autocompactable, mezcla A	298
55	Resultado de la prueba empírica de pérdida de fluidez del concreto autocompactable, mezcla B	298
56	Resultados promedio del peso unitario del concreto autocompactable	301
57	Resultados promedio de la resistencia a la compresión del concreto autocompactable	305
58	Desviación estándar para las normas del control del concreto (ACI 214)	306
59	Porcentajes de resistencia ganada a diferentes edades	309
60	Relación entre la resistencia a la compresión y el módulo de ruptura del concreto autocompactable	314

RESUMEN GENERAL

El presente trabajo de investigación está enfocado en el planteamiento de una alternativa de solución a los problemas de colocación del concreto, para estructuras donde los procedimientos tradicionales de compactación no son suficientes para las exigencias de calidad solicitadas. El concreto autocompactable (CAC), es un material que por su estructura interna permite clasificarse como una alternativa de solución; pero debido a la escasa investigación en El Salvador sobre este nuevo material, es necesario que el trabajo de graduación posea una base Teórica - Experimental.

El trabajo de investigación denominado, CONCRETO AUTOCOMPACTABLE: PROPUESTA PARA DISEÑO DE MEZCLA. BENEFICIOS TÉCNICOS Y CONSIDERACIONES BÁSICAS PARA SU IMPLEMENTACIÓN EN EL SALVADOR, pretende lograr al término de su estudio la propuesta para el diseño de mezcla de CAC con los recursos disponibles en el medio, donde la metodología aplicada esté fundamentada en principios lógicos y sugerencias bibliográficas que respalden la calidad de los resultados obtenidos, además es posible valorar las consideraciones necesarias para implementarlo en El Salvador durante el proceso de proporcionamiento de las mezclas, según las experiencias obtenidas.

El trabajo se divide en cinco capítulos, que en términos generales describen una investigación que permite generar la información para diseñar una mezcla de concreto y crear las bases para identificar los puntos importantes en el ajuste de la misma, logrando así, que cumpla con las características necesarias para clasificarse como concreto autocompactable; a continuación se presenta una breve descripción del contenido.

El capítulo primero, describe las generalidades de la investigación, el cual tiene carácter informativo ya que detalla los antecedentes del CAC y plantea el enfoque de la investigación dividiéndola en dos grandes campos, la parte teórica para conceptualizar adecuadamente el tema, y la parte experimental para evaluar la aplicabilidad del CAC

en El Salvador; además se destacan los objetivos y la importancia de la investigación para resolver un problema de interés actual.

El segundo capítulo corresponde a un resumen general de tecnología del concreto, creado con el propósito de describir la terminología y el comportamiento del concreto convencional, para facilitar la comprensión de los capítulos posteriores y de igual manera generar una comparación por parte del lector con el concreto en estudio.

El capítulo tercero presenta un marco teórico sobre CAC, en el que se detallan los temas generales para comprender su origen y comportamiento en estado fresco y endurecido, además plantea metodologías de diseño y procedimientos de mezclado transporte y bombeo.

El cuarto capítulo corresponde a la parte experimental de la investigación, comprende la descripción de la metodología experimental a desarrollar, el análisis de los materiales constitutivos y la propuesta para dos diseños de mezcla, denominados mezcla A y B.

El quinto capítulo comprende el análisis estadístico de cada proporcionamiento propuesto y la verificación de su capacidad de reproducción para generar un historial de cada uno y poder concluir sobre la calidad de los resultados.

Para finalizar se desarrollan las conclusiones de la investigación experimental y las recomendaciones del trabajo.

CAPITULO I

GENERALIDADES DEL PROYECTO

1.1 INTRODUCCIÓN

Actualmente el concreto se ha convertido en el material de construcción más ampliamente utilizado en el ámbito mundial, debido a su extraordinaria versatilidad para moldearse, sus propiedades físicas y mecánicas para ser usado como elemento estructural, y su economía; razones que lo hacen muy competente frente a construcciones de madera, mampostería, asfalto y acero. Pero la calidad del concreto como producto terminado depende en gran medida de los procesos de consolidación que se apliquen a la mezcla en su estado fresco, es por ello que el tema de la compactación se ha vuelto de gran interés para la ingeniería, dada la importancia que tiene este proceso para alcanzar los parámetros establecidos en el diseño de mezcla; además de buscar mejores rendimientos en la mano de obra, reducir el tiempo de colocación, lograr mejores terminaciones, etc.

Lo anterior ha motivado el estudio de nuevos métodos de vibración y técnicas de consolidación; estas investigaciones aunadas a la disponibilidad en el mercado de aditivos de última generación, han permitido que finalmente se desarrolle el concreto autocompactable (CAC), la investigación técnica en El Salvador de este nuevo material y el ajuste de los recursos disponibles en el país para cumplir los requisitos de la propuesta de diseño de mezcla, permitiría su implementación.

El capítulo siguiente, detalla la base de la investigación teórico-experimental sobre CAC, se exponen los antecedentes mas importantes, con el propósito de conocer su evolución, desarrollo e influencia en el desempeño de los procesos constructivos; de igual forma se describe el planteamiento del problema, los objetivos, alcances y limitaciones para definir el enfoque de la investigación y finalmente la justificación con el propósito de enfatizar la necesidad de la realización del estudio.

1.2 ANTECEDENTES

La utilización de morteros aglomerantes y cementantes para la construcción con ciertas propiedades de manejabilidad y dureza, es ya muy antigua. Así, el empleo del concreto en la construcción, está registrado en las memorias de la historia occidental; específicamente en las ciudades de Troya y Mecnas se empleó un concreto de piedras aglomeradas con arcilla, con fines de defensa militar en las murallas de dicha ciudad, y los romanos a su vez lo utilizaron más habitualmente en termas, acueductos, y otras estructuras civiles.

Desde la aparición del cemento Pórtland el concreto adquiere importancia y sus propiedades de aumentar la resistencia con el tiempo y adaptarse a las formas que convengan al proyectista, han hecho de este en un breve plazo, uno de los materiales de mayor utilidad en el campo de la construcción y más aún desde que se asoció con el acero para constituir el concreto armado, de mayor resistencia, especialmente en esfuerzos de tensión.

En El Salvador, el empleo del concreto se remonta a principios del siglo pasado; en 1924 ya se había construido el Puente Cuscatlán sobre el río Lempa, con concreto reforzado, luego en 1933 con ésta tecnología, se construyó el antiguo Portal de La Dalia, frente al Parque Libertad en San Salvador. Otros edificios así construidos son el Telégrafo Nacional y el Teatro Nacional.

Actualmente en el país el concreto reforzado es el material más utilizado en la mayoría de obras de infraestructura liviana y pesada, por lo que los estudios orientados a la optimización de los procesos constructivos, siempre han sido de gran interés, para el gremio de la construcción.

Con los avances mundiales en las investigaciones sobre materiales de construcción, a finales de la década de los ochenta, en la Universidad de Tokyo (Japón), se desarrolló un tipo de concreto, llamado Concreto Autocompactable (CAC). Existen muchas

definiciones sobre este material, pero la más difundida expresa que se trata de un concreto de muy alta fluidez que puede ser colocado por su propio peso y es capaz de llenar los encofrados sin vibración, logrando buena consolidación sin que se produzca exudación ni segregación. [1]

A partir de 1988, hubo una apertura de experimentos en este nuevo concreto respaldados principalmente por la universidad de Tokyo, ante la expectativa de decenas de investigadores y practicantes de la ingeniería. Consecuentemente otros estudios se iniciaron, especialmente en institutos de investigación de importantes compañías relacionadas con el ámbito de la construcción.

Las primeras investigaciones buscaban concretos que no dependieran de la habilidad de la mano de obra en la vibración para asegurar la calidad de las estructuras de concreto armado y por lo tanto, su durabilidad a largo plazo. En contraste con la tecnología actual, que requiere de operarios entrenados que realicen la adecuada labor de vibración, para lograr una distribución homogénea del concreto.

El interés del CAC, crece de tal manera que en la reunión anual del Instituto del Concreto en Japón para el año de 1992, se abordó el tema del CAC, motivando la asistencia de más de treinta representantes del sector empresarial y universitario, entre otros. De continuar así se perfila que a muy corto plazo, el empleo de esta nueva tecnología llegue a convertirse en el futuro, en un concreto estándar más que en un concreto especial. [2]

Si bien no se puede hablar en la actualidad de una utilización sistemática de estos concretos, si existen referencias de aplicaciones pioneras de los mismos, posee especial relevancia la aplicación en los bloques de anclaje del puente colgante Akashi, Kaikyō; de 2 km de luz, con un volumen de 250,000 m³ de CAC en cada bloque; El Túnel de Yokohama, una zona densamente armada, el volumen de CAC fue de 40 m³ [1]; El Restaurante giratorio en Lucerna, Suiza; fue una construcción en el primer nivel de un edificio existente, cimentado sobre pilotes; las habitaciones modulares para Hoteles

(Estados Unidos); sistema constructivo complejo, donde el vibrado producía un concreto pobremente compactado y con grandes vacíos. [3]

Otras experiencias:

- Suecia, inicialmente el CAC se desarrolló en estructuras sofisticadas, implementándose actualmente en la construcción de viviendas. También se ha utilizado en puentes, recubrimientos de túneles y en reparaciones.
- Francia, realizó en 1995, sus primeros experimentos de CAC en laboratorios del sector público. Posteriormente en 1997-1998 propietarios, contratistas, fabricantes de aditivos y concreto prefabricado comenzaron a mostrar interés en el nuevo tipo de concreto. Desde entonces, se ha utilizado en un gran número de obras.
- España, el CAC ha sido utilizado en El Puente del Barrio de las Fuentes en Zaragoza, los muros de la Cuarta Plaza del Ayuntamiento de Mollet del Vallés (Barcelona) y diversos túneles del tramo del AVE en Montblanc, entre otras.
- Chile, ha utilizado hasta la fecha el CAC en elementos prefabricados, muros, fundaciones, losas, vigas y columnas; en viviendas, edificios, túneles, puentes, estanques, entre otros.
- México, la aplicación del CAC ha sido utilizada principalmente en la construcción de viviendas monolíticas, con ayuda de las empresas productoras de concreto.

Países como, Argentina, Colombia, Canadá, entre otros, han iniciando gradualmente la implementación del CAC en sus obras, después de un periodo de investigación, que continua hasta la fecha.

Por otra parte, el progresivo interés científico y técnico de esta tecnología se ve reflejado en la realización de diferentes congresos internacionales, que permiten conocer los avances en las investigaciones; estas conferencias son desarrolladas por profesionales involucrados directamente en la evolución del tema, que buscan una apertura del CAC,

a través de la difusión de su comportamiento, beneficios y ventajas de su implementación.

El 1er Simposio Internacional del CAC (Agosto 1999, Tokyo, Japón) enfatizó en las propiedades del CAC en estado fresco, documentando las investigaciones y experiencias prácticas. Las propiedades en estado endurecido, entre otras generalidades, fueron abordadas en el 2º Simposio Internacional efectuado en Octubre 2001, Tokyo, Japón. El 3er Simposio Internacional del CAC se realizó en Agosto de 2003, ICELAND.

Destacando entre otros congresos:

- First North American Conference on the Design and Use of Self Consolidating Concrete, el cual abordo temas como el diseño de mezcla, materiales, aditivos, ensayos de laboratorio, etc.
- Proceedings of the sixth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction. Desarrollando el tema: "A rational mix design method for mortar in self-compacting concrete" ; por Ouchi, Habino, Okamura y Ozawa, en 1988.

Analizando el desarrollo del CAC de manera global, en Europa centros de estudio del concreto investigan intensamente la aplicación del CAC y las experiencias en su implementación, creando las Especificaciones y Directrices divulgadas por el EFNARC (European Federation for Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems) para obtener un marco de referencia en el diseño y la utilización del CAC. Estas investigaciones se basan en los últimos descubrimientos, así como en la experiencia de campo procedente de sus miembros en toda Europa. Reconociendo que se trata de una tecnología que aún se encuentra en evolución y que los nuevos avances quizá recomienden una modificación o ampliación de los requisitos de esta especificación. [4]

En América, los documentos con respecto al CAC, se resumen a la edición de artículos en las revistas mas reconocidas del continente, siendo así, el ACI (American Concrete

Institute) publica ediciones especiales con respecto a normativas y sugerencias para su implementación, la ASTM (American Society for Testing Materials) comenta sus impresiones con respecto a las particulares pruebas de laboratorio, al igual el IMCYC (Instituto Mexicano del Cemento y el Concreto), promueve a través de su revista mensual los nuevos avances y experiencias en esta tecnología.

Centroamérica se encuentra a la expectativa del desarrollo de las investigaciones que permitan la apertura de la tecnología del CAC, la difusión sobre el tema es lenta, pero puede llevarse a cabo con el apoyo de instituciones, fabricantes de concreto premezclado y contratistas, en conjunto con la introducción al mercado local de aditivos de última generación.

1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Actualmente en El Salvador existe un problema de colocación y consolidación del concreto, especialmente en estructuras de arquitectura ó diseño estructural complejo, donde los existentes procedimientos constructivos, podrían ser sustituidos por una técnica más efectiva y funcional.

La construcción de infraestructura se ha desarrollado bajo el cumplimiento de ensayos, normas y especificaciones de otros países; por ejemplo el ensayo de revenimiento busca registrar la consistencia del concreto en estado fresco y así correlacionar la facilidad de colocación con la correcta consolidación. Pero a pesar de este tipo de ensayos existe la posibilidad que entre el concreto que producen las empresas y el concreto que quede colocado en el elemento de la obra, exista un cambio deficitario en la calidad del concreto, que modifique negativamente su comportamiento. Este problema se genera a raíz de varios factores como la mano de obra, equipo y herramientas, que por su naturaleza arbitraria no ayudan a garantizar la homogeneidad y consolidación del concreto en el elemento.

En estructuras con encofrados muy estrechos o en áreas densamente armadas, el concreto generalmente presenta problemas de colocación, mala calidad de mano de obra en el vibrado, escasa trabajabilidad de algunas mezclas de concreto, rendimientos y malos entornos de trabajo, donde las soluciones actuales traen como consecuencia un aumento en el costo por reparaciones; invirtiendo en tiempo, personal y equipo, con tal magnitud que los métodos de vibración convencionales se han convertido en una dificultad para la elaboración de estas formas, ya que estos diseños estructurales demandan altas ductilidades generando elementos congestionados de acero de refuerzo.

Es por ello que la demanda de una solución está orientada al campo de la investigación, para implementar nuevas tecnologías, valorando su comportamiento utilizando los recursos disponibles en nuestro medio.

Aumentar la capacidad de acomodo del concreto, supliría las necesidades demandadas, pero si la alternativa de solución es el CAC, es notable la ausencia en nuestro país de documentación que valide a un diseño de mezcla, donde la colocación y compactación no representen alteraciones de las características físicas y mecánicas deseadas.

1.4 OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL:

Proponer el diseño de mezcla para CAC destacando los beneficios técnicos y las consideraciones básicas para implementarlo en El Salvador.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- Determinar los fundamentos Teórico-Conceptuales del CAC y las ventajas de su aplicación como una alternativa para la solución de problemas de colocación del concreto.
- Diseñar mezclas de prueba y determinar las proporciones optimas para obtener una mezcla de concreto racional, con características autocompactables, haciendo uso de agregados normales provenientes de un determinado banco de materiales, utilizando un solo tipo de cemento.
- Determinar las propiedades físicas y mecánicas del CAC, a través de ensayos de laboratorio, que valoren principalmente las características de autocompactabilidad, el peso unitario, temperatura y contenido de aire en estado fresco y la resistencia a la compresión en estado endurecido.
- Definir la factibilidad técnica del CAC para su implementación en nuestro país, a través del análisis de las especificaciones, procedimientos de dosificación y otros métodos de caracterización.

1.5 ALCANCES Y LIMITACIONES

ALCANCES

La investigación será enfocada al área de Ingeniería Civil específicamente en el ramo de la construcción con el objeto de proporcionar las consideraciones básicas, para valorar la implementación del CAC como alternativa al problema de colocación del concreto, que además cumpla con las propiedades físicas y mecánicas requeridas en su estado endurecido, y cuya compactación necesita menos cantidad de mano de obra.

El estudio se efectuará a nivel teórico y experimental, con el propósito de respaldar con información técnica la evolución, desarrollo y comportamiento de la tecnología del CAC, por lo que además será necesario efectuar ensayos de laboratorio, en el proceso de dosificación de la mezcla y para analizar el concreto en estado endurecido.

El diseño de mezcla será para resistencias a la compresión de 280 kg/cm² y 350 kg/cm², y los tipos de agregados a utilizar serán arenas naturales de mediano proceso y grava triturada con tamaño máximo nominal de 3/8", procedentes de la zona de Aguilares y la Cantera de San Diego, respectivamente; el cemento a utilizar será CESSA Pórtland Tipo I; y se utilizarán dos tipos de aditivos a base de Policarboxilatos Polímeros, disponibles en nuestro medio, que permitan lograr en la mezcla las características autocompactables requeridas.

Se realizará un análisis de las características del CAC en estado fresco basándose en los ensayos de laboratorio sugeridos por el EFNARC, que valoran principalmente la capacidad de relleno, capacidad de paso y resistencia a la segregación; parámetros que serán utilizados en el ajuste del diseño de la mezcla, para lograr la correcta autocompactabilidad, a través del procedimiento de prueba y error.

También se realizarán ensayos al concreto en estado endurecido, elaborando un número significativo de especímenes de 15 cm de diámetro y 30 cm de alto; para obtener valores

confiables de resistencia a la compresión, que a su vez determinen la calidad del diseño de mezcla.

Para el análisis de los materiales y el diseño de mezcla se tomara de referencia las normas ASTM, ACI y los estudios Europeos del EFNARC, bajo la aclaración que se cumplirán solamente los requisitos que en nuestro entorno puedan ser desarrollados y sean relevantes para implementar el CAC en El Salvador.

Al término de la investigación, podrá obtenerse un documento de referencia, sobre los fundamentos teóricos y conceptuales del CAC, información técnica, metodologías de utilización, diseño de mezcla y la descripción del comportamiento del mismo con los materiales disponibles en nuestro medio.

LIMITACIONES

- Las investigaciones extranjeras utilizan pruebas de laboratorio para el CAC en estado fresco con equipo que actualmente no esta disponible en El Salvador, por lo que no todos los ensayos podrán realizarse. Sin embargo esto no resta importancia a la investigación, ya que es posible satisfacer los requerimientos básicos.
- La información sobre el CAC es escasa y la mayoría de ella es de carácter empírico, además no existe una normativa que rija el comportamiento de este concreto, debido a que es un tema en desarrollo, extenso y muchos aspectos aún son objeto de investigación.
- El periodo de tiempo disponible para realizar la investigación no permite profundizar en cada particularidad de la tecnología del CAC.

1.6 JUSTIFICACIÓN

La investigación de nuevas tecnologías en el área del concreto mejora los procesos constructivos, busca soluciones factibles y seguras que permitan aumentar la calidad de las estructuras.

El CAC se presta como una solución a problemas de colocación de concreto, por su capacidad de acomodo sin segregación. Esta tecnología puede mejorar ampliamente los sistemas de construcción basados en concreto convencional que requieren necesariamente compactación por vibrado.

La demanda potencial en El Salvador de esta tecnología es muy amplia, revolucionando los procedimientos alternos tradicionalmente aplicados para la solución de problemas de colocación del concreto, en aquellos proyectos donde existan estructuras complejas con áreas densamente armadas o muy estrechas, donde la mano de obra y el quipo para colocar el concreto representen un problema que ponga en duda el correcto funcionamiento y desarrollo completo de las características físicas y mecánicas del concreto colocado en la obra. De tal forma, surge la necesidad de su estudio en nuestro país, para sustentar con aplicaciones experimentales en el entorno nacional, la factibilidad de su implementación; es decir, no es solo importante la demanda y excelente funcionalidad que este CAC tenga en otros países, sino también la observación de las prestaciones técnicas que tenga utilizando por lo menos un banco de material de nuestro país, lo que demanda inicialmente la propuesta de un diseño de mezcla que permita comprobar sus beneficios técnicos.

Además, ayudaría a definir los aspectos positivos de su implementación, estudiar las ventajas comparativas que el CAC pueda generar en nuestro entorno, con las habituales condiciones y técnicas constructivas en el ámbito nacional, así como las ventajas reales que su empleo conlleva, para las empresas que lo pudieran utilizar.

CAPITULO II
TECNOLOGÍA DEL CONCRETO. Marco
Conceptual

2.1 INTRODUCCIÓN

El concreto es básicamente una mezcla de un material aglutinante, un material de relleno, agua y frecuentemente aditivos, que al endurecerse forman un sólido compacto semejante a una roca que después de cierto tiempo es capaz de soportar grandes esfuerzos de compresión y flexión. El concreto, se produce a partir de un diseño de mezcla que consiste en la selección de los materiales disponibles y su dosificación en cantidades relativas para producir, una masa volumétrica con el grado requerido de manejabilidad, que al endurecer adquiriera las propiedades de resistencia, durabilidad, peso unitario, estabilidad volumétrica y apariencia adecuada, además debe producirse a un bajo costo para competir con otros materiales igualmente resistentes y durables.

En el siguiente capítulo se abordan los principales temas sobre tecnología del concreto, como son: los componentes del concreto, destacando principalmente las propiedades físicas, químicas y mecánicas que los caracterizan; el comportamiento en estado fresco del concreto donde se definen términos como reología, trabajabilidad y fraguado; el comportamiento en estado endurecido que enfatiza en el desempeño del concreto como material de construcción a través de su comportamiento mecánico, elasticidad, adherencia, estabilidad volumétrica y permeabilidad; el mezclado, transporte y bombeo y finalmente la presentación de los tipos especiales de concreto que no dependen de factores externos de compactación.

El CAC es un tipo de concreto especial, definido así por su singular comportamiento reológico y no tradicional proporcionamiento de mezcla, particularidades necesarias para cumplir con la teoría de autocompactabilidad. Debido a lo anterior, la investigación sobre este nuevo material debe iniciar con el estudio del comportamiento y la terminología técnica de un concreto convencional que permita posteriormente analizar con propiedad el aporte de cada uno de los materiales constitutivos, los procedimientos para el diseño de mezcla, el objetivo de los métodos de ensayo aplicados y las propiedades y características en estado fresco y endurecido.

2.2 COMPONENTES DEL CONCRETO

El comportamiento mecánico del concreto y su durabilidad en servicio depende de tres aspectos básicos, entre los que se encuentran las características y propiedades de la pasta de cemento o matriz cementante, la calidad propia de los agregados en el sentido más amplio, la afinidad de la matriz cementante con los agregados y su capacidad para trabajar en conjunto, la cual a su vez depende de diversos factores, tales como: características físicas y químicas del cementante, la composición mineralógica y petrográfica de las rocas que constituyen los agregados y la forma, tamaño máximo y textura superficial de estos.

De los aspectos ya mencionados depende sustancialmente la capacidad potencial del concreto como material de construcción, por lo que es indispensable el estudio de cada uno de ellos.

2.2.1 CEMENTANTES

Los cementantes que se utilizan para la fabricación del concreto son hidráulicos, es decir fraguan y endurecen al reaccionar químicamente con el agua, aún estando inmersos en ella.

Los principales cementantes son los cementos, las escorias, los materiales puzolánicos y sus respectivas combinaciones. Por otra parte, bajo la denominación genérica de cementos hidráulicos, existen diversas clases de cemento con diferente composición y propiedades, en cuya elaboración intervienen diversas materias primas (véase la Tabla 1).

TABLA 1: Diversas clases de cementos.

CEMENTOS HIDRÁULICOS	
Clase	Materia primas principales
Pórtland Aluminoso Sobresulfatado Expansivo Natural	Arcilla y caliza (materiales individuales) Bauxita, caliza Escoria granulada de alto horno Clinker Pórtland, escoria, bauxita, yeso Caliza-arcilloso (un solo material)

FUENTE: Manual de Tecnología del Concreto Tomo I. CFE (Comisión Federal de Electricidad).

2.2.1.1 CEMENTOS CON CLINKER PÓRTLAND

Todos los cementos para concreto hidráulico se producen a base de clinker Pórtland y para su elaboración se emplean materia primas capaces de aportar principalmente cal, sílice, y adicionalmente óxido de hierro y alúmina, para los que se seleccionan materiales calizos y arcillosos de composición adecuada. Estos materiales se trituran, dosifican, muelen y mezclan hasta su completa homogenización, ya sea en seco o en húmedo.

La materia prima así procesada ya sea en forma de polvo o lodo se calcina a temperaturas del orden de 1400 ° C hasta que alcanza un estado de fusión incipiente. En este estado se producen las reacciones químicas requeridas y el material se subdivide y aglutina en fragmentos no mayores a los 6 cm; este material fragmentado es al que se denomina "clinker Pórtland", el cual una vez frío, se muele conjuntamente con una reducida porción de yeso que tiene la función de regular el tiempo de fraguado, y con ello se obtiene el polvo gris que se conoce como "cemento Pórtland simple"

Además durante la molienda el clinker puede combinarse con una escoria o un material puzolánico para producir un cemento mezclado Pórtland-escoria o Pórtland-puzolana, o bien con determinados materiales de carácter sulfa-cálcico-aluminoso para obtener los llamados cementos expansivos.

De conformidad con lo anterior, a partir del clinker es posible fabricar tres clases de cemento para concreto:

- a) Cemento Pórtland Simple, resultan de la mezcla del yeso y clinker solamente sin componente cementante adicional.
- b) Cemento Pórtland Mezclado, resulta combinando el clinker y el yeso con otro cementante, ya sea una escoria o una puzolana.
- c) Cemento Pórtland Expansivo, se obtienen añadiendo al clinker otros componentes especiales de carácter sulfatado, cálcico y aluminoso.

Para apreciar el campo de aplicación, en las Tablas 2, 3 y 4 se mencionan los diversos tipos de cemento considerados y reglamentados por las especificaciones ASTM C 150, C 595 y C 845.

TABLA 2: Tipos de cemento Pórtland simple.

CEMENTOS PÓRTLAND SIMPLES (ASTM C 150)		
TIPO	CARACTERÍSTICAS	OPCIONES
I	Para uso general	(A), (BA)
II	Moderadas resistencias a los sulfatos y moderado calor de hidratación	(A), (MH), (BA)
III	Alta resistencia inicial	(A), (BA) (MS), (AS)
IV	Bajo calor de hidratación	(BA)
V	Alta resistencia a los sulfatos	(BA), (EXP1)
OPCIONES:		
(A) : con inductor de aire (AS) : alta resistencia a los sulfatos (BA) : bajo contenido de álcalis $\leq 0.60\%$ (BH) : bajo calor de hidratación (EXP1) : expansión $\leq 0.04\%$ (EXP2) : aplicación con agregados reactivos con los álcalis, expansión $\leq 0.02\%$ (MH) : moderado calor de hidratación (MS) : moderada resistencia a los sulfatos		

FUENTE: Manual de Tecnología del Concreto Tomo I. CFE (Comisión Federal de Electricidad).

TABLA 3: Tipos de cemento mezclado.

CEMENTOS MEZCLADOS (ASTM C 595)		
TIPO	CARACTERÍSTICAS	OPCIONES
IS	Pórtland - escoria de alto horno, escoria entre 25 y 70%	(A), (MS), (MH), EXP2)
IP	Pórtland - puzolana, puzolana entre el 15 y 40%	(A), (MS), (MH), EXP2)
P	Pórtland - puzolana, alta resistencia a edad temprana, puzolana entre el 15 y 40%	(A), (MS), (BH), (EXP2)
S	Pórtland - escoria para concreto o escoria - cal hidratada para mortero, escoria > 70%	(A), (EXP2)
I (PM)	Pórtland modificado con puzolana, puzolana < 15%	(A), (MS), (MH)
I (SM)	Pórtland modificado con escoria, escoria < 25%	(A), (MS), (MH)

FUENTE: Manual de Tecnología del Concreto Tomo I. CFE (Comisión Federal de Electricidad).

TABLA 4: Clases de cementos expansivos.

CEMENTOS EXPANSIVOS (ASTM C 845)	
TIPO:	Los cementos expansivos son de un solo tipo, designado como E - 1
CLASES:	K: con aluminato de calcio anhidro, sulfato de calcio y óxido de calcio no combinado M: con calcio aluminoso y sulfato de calcio S: con aluminato tricálcico y sulfato de calcio
Requisito opcional: bajo contenido de álcalis (0.60 % máximo)	

FUENTE: Manual de Tecnología del Concreto Tomo I. CFE (Comisión Federal de Electricidad).

2.2.1.2 CEMENTOS ESPECIALES [5]

Existen tipos especiales de cemento que no están necesariamente incluidos en las especificaciones ASTM; algunos de ellos son:

a) Cementos impermeabilizados

Se obtienen añadiendo una pequeña cantidad de aditivo repelente al agua como el estearato (de sodio, de aluminio u otros) al clinker de cemento Pórtland durante la molienda final. Fabricado en color blanco o gris y reduce la transmisión capilar del agua a presiones bajas o nulas, sin embargo, no detiene la transmisión de vapor de agua.

b) Cementos plásticos

Se obtienen añadiendo agentes plastificantes en una cantidad no mayor del 12% del volumen total al cemento Pórtland Tipo I o II durante la molienda.

c) Cementos de fraguado regulado

Este cemento produce concreto con tiempos de fraguado que varían desde unos cuantos minutos hasta una hora, y con un desarrollo de resistencia a edad temprana correspondiente a 70 kg/cm² o más, luego de una hora después de haber fraguado.

d) Cementos con adiciones funcionales

Las adiciones son una combinación de reductores de agua retardantes y acelerantes, estos se mezclan durante la molienda del clinker.

2.2.1.3 CARACTERÍSTICAS ESENCIALES DEL CEMENTO

La influencia que el cemento tiene en el comportamiento y propiedades de la pasta y del concreto deriva de sus características, las cuales se mencionan a continuación: ^[5]

a) Composición química

Durante la calcinación en la fabricación del clinker, el óxido de calcio se combina con los componentes ácidos de la materia prima para formar cuatro componentes cementantes que constituyen el 90% del peso del cemento, los cuales se presentan a continuación:

Compuesto	Fórmula del óxido	Notación	Nombre común
Silicato tricácico	3 CaO SiO ₂	C ₃ S	Alita
Silicato dicácico	2 CaO SiO ₂	C ₂ S	Belita
Aluminato tricácico	3 CaO Al ₂ O ₃	C ₃ A	Aluminato
Aluminoferrito tetracácico	4 CaO Al ₂ O ₃ Fe ₂ O ₃	C ₄ AF	Ferrita

El silicato tricálcico (C_3S), se hidrata y endurece rápidamente y es responsable en gran medida del fraguado inicial y de la resistencia temprana. En general la resistencia temprana del concreto de cemento Pórtland es producto de altos porcentajes de C_3S .

El silicato dicálcico (C_2S), se hidrata y endurece lentamente y contribuye en gran parte al incremento de resistencia a edades mayores de una semana.

El aluminato tricálcico (C_3A), libera una gran cantidad de calor en los primeros días de hidratación y endurecimiento. También contribuye al desarrollo de resistencia temprana; el yeso que se agrega al cemento durante la molienda final, retrasa la velocidad de hidratación del C_3A . Sin el yeso un cemento que contuviera C_3A fraguaría rápidamente, los cementos con bajos porcentajes de C_3A son particularmente resistentes a los suelos y agua que contienen sulfatos.

El aluminoferrito tetracálcico (C_4AF), reduce la temperatura de formación del clinker, ayudando por tanto a la manufactura del cemento.

b) Finura

El grado de finura del cemento tiene efectos ambivalentes en el concreto; al aumentar la finura en el cemento se hidrata y adquiere resistencia con más rapidez y se presenta mayor disposición en las partículas para mantenerse en suspensión en la pasta recién mezclada, lo cual es ventajoso para la cohesión, manejabilidad y capacidad de retención de agua. Como contrapartida, una finura más alta representa mayor velocidad en la generación de calor y mayor demanda de agua de mezclado en el concreto, cuyas consecuencias son indeseables porque se traduce en mayores cambios volumétricos y posibles agrietamientos en las estructuras.

c) Sanidad

Se dice que un cemento carece de sanidad cuando muestra gran expansión después del fraguado. Las principales causas de la falta de sanidad en el cemento Pórtland se deben a la presencia de pequeños porcentajes, ya sea de cal (CaO) no combinada sobrecosida o

magnesia (MgO) sin combinar y sobrecoada. Cualquiera de estos óxidos en estado de sobrecoados se hidratan tan lentamente que la reacción no comienza hasta después que la pasta de cemento o el concreto ha endurecido. La expansión que se produce con la hidratación de éstos óxidos puede ser muy destructiva para las estructuras de concreto; en el caso de la cal una expansión de importancia puede demorarse durante meses y para la magnesia varios años.

d) Consistencia

En general se refiere al carácter de la mezcla con respecto al estado de fluidez. La consistencia abarca todos los estados de fluidez desde la más seca hasta la más fluida de todas las mezclas posibles; la consistencia óptima es la que se denomina como “mezcla plástica”, esta expresión define una mezcla cuya consistencia se encuentra entre la seca desmenuzable y la muy fluida y acuosa, una mezcla plástica cohesiva y no desmenuzable fluye lentamente sin segregarse.

e) Tiempo de fraguado

El tiempo de fraguado se da desde el momento en que se elabora el concreto, dando principio a las reacciones químicas entre el cemento y el agua, que conducen primero a la pérdida de fluidez y rigidización de la mezcla, y después a su endurecimiento y adquisición de resistencia mecánica.

f) Fraguado falso

Llamado también endurecimiento prematuro, el cual es un endurecimiento inicial de la pasta o del concreto que se presenta de 1 a 5 minutos después del mezclado. Este fraguado se puede romper o eliminar por un continuo mezclado o remezclado. La causa más común por la que se da es la deshidratación parcial del yeso y ésta resulta si la temperatura se eleva demasiado durante la molienda. Posteriormente al agregarse agua al cemento el yeso deshidratado comienza a endurecer inmediatamente, causando un endurecimiento temprano. El remezclado rompe este fraguado sin afectar el fraguado normal.

g) Resistencia a la compresión

La resistencia a la compresión, tal como lo especifica la norma ASTM C 150, es la obtenida a partir de pruebas en cubos de mortero estándar de 5 cm, ensayados de acuerdo a la norma ASTM C 109. Estos cubos se hacen y se curan de manera prescrita y utilizando una arena estándar. La resistencia a la compresión está influida por el tipo de cemento, específicamente la composición química y finura del cemento. En general las resistencias de los cementos (teniendo como base las pruebas de cubos de mortero) no se pueden usar para predecir las resistencias de los concretos con exactitud debido a la gran cantidad de variables en las características de los agregados, mezclas de concreto y procedimientos constructivos.

h) Calor de hidratación

Es el calor que se genera cuando reacciona el agua con el cemento, la cantidad de calor generado depende principalmente de la composición química del cemento, siendo el C_3A y el C_3S los componentes responsables particularmente del elevado desarrollo de calor de hidratación, también influyen factores como la relación agua cemento, la finura del cemento y la temperatura de curado.

i) Pérdida por ignición

Es la pérdida de peso que una muestra de cemento experimenta cuando esta es calentada de $900\text{ }^\circ\text{C}$ a $1000\text{ }^\circ\text{C}$. Normalmente la pérdida por ignición elevada indica prehidratación y carbonatación, que pueden ser causadas por un almacenamiento prolongado e inadecuado, o por adulteraciones durante el transporte y la descarga.

j) Gravedad específica

Generalmente la gravedad específica del cemento Pórtland es de aproximadamente 3.15, mientras que del Pórtland - escoria de alto horno y Pórtland puzolana puede tener valores de aproximadamente 2.9. Y es un indicador de la calidad del cemento.

2.2.2 AGREGADOS

Los agregados ocupan en la mezcla de concreto aproximadamente un 75% del volumen, por lo que influyen en las propiedades del concreto en estado fresco y endurecido. Su selección es importante y deben consistir en partículas con resistencia adecuada así como resistencias a condiciones de exposición a la intemperie y no deben contener materiales que pudieran causar deterioro del concreto.

En la Tabla 5, se relacionan las principales características de los agregados y los correspondientes aspectos del comportamiento del concreto en que ejercen mayor influencia.

TABLA 5 : Influencia de las características del concreto.

CARACTERÍSTICAS DE LOS AGREGADOS	ASPECTOS QUE INFLUYEN EN EL CONCRETO	
	CONCRETO FRESCO	CONCRETO ENDURECIDO
Granulometría	Manejabilidad, requerimiento de agua, sangrado	Resistencia mecánica, Cambios volumétricos Economía.
Limpieza (materia orgánica, limo, arcilla y otros finos)	Requerimiento de agua Contracción plástica	Durabilidad Resistencia mecánica Cambios volumétricos
Densidad	Peso unitario	Peso unitario
Sanidad	Requerimiento de agua	Durabilidad
Absorción y porosidad	Pérdida de revenimiento Contracción plástica	Durabilidad Permeabilidad
Forma de partículas	Manejabilidad Requerimiento de agua Sangrado	Resistencia mecánica Cambios volumétricos Economía
Textura superficial	Manejabilidad Requerimiento de agua	Durabilidad Resistencia al desgaste Economía
Tamaño máximo	Segregación, peso unitario Requerimiento de agua	Resistencia mecánica, cambios volumétricos, peso unitario, permeabilidad, economía.
Módulo de elasticidad		Módulo de elasticidad y cambios volumétricos
Resistencia a la abrasión		Resistencia a la abrasión y durabilidad
Resistencia mecánica		Resistencia mecánica

FUENTE: Manual de Tecnología del Concreto Tomo I. CFE (Comisión Federal de Electricidad).

Las características comúnmente evaluadas a los agregados y los requisitos mínimos que deberán cumplir se mencionan a continuación:

2.2.2.1 GRANULOMETRÍA

La granulometría suministra la distribución de los tamaños de las partículas del agregado, se analiza por medio del tamizado en mallas estándar, y es expresada como un porcentaje en peso retenido entre mallas consecutivas, o lo que pasa en cada malla.

Es frecuente representar la granulometría de los agregados, haciendo uso de gráficos, colocando en el eje de las abscisas los tamaños de abertura (ASTM E 11), y en el eje de las ordenadas los porcentajes correspondientes.

Se tienen tamices estándar usados para determinar la gradación de los agregados, ya sea finos o gruesos. La especificación ASTM C 33, establece el porcentaje de material que debe pasar por cada malla, estableciendo el máximo y el mínimo; es decir, la zona donde debe estar contenido el diagrama granulométrico para que el material sea aceptable.

Granulometría para el agregado fino

La composición granulométrica de la arena suele identificarse por su módulo de finura (MF), como se define en la especificación ASTM C 125. Considerándose que un $MF < 2.3$ es representativo de una arena muy fina y un $MF > 3.1$ es representativo de una arena demasiado gruesa para utilizarse en el concreto.

El módulo de finura se obtiene de la sumatoria de los porcentajes retenidos acumulados en los tamices que van de la malla N° 4 a la N° 100, dividiendo la suma entre 100.

Granulometría para agregado grueso

De igual modo que en el caso de la arena, es deseable que el agregado grueso en conjunto posea continuidad de tamaños en su composición granulométrica, si bien los efectos que la granulometría de la grava produce sobre la manejabilidad de las mezclas de concreto no son tan notables como los que produce la arena.

El tamaño máximo del agregado grueso que se utiliza en el concreto tiene su fundamento en la economía. Comúnmente se necesita mas agua y cemento para agregados de tamaño pequeño que para tamaños mayores.

El numero de tamaño de la granulometría (o tamaño de la granulometría), se aplica a la cantidad colectiva de agregado que pasa a través de un arreglo de mallas.

El tamaño máximo nominal de un agregado, es el menor tamaño de la malla por el cual debe pasar la mayor parte del agregado. La malla de tamaño máximo nominal, puede retener de 5% a 15% del agregado dependiendo del numero de tamaño (ASTM C 125).

2.2.2.2 MATERIALES CONTAMINANTES

Existen diversos materiales contaminantes que con cierta frecuencia acompañan a los agregados, y cuya presencia es inconveniente por los efectos adversos que producen en el concreto; entre los que podemos encontrar el limo y la arcilla, los cuales son indeseables en los agregados, pues incrementan el requerimiento de agua de mezclado y los cambios volumétricos.

En las especificaciones de agregado para concreto ASTM C 33 se establecen los limites de tolerancia para estos materiales.

2.2.2.3 DENSIDAD (GRAVEDAD ESPECÍFICA O PESO ESPECÍFICO)

La densidad es una característica importante de los agregados para el concreto, la cual representa el peso del agregado por unidad de volumen incluyendo los vacíos entre las partículas. Esta propiedad permite calcular los vacíos en un volumen determinado, que a su vez, se emplea para obtener la cantidad de mortero necesario para llenar los vacíos y proporcionar la manejabilidad deseada (ASTM C 127 y ASTM C 128).

2.2.2.4 SANIDAD

Permite definir la calidad física intrínseca de las rocas que constituyen los agregados, y se describe como la capacidad de éstos para soportar la acción agresiva a que se exponga el concreto que los contiene, especialmente la que corresponde al intemperismo (ASTM C 88).

2.2.2.5 ABSORCIÓN Y POROSIDAD

Todas las rocas que constituyen los agregados de peso normal son porosas en mayor o menor grado, una excesiva porosidad en la roca puede ser un síntoma de reducida calidad intrínseca y al ser empleada como agregado puede tener efectos indeseables.

Es posible tener una idea aproximada de la porosidad de los agregados mediante la determinación de su capacidad para absorber agua en condiciones establecidas. La absorción se define como el incremento en la masa de un cuerpo sólido poroso, como resultado de la penetración de un líquido dentro de sus poros permeables. Para los agregados la absorción se determina, conforme a métodos de prueba (ASTM C 127 y C 128).

2.2.2.6 FORMA Y TEXTURA SUPERFICIAL DE LAS PARTÍCULAS

Son características que normalmente representan la calidad intrínseca de las rocas que constituyen los agregados.

Para tratar de establecer la forma y textura superficial de las partículas de los agregados, debemos mencionar que las formas redondeadas y superficialmente lisas producen buena manejabilidad en las mezclas del concreto, pero no son propicias para una buena adherencia. Por el contrario, las partículas de formas muy angulosas y superficies ásperas, son inconvenientes para la elaboración de mezclas manejables, pero favorecen en lo relativo a su adherencia con la pasta de cemento; es decir, lo más adecuado es una condición intermedia que optimice ambas tendencias.

2.2.2.7 TAMAÑO MÁXIMO DE LAS PARTÍCULAS

Se define de acuerdo a diversos aspectos como, las características geométricas y de refuerzo de las estructuras, los procedimientos y equipos empleados para la colocación, el nivel de la resistencia mecánica requerida, etc. Debido a la dificultad práctica de asegurar una dimensión máxima precisa en el tamaño de las partículas durante la clasificación en el suministro de agregado grueso, es usual conceder una tolerancia dimensional con respecto al tamaño máximo nominal, pero limitando la proporción de partículas que pueden excederlo. Es necesario entonces definir el tamaño máximo efectivo permisible y la proporción máxima de partículas que puedan admitirse entre el tamaño máximo nominal y el efectivo, es decir, lo que constituye el sobre tamaño nominal tolerable.

2.2.2.8 MÓDULO DE ELASTICIDAD

Las propiedades elásticas del agregado grueso, son característica que interesan en la medida que afectan a las correspondientes en el concreto endurecido. Las rocas que constituyen los agregados son propiamente elásticas a compresión cuando son físicamente homogéneas, es decir, su gráfica esfuerzo - deformación unitaria es una recta que denota proporcionalidad; pero no ocurre así en el concreto cuya gráfica exhibe normalmente cierta falta de proporcionalidad debido a microfisuras y deslizamientos internos que se producen al exceder el 30% del esfuerzo de ruptura, aproximadamente.

2.2.2.9 RESISTENCIA A LA ABRASIÓN

La resistencia que los agregados gruesos oponen a sufrir desgaste, rotura o desintegración de partículas por efecto de la abrasión, es una característica que suele considerarse como un índice de su calidad en general, y en su capacidad de producir concretos durables en condiciones de servicio donde intervienen acciones deteriorantes de carácter abrasivo.

2.2.3 AGUA

El agua, en relación con su empleo en el concreto, tiene dos diferentes aplicaciones: como ingrediente en la elaboración de las mezclas y como medio de curado de las estructuras recién construidas.

Aunque en estas aplicaciones las características del agua tienen efectos de diferente importancia sobre el concreto, es usual que se recomiende emplear agua de una sola calidad en ambos casos.

Como corresponde en el concreto convencional, el agua suele representar entre el 10 % y 25% del volumen de concreto recién mezclado, dependiendo del tamaño máximo del agregado que se utilice y del revenimiento que se requiera [6]. Esto le concede una influencia importante a la calidad del agua de mezclado en el comportamiento y las propiedades del concreto, pues cualquier sustancia dañina que contenga, aun en proporciones reducidas, puede tener efectos adversos significativos en el concreto.

Las características físico-químicas del agua deben limitarse en cuanto al contenido de sustancias cuya presencia es relativamente frecuente tales como sólidos en suspensión, sales inorgánicas, materia orgánica, etc., sin embargo no existe un consenso general en cuanto a la cantidad que debe imponerse como limitación; no así con la presencia de sustancias dañinas tales como grasas, aceites, azúcares y ácidos, las cuales son un síntoma de contaminación que requiere eliminarse para el agua de mezclado.

Las impurezas excesivas en el agua no solo pueden afectar el tiempo de fraguado, y la resistencia del concreto, sino también, puede ser causa de eflorescencia, manchado, corrosión del refuerzo, inestabilidad volumétrica y una menor durabilidad. [7]

La verificación de la calidad del agua de uso previsto para elaborar el concreto, debe ser una práctica obligatoria antes de iniciar la construcción de obras importantes, sin embargo puede permitirse que esta verificación se omita en las siguientes condiciones:

1. Cuando el agua procede de la red local de suministro para uso domestico y no se le aprecia olor color ni sabor, aunque no posea antecedentes de uso en la fabricación del concreto.
2. Si el agua procede de cualquier otro suministro que cuenta con antecedentes de uso en la fabricación del concreto con buenos resultados y no se aprecia color, olor y sabor.

Cuando se presenten condiciones contrarias a las mencionadas, la verificación de la calidad del agua para su empleo en la fabricación del concreto debe ser un requisito ineludible.

2.2.4 ADITIVOS

Son aquellos ingredientes que se agregan antes del mezclado o durante el mismo, en los cuales se puede ejercer control sobre su dosificación y que se utilizan con el propósito fundamental de modificar convenientemente el comportamiento del concreto en estado fresco, así como de inducir o mejorar determinadas propiedades deseables en el concreto endurecido. Según su función se clasifican de la siguiente manera:

- a) Aditivos inclusores de aire: Se utilizan para retener intencionalmente burbujas microscópicas de aire en el concreto, lo cual mejora la durabilidad de concretos que estarán expuestos a ciclos de congelación y deshielo.
- b) Aditivos reductores de agua: Se emplean para disminuir la cantidad de agua de mezclado requerida para un revenimiento especificado, disminuir la relación agua/cemento con lo que se obtiene un aumento en la resistencia, sin embargo se incrementa la velocidad de pérdida de revenimiento lo que redundará en un tiempo de colocación menor.
- c) Aditivos retardantes: Disminuyen la velocidad de fraguado del concreto, estos también actúan como reductores de agua, se les denomina frecuentemente retardantes

reductores de agua. Se emplean para compensar el efecto acelerante que el clima cálido puede producir al fraguado del concreto o para retrasar el fraguado inicial en colados difíciles.

d) Aditivos acelerantes: Se usan para acelerar el desarrollo de la resistencia del concreto a edades tempranas, se utilizan cuando es necesario desencofrar antes del tiempo que las especificaciones contractuales fijan y/o para poner en servicio la obra prontamente.

e) Aditivos superplastificantes: Son aditivos reductores de agua de alto rango, que se agregan a los concretos de bajo revenimiento y baja relación agua/cemento para producir concretos fluidos de alto revenimiento. La creciente utilización del concreto fluido permitió la elaboración de aditivos para este concreto y dio origen a la especificación ASTM C 1017. La condición esencial que se busca al emplear un aditivo superplastificante consiste en aumentar transitoriamente la fluidez de las mezclas de concreto, sin afectar las propiedades potenciales del concreto endurecido, sin embargo debe tenerse presente los posibles efectos secundarios que se originan a partir de aditivos reductores de agua a fin de prevenirlos con los ensayos correspondientes.

El concreto fluidificado con aditivos prácticamente no requiere ser compactado en las formas o cimbras y frecuentemente se logra acomodar por simple gravedad. De esta característica derivan sus principales aplicaciones, que son aquellas donde existan dificultades de acceso para la colocación y/o compactación del concreto, donde las formas son muy estrechas o donde hay excesivo acero de refuerzo.

El concreto fluidificado con aditivos de esta clase tiende a perder revenimiento con mayor rapidez que el concreto del mismo revenimiento sin aditivo, sin embargo es posible reponerle su revenimiento original con una nueva dosificación del aditivo. [7]

2.2.5 ADICIONES

Es un material inorgánico finamente dividido utilizado en el concreto para mejorar ciertas propiedades o para lograr propiedades especiales.

Algunas adiciones provienen de subproductos industriales considerados como residuos. Su empleo en concretos presenta elevados beneficios en la economía, consumo de energía, protección al ambiente y conservación de los recursos naturales.

Los materiales más utilizados como adiciones en los concretos de alto comportamiento son la microsíllica (silica fume) y en menor escala cenizas volantes (fly ash) (ASTM C 618) y escorias de altos hornos (ASTM C 989).

2.3 CONCRETO EN ESTADO FRESCO

El concreto recién mezclado debe ser plástico o semifluido y capaz de ser moldeado a mano. Una mezcla muy húmeda de concreto se puede moldear en el sentido de que puede colarse en una cimbra, pero esto no entra en la definición de “plástico”, el cual es aquel material que es plegable y capaz de ser moldeado.

En una mezcla de concreto plástico la arena y la grava quedan encajonados y en suspensión. Los componentes no están predispuestos a segregarse durante el transporte; y cuando el concreto endurece, se transforma en una mezcla homogénea de todos los componentes. El concreto de consistencia plástica no se desmorona, sino que fluye como líquido viscoso sin segregarse. ^[5]

Para dar el uso y tratamiento adecuado al concreto en estado fresco hasta el estado endurecido, es necesario reconocer sus respectivas características, propiedades y los factores que las modifican, a fin de poder ajustarlas según convenga.

2.3.1 ESTADO FRESCO DEL CONCRETO

2.3.1.1 LIMITES DEL ESTADO FRESCO DEL CONCRETO

El concreto convencional, recién elaborado, es un material que en pocas horas se transforma y cambia de estado, desde su condición inicial de masa blanda uniforme hasta la de cuerpo rígido que toma la forma del molde en que se coloca, y después continúa evolucionando para adquirir con el tiempo sus propiedades definitivas.

En relación con la delimitación del estado fresco del concreto, es conveniente precisar la diferencia que existe entre los lapsos que corresponden al concreto blando y moldeable, para aclarar sus respectivos significados y consecuencias en el aspecto constructivo.

El concreto blando abarca desde la elaboración de la mezcla de concreto, hasta que en ésta se presentan los primeros síntomas de rigidez, lo cual es una señal de que termina la fase "durmiente" (concreto blando) y principia la del fraguado. La duración de este lapso, en que el concreto se conserva blando, marca el tiempo más adecuado para transportarlo, colocarlo y compactarlo en su lugar definitivo dentro de la estructura en construcción. El lapso de concreto moldeable corresponde al mismo lapso anterior, pero ampliado hasta la finalización del fraguado inicial (véase la Figura 1).

Puede decirse que para fines prácticos, el concreto se considera en estado fresco, mientras permanece moldeable, es decir, mientras adquiera su fraguado inicial, aunque resulta más fácilmente moldeable en su fase "durmiente", o blanda. Por tal motivo, siempre se deben hacer los arreglos necesarios en obra para que el concreto se termine de colocar y compactar antes que finalice la fase "durmiente", o blanda, dejando el lapso adicional dado por la ampliación hasta el fraguado inicial.

Conviene aclarar que la duración del lapso en que el concreto permanece en estado fresco, o blando, es una característica muy variable que depende de factores intrínsecos relacionados con su composición y factores extrínsecos representados principalmente por la temperatura.

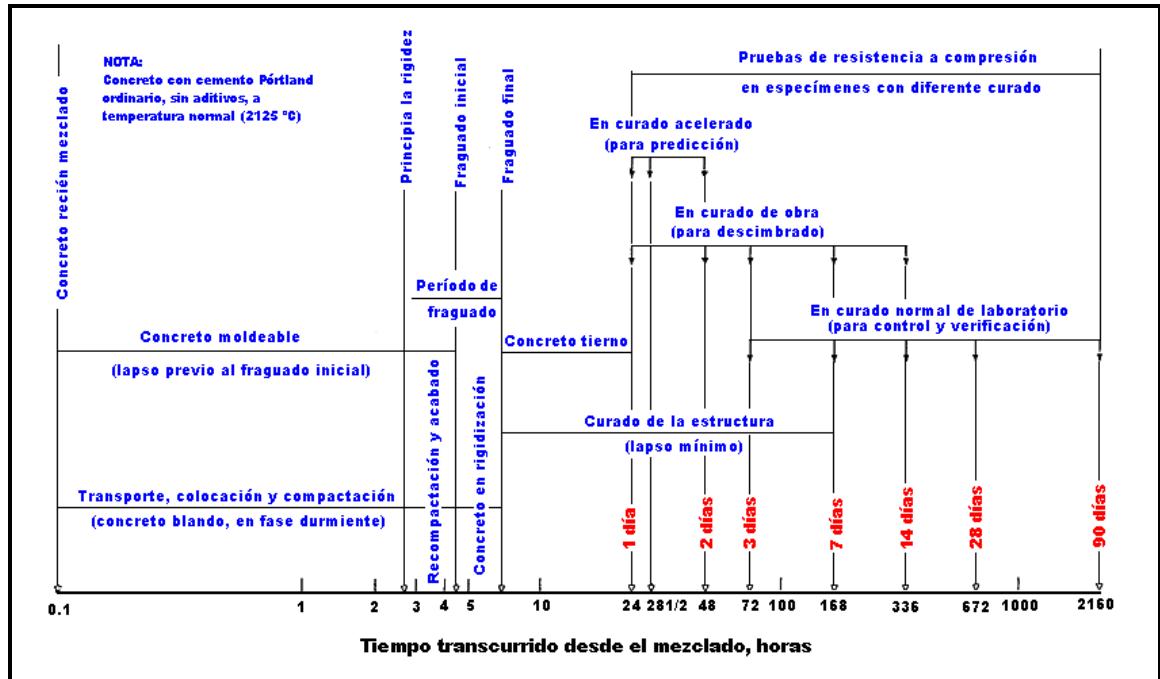


Figura tomada de: Manual de Tecnología del Concreto Tomo II. CFE (Comisión Federal de Electricidad).

FIGURA 1: Lapsos y actividades características en los diferentes estados de un concreto convencional a temperatura normal.

2.3.1.2 ATRIBUTOS DEL CONCRETO FRESCO

El principal atributo del concreto en estado fresco es el que se designa como "trabajabilidad" y es aquella propiedad del mortero o del concreto recién mezclado que determina la facilidad y homogeneidad con que puede ser mezclado, transportado, colocado, compactado y acabado. [8]

La trabajabilidad en el concreto fresco no es solamente una propiedad intrínseca del mismo, sino que también depende de factores extrínsecos relacionados con el uso a que se destina y la forma como se utiliza. [9]

Su evaluación es un tanto subjetiva, es por ello que ha sido necesario acudir a otras características del concreto fresco que sí puedan ser evaluadas con relativa facilidad y exactitud, para que en conjunto se complementen y permitan configurar el atributo de la

trabajabilidad; como la prueba estándar de revenimiento (ASTM C 143), el cual es un ensayo prácticamente estático en el que la muestra de concreto se deforma exclusivamente por efecto de la reducida energía potencial de la propia muestra.

2.3.1.3 REOLOGÍA DEL CONCRETO EN ESTADO FRESCO

En el campo de la reología se examina el comportamiento de los cuerpos sólidos, líquidos e intermedios entre ambos estados, que se deforman y fluyen por efecto de las fuerzas que actúan en ellos, es decir, cuerpos que tienen cierta plasticidad. Al referirse al comportamiento reológico del concreto en estado fresco, es necesario considerar por separado el caso de la pura pasta de cemento como fluido viscoso y después verificar lo que ocurre cuando a ésta se le incorporan los agregados para constituir una mezcla de concreto de consistencia plástica.

Características reológicas de la pasta de cemento

La combinación del cemento con el agua produce una mezcla cuyas propiedades iniciales en estado fresco, y posteriormente en estado endurecido, dependen básicamente de la proporción relativa en que ambos componentes se mezclan.

De acuerdo con lo anterior, las mezclas que contienen demasiada agua carecen de plasticidad por ser excesivamente fluidas, y las que poseen muy poca agua resultan duras y se comportan como cuerpos rígidos que no son fácilmente deformables y aptos para fluir. Dentro de estas dos condiciones extremas se sitúan las combinaciones de agua y de cemento que constituyen las pastas de cemento de consistencia plástica convencional. Cuantitativamente las proporciones de las pastas de cemento se definen por la relación agua/cemento, en peso, y sus valores usuales en el concreto convencional sin aditivos fluctúan entre 0.4 y 0.8, aproximadamente.

Una pasta de cemento de consistencia plástica, es una suspensión de granos de cemento en un medio acuoso. Es decir, en una pasta así, la concentración de cemento por unidad de volumen de pasta es tal, que no se establece contacto pleno entre los granos y estos

permanecen suspendidos por el efecto de las fuerzas de atracción y repulsión que actúan en ellos, y que mantienen un precario estado de equilibrio mientras la pasta permanece en reposo. En la Figura 2, se presenta el esquema de tres pastas de cemento con diferente concentración de granos de cemento por unidad de volumen de pasta, y se indican las fuerzas que en cada caso prevalecen.

Cuando la concentración de granos de cemento por unidad de volumen de pasta correspondiente al esquema (a) de la figura 2, se produce un cierto equilibrio de todas estas fuerzas de tal modo que los granos se conservan agrupados pero no establecen contacto permanente entre sí, lo cual significa que pueden tener cierto grado de movilidad sin dispersarse. En esta condición se dice que la pasta de cemento tiene consistencia plástica.

Por otra parte, la inclusión de aditivos, cuyos efectos básicos consisten en hacer más fluidas las pastas de cemento y las mezclas de concreto, produce diversas modificaciones a las fuerzas actuantes como: la reducción de la tensión superficial del agua, con lo cual disminuyen las fuerzas de atracción capilar; la adsorción de moléculas de aditivo por los granos del cemento, que incrementan las fuerzas de repulsión electrostática con lo cual son dispersados, y la formación de una película lubricante alrededor de los granos de cemento, que reduce la fricción entre éstos. Todos estos efectos sumados hacen que se reduzca la cohesión de la pasta y aumente la dispersión de los granos de cemento, es decir, disminuyen el esfuerzo de cedencia y la viscosidad plástica de la pasta de cemento con lo cual ésta adquiere mayor aptitud para deformarse y fluir.

	<p>a) Pasta de consistencia plástica Los granos de cemento se mantienen dispersos y en suspensión en la solución acuosa, de acuerdo con el alcance de las fuerzas actuantes:</p> <p>(1) Atracción molecular (Van der Waals) (2) Atracción Capilar (3) Repulsión electrostática (4) repulsión por la "presión de separación" (5) Fuerza de gravedad</p>
	<p>b) Pasta de consistencia fluida (lechada de cemento)</p> <p>Se reducen las fuerzas (1) a (4) y sólo permanece actuando con la misma intensidad la fuerza de la gravedad (5). Los granos de cemento disponen de mayor libertad para desplazarse, y tienden a sedimentarse en el seno de la solución acuosa. La pasta o lechada prácticamente carece de plasticidad.</p>
	<p>c) Pasta de consistencia "seca"</p> <p>Se incrementan las fuerzas (1) a (4) pero en el balance predomina la atracción molecular (1) por lo que los granos tienden a juntarse y a mantenerse unidos. Debido a la falta de movilidad de los granos, la pasta resulta rígida y difícil de moldear</p>

Figura tomada de: Manual de Tecnología del Concreto Tomo II, CFE (Comisión Federal de Electricidad).

FIGURA 2: Representación esquemática de tres pastas con diferente concentración de cemento por unidad de volumen.

Para representar el comportamiento reológico de un materia que se deforma y fluye bajo la acción de una velocidad de flujo con el nivel de fuerza externa, se acostumbra relacionar la velocidad de flujo con el esfuerzo cortante que se genera en el seno del material al incrementarse la magnitud de la fuerza aplicada. De esta manera se dispone

de dos variables, el gradiente de velocidad de flujo (dv/dy) y el esfuerzo cortante (τ), que al ser representadas gráficamente en un sistema de coordenadas cartesianas, constituyen el diagrama reológico que define el comportamiento del material en cuestión.

El diagrama reológico representa dos tipos básicos de fluidos: el diagrama (1) corresponde a los denominados fluidos de Newton, o newtonianos, y el diagrama (2) representa los llamados fluidos de Bingham (véase la Figura 3).

La ecuación de la recta, para los fluidos newtonianos es: $\tau = \eta \, dv/dy$, donde η es el coeficiente de viscosidad. Y en el caso de los fluidos de Bingham, se les considera representados por la recta indicada, cuya ecuación es: $\tau - f = U \, dv/dy$ en donde f y U son los llamados coeficientes reológicos.

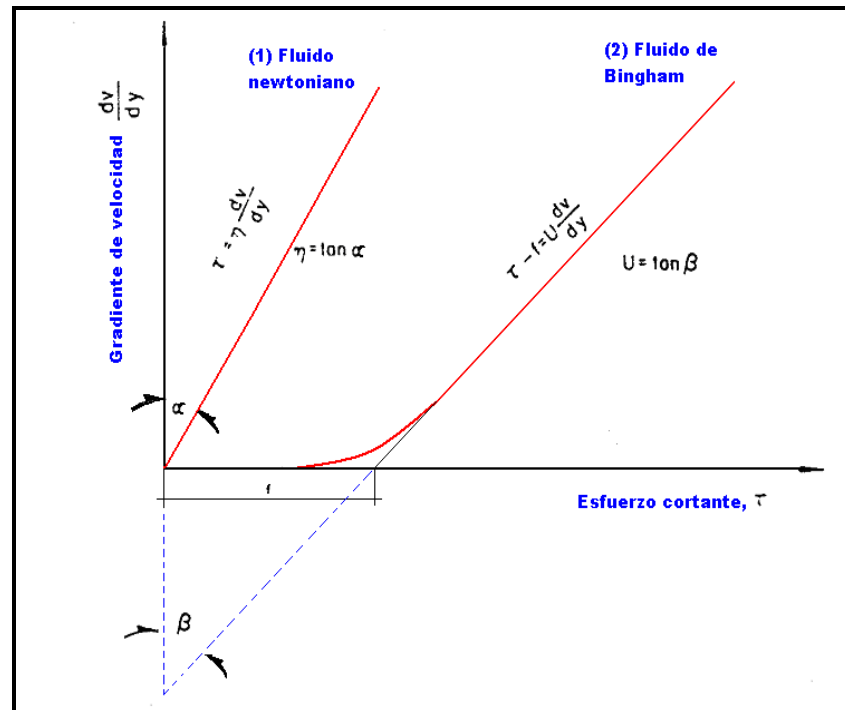


Figura tomada de: Manual de Tecnología del Concreto Tomo II. CFE (Comisión Federal de Electricidad).

FIGURA 3: Diagramas reológicos característicos de un fluido newtoniano y de un fluido de Bingham.

En el gráfico se observa que para un cierto intervalo inicial del esfuerzo aplicado la gráfica es curva, lo cual denota una etapa de transición de la pasta entre el estado plástico y el fluido. A partir de un determinado nivel de esfuerzo, llamado de cedencia (f), la gráfica se vuelve una línea recta y la pasta se comporta como un fluido sin cohesión, tipo Newtoniano. Si el esfuerzo se anula, la pasta recobra su estado inicial, como ocurre en el caso del fenómeno de tixotropía el cual es un comportamiento característico de los fluidos tipo Bingham, como la pasta de cemento.

En la mayoría de los trabajos con concreto que se realizan con métodos y equipos convencionales, se requiere el empleo de mezclas que posean suficiente cohesión para no segregarse, pero que al mismo tiempo puedan ser moldeadas y compactadas con la energía que normalmente son capaces de generar y transmitir dichos equipos. Esto significa que tales mezclas de concreto deben contener pastas de cemento de consistencia plástica cuyos coeficientes reológicos sean adecuados para el caso.

Entre los factores de índole intrínseca que influyen en la magnitud de los coeficientes reológicos de la pasta de cemento, el principal se refiere a la concentración de sólidos, definida por la relación agua/cemento (A/C) de la pasta.

Características reológicas de las mezclas de concreto

El comportamiento reológico, de una mezcla de concreto, puede verse como el resultado de combinar una pasta de cemento de consistencia plástica, con la máxima proporción de agregados que permita tener una masa deformable pero cohesiva, que pueda trabajarse bien, con equipos y procedimientos ordinarios.

Es posible hacer un símil, en el aspecto reológico, entre el papel que desempeña el agua en la pasta de cemento y la función que cumple ésta en el concreto recién mezclado. De esta manera, puede considerarse que si a una pasta de cemento con determinada consistencia se le incrementa progresivamente el contenido de partículas de agregados, resultan mezclas de concreto cuya aptitud para deformarse y fluir se reduce

consecutivamente. En forma equivalente a la expuesta en la Figura 2, para la pasta de cemento. En la Figura 4, se hace la representación esquemática de tres mezclas de concreto con diferente concentración de partículas de agregados por unidad de volumen.

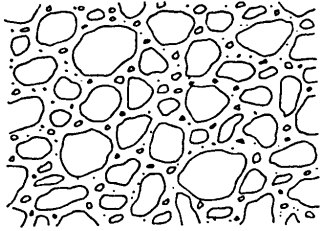
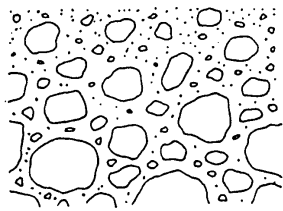
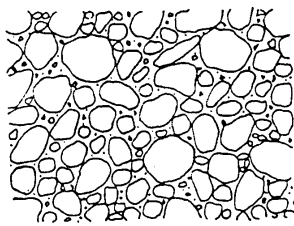
	<p>a) Mezcla de concreto de consistencia plástica, con el contenido óptimo de pasta de cemento. Las partículas de los agregados no hacen contactos permanentes, tienen una movilidad limitada y se mantienen uniformemente dispersas en la pasta de cemento. La mezcla de concreto se muestra cohesiva, pero se deforma y fluye con relativa facilidad, sin segregarse.</p>
	<p>b) Mezcla de concreto de consistencia blanda, por exceso de pasta de cemento. Las partículas de los agregados no llegan a establecer contacto permanente, disponen de una gran movilidad, y las de mayor tamaño propenden a sedimentarse. La mezcla de concreto muestra poca cohesividad, por lo que se deforma y fluye con facilidad, pero con tendencia a segregar.</p>
	<p>c) Mezcla de concreto de consistencia dura, por defecto de pasta de cemento. Las partículas de los agregados hacen contactos transitorios y permanentes entre sí, y prácticamente no disponen de movilidad, por lo que la mezcla de concreto resulta dura y requiere la aplicación de un alto esfuerzo para lograr su deformación y compactación, pero sin llegar a fluir propiamente.</p>

Figura tomada de: Manual de Tecnología del Concreto Tomo II. CFE (Comisión Federal de Electricidad).

FIGURA 4: Representación esquemática de tres mezclas de concreto con diferente concentración de agregados.

Para juzgar comparativamente el comportamiento reológico que puede esperarse de las tres mezclas de concreto representadas en la figura 4, es conveniente insistir en el concepto de trabajabilidad, en términos de facilidad de colocación, mezclado y transporte para que su consistencia sea acorde con los medios de trabajo, y en lo relativo

a la homogeneidad el concepto es más claro, pues evidentemente se refiere al hecho de conservar la distribución relativa de los componentes del concreto, durante y después de la realización de todas las operaciones indicadas, es decir, que no se produzca segregación ni sangrado, en magnitud objetable. [8]

El solo hecho de que una mezcla de concreto contenga una concentración de agregados dentro de la zona plástica, no es suficiente para que posea las condiciones reológicas que le permitan deformarse y fluir sin segregar, cuya característica es inherente a las mezclas que son trabajables, sino que también es necesario que dicha mezcla de concreto contenga una pasta de cemento con la cohesión y viscosidad que caracteriza a los fluidos de Bingham. Si esto se cumple, puede suponerse entonces que la mezcla de concreto también manifieste el comportamiento reológico que identifica a dichos fluidos, lo cual significa que:

- 1) La mezcla de concreto en estado de reposo posee una cierta cohesión que le impide deformarse y fluir, a menos que se le apliquen fuerzas capaces de producir esfuerzos internos mayores que el valor de la cohesión.
- 2) Una vez vencida la cohesión e iniciado el estado de movimiento, la mezcla de concreto exhibe una determinada viscosidad que le permite desplazarse como un fluido continuo y homogéneo, es decir sin segregar, mientras permanecen actuando las fuerzas que generan los esfuerzos de deformación y flujo.
- 3) Al suspenderse la acción de las fuerzas motrices, la mezcla de concreto recupera el estado de reposo y su condición de cuerpo cohesivo, aunque con un cierto grado de compacidad que se refleja en un ligero incremento de su cohesión. Es decir, si se requiere volver a deformar y fluidificar la mezcla de concreto por segunda ocasión, es necesario comunicarle mayor cantidad de energía, mediante fuerzas capaces de vencer la cohesión incrementada.

2.3.1.4 ASPECTOS QUE DEFINEN LA TRABAJABILIDAD DEL CONCRETO FRESCO

De acuerdo con el Comité ACI 309 ^[10], hay tres principales características funcionales del concreto en estado fresco:

a) Estabilidad

Esta característica se refiere a la resistencia que las mezclas oponen para segregarse, es decir, la separación parcial del agregado grueso del resto de masa de concreto, y exudar agua “sangrado”; en otras palabras, representa su disposición para conservarse homogéneas.

b) Compactabilidad

Corresponde a la facilidad con que las mezclas de concreto permiten la remoción del aire atrapado durante el moldeo, a fin de lograr un alto grado de compacidad en el concreto endurecido.

c) Movilidad

Representa la aptitud de las mezclas de concreto para deformarse y fluir; cuya característica depende de la cohesión, viscosidad y ángulo de fricción interna del concreto fresco.

2.3.1.5 MEDIOS PARA EVALUAR LA TRABAJABILIDAD DEL CONCRETO FRESCO

Para evaluar mezclas satisfactorias de concreto deben tomarse en cuenta las características del concreto en estado fresco, las cuales son verificables por medios accesibles y en conjunto se complementan para ofrecer una perspectiva global de su trabajabilidad. Dichas características son:

Homogeneidad y uniformidad

La homogeneidad es condición necesaria en el curso de todas las operaciones a que se someta la mezcla para que esta sea trabajable. Es posible considerar la homogeneidad original del concreto fresco desde dos puntos de vista: por un lado la del mezclado, que corresponde a la homogeneidad "en el seno de la revoltura", esta depende esencialmente del acto de mezclado, que involucra la forma y la secuencia como se administran los ingredientes, y las características y condiciones del funcionamiento del equipo mezclador y el tiempo de revoltura, principalmente. Y por otro lado la producción, que se refiere a la uniformidad del concreto de revoltura a revoltura, la cual es más bien un reflejo de la eficacia del proceso de producción, incluyendo su calibración rutinaria, y el control de calidad.

Es importante que el concreto recién mezclado sea homogéneo, es decir que las revolturas de concreto posean una distribución uniforme de todos sus componentes al salir de la mezcladora, de manera que las operaciones subsecuentes se realicen en forma tal que cada revoltura conserve la homogeneidad original. Para evaluar la homogeneidad al término del mezclado se toman dos muestras en diferentes porciones al principio y final de la descarga, mediante el método de muestreo ASTM C 172.

La falta de homogeneidad en el seno de una mezcla puede ser por algunos factores que la afectan adversamente, como el sistema de carga y el orden de rapidez con que se introducen los ingredientes a la mezcladora; el tipo, la capacidad, condiciones mecánicas, el sistema de descarga de la mezcladora; el tiempo de revoltura; la consistencia del concreto y el tamaño máximo del agregado y /o el procedimiento de muestreo y prueba del concreto.

Consistencia (cohesión y viscosidad)

La consistencia de las mezclas de concreto, es una característica que se relaciona principalmente con la movilidad, pero también considera que determina la facilidad con que una mezcla puede ser compactada ^[10]. La manera más usual para evaluarla es por

medio de la prueba de revenimiento (ASTM C 143). También se considera que esta característica determina la facilidad con que una mezcla puede ser compactada; conviene observar, entonces, que en ningún caso se asocia la consistencia de las mezclas de concreto con el aspecto de su estabilidad, o aptitud para conservarse homogéneas.

Al descargar de la mezcladora una revoltura de concreto que cumple requisitos de homogeneidad, se plantea el compromiso de transportarla, colocarla y dejarla compactada en la estructura, sin que sufra alteraciones sustanciales en su homogeneidad original. Cuando los equipos, el personal y los procedimientos que se utilizan en estas operaciones son los adecuados, el logro de ese objetivo pasa a depender primordialmente de la disposición que la mezcla de concreto manifieste para deformarse y fluir sin perder homogeneidad, en el curso y al término de dichas operaciones.

La disposición que una mezcla de concreto ofrece para deformarse y fluir, corresponde al aspecto de movilidad, el cual depende significativamente de la cohesión y la viscosidad plástica de la mezcla como fluido de Bingham. La cohesión, que se identifica con el esfuerzo de cedencia, representa en cierto modo la resistencia que la mezcla opone para deformarse e iniciar el flujo, en tanto que la viscosidad plástica da noción de la facilidad y rapidez con que la mezcla puede fluir, una vez rebasada la cohesión e iniciado el movimiento. Entonces, desde un punto de vista práctico, lo deseable es que las mezclas de concreto fluyan con facilidad, pero permaneciendo homogéneas. Sin embargo, los requerimientos para que se cumplan estas dos condiciones siguen tendencias contrarias, pues al aumentar la movilidad de mezclas de concreto disminuye su posibilidad de permanecer homogéneas.

La consistencia, es representativa de la resistencia que el concreto opone para deformarse y fluir, entonces puede hablarse de “grados de consistencia” valorables en función de dicha resistencia a la deformación y flujo. Sin embargo, debido a que no hay un procedimiento de aceptación general para medir cuantitativamente esta resistencia, en la práctica se recurre normalmente a dos modelos para expresar los grados de

consistencia de las mezclas de concreto, por una parte en términos descriptivos, basados en la apariencia del concreto y el comportamiento que exhibe al ser manipulada, y por otra parte en términos cuantitativos, con base en los resultados de alguna prueba específica.

En referencia a términos descriptivos podemos mencionar en orden ascendente que una mezcla puede ser de consistencia fluida, plástica o dura, con sus respectivos calificativos intermedios o superlativos.

En términos cuantitativos existen numerosos métodos cuya aptitud depende del nivel o grado de consistencia que quiere medirse. (véase la Figura 5)

La prueba estándar de revenimiento es un ensayo prácticamente estático en el que la muestra de concreto se deforma exclusivamente por efecto de la reducida energía potencial de la propia muestra; también puede ser útil para dar información acerca de su cohesividad y posible comportamiento durante su manipulación en obra. Ahora bien, un concreto fluido mediante la incorporación de aditivos plastificantes da un revenimiento mayor de 19 cm (véase la Figura 6) ^[11], el concreto normal o convencional proporciona revenimientos entre 2.5 cm y 17.5 cm ^[12] (véase la Figura 7), el concreto masivo posee revenimientos entre 2.5 cm y 5 cm ^[12] y el concreto muy duro es el que proporciona un revenimiento máximo de 2.5 cm ^[13] al cual se le conoce como “concreto sin revenimiento”.

Procedimientos de Medición	TIPOS DE CONCRETO						
	Fluido	Normal		Masivo	Sin revenimiento		
		Grados de Consistencia de las Mezclas					
	Fluida	Semi-Fluida	Plástica	Semi-Plástica	Dura	Muy Dura	Extremadamente Dura
Extensibilidad (DIN 1048)							
Revenimiento (ASTM C 143)							
Bola de penetración Kelly (ASTM C 360)							
Factor de Compactación							
Mesa de Sacudidas (ACI 211.3)							
Mesa Vibratoria Vebe (ACI 211.3)							
Simbología <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="width: 20px; height: 10px; background-color: gray; border: 1px solid black;"></div> <div>Intervalo de aplicación confiable</div> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center; margin-top: 5px;"> <div style="width: 20px; height: 10px; background-color: red; border: 1px solid black;"></div> <div>Intervalo adicional, de aplicación con reservas</div> </div>							

Figura tomada de: Manual de Tecnología del Concreto Tomo II. CFE (Comisión Federal de Electricidad).

FIGURA 5: Intervalos de consistencia para diferentes tipos de concreto fresco en los cuales son aplicables los procedimientos de medición de uso común.

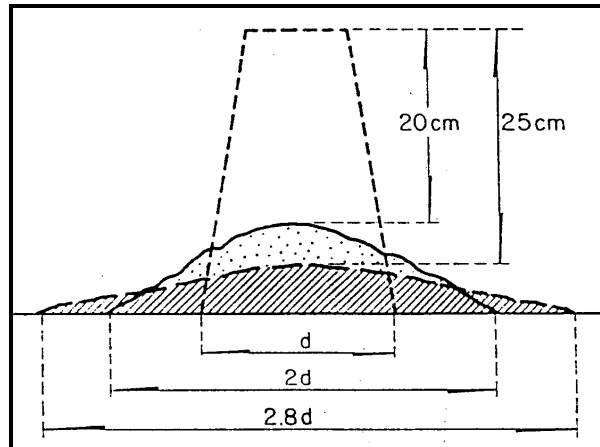


Figura tomada de: Manual de Tecnología del Concreto Tomo II. CFE (Comisión Federal de Electricidad).

FIGURA 6: Representación esquemática de la prueba de revenimiento en mezclas de concreto fluido.

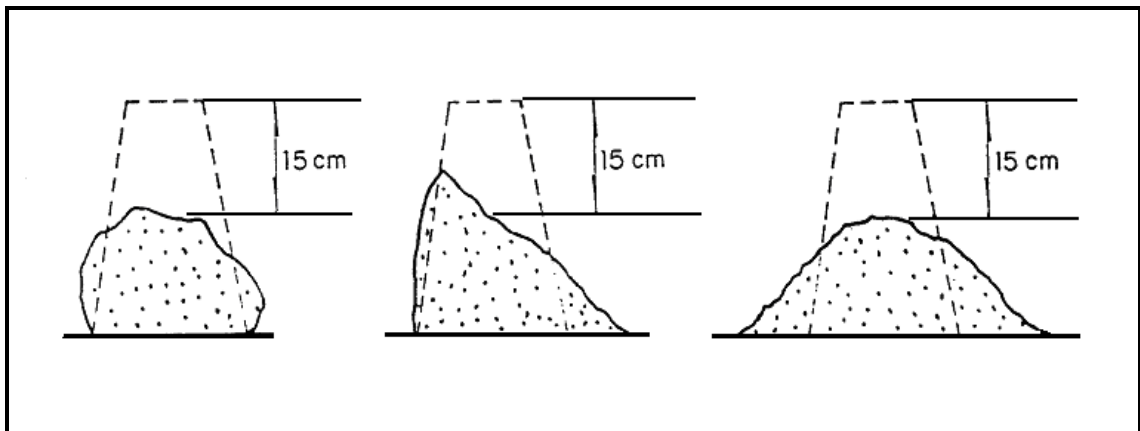


Figura tomada de: Manual de Tecnología del concreto Tomo II. CFE (Comisión Federal de Electricidad).

FIGURA 7: Representación esquemática de tres mezclas de concreto convencional con el mismo revenimiento, pero con diferente cohesividad.

Por otra parte existen factores que en términos generales tienen alguna injerencia en la variación de la consistencia del concreto fresco tanto en la elaboración como en el lapso inmediato son los presentados en la Tabla 6.

TABLA 6 : Factores que influyen en la consistencia del concreto fresco.

Durante el proceso de elaboración	Factores intrínsecos	<ul style="list-style-type: none"> - Característica de los componentes - Proporción de los componentes - Temperatura de la mezcla
	Factores Extrínsecos	<ul style="list-style-type: none"> - Temperatura y humedad - Tiempo de mezclado - Procedimiento para medir consistencia
Durante el lapso inmediato posterior a la elaboración	Factores intrínsecos	<ul style="list-style-type: none"> - Característica de los componentes - Grado de consistencia inicial - Incompatibilidad de componentes (cemento y aditivos)
	Factores Extrínsecos	<ul style="list-style-type: none"> - Temperatura y humedad ambiental - Condiciones y exposición y manejo del concreto - Procedimiento para medir consistencia.

FUENTE: Manual de Tecnología del concreto Tomo II. CFE (Comisión Federal de Electricidad).

▪ **Influencia de las características de los componentes**

Hay características del cemento y los agregados cuyas variaciones modifican el requerimiento de agua en el concreto, y por lo tanto influyen en los cambios de consistencia de las mezclas, de revoltura a revoltura. Asimismo, ciertas características de estos componentes del concreto pueden tener influencia en el cambio acelerado de consistencia que manifiestan algunas mezclas a raíz de su elaboración, fenómeno indeseable que en términos prácticos se designa como “pérdida prematura de revenimiento”. La característica del cemento Pórtland que normalmente influye en el requerimiento de agua del concreto es la finura; sin embargo, esta es una característica que suele variar poco durante el suministro del cemento, si se mantiene constante el tipo y la procedencia de fabricación. De no ser así, es necesario determinar el requerimiento de agua del concreto con diferentes cementos de uso previsto, a fin de hacer los ajustes que procedan durante la producción del concreto.

▪ **Influencia de la proporción de los componentes**

Después de verificar y tomar en cuenta las características que exhiben los componentes en el momento de elaborar el concreto, y de realizar los ajustes pertinentes, se obtiene como resultado la cantidad de cada componente que debe dosificarse para dar una mezcla de consistencia requerida. La uniformidad con que se puede producir esta

consistencia en la elaboración del concreto, de revoltura a revoltura, dependen significativamente en esta etapa del grado de precisión con que se dosifican los componentes. Normalmente es más notoria la influencia que ejercen las variaciones del agua y los aditivos que las del cemento y los agregados. En la Figura 8 se observa la forma de comportamiento del concreto cuando se relaciona el contenido de agua del concreto y su correspondiente medida por el revenimiento.

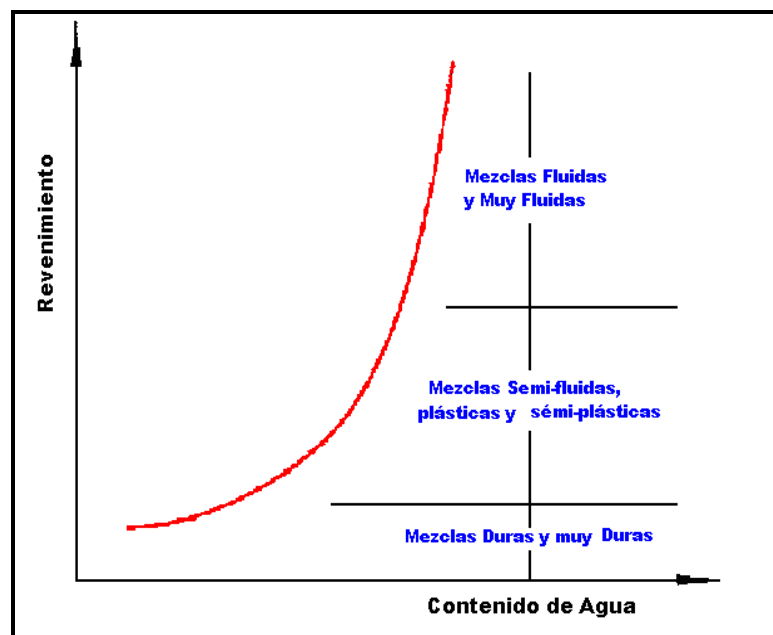


Figura tomada de: Manual de Tecnología del Concreto Tomo II. CFE (Comisión Federal de Electricidad).

FIGURA 8: Variación del revenimiento al aumentar el contenido de agua en el concreto.

- Temperatura de la mezcla

La variación de la temperatura del concreto al ser mezclado, puede ser una causa importante de cambios en la consistencia de las mezclas y un obstáculo para lograr una adecuada uniformidad en la calidad del concreto. La temperatura de una mezcla de concreto recién elaborada depende básicamente de la temperatura de cada uno de sus componentes y de las respectivas cantidades en que se emplean, de manera que puede ser calculada con razonable aproximación conociendo dichas temperaturas y cantidades. [14]

A igualdad de cantidades, la temperatura del agua es la que más influye en la temperatura del concreto recién mezclado, debido a que su calor específico ($1 \text{ cal/g } ^\circ\text{C}$) es cerca de cinco veces mayor que el del cemento y los agregados (de 0.20 a $0.24 \text{ cal/g } ^\circ\text{C}$). Sin embargo, debido a que el agua se utiliza en menor proporción y porque en condiciones ordinarias su temperatura se mantiene razonablemente estable durante el suministro, son más bien el cemento y los agregados los componentes cuyas variaciones de temperatura suelen reflejarse en las temperaturas resultantes en las mezclas de concreto. La temperatura con que el concreto se elabora tiene consecuencias inmediatas en el requerimiento de agua y en la consistencia de la mezcla (véase la Figura 9) ^[15]; esto es, que al variar la temperatura de elaboración del concreto se modifica sensiblemente el revenimiento y por consiguiente, para mantenerlo constante, se hace necesario ajustar convenientemente el contenido de agua de mezcla.

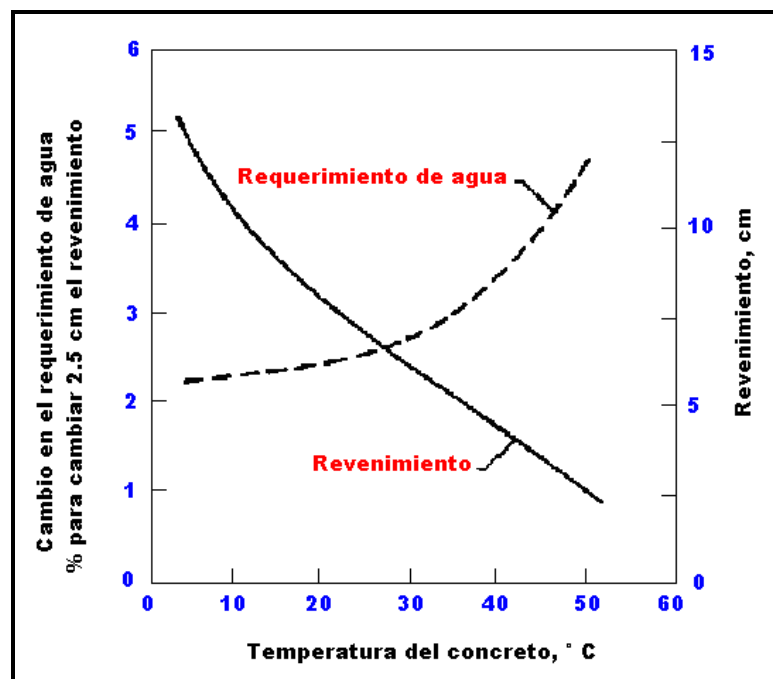


Figura tomada de: Manual de Tecnología del Concreto Tomo II. CFE (Comisión Federal de Electricidad).

FIGURA 9: Influencia de la temperatura del concreto en el revenimiento y en el ajuste del requerimiento de agua de mezclado.

Estabilidad (segregación y sangrado)

Se considera que una mezcla de concreto se comporta como una suspensión estable, en la medida que se opone a perder su homogeneidad original en el lapso comprendido desde que abandona la mezcladora hasta que adquiere el fraguado en su posición final, ya colocada dentro de la estructura. Al referirse al comportamiento de una mezcla de concreto como suspensión estable, es posible considerar que puede perder homogeneidad por dos diferentes razones: la pérdida que obedece a factores de índole interna y la que se produce como consecuencia de acciones externas. En el primer caso el demérito de la homogeneidad se manifiesta por los fenómenos simultáneos identificados como asentamiento y sangrado; en tanto que la manifestación más evidente del segundo es la separación parcial del agregado grueso del resto de la masa, lo cual se conoce como segregación de la grava.

Compacidad (densidad relativa)

Una vez depositado, el concreto fresco no debe ser desplazado más que lo indispensable dentro del espacio cimbrado, a fin de no segregarlo. Si el concreto solamente se deposita y se deja fraguar y endurecer en estas condiciones, puede convertirse en una masa rígida de estructura muy porosa, e incluso cavernosa, que no se adapta fielmente a la forma del espacio cimbrado, no se adhiere correctamente al acero de refuerzo y no adquiere cabalmente sus propiedades potenciales como concreto endurecido.

Acabado superficial

El concepto de acabado, se refiere a las características que deben poseer dichas superficies para cumplir determinados requisitos, normalmente definidos en las especificaciones de la obra.

2.3.2 ETAPA DE FRAGUADO DEL CONCRETO

2.3.2.1 ETAPAS DEL PROCESO DE FRAGUADO

En este proceso evolutivo se distinguen tres principales etapas que corresponden a otros tantos estados característicos del concreto:

- 1) El lapso anterior al fraguado, durante el cual el concreto se manifiesta como una mezcla relativamente blanda y moldeable, en función de la consistencia con que se elabora.
- 2) El lapso de fraguado, en cuyo curso la mezcla aumenta progresivamente de consistencia, para convertirse en una masa rígida que ya no es moldeable, pero que aún no adquiere resistencia mecánica apreciable.
- 3) El lapso posterior al fraguado que corresponde a la etapa del endurecimiento propiamente dicho.

Por razones de utilidad práctica, se considera que la primera etapa es aquella en que el concreto puede ser moldeado o remodelado; en la segunda etapa el concreto se halla en curso de rigidización y ya no puede ser moldeado o remodelado sin riesgo de causarle daño permanente, pero admite la ejecución de ciertas operaciones superficiales relacionadas con la obtención del acabado requerido.

2.3.2.2 EVOLUCIÓN DEL FRAGUADO

Expresado en términos de su manifestación física, el fraguado es la condición adquirida paulatinamente por una pasta de cemento o por una mezcla de mortero o de concreto, cuando ha perdido plasticidad, definido normalmente en función de su resistencia a la penetración o de su deformación. Además de esta manifestación, que se puede denominar normal, hay otras dos formas de fraguado que son anormales e indeseables: como el falso fraguado que se manifiesta por una rápida pérdida de plasticidad, prácticamente sin desarrollo de calor, que puede ser restituida con un remezclado sin

añadir agua, y el fraguado instantáneo que se caracteriza también por una súbita pérdida de plasticidad, pero con gran desarrollo de calor, y en cuyo caso la plasticidad no puede ser restituida con un remezclado, a menos que se adicione agua.

Al seguir el proceso de rigidización del concreto en sus dos primeras etapas por el método de las agujas de penetración (ASTM C 403) se obtiene una evolución como la que se presenta en la Figura 10. Independientemente del grado de aproximación con que estas resistencias a la penetración puedan corresponder a los estados del concreto cuya representación y significado práctico se les adjudica.

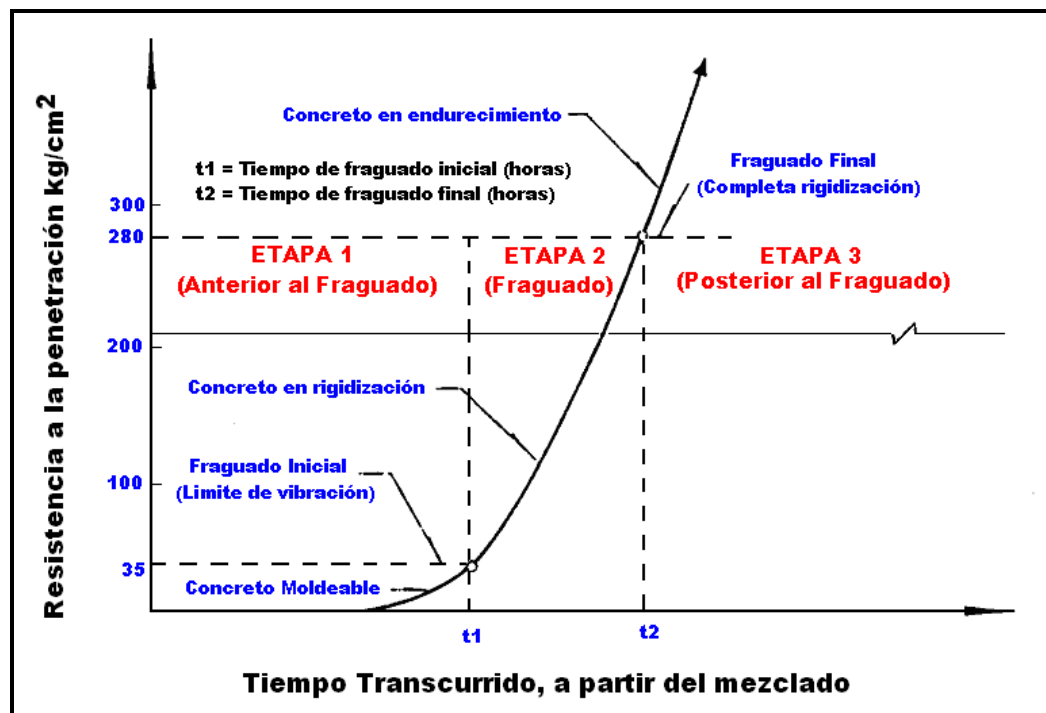


Figura tomada de: Manual de Tecnología del Concreto Tomo II. CFE (Comisión Federal de Electricidad).

FIGURA 10: Gráfico de las etapas de fraguado del concreto utilizando las agujas de Vicat.

El fraguado del cemento

Puede esperarse que la rigidización de la pasta de cemento evolucione gradualmente, y que el tiempo requerido por la mezcla de concreto para pasar del estado plástico al

rígido resulte dentro de límites que en la práctica han resultado adecuados y suficientes para llevar a cabo todas las operaciones constructivas en condiciones ordinarias.

Debido al efecto que la temperatura ejerce en la velocidad de hidratación del cemento, para reglamentar los límites del tiempo de fraguado, es necesario reglamentar también la temperatura a que evoluciona. Por consiguiente, lo usual es que la duración del fraguado como requisito, solamente se exija para el cemento cuando se ensaya a una temperatura constante normalizada, que en los métodos de prueba ASTM es igual a $23 \pm 2^\circ \text{C}$.

Fraguado del concreto

En lo que concierne al concreto convencional, el tiempo de fraguado no suele ser motivo de reglamentación en las especificaciones, salvo que se utilicen aditivos que la modifiquen, en cuyo caso lo que se acostumbra limitar es el efecto que produce el aditivo con relación a lo que tarda en fraguar el mismo concreto sin el aditivo.

Para seguir la evolución del fraguado del concreto, existen diversos procedimientos que miden los cambios que se operan en el concreto conforme se rigidiza en cuanto a resistencia al paso de una corriente eléctrica, velocidad de propagación de ondas sónicas, generación de calor, deformabilidad, resistencia mecánica, etc., de todos los cuales solamente se halla reglamentado por métodos ASTM el que mide la resistencia a la penetración con agujas tipo proctor, de la fracción mortero obtenida por cribado en húmedo del concreto mediante la malla N° 4 (4.75 mm).

2.3.3 ENDURECIMIENTO DEL CONCRETO

Al entrar el concreto a la tercera etapa es cuando propiamente comienza la formación del tejido filamentosos producto de la hidratación, o gel de cemento, que endurece la pasta y que a su vez la capacita para aglutinar las partículas de los agregados, dándole resistencia mecánica a la masa del concreto.

La hidratación del cemento es un proceso que en condiciones favorables de humedad y temperatura evoluciona sin pausas, de manera tal que sus manifestaciones sucesivas, fraguado y endurecimiento, se producen sin interrupción. También por definición convencional, el fraguado del concreto concluye cuando alcanza una resistencia a la penetración igual a 280 kg/cm² al ser ensayado por el método de prueba ASTM C 403, y a partir de ahí comienza su verdadero endurecimiento. Juzgado físicamente en ese momento, el concreto recién fraguado es un material rígido pero frágil, con una incipiente resistencia mecánica que medida a compresión no suele exceder a 7 kg/cm².

2.4 CONCRETO EN ESTADO ENDURECIDO

2.4.1 DEFINICIÓN Y PROPIEDADES DEL CONCRETO ENDURECIDO

En la tercera etapa es cuando el concreto ya fraguado inicia el proceso de verdadero endurecimiento que lo conduce a la adquisición de propiedades mecánicas y de otra índole, cuyo desarrollo suele representarse mediante la evolución de la resistencia a compresión simple del concreto.

Al concreto endurecido no solamente debe exigírsele capacidad mecánica para soportar esfuerzos, sino que además debe proveérsele de una composición idónea, que lo haga apto para resistir con éxito durante toda la vida útil de la estructura, los efectos de las acciones dañinas que en cada caso prevalezcan; y para ello es necesario conocer anticipadamente las características de los materiales previstos para la elaboración del concreto y las condiciones de exposición en que deban prestar servicio las estructuras, a fin de poder adoptar las precauciones que en consecuencia procedan.

Propiedades requeridas por condiciones operativas.

En función de tales condiciones, es posible considerar dos casos principales: 1) cuando el funcionamiento de la estructura sólo demanda del concreto, como condición prioritaria, un determinado comportamiento mecánico, o estructural, y 2) cuando la estructura debe

operar en condiciones de exposición y servicio tales que sus efectos crean el riesgo de que se deteriore prematuramente el concreto (véase la Tabla 7).

TABLA 7: Características y propiedades del concreto endurecido relacionadas con su funcionamiento estructural y su durabilidad.

COMPORTAMIENTO	PROPIEDADES Y CARACTERÍSTICAS RELATIVAS
1. Funcionamiento estructural	Resistencia mecánica (compresión, tensión, cortante).
	Deformación bajo carga (módulo de elasticidad, relación de Poisson, fluencia).
	Adherencia con el acero de refuerzo.
	Resistencia a la fatiga.
2. Durabilidad	
a) En condiciones más frecuentes	Estabilidad dimensional (cambios volumétricos por humedad y temperatura)
	Estabilidad química (reacciones deletéreas cemento-agregados)
	Resistencia a la congelación y al deshielo
	Resistencia al ataque de sulfatos
	Resistencia a la penetración de líquidos y gases (permeabilidad)
	Protección al acero de refuerzo contra corrosión
	Resistencia al intemperismo (sanidad)
	Resistencia a la abrasión mecánica
	Resistencia a la erosión hidráulica
b) En condiciones eventuales	Resistencia al ataque de sustancias químicas diversas
	Resistencia a las temperaturas elevadas permanentes y ocasionales (incendio)
	Resistencia a la cavitación
	Resistencia al impacto
3. Misceláneos	Resistencia a las radiaciones (blindaje)
	Conductividad eléctrica
	Aislamiento térmico
	Propiedades acústicas

FUENTE: Manual de Tecnología del concreto Tomo III. CFE (Comisión Federal de Electricidad).

2.4.2 RESISTENCIA MECÁNICA

La resistencia mecánica del concreto endurecido ha sido tradicionalmente la propiedad más identificada con su comportamiento como material de construcción, lo cual se ha considerado atribuible a tres principales razones ^[16]: 1) la resistencia mecánica (a compresión o tensión) tiene influencia directa en la capacidad de carga de las estructuras, 2) es la propiedad más fácilmente determinable en el concreto endurecido, y 3) los resultados de su determinación pueden ser utilizados como datos índice de otras propiedades del concreto.

En términos generales, la resistencia mecánica que potencialmente puede desarrollar el concreto depende de la resistencia individual de los agregados, la pasta de cemento endurecida, y de la adherencia que se produce entre ambos materiales. En la práctica, habría que añadir a estos factores el grado de densificación logrado en la mezcla de concreto en la estructura ya que, como ocurre con otros materiales, la proporción de vacíos en el concreto endurecido tiene un efecto decisivo en su resistencia mecánica y finalmente la resistencia del conjunto es dictada por la que resulte más débil de las tres.

Generalmente la resistencia intrínseca de los agregados de calidad normal es superior a la que se requiere en el concreto convencional, de manera que el caso más común es que la resistencia del concreto sea gobernada por la pasta de cemento y/o por el grado de adherencia en el contacto pasta-agregado ^[17].

Resistencia a la Compresión

La determinación de la resistencia a la compresión del concreto se efectúa mediante el ensayo hasta la ruptura de especímenes representativos, con tres finalidades principalmente: 1) comprobar si las previsiones que se hacen al diseñar una mezcla de concreto son adecuadas para cumplir con la resistencia de proyecto, 2) controlar la uniformidad de las resistencias y ajustarlas al nivel requerido durante la producción del concreto, y 3) verificar la resistencia del concreto como se encuentra en la estructura.

En la Tabla 8 se incluyen las especificaciones, métodos de prueba y prácticas ASTM relacionadas con la determinación de la resistencia a compresión del concreto en especímenes representativos.

TABLA 8: Condiciones y procedimientos normalizados para la determinación de la resistencia a compresión del concreto en especímenes representativos.

ESPECIFICACIONES, MÉTODOS DE PRUEBA Y PRÁCTICAS USUALES	ASTM
<u>Para especímenes de laboratorio:</u>	
-Elaboración y curado en el laboratorio de especímenes de concreto de prueba. (Práctica).	C 192
<u>Para especímenes de obra:</u>	
-Elaboración y curado en el campo, de especímenes de concreto de prueba. (Práctica)	C 31
<u>Para especímenes de laboratorio y obra:</u>	
-Elaboración, curado acelerado y ensayo de especímenes de concreto a compresión. (Método de prueba)	C 684
<u>Para especímenes obtenidos en la estructura :</u>	
-Resistencia a compresión de cilindros de concretos colados en el lugar, en moldes cilíndricos. (Método de prueba).	C 873
-Obtención y ensayo de núcleos barrenados y prismas cortados de concreto. (Método de prueba)	C 42
<u>Para uso común en todos los casos:</u>	
-Moldes para colar verticalmente cilindros de concreto de prueba. (Especificación)	C 470
-Gabinetes y cuartos húmedos, y tanques de almacenamiento de agua, para ensayos de cemento y concreto hidráulicos. (Especificación)	C 511
-Cabeceo de especímenes cilíndricos de concreto.	C 617
-Resistencia a compresión de especímenes cilíndricos de concreto. (Método de prueba)	C 39
-Verificación de la carga en máquinas de ensayo (Práctica)	E 4

FUENTE: Manual de Tecnología del concreto Tomo III. CFE (Comisión Federal de Electricidad).

Se debe mencionar además que los especímenes representativos pueden ser elaborados durante la fabricación del concreto, mediante la obtención de muestras del concreto en estado fresco, o bien pueden ser obtenidos del concreto ya endurecido en la estructura.

Para extraer los especímenes de la estructura existen dos procedimientos: el método tradicional que consiste en extraer especímenes cilíndricos (núcleos) por barrenación o especímenes prismáticos (vigas) mediante el corte con sierra, y el método alternativo

que es menos usual (porque su empleo se restringe a elementos planos horizontales) en el que se dejan moldes cilíndricos especiales sujetos a la cimbra de fondo.

En la Tabla 9 se presenta un resumen de las características dimensionales requeridas para los especímenes cilíndricos en los que se determinan la resistencia a compresión del concreto.

TABLA 9: Requisitos dimensionales de los especímenes cilíndricos especificados para determinar la resistencia a compresión del concreto, conforme a procedimientos normalizados.

CONCEPTO	Especímenes del concreto fresco		Especímenes extraídos de la estructura	
	En el laboratorio	En el campo	Por barrenación	Colados en la estructura
Norma Aplicable:				
ASTM	C 192	C 31	C 42	C 873
Diámetro (d):				
Requisito general	$d \geq 3$ TMA (*)	$d \geq 3$ TMA	$d \geq 2$ TMA	$d \geq 3$ TMA
Mínimo permisible	(2")	(6")	(2")	(4")
Altura (h):				
Requisito general	$h = 2d$	$h = 2d$	$h = \begin{cases} \geq d \\ \leq 2d \end{cases}$	$h = \begin{cases} \geq d \\ \leq 2d \end{cases}$
Mínimo permisible	(4")	(12")	(2")	(4")
Relación de Esbeltez:				
Requisito general	$\frac{h}{d} = 2$	$\frac{h}{d} = 2$	$\frac{h}{d} = \begin{cases} \geq 1 \\ \leq 2 \end{cases}$	$\frac{h}{d} = \begin{cases} \geq 1 \\ \leq 2 \end{cases}$
Mínimo permisible	2	2	1	1

FUENTE: Manual de Tecnología del concreto Tomo III. CFE (Comisión Federal de Electricidad).

* TMA: Tamaño Máximo del agregado.

Fabricación y curado de los especímenes.

En la Tabla 10, se resumen los datos característicos correspondientes a la elaboración y curado de los especímenes en que se determina la resistencia a compresión.

TABLA 10: Resumen de requisitos usuales para la elaboración y curado de los especímenes para determinar la resistencia a compresión del concreto.

TIPO DE ESPECIMENES	ELABORACIÓN (OBTENCIÓN)	CONSERVACIÓN (CURADO)
1. especímenes fabricados en moldes estándar, por muestreo del concreto fresco:		
a) En laboratorio (ASTM C 192)	Llenado del molde en capas de, igual espesor, compactadas con varilla o por vibración según revenimiento.	Primeras 24 horas: en los moldes, protegidos de la evaporación, a 23 ± 2 °C. A continuación: inmersión en agua saturada de cal, o en ambiente con 95% HR (*) (mínimo) a 23 ± 2 °C.
b) En Obra (ASTM C 31)	Llenado del molde en capas de igual espesor, compactadas con varilla o por vibración según revenimiento.	Primeras 48 horas (como máximo): en los moldes protegidos de la evaporación, o inmersión en agua saturada de cal, a temperatura entre 16 y 27 °C. A continuación: inmersión en agua saturada de cal, o en ambiente con 95% HR (mínimo) a 23 ± 2 °C.
2. Especímenes extraídos de la estructura:		
a) Núcleos recuperados por perforación (ASTM C 42)	Perforación del concreto endurecido con una máquina provista de broca con corona de diamante.	Inicial: en las mismas condiciones de la estructura, hasta el momento de la barrenación. Después de la extracción (previamente al ensayo): -Ensayo en condición húmeda: 40 horas (mínimo) de inmersión en agua saturada de cal, a 23 ± 2 °C. -Ensayo en condición seca: 7 días de secado al aire con menos de 60% HR, entre 15 y 30 °C.
b) Cilindros colados dentro de la estructura (ASTM C 873)	Llenado y compactación del molde adosado a la cimbra, simultáneamente con el colado de la estructura.	En las mismas condiciones de la estructura hasta el momento de su extracción, para ensayo inmediato sin cambio de condiciones.

FUENTE: Manual de Tecnología del concreto Tomo III. CFE (Comisión Federal de Electricidad).

* HR = Humedad Relativa.

Preparación y ensayo de los especímenes

En sus aspectos esenciales, los requisitos de las condiciones de prueba para los especímenes cilíndricos de concreto, en lo que se refiere a su preparación y ensayo, son iguales para los especímenes que se fabrican en moldes estándares y para los que se extraen de las estructuras.

Hay dos factores cuya influencia es decisiva y que por ello se reglamentan con precisión: la “planeidad” de las superficies y su perpendicularidad con el eje del cilindro. El método ASTM C 39 establece que, para considerarse aceptables, las superficies no deben manifestar desviaciones mayores de 0.05 mm en una distancia de 152 mm (diámetro del cilindro estándar); y que su perpendicularidad con el eje del cilindro no debe diferir más de 0.5° con respecto al ángulo de 90°.

Para cumplir estos requisitos, suelen emplearse dos procedimientos consistentes en pulir la superficie con una piedra de esmeril de características apropiadas, o recubrirlas con una delgada capa (alrededor de 3 mm de espesor) de pasta de cemento, masilla de yeso de alta resistencia, o un compuesto de azufre fundido. En el método ASTM C 617 se definen los requisitos que deben cumplirse cuando se emplea el recubrimiento de las cabezas del cilindro con una capa de alguno de estos tres materiales.

Un procedimiento más sencillo y menos costoso, es el uso de placas de hule de neopreno con determinadas características de espesor y dureza, confinadas en moldes metálicos e interpuestas entre las cabezas del espécimen y las placas metálicas de la máquina de ensayo, (ASTM C 1231).

Resistencia a la Tensión

El concreto endurecido se manifiesta en los ensayos bajo carga de corta duración como un material de tendencia frágil, pues su ruptura se produce con una deformación unitaria relativamente reducida: entre 100 y 200 millonésima a tensión y entre 2000 y 4000 millonésimas a compresión, según su grado de resistencia ^[18]; y esta diferente

deformación a tensión y compresión puede verse como una manifestación de lo heterogéneo de su composición que le confiere el carácter de cuerpo anisótropo.

En concordancia con esta limitación, al diseñar las estructuras se procura que el concreto no trabaje a tensión directa; sin embargo, casi siempre es inevitable que el concreto en la estructura deba soportar ciertos esfuerzos a tensión, ya sea como consecuencia de determinadas condiciones de carga que involucran flexión y cortante, o como resultado de las contracciones que se producen en el concreto por secado o por temperatura, en condiciones que las restringen.

La resistencia del concreto a tensión también depende de las resistencias a tensión propias de la pasta de cemento, agregados y de la adherencia que hay entre ambos. La influencia relativa de estos factores puede variar en función de los procedimientos que se utilizan para determinar la resistencia del concreto a tensión, que son básicamente tres (véase la Figura 11):

- a) Prueba de tensión directa, por medio del ensayo de especímenes cilíndricos o prismáticos, sometidos a una fuerza de tensión axial.
- b) Prueba de tensión indirecta, mediante el ensayo de especímenes cilíndricos, sujetos a la aplicación de una carga de compresión diametral.
- c) Prueba de tensión por flexión en especímenes prismáticos (vigas), ensayados opcionalmente con una carga concentrada en el centro del claro, o con dos cargas concentradas iguales aplicadas en los tercios del claro.

En la resistencia a tensión de la pasta de cemento endurecida influyen, como factores básicos, su grado de porosidad y la presencia de microfisuras y otras discontinuidades originales, tal como sucede a compresión; por consiguiente, la relación agua/cemento, la compactación y el curado continúan operando como medios prácticos para su regulación y desarrollo.

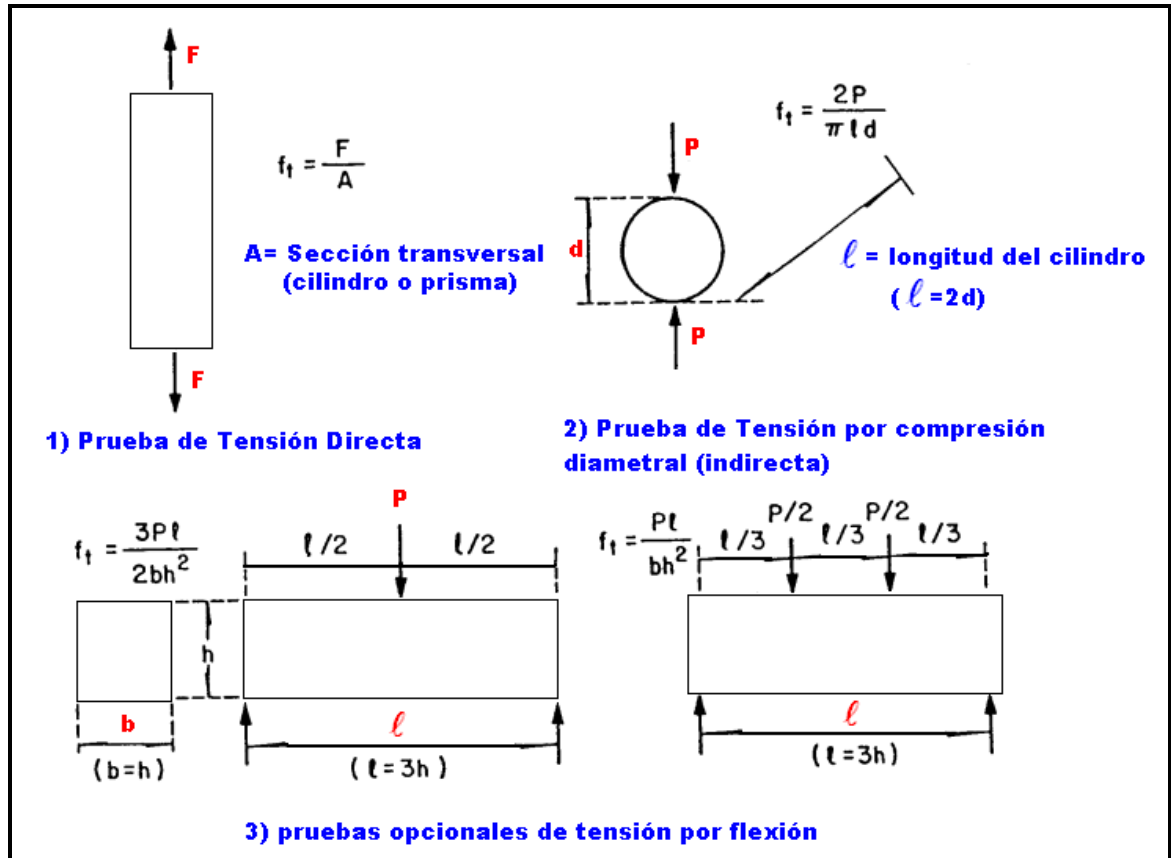


Figura tomada de: Manual de Tecnología del concreto Tomo III. CFE (Comisión Federal de Electricidad).

FIGURA 11: Representación esquemática de los procedimientos usuales para determinar la resistencia a tensión del concreto [19].

Resistencia al esfuerzo cortante

La resistencia del concreto al esfuerzo cortante es una propiedad que no se determina en forma directa, debido a que en un espécimen sometido a tal condición de esfuerzo, se generan inevitablemente esfuerzos iguales de tensión en otro plano, que terminan por producir la falla del concreto por tensión antes que se pueda alcanzar el valor del esfuerzo cortante máximo que el concreto pueda soportar. Como consecuencia de ello, la resistencia del concreto al cortante suele determinarse en forma indirecta, deduciéndola del ensayo de especímenes sometidos a condiciones de carga que producen esfuerzos combinados.

2.4.3 DEFORMABILIDAD BAJO CARGA

El concepto de deformación, en términos físicos se refiere al cambio de forma y dimensiones que un cuerpo experimenta por efecto de las fuerzas de diversa índole que actúan en él, sean estas inducidas por factores extrínsecos o intrínsecos. Conforme a tal concepto, puede considerarse que el concreto endurecido sufre cambios y deformaciones de origen estructural y no estructural, siendo esta última ampliada en el tema de cambios volumétricos.

Tratándose de las deformaciones de origen estructural, y específicamente de las que son resultado de la aplicación de carga, cabe señalar como variable importante el tiempo que la carga permanece aplicada, pues sus manifestaciones y consecuencias en las estructuras dependen de su duración.

La deformación del concreto bajo carga se acostumbra determinar experimentalmente en especímenes representativos, sometidos a cargas de compresión para medir las deformaciones en dirección longitudinal y transversal. Las deformaciones, que corresponden a la dirección en que se aplica la carga, se utilizan para determinar el llamado módulo de elasticidad estático a compresión, por su parte, las deformaciones registradas en dirección transversal a la carga, se aplican al cálculo de la relación de Poisson que corresponde al cociente de la deformación transversal entre la deformación longitudinal en el mismo intervalo de esfuerzos.

Módulo de Elasticidad

Cuándo un espécimen de concreto endurecido se somete por primera vez a una carga de compresión axial, que se incrementa progresivamente a velocidad uniforme hasta un valor inferior al de ruptura y después se retira a la misma velocidad, ocurre lo que se indica esquemáticamente en la Figura 12.

En el esquema 1) se representa un espécimen cilíndrico de diámetro d y altura h , antes de aplicarle carga; una vez aplicada la carga hasta llegar al valor p (produce un esfuerzo

inferior al de ruptura) el espécimen manifiesta una deformación longitudinal bajo carga (Δ_{lc}) y una deformación transversal simultánea (Δ_{tc}), según se muestra en el esquema 2; después de retirar completamente la carga, el espécimen no recupera totalmente sus dimensiones originales quedándole una deformación permanente, tanto en dirección longitudinal (Δ_{lp}) como en dirección transversal (Δ_{tp}), como se hace notar en el esquema 3.

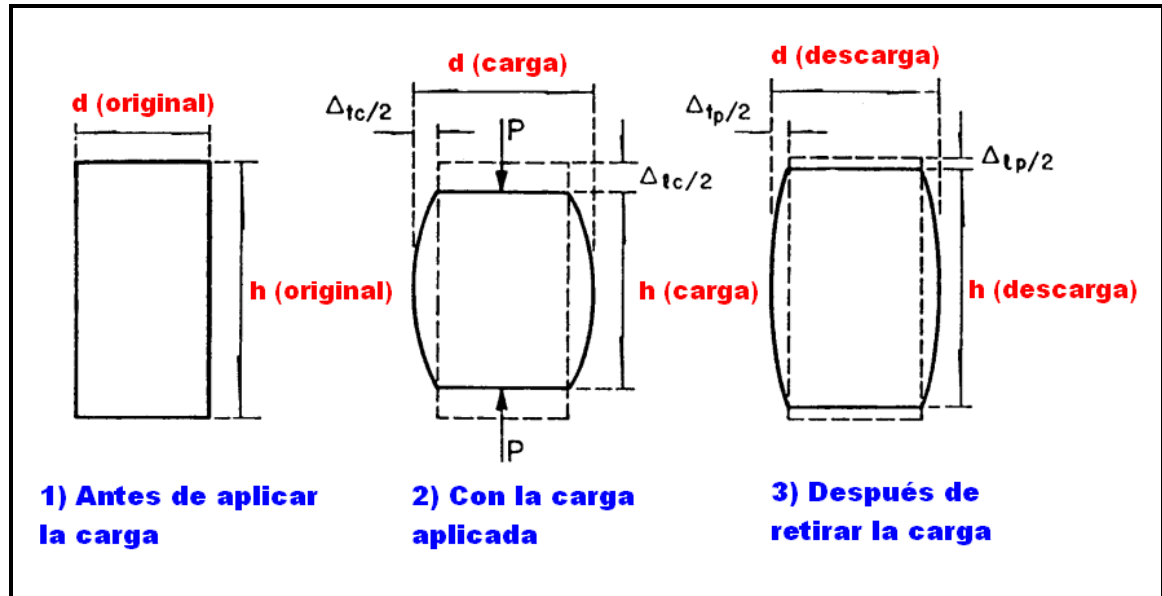


Figura tomada de: Manual de Tecnología del concreto Tomo III. CFE (Comisión Federal de Electricidad).

FIGURA 12: Representación esquemática de las deformaciones de un espécimen cilíndrico [20].

Relación de Poisson

La proporción en que el espécimen se deforma transversalmente con respecto a lo que se deforma longitudinalmente se conoce como relación de Poisson, y de acuerdo con la consideración precedente, aunque esta relación no se conserva constante dentro del intervalo pseudo elástico, puede dársele el mismo tratamiento que al módulo de elasticidad, es decir, se le puede considerar un valor medio representativo dentro de

dicho intervalo. De esta manera en los ensayos conducidos conforme al método de prueba ASTM C 469, la relación de Poisson se calcula a partir de las deformaciones transversales medidas a la mitad de la altura del espécimen, así:

$$\mu = \frac{\varepsilon_{tB} - \varepsilon_{tA}}{\varepsilon_{tB} - 0.000050}$$

Donde:

μ : Relación de Poisson

ε_{tB} : Deformación transversal producida por un esfuerzo del 40% del esfuerzo de ruptura.

ε_{tA} : Deformación transversal producto del esfuerzo de una deformación longitudinal, 50×10^{-6} .

2.4.4 ADHERENCIA CON EL ACERO DE REFUERZO

La resistencia por adherencia se evalúa por el esfuerzo medio de adherencia que se desarrolla entre el concreto y el acero de refuerzo, cuando a éste se le aplica una fuerza de tensión capaz de producir su deslizamiento. En términos generales pueden considerarse dos tipos de pruebas para medir la resistencia por adherencia: las pruebas de extracción de varillas ahogadas en especímenes reducidos de concreto simple, y el ensayo de piezas de concreto reforzado simulando las condiciones de la estructura, principalmente vigas trabajando a flexión (véase la Figura 13). A las primeras se les supone utilidad como procedimiento de evaluación comparativa, en tanto que para el desarrollo de criterios de diseño se opta por las segundas. [20]

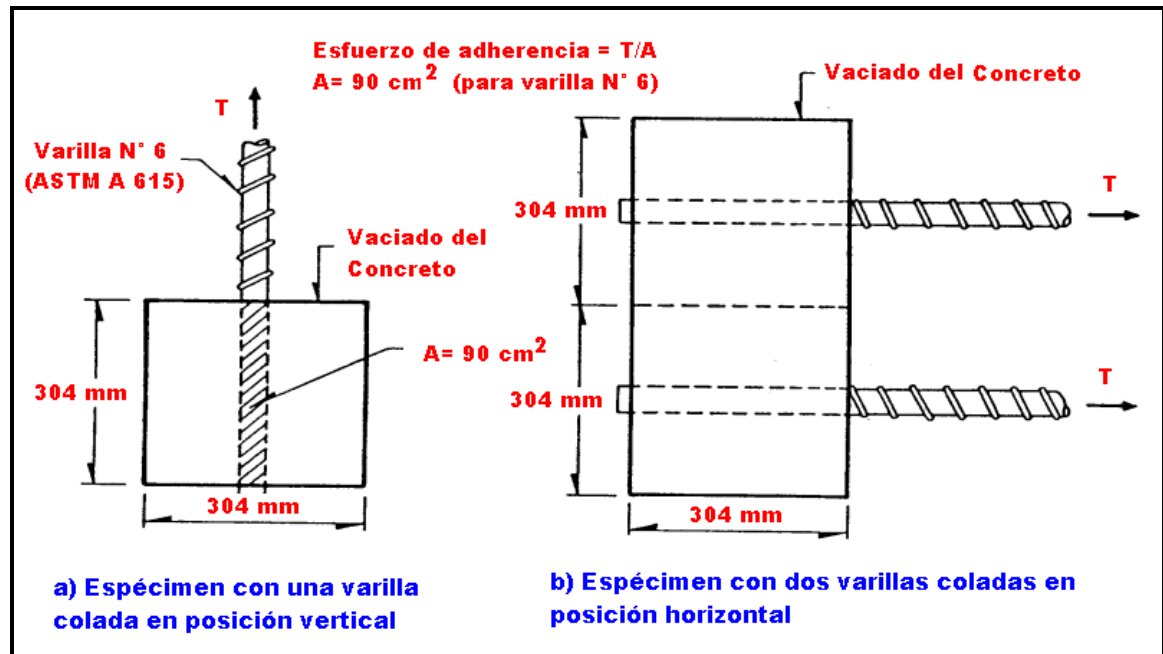


Figura tomada de: Manual de Tecnología del concreto Tomo III. CFE (Comisión Federal de Electricidad).

FIGURA 13: Especímenes para pruebas de adherencia de varillas por extracción, conforme al método de prueba ASTM C 234.

2.4.5 CAMBIOS VOLUMÉTRICOS

El concreto no es un material volumétricamente estable, pues en el curso del tiempo experimenta cambios de volumen por causas físicas y químicas. Los de origen químico (independientemente de algunos cambios menores derivados de la hidratación del cemento) generalmente se producen como consecuencia de reacciones detrimetales que se generan interna y/o externamente. Debido a ello, no se les considera como eventos ocasionales que deterioran el concreto prematuramente (véase la Tabla 11).

Los cambios de volumen de origen físico, pueden obedecer a dos tipos de acciones sobre el concreto: 1) las de carácter mecánico, específicamente las cargas y sollicitaciones, y 2) los agentes fenomenológicos, entre los que destacan por sus efectos la humedad, y la temperatura.

TABLA 11: Principales cambios volumétricos que suelen ocurrir en el concreto fresco y endurecido.

CAMBIOS VOLUMÉTRICOS DEL CONCRETO			
ETAPA	EXPOSICIÓN	CAUSA	MANIFESTACIÓN
Antes del fraguado (concreto fresco) y Durante el fraguado (concreto en rigidización)	Al aire	Asentamiento, sangrado y pérdida inicial de agua.	Contracción plástica
	Sumergido	Efectos físicos y químicos de la hidratación inicial del cemento.	Expansión post-sangrado
Pérdida de agua por la hidratación del cemento.		Contracción autógena.	
Después del fraguado (concreto en curso de endurecimiento ya endurecido)	Al aire	Continuación de la pérdida de agua.	Contracción por secado.
		Generación de calor interno por la hidratación del cemento.	Expansión térmica inicial al acumularse el calor, y contracción posterior al disiparse.
		Variaciones externas de temperatura (medio ambiente y otras causas).	Expansión al calentarse y contracción al enfriarse.
		Acción del bióxido de carbono atmosférico.	Contracción por carbonatación.
	Sumergido	Consumión de agua por la hidratación del cemento.	Contracción autógena.
		Adsorción de agua por el gel de cemento.	Hinchamiento por saturación

FUENTE: Manual de Tecnología del concreto Tomo III. CFE (Comisión Federal de Electricidad).

2.4.6 PERMEABILIDAD AL AGUA

La permeabilidad de un material se define por la facilidad con que puede ser penetrado por un fluido, ya sea líquido o gaseoso, bajo determinadas condiciones de aplicación. En el caso del concreto interesa principalmente su permeabilidad al agua y al aire, dado que son los fluidos con los que de ordinario tiene contacto.

Por tratarse de la propiedad de un material compuesto, la permeabilidad del concreto depende de la permeabilidad individual de sus componentes, pero existe un elemento complementario e indispensable representado por la homogeneidad y la compacidad de la masa de concreto integrada, como resulta finalmente colocada en la estructura.

La permeabilidad de los agregados: está definida por la cantidad y tamaño de los poros en las rocas.

La permeabilidad de la pasta hidratada: la porosidad de la pasta de cemento en un momento dado depende de la relación agua / cemento con que se elabora y del estado de avance en su hidratación, el cual puede ser referido al tiempo que transcurre desde su elaboración, si las condiciones de humedad y temperatura son favorables.

Permeabilidad del Concreto Integral: Al referirse al concreto integrado, ocurre que sus coeficientes de permeabilidad tienden a ser más altos, pues con frecuencia oscilan entre 10^{-3} m/s y 10^{-11} m/s aproximadamente, esto suele obedecer a diversas causas, entre las que cabe mencionar: (1) proporción de pasta en el concreto, (2) tamaño máximo del agregado, (3) condiciones de curado, (4) prácticas de diseño y construcción.

2.5 MEZCLADO, TRANSPORTE Y BOMBEO DEL CONCRETO

La producción y entrega del concreto se lleva a cabo por medio de un proceso que se inicia con la dosificación, la cual consiste en pesar y medir los ingredientes de la mezcla del concreto que luego son introducidos en el mezclador. El concreto debe mezclarse completamente hasta que sea uniforme en apariencia, con todos sus ingredientes distribuidos equitativamente.

Si el concreto ha sido mezclado adecuadamente, las muestras que se tomen de distintas porciones de la mezcla, tendrán los mismos pesos volumétricos, contenido de aire, revenimientos y contenido de agregado grueso.

Después de realizado el mezclado, el concreto debe ser transportado hacia el sitio de la obra, la amplitud y trascendencia de esta actividad puede ser muy variable pues depende de la extensión y condiciones de distancia entre ambos sitios. El concreto fresco debe transportarse mediante equipos y procedimientos que no afecten las características de las mezclas en lo que se refiere a la homogeneidad, consistencia y temperatura, y deben ser protegidas de toda forma de contaminación.

Una vez el concreto se ha transportado hacia la obra, debe emplearse el método más adecuado para el manejo y colocación en el lugar de disposición final, esto puede

realizarse de diversas formas entre las que se incluye el empleo de una bomba mecánica o hidráulica que ha sido la innovación más sencilla e importante en lo que se refiere a equipos para el manejo del concreto. Las bombas deberán ser de capacidad adecuada y transportar el concreto sin producir segregación, así como la pérdida de revenimiento desde la tolva hasta el final de la tubería debe ser mínima. [6]

2.6 PUESTA EN OBRA DEL CONCRETO

La preparación previa al colado del concreto incluye diversas actividades como el montaje de las cimbras y la fijación del acero de refuerzo y demás accesorios que van a quedar insertos en la estructura. Las cimbras deberán estar limpias, firmes, fijadas de manera exacta, adecuadamente apuntaladas y/o construidas con materiales que brinden el acabado deseado al concreto endurecido. Las cimbras de madera, a menos que hayan sido aceitadas o tratadas con algún agente que permita su remoción deberán humedecerse antes del colado del concreto ya que de otra manera absorberían el agua del concreto; así mismo el acero de refuerzo deberá estar limpio y libre de herrumbre o de costras de laminado al colar el concreto.

El objetivo es colocar el concreto dentro de las formaletas sin segregación por la caída y sin que se aplaste en ellas para que no empiece a endurecerse por secciones.

El concreto deberá colarse en capas horizontales de espesor uniforme y no en pilas corridas para luego moverlo horizontalmente lo cual produce segregación; las capas deberán ser de 15 cm a 50 cm de espesor para elementos reforzados y de 38 cm a 50 cm para trabajos masivos; el espesor dependerá del ancho de las cimbras, de la cantidad de refuerzo y del equipo de vibración utilizado.

Para la consolidación del concreto existen diferentes métodos de compactación que lo moldean dentro de la cimbra y alrededor de los elementos insertos y del refuerzo con el fin de eliminar los depósitos de piedra, los apanalamientos y las cavidades de aire

atrapado, entre estos el más utilizado es el método mecánico que consiste en la utilización de vibradores ya sea internos o externos.

La vibración es el método de asentamiento más eficaz, proporciona características al concreto de resistencia, compacidad y buen acabado. El vibrado consiste en someter al concreto a una serie de sacudidas, con frecuencia elevadas, que permitan una buena eliminación del aire atrapado y un mínimo de cavidades en la superficie. Es importante darle uso adecuado a los vibradores para obtener los mejores resultados; los vibradores no deben utilizarse para mover horizontalmente al concreto, ya que esto provoca segregación y siempre que sea posible el vibrador deberá introducirse verticalmente en el concreto a intervalos regulares.

Posteriormente al colado del elemento se tiene la fase que corresponde al curado del concreto, de la cual depende que este tenga las condiciones favorables para obtener una buena calidad del elemento, ya que puede decirse que para la adecuada evolución de la hidratación del cemento y el correspondiente desarrollo de las propiedades del concreto es necesario que en el interior de este siempre exista suficiente agua dispuesta a reaccionar con el cemento y que la temperatura interna se halle dentro de un intervalo favorable. Debido a que estas condiciones internas de humedad y temperatura, pocas veces se dan y se conservan en la práctica de manera natural, resulta necesario proporcionárselas al concreto ya terminado. La ejecución de esta medida debe aplicarse a continuación del acabado, hasta que el concreto adquiera sus propiedades de diseño y es lo que en términos amplios corresponde a la concepción del curado del concreto. [5]

2.7 TIPOS ESPECIALES DE CONCRETO

Los concretos de tipos especiales son aquellos que poseen propiedades distintas a las ordinarias o aquellos que se producen mediante técnicas poco usuales para obtener propiedades específicas que faciliten ciertos requerimientos de la obra. El CAC, pertenece a esta clasificación, por lo que el siguiente trabajo de investigación presenta a manera de introducción algunos tipos especiales de concretos, cuya dosificación de los

materiales en el diseño de la mezcla, permite modificar los procesos tradicionales de la puesta en obra, haciendo similitud con el comportamiento del CAC.

2.7.1 CONCRETO CELULAR

Este es un mortero alveolar liviano, que presenta el aspecto de una piedra porosa, con una estructura celular de poros casi esféricos visibles a simple vista, con alto aislamiento térmico.

En general, puede decirse que las materias primas utilizadas son un aglomerante (cemento, cal, yeso, escoria granulada de alto horno, etc.), un agregado (arenas naturales o molidas) y uno o mas agentes responsables de la formación de la estructura celular.

Esta formación puede obtenerse por un proceso químico (concreto celular gaseoso) o por un proceso físico (concreto celular de espuma). A su vez, el concreto celular de espuma puede obtenerse utilizando dos técnicas (1) espuma preformada, para lo cual es necesario un equipo especial, (2) concretera común, a la que se le modifica su velocidad de rotación.

El concreto celular carece de agregado grueso y el efecto de rodamiento producido por la espuma proporciona una buena consistencia al concreto celular. No es necesaria la vibración cuando se vacía, ya que el sistema de concreto celular se distribuye uniformemente y llena todos los espacios completamente con la misma densidad en el elemento colado, lo cual acelera considerablemente la velocidad de construcción.

Una de las características más especiales que posee el concreto celular es el valor relativamente alto del aislamiento térmico que se hace mayor o menor en razón inversa a la densidad del material.

2.7.2 CONCRETO LANZADO

El concreto lanzado puede definirse como un concreto transportado a través de una manguera que se proyecta neumáticamente a gran velocidad sobre una superficie. En estado fresco (ya colocado) tiene un revenimiento de cero y puede sostenerse por sí mismo sin escurrirse, debido a la fuerza del chorro que produce el impacto sobre la superficie que compacta el material.

Una de sus principales propiedades es la facilidad que tiene para formar una excelente adherencia con varios materiales; tiene características impermeables (pudiendo utilizar aditivos), y es utilizado como un material para la reparación y rehabilitación de estructuras.

2.7.3 CONCRETO BAJO AGUA

El concreto bajo agua es el que se coloca en sitios inundados donde no es posible agotar el agua por gravedad o mediante bombeo. El cual tiene características particulares en su dosificación como: alta fluidez (revenimiento entre 15 cm y 20 cm), consistencia muy cohesiva, tamaño del agregado grueso no mayor de 40 mm, y la dosis de cemento es mínima.

Dado que en este caso la colocación adquiere algunas características particulares, inherentes al hecho de que no existe visibilidad del concreto en el sitio lo cual impide ejercer un control efectivo que permita corregir los efectos que pudieran producirse, es necesario tomar precauciones especiales y cumplir las especificaciones de dosificación y colocación.

CAPITULO III

CONCRETO AUTOCOMPACTABLE

3.1 INTRODUCCIÓN

Un Concreto Autocompactable (CAC), posee las propiedades de fluidez para acomodarse por efecto de su propio peso al encofrado o armaduras de acero, y cohesión suficiente como para mantener homogénea la mezcla. Por tanto, la caracterización de un CAC se basa principalmente en las propiedades en estado fresco, teniendo en cuenta que el producto endurecido cumple con los requerimientos de resistencia y durabilidad exigidos a un concreto convencional que necesita la aplicación de los sistemas de puesta en obra habituales en la construcción.

El objetivo de la presente investigación es definir las características generales del CAC y proponer un diseño de mezcla con la capacidad de implementarse en El Salvador. Por lo que es inminente una investigación teórica conceptual del comportamiento en estado fresco y endurecido del CAC.

En el siguiente capítulo se muestran los temas más relevantes que permiten crear una idea de la evolución del CAC, las actuales ventajas y limitaciones, la naturaleza de los materiales ideales para la utilización en mezclas de CAC, el comportamiento interno de la mezcla en estado fresco, la caracterización de las propiedades de autocompactabilidad a través de ensayos de laboratorio, las referencias más populares sobre metodología de diseño, los métodos propuestos para el mezclado, transporte y bombeo, finalizando con un estudio del comportamiento del CAC en estado endurecido.

3.2. GENERALIDADES DEL CONCRETO AUTOCOMPACTABLE

3.2.1. EVOLUCIÓN Y DESARROLLO

En las últimas décadas la industria de la construcción ha mostrado gran preocupación e interés en el proceso de compactación del concreto, debido a la importancia que éste tiene en el rendimiento del producto terminado; que aunado a la creciente escasez de personal especializado en el uso de equipos que permitan realizar la compactación de forma correcta, ha permitido que se desarrollen nuevas tecnologías de vibración y consolidación, de igual forma la evolución en el diseño de estructuras cada vez más complejas y sofisticadas, evidencia que los métodos convencionales para la colocación del concreto ya no resulta efectiva.

La respuesta a estas necesidades es la utilización de un tipo de concreto que no dependa de las técnicas de vibración para la adecuada compactación, el cual recibe el nombre de Concreto Autocompactable, definido como “aquel concreto que es capaz de fluir en el interior del encofrado, relleno de forma natural el volumen del mismo, pasando entre las barras de armadura y consolidándose únicamente bajo la acción de su propio peso sin compactación interna o externa”. [21]

Este tipo de concreto presenta alta fluidez y alta resistencia a la segregación durante el transporte y la colocación; por lo que puede ser vaciado dentro de moldes estrechos y áreas densamente armadas, ofreciendo mejores acabados en los elementos, altas resistencias mecánicas a corto y largo plazo, alta deformabilidad y durabilidad. [22]

La historia del CAC se remonta a los años de 1975 y 1976 [23] [24], periodo durante el cual se desarrolló un modelo muy cercano al actual, el cual surgió a partir del advenimiento de los superplastificantes y de componentes que juegan un papel importante en la determinación de las propiedades reológicas necesarias para el CAC. En este momento el máximo revenimiento admitido por el ACI era de 175 mm [25], ya que con un revenimiento mayor el sangrado del concreto aumenta fuertemente incluso utilizando grandes cantidades de cemento; con la utilización del superplastificante fue posible producir concretos fluidos con flujo de revenimiento de 250 mm sin presentar sangrado

o con un sangrado despreciable, siempre que se utilice una proporción de cemento adecuada. En este momento surgió el concepto de concreto reoplástico como aquel concreto que además de ser muy fluido es también muy cohesivo y por consiguiente tiene una baja tendencia a la segregación y sangrado; el principio básico para la producción de concretos fluidos no segregables e incluso autocompactables es la combinación de superplastificantes con un volumen considerable de finos, los cuales pueden obtenerse a partir de arenas muy finas, un incremento en el volumen de cemento y el uso de adiciones.

La evolución en el uso de los aditivos ha sido esencial para la caracterización del CAC; el aditivo superplastificante de alto rango fue desarrollado a principios del año 2000, el cual pertenece a la evolución de los aditivos reductores de agua. Desde 1930 con la utilización de aditivos plastificantes basados en lignosulfatos y gluconatos, fue posible obtener reducciones de agua del 8% al 10%, los cuales fueron usados para mejorar la trabajabilidad; posteriormente surgieron aditivos reductores de agua y de alta resistencia inicial, que incrementaron el tiempo de fraguado, a base de gluconatos, naftalenos sulfonados, melamina sulfonada y copolímeros vinílicos, obteniendo una reducción de agua de más del 20%; finalmente se desarrollaron los aditivos superplastificantes a base de polímeros de polycarboxilatos modificados que permiten obtener reducciones de agua superiores al 30%, con lo cual es posible el diseño del CAC. [26]

En el año de 1983 fue iniciado en Japón un estudio sobre el CAC, y en 1986 es propuesto por Okamura y sus colaboradores; posteriormente fue desarrollado un estudio fundamental de la trabajabilidad del concreto, el cual fue llevado a cabo además por Osawa y Maekawa en la Universidad de Tokyo, Japón (Osawa en 1989, Okamura en 1993 y Maekawa en 1999). [2]

El prototipo del CAC fue completado en 1988 por Okamura y sus colaboradores, usando los materiales existentes en el mercado. El prototipo desarrollado satisfactoriamente considera las contracciones por secado y endurecimiento entre otras propiedades del

concreto. Este concreto fue llamado inicialmente “Concreto de Alto Rendimiento” y fue definido mediante el uso de los tres estados del concreto, como sigue:

1. Fresco: autocompactable
2. Edad temprana: anula los efectos iniciales
3. Después del endurecimiento: protección contra factores externos

Casi al mismo tiempo, el “Concreto de Alto Rendimiento” fue definido como un concreto de alta durabilidad debido a la baja tasa de relación agua/cemento, por el profesor Aïtcin y sus colaboradores, desde entonces el termino de “Concreto de Alto Rendimiento” ha sido usado alrededor del mundo para referirse a concretos de alta tasa de durabilidad. Sin embargo los autores del CAC han cambiado el término por la propuesta “Concreto autocompactable de Alto Desempeño”. [27]

A partir de la aparición del prototipo del CAC, se inició a nivel mundial una investigación intensiva en varios países, especialmente entre los institutos de investigación de grandes compañías de construcción.

En Estados Unidos las investigaciones son conducidas por los productores de aditivos. En Europa las investigaciones se iniciaron en 1996 y fueron impulsadas por el financiamiento proveniente de la Unión Europea; realizadas con la colaboración de académicos y socios industriales; esta tecnología fue rápidamente implementada y explotada debido al descubrimiento de los beneficios potenciales derivados de su uso.

Así mismo, se desarrolló el proyecto “Producción racional y mejoramiento del trabajo ambiental a través del CAC” el cual fue una sinergia con el aporte de ocho organizaciones provenientes de cinco países, liderados por Suecia; en Singapur se obtuvieron beneficios en los procesos constructivos debido a las aplicaciones del CAC, los cuales fueron reconocidos por la Autoridad de Construcción y Edificación, que conjuntamente con otras entidades se han embarcado en un proyecto de investigación, con el objetivo de usar residuos en la producción de CAC.

Las primeras aplicaciones fueron en la década de los noventa, en construcciones de edificios y elementos estructurales de puentes. Desde entonces el uso del CAC ha ido incrementando gradualmente.

En la práctica el CAC ha sido empleado para varias estructuras en orden de acortar el periodo de construcción en obras a gran escala, entre las más importantes podemos mencionar:

- Los dos bloques de anclajes del puente Hakashi-Kaikyo (Hakashi Straits), con apertura en abril de 1988, consistía en la suspensión del puente con el alma mas larga en el mundo, de 1991 m de luz (véase la Figura 14).



Figura tomada de: Ponencia en CAC, Masahiro Ouchi. México 2003.

FIGURA 14: Puente Hakashi-Kaikyo (Hakashi Straits).

- El tanque LNG que pertenece a Osaka Gas Company. La opción de usar el CAC en este proyecto en particular tuvo los siguientes meritos:

- La altura de cada capa de colocación se incremento de 3.0 m a 4.5 m.
- El número de trabajadores se redujo de 150 a 50.
- El período de construcción de la estructura se redujo de 22 a 18 meses (véase la Figura 15).



Figura tomada de: ponencia en CAC, Masahiro Ouchi. México 2003.

FIGURA 15: Tanque LNG.

También en el campo de la reparación existen antecedentes de la aplicación de este tipo de concreto, bajo condiciones de contorno determinadas por zonas densamente armadas y con dificultad de acceso a las mismas. A modo de ejemplo se pueden citar un puente en Suiza, con resistencia a la compresión a 28 días de 40 MPa (Campion y Jost, 2000), y un puente en el Reino Unido, de resistencia a la compresión de 60 MPa a 7 días (McLeish, 1996). Asimismo, en el campo de la prefabricación existen experiencias de aplicaciones en elementos de pequeño espesor y elevada densidad de refuerzo (Skarendahi y Petersson, 1999).

En América, la tecnología del CAC se introdujo fuertemente en Chile, México y Argentina, utilizándose en importantes obras, basadas en la valiosa experiencia de casi una década de aplicaciones en diversos lugares del mundo.

3.2.2. CARACTERÍSTICAS

El CAC es el resultado de una tecnología que ha logrado por primera vez que las propiedades del concreto en estado fresco permitan garantizar la correcta compactación y consolidación del material directamente en el elemento estructural, obteniéndose la capacidad de autocompactación, la cual consiste en combinar las propiedades del concreto en estado fresco con el desempeño del elemento de concreto en estado endurecido, debido a la homogeneidad en el comportamiento mecánico y la durabilidad del concreto colocado en la estructura. [27]

Las características del CAC son su alta deformabilidad y alta resistencia a la segregación, tales prestaciones se logran con la fluidez, viscosidad y cohesión apropiadas en las mezclas de estos concretos. La fluidez alta proporciona la facilidad de colocación del concreto en el encofrado y el relleno del mismo, y la viscosidad y cohesión moderadas evitan la segregación de sus componentes garantizando una deformabilidad uniforme en el proceso de colocación. En este sentido, la facilidad para el relleno y el paso entre las armaduras son parámetros esenciales en la definición de las prestaciones de este tipo de concreto. [21]

La consistencia del CAC es menor que la clase de consistencia mas fluida que presenta el concreto convencional y puede caracterizarse por las siguientes propiedades:

1. Capacidad de relleno, es la capacidad del CAC de rellenar los espacios de un encofrado solamente por la acción de su propio peso, sin la necesidad de compactación por vibrado.
2. Capacidad de paso, es la capacidad de fluir a través de las barras del refuerzo del elemento estructural sin que se presente ningún tipo de bloqueo entre agregado - agregado y agregado - refuerzo.

3. Resistencia a la segregación, es la capacidad de este tipo de concreto de tomar una consistencia muy fluida sin permitir segregación.

En esencia, para que la mezcla de concreto sea considerada autocompactable, debe tener las características de fluir fácilmente y así llenar completamente los espacios dentro de las formas reforzadas por efecto de su propio peso, la mezcla deberá también tener una buena estabilidad para resistir la segregación.

Las mezclas de CAC, reducen significativamente la necesidad de vibración u otras medidas de consolidación, puede decirse entonces que los problemas de mala calidad y durabilidad asociados a las deficiencias en el procedimiento de vibrado, pueden resolverse paulatinamente con la implementación de esta tecnología, lo cual en años anteriores no era posible.

Otra característica de las mezclas de CAC es aquella que se conoce con el nombre de tixotropía, lo que significa que este tipo de mezclas se diseñan para fluir en un estado semisólido, y que en estado de reposo retoman su viscosidad inicial.

En el diseño de mezcla de CAC, es preciso tener en cuenta el tamaño y la forma de la estructura, la dimensión y la densidad del armado; ya que debido a las características de fluidez, puede ser difícil la puesta en obra, por lo que es necesario utilizar un encofrado adecuado, hermético y diseñado para las presiones resultantes de la mezcla. Con respecto a la producción, el CAC puede fabricarse en plantas de concreto, y ser transportado a la obra en camiones. Puede colocarse por bombeo o vertido directo.

3.2.3. APLICACIONES

El CAC puede utilizarse en prefabricación, en obra civil y edificación, permitiendo ejecutar estructuras de concreto de una calidad que es muy difícil con la tecnología del concreto convencional.

El CAC puede mejorar los sistemas constructivos actuales, basados en actividades convencionales como el proceso de compactación, esta actividad puede ser fácilmente

causa de segregación y un obstáculo para la realización del trabajo constructivo. Sí este requisito es minimizado, la construcción puede ser racionalizada y nuevos sistemas de construcción pueden ser desarrollados incluyendo encofrados, refuerzos, soportes, diseños estructurales, entre otros. [2]

El CAC puede ser en general aplicado en formas complejas donde es dificultoso obtener la fluidez y consolidación adecuadas para el concreto. Como por ejemplo en puentes, túneles, presas, productos de concreto tales como bloques, tuberías de drenaje, paredes, tanques de agua, paredes de diafragma, bóvedas, columnas, etc.

3.2.4. VENTAJAS Y LIMITACIONES

El CAC puede describirse como la tecnología más revolucionaria de las últimas décadas en el campo de la construcción con concreto. En un principio se diseñó para compensar una creciente escasez de personal especializado, pero ha demostrado ser beneficioso tanto técnica como económicamente debido a la influencia de varios factores, entre los que se pueden mencionar:

1. Reducción de la mano de obra para la colocación.
2. Un mejor acabado superficial.
3. Mayor facilidad de colocación.
4. Mayor libertad y posibilidades en el diseño de estructuras.
5. Secciones de concreto más reducidas.
6. Buen desempeño mecánico y durabilidad de los elementos y estructuras.
7. Elementos de concreto sin oquedades internas, ni agrietamientos que permiten el acceso de agentes nocivos para el concreto.
8. Reducción de costos y tiempos asociados con la colocación y el vibrado.
9. Reducción de los tiempos de ejecución de la obra.

10. Reducción de los niveles de ruido provocado por el uso de vibradores durante el proceso de colocación del concreto.
11. Un entorno de trabajo más seguro.
12. Reducción de herramientas y equipos necesarios para la colocación del concreto.

La ventaja más importante de este concreto es la uniformidad estructural que puede lograrse sin que el proceso de colocación tenga un efecto negativo, como sucede con el concreto convencional, en el que a pesar de un alto revenimiento no se puede garantizar que fluya por el refuerzo si no se asegura la consolidación por medios mecánicos. [27]

El CAC tiene también ciertas limitaciones que deben ser consideradas para poder implementarlo en las obras de nuestro país, entre las que se mencionan:

1. En los ensayos de laboratorio para el control de calidad del CAC, aun no se han establecido parámetros estándar, para cuantificar las propiedades físicas.
2. Existe poca información disponible en cuanto al diseño y caracterización de la mezcla, en este sentido la aplicación del CAC, es considerada a mediano futuro.
3. Una de las limitaciones en la producción del CAC, es el alto costo de los materiales, especialmente los aditivos superplastificantes, necesarios para obtener la autocompactabilidad de este concreto.
4. La mayoría del equipo para realizar los ensayos al CAC en estado fresco, es de uso específico en los países precursores sobre la investigación de esta tecnología; debido a esto la evaluación de las características de la trabajabilidad, es limitada.
5. En la colocación del CAC, la elevada fluidez de la mezcla podría causar dificultades en el encofrado, debido a los esfuerzos de presión y la ausencia de un sellado completo; aunque por la naturaleza tixotrópica del CAC, esta última consideración no debería ser calificada como un problema.

3.3 COMPONENTES DEL CONCRETO AUTOCOMPACTABLE

Las mezclas de CAC se caracterizan por su alta fluidez, buena estabilidad o falta de segregación y bajo riesgo de bloqueo, tales propiedades se logran con componentes no usuales en el concreto convencional, ya que a diferencia de éste, necesariamente deben incluirse adiciones para incrementar el contenido de finos (*) y según sea preciso aditivos modificadores de la viscosidad. [4]

Como ya es conocido, las propiedades y cantidades de los componentes del concreto tienen efectos importantes en el comportamiento reológico de la mezcla, en la estabilidad y el bloqueo. En el diseño de mezcla se deben considerar las propiedades esenciales de los componentes para obtener las características necesarias. Según investigaciones realizadas, los parámetros de los materiales que producen las variaciones más grandes para este tipo de concreto son los siguientes:

1. Características de los agregados tales como granulometría, contenido de humedad, absorción, etc.
2. Características del cemento.
3. Características de las adiciones.
4. Temperatura.

En general podemos decir que los componentes del CAC deben cumplir con los requisitos de calidad que exige un concreto convencional en cuanto a los agregados, cemento y agua.

Para el almacenamiento de los componentes es necesario disponer de un lugar adecuado, en el caso de los agregados estos deben estar cubiertos para evitar la pérdida de finos y minimizar la fluctuación en el contenido de humedad, así como los aditivos y las adiciones deben estar provistos de un lugar que garantice su calidad. [4]

* Véase definición en el Glosario.

3.3.1 CEMENTANTES

Los requisitos básicos para el uso del cemento en el CAC están conforme a las normas para concreto convencional. Todos los tipos de cemento que cumplen con estas normas son considerados adecuados.

La selección del tipo de cemento depende de los requisitos del concreto en estado fresco más que en estado endurecido debido a los requisitos de trabajabilidad del CAC.

Un concreto con contenido de Aluminato Tricálcico (C_3A) superior al 10% puede provocar problemas de mala retención de la trabajabilidad; debido a que este componente del cemento se hidrata con mayor rapidez y propicia mayor velocidad en el fraguado y en el desarrollo de calor de hidratación. [4]

Las propiedades del cemento en plantas cementeras, están sujetas a variaciones debido principalmente a las fluctuaciones en las cantidades de yeso presentes y la variación de otros elementos de la producción que llevan al problema conocido como fraguado falso y fraguado rápido, a los que el CAC es más sensible.

3.3.2 AGREGADOS

Los agregados que se utilizan para la producción de CAC, en general deben cumplir los requisitos especificados para concretos convencionales, es decir, deben ser adecuados para el uso previsto en el concreto con respecto al contenido de elementos dañinos en tales cantidades que puedan suponer un detrimento de la calidad en la resistencia o en la corrosión del refuerzo y poseer un origen petrográfico que le permita cumplir con el requisito de durabilidad del concreto.

Ambos agregados naturales y triturados pueden utilizarse para el CAC, sin embargo el agregado triturado normalmente necesita más pasta aunque menos volumen de agregado, lo que debe considerarse en el diseño de mezcla si el riesgo de bloqueo es alto, por lo que es recomendable utilizar una combinación de ambos. [4]

AGREGADO FINO

Las arenas deben cumplir las especificaciones que exige el concreto convencional con respecto a los requisitos de sanidad, pueden utilizarse arenas trituradas o rodadas, arenas silíceas o calizas. El contenido de arenas corresponde a las partículas de tamaño superior a 0.150 mm (malla N° 100) y menores a 4.75 mm (malla N° 4), el contenido óptimo de arena varía entre el 40 % y el 50 % en función de las propiedades de la pasta.

La cantidad de partículas inferiores a 0.150 mm (malla N° 100) se consideran como finos y es muy importante para la reología, debe alcanzarse una cantidad mínima de finos procedente de los aglomerantes y la arena para evitar la segregación.^[4]

Se ha demostrado que la arena triturada puede utilizarse, a pesar de necesitar una mayor demanda de superplastificante.

El contenido de arena en el CAC es mayor que en un concreto convencional, con el objetivo de incrementar la presencia de finos en la mezcla, permitiendo la autocompactación; ya que este tipo de concreto debe cumplir con las características de elevada fluidez y alta viscosidad, de tal manera que al ser descargado se extienda por sí solo y no se provoque segregación del agregado grueso ni sangrado, garantizando así que el concreto mantenga su homogeneidad.

El contenido de humedad del agregado fino debe controlarse con atención y debe tenerse en cuenta para producir un CAC de calidad constante.

Durante la producción del CAC, es preciso realizar ensayos sobre el contenido de humedad y la granulometría de la arena con mayor frecuencia de lo habitual puesto que el CAC es más sensible a las variaciones de estos parámetros que el concreto convencional.

AGREGADO GRUESO

El contenido del agregado grueso es menor con relación a los concretos convencionales, con volúmenes entre el 50% y el 60% del volumen del agregado, estos son los

parámetros que le permiten al CAC una mayor deformabilidad y un menor riesgo de bloqueo, ya que cuando el volumen de agregado grueso supera cierto límite, las posibilidades de colisión o contacto entre las partículas del agregado grueso aumentan y también se incrementa el riesgo de la obstrucción del agregado cuando el concreto pasa por los espacios entre las armaduras. El menor tamaño máximo del agregado necesita menos volumen de pasta, y disminuye la posibilidad de segregación por asentamiento del agregado debido a su peso; por esta razón frecuentemente la mayoría de productores de CAC utilizan un tamaño máximo nominal del agregado entre 3/4" - 3/8". [4]

La consistencia en la granulometría es de vital importancia, las mezclas de agregados de granulometría discontinua suelen ser mejores que las de granulometría continua, ya que pueden experimentar una mayor fricción interna y producir una reducción del flujo.

En cuanto a las características de los distintos tipos de agregados, los triturados tienden a mejorar la resistencia gracias al enclavamiento de las partículas angulares, mientras que los redondeados mejoran el flujo debido a su menor fricción interna. El coeficiente de forma del agregado grueso es un factor que influye en el comportamiento del concreto en estado plástico, por lo que es preferible el uso de un agregado grueso que no contenga partículas planas y alargadas. Es conveniente que el coeficiente de forma del agregado grueso sea mayor o igual a 0.20. [27]

3.3.3 AGUA

El agua de mezclado para la producción de CAC debe cumplir con las características especificadas para un concreto convencional, en lo que respecta a los ensayos de tiempo de fraguado, ya sea en la pasta según la norma ASTM C 191 o ASTM C 266; o en concreto según la norma ASTM C 403 y a la resistencia a la compresión en cubos de mortero según la norma ASTM C 109; ya que tienen efecto de gran importancia en el

concreto. El contenido de impurezas podría afectar el comportamiento mecánico y sus propiedades.

Las impurezas en cantidades excesivas en el agua no solo pueden afectar el tiempo de fraguado del CAC, sino también la resistencia del concreto; además pueden ser causa de eflorescencia, manchado, corrosión del refuerzo, inestabilidad volumétrica y una menor durabilidad. Por lo que también es necesario determinar las características físicas y químicas para su utilización.

Al igual que en el concreto convencional, el contenido bacteriológico del agua no representa un riesgo, no así sus características físico-químicas que pueden tener efectos sobre todo con los componentes químicos de los aditivos y las adiciones.

3.3.4 ADITIVOS

Debido a que los componentes básicos del concreto convencional no son suficientes para obtener las características de un CAC en estado fresco, se hace necesaria la utilización de aditivos para aumentar la fluidez de las mezclas sin incrementar el contenido de agua, lo que permite conservar la viscosidad evitando la segregación del concreto; los aditivos usualmente empleados son los agentes modificadores de la reología, clasificados como reductores de agua de alta actividad, llamados también superfluidificantes o superplastificantes; pueden incorporarse otros como los aditivos modificadores de la viscosidad para la estabilidad, aditivos inclusores de aire, para mejorar la resistencia a los ciclos hielo-deshielo y los aditivos retardadores de fraguado, etc. [4]

La evolución de los aditivos reductores de agua ha tenido un desarrollo relativamente reciente y creciente en el tiempo. Los primeros reductores de agua surgieron alrededor de 1930, utilizándose lignosulfonatos como medio para mejorar la trabajabilidad de los concretos. Los primeros superfluidificantes surgieron en los años setenta, y estaban basados en polímeros de melamina formaldehídos o de naftaleno formaldehídos, presentando como principal limitación la reducida permanencia del efecto plastificante en el tiempo.

Finalmente, una última generación de superfluidificantes basados en polímeros acrílicos, llamados también policarboxilatos, incrementó drásticamente la capacidad reductora de agua o el poder plastificante. Sin embargo, la principal ventaja no es de orden cuantitativo (hasta 40 % de reducción de agua), sino cualitativo: a través de estos aditivos es factible lograr una mayor permanencia en el tiempo de las propiedades reológicas del concreto. De este modo, se aumenta el tiempo en que el concreto se mantiene trabajable según los parámetros de diseño, extendiéndose en algunos casos el período de trabajabilidad hasta 2 horas ó más, dependiendo por supuesto del diseño de mezcla, relación agua/cemento, tipo de cemento, condiciones ambientales, etc.

En la Figura 16 se muestra la comparación de tres tipos de mezclas de concreto con contenido de cemento de 300 kg/m³, 350 kg/m³ y 400 kg/m³ sin utilizar aditivo superplastificante; y en la Figura 17 se muestra la influencia del aditivo en el sangrado y el revenimiento de las mezclas de concreto con el mismo contenido de cemento. [24]

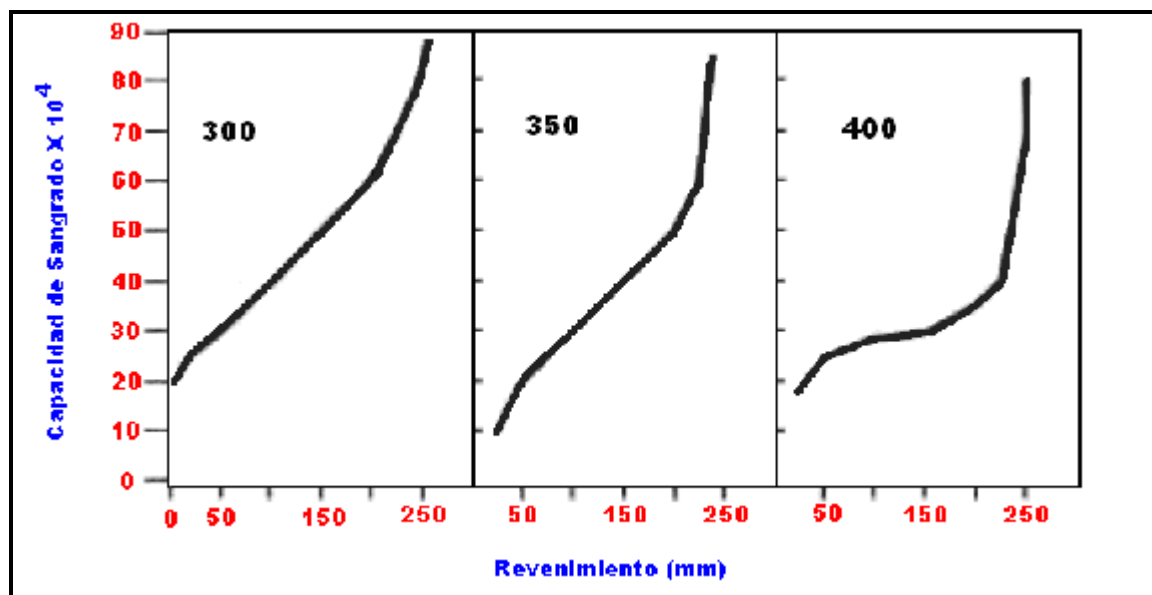


Figura tomada de: "Assessment of the Rheoplasticity of Concretes" (M. Collepardi).

FIGURA 16: Capacidad de sangrado en función del revenimiento para concretos que no contienen aditivos. (contenido de cemento en kg/m³).

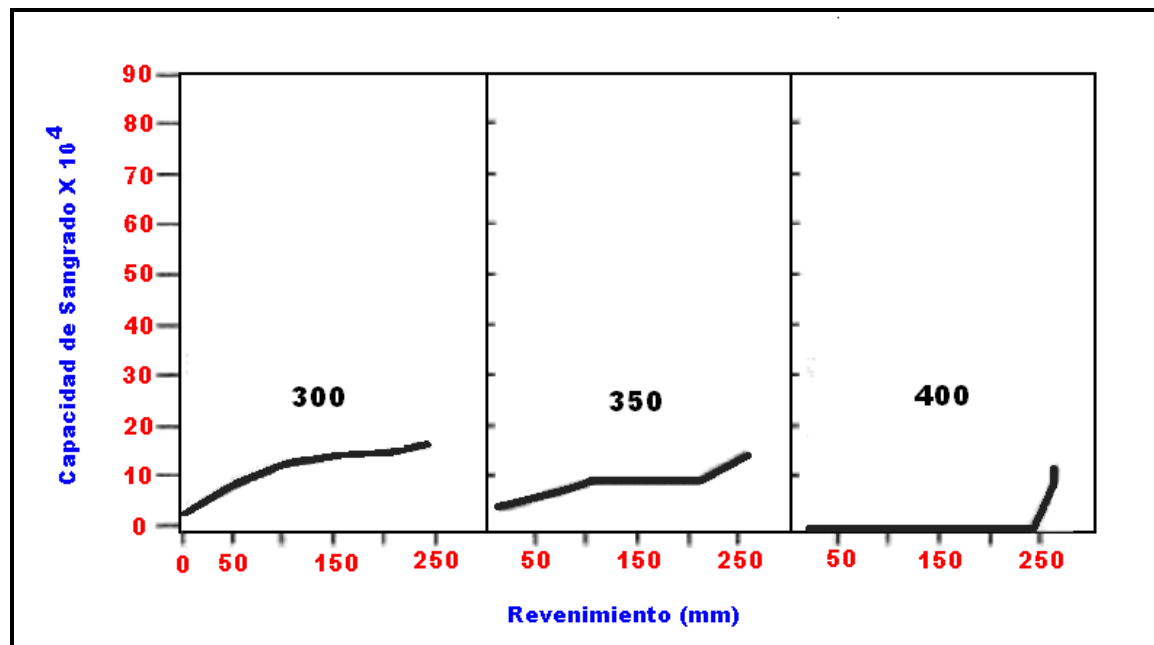


Figura tomada de: "Assessment of the Rheoplasticity of Concretes" (M. Collepardi).

FIGURA 17: Capacidad de sangrado en función del revenimiento para concretos que contienen superplastificante. (contenido de cemento en kg/m³).

Los superplastificantes alcanzan reducciones del contenido de agua del 12% al 25%, por tal motivo incrementan la resistencia a la segregación y reducen la permeabilidad al disminuir la cantidad de agua de mezclado. Los efectos que estos aditivos permiten en la reología de un CAC son los siguientes (*):

1. Alto efecto dispersante para una proporción agua/cemento dada.
2. El mantenimiento del efecto dispersante por lo menos dos horas después de la mezcla.
3. Baja sensibilidad a los cambios de temperatura. [2]

La caracterización del efecto dispersante del superplastificante independientemente del efecto del flujo resulta ser indispensable. En la Figura 18 se muestra el efecto dispersante producido por el superplastificante en el concreto.

* Las características del efecto dispersante, dependen del tipo de aditivo superplastificante en estudio.

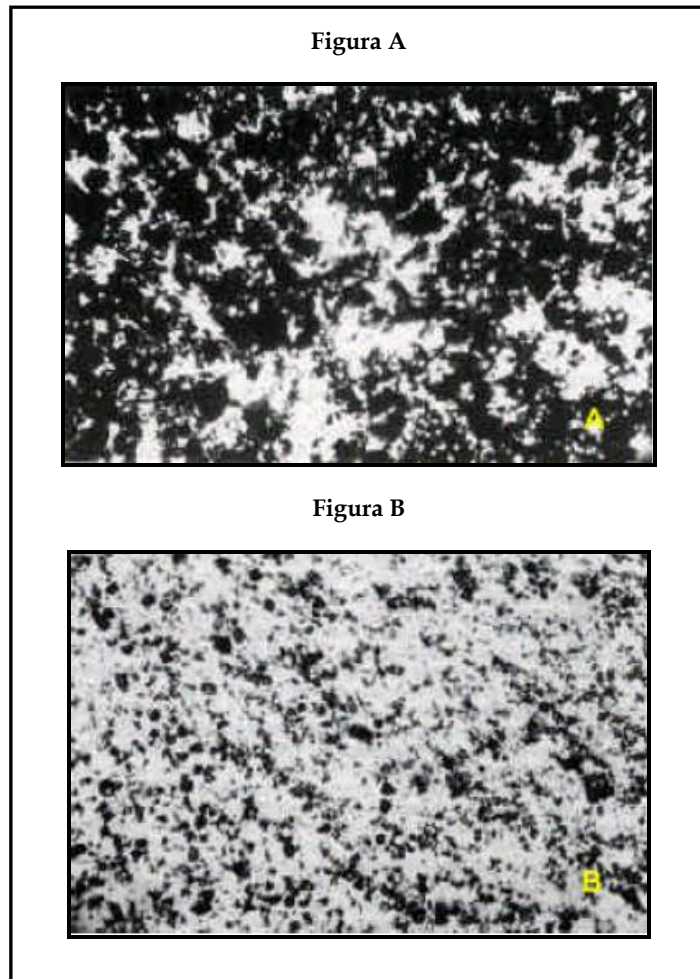


Figura tomada de: "Assessment of the Rheoplasticity of Concretes" (M. Collepardi).

FIGURA 18: (A) Aglomeración, (B) Dispersión de las partículas de cemento producido por el superplastificante.

Los agentes modificadores de la viscosidad son un material que permite producir un CAC con un volumen reducido de materiales finos. Existen dos tipos los cuales son:

- Los que se utilizan para bombeo de concreto convencional, y mejoran la cohesión de las mezclas químicamente basados en celulosa modificada.
- Los basados en polímeros que parecen ser los más eficaces para el CAC, que producen un aumento significativo en el concreto en la fase líquida.

El contenido de aditivo tiene una importante influencia en las propiedades del CAC, ya que una dosificación excesiva puede causar segregación, exudación y un aumento del costo del concreto, sin embargo debe emplearse lo suficiente para producir la fluidez necesaria.

3.3.5 ADICIONES

Entre los parámetros que afectan la trabajabilidad de un concreto se destaca la cantidad de finos utilizada en la fabricación de la mezcla; ya que al incrementar la proporción de estos se mejora la trabajabilidad del concreto al facilitar el deslizamiento de los agregados. Los finos no alteran la resistencia mecánica del concreto y permiten obtener granulometrías más perfectas.

Debido a los requisitos reológicos especiales del CAC se hace necesaria la utilización de adiciones que permitan mejorar y mantener la trabajabilidad del concreto en estado fresco ya que con los componentes generales del concreto convencional no es posible obtener la cantidad de finos requerida.

Existen dos tipos de adiciones que pueden ser utilizadas en la producción de CAC:

1. Adición de Tipo I o inerte, que incluye filler mineral y pigmentos minerales.
2. Adición de Tipo II o reactivas, que puede ser hidráulica latente o puzolánica que incluye las cenizas volantes (fly ash), humo de sílice (microsílice) y escoria granulada (pulverizada) de alto horno. [4]

Las adiciones inertes proporcionan buenas características de autocompactabilidad, al ser utilizados en proporciones óptimas, sin embargo al rebasar la cantidad límite, la cual depende del material fino utilizado, se obtiene resultados de segregación y exudación fuera de los rangos previamente establecidos.

Las adiciones inertes se utilizan habitualmente para mejorar y mantener la trabajabilidad, así como para regular el contenido de cemento y reducir de esta manera el calor de hidratación.

Las adiciones de Tipo II pueden mejorar significativamente las propiedades del concreto a largo plazo; las cenizas volantes poseen un comportamiento similar al de los finos inertes, esto podría ser consecuencia de la esfericidad de sus partículas, actuando dentro del concreto en estado fresco, mejorando con ello la trabajabilidad.

Las adiciones más frecuentes son las siguientes:

1. Filler de machaqueo: piedra caliza, dolomita o granito finamente triturado, que puede utilizarse para aumentar la cantidad de finos; la fracción menor de 0.150 mm (malla N° 100) es la más provechosa para el CAC. La dolomita puede presentar un riesgo en la durabilidad debido a la reacción alcalina.
2. Ceniza volante: es un residuo finamente dividido (polvo que se asemeja al cemento) que resulta de la combustión del carbón mineral pulverizado en una planta industrial, es un material inorgánico fino con propiedades puzolánicas, que puede añadirse al CAC para mejorar sus propiedades reológicas debido a su finura. No obstante, la estabilidad dimensional puede verse afectada y por lo tanto es preciso comprobarla.
3. Microsílica: partículas muy finas amorfas de sílice, ofrecen una mejora importante de las propiedades reológicas del concreto, permitiendo un concreto muy cohesivo y no segregable cuando está estacionario y muy fluido cuando está en movimiento.
4. Escoria pulverizada (granulada) de alto horno: esta escoria es un material aglomerante hidráulico básicamente latente y granulado fino, que también puede añadirse al CAC para mejorar las propiedades reológicas.
5. Relleno de vidrio pulverizado: suele obtenerse pulverizando vidrio reciclado. El tamaño de partícula debe ser inferior a 0.1 mm y el área de superficie específica

debe ser de 2500 cm²/g. Los tamaños de partícula más grandes pueden provocar reacción álcali - agregado. [4]

La principal característica de los finos que afectan el comportamiento de los CAC es la superficie específica, ya que a medida aumenta la finura y las partículas del agregado van siendo más redondeadas, es posible obtener un CAC con una menor cantidad de finos.

3.4 CONCRETO AUTOCOMPACTABLE EN ESTADO FRESCO

El CAC en estado fresco es capaz de poseer alta fluidez y a la vez presentar una alta resistencia a la segregación. Se puede describir como una suspensión de partículas, bastante compleja ya que tiene una gran variedad de tamaños y la fase líquida está en cambio continuo debido al desarrollo de la hidratación. Como en todas las suspensiones de partículas, el equilibrio entre fluidez y segregación es vital.

Como se ha mencionado la consistencia del CAC es menor que la clase de consistencia para un concreto fluido descrito en un concreto convencional, y se caracteriza por su capacidad de relleno, capacidad de paso y resistencia a la segregación. Una mezcla de concreto sólo puede clasificarse como autocompactable si cumple los requisitos para estas tres características.

La diferencia entre el CAC y el concreto convencional radica en que sus propiedades en fresco son vitales para determinar si puede o no colocarse de manera satisfactoria. Los distintos aspectos de la trabajabilidad que controlan dichas características, deben tomarse con atención para garantizar que su colocación sea aceptable. [4]

En el CAC en estado fresco el uso de superplastificantes es necesario para reducir la demanda de agua, causando una dispersión en la mezcla debido a la reducción de la fricción entre los materiales que forman los finos, y los agentes de viscosidad algunas veces son incorporados para minimizar la utilización de adiciones de mayor valor económico. Por un lado una baja viscosidad es necesaria para que el concreto se pueda

deformar y fluir fácilmente a un porcentaje razonable. Sin embargo, el CAC requiere alta viscosidad para impedir la segregación, el balancear estos requerimientos comienza a ser un arte y una ciencia dentro del campo del proporcionamiento de mezclas. Para lograr este balance también es importante tener un conocimiento fundamental de la reología del concreto fresco. [28]

3.4.1 REOLOGÍA DEL CONCRETO AUTOCOMPACTABLE EN ESTADO FRESCO

Las propiedades reológicas son bastante complejas debido a la amplia gama de tamaños de partículas que se encuentran en suspensión y a las reacciones de hidratación presentes en el estado fresco del concreto. Desde este punto de vista el concreto fresco autocompactable puede ser considerado como un agregado grueso en un mortero líquido, y como partículas de arena en una pasta líquida. Así la evaluación del mortero y la pasta podrán generar información útil en la optimización de las proporciones de la mezcla.

La reología del concreto fresco es descrita por el modelo de Bingham. De acuerdo con este modelo (véase la Figura 19), el concreto fresco muchas veces sobrepasa los límites de tensión (esfuerzo de fluencia, τ_0) antes del cual pueda fluir; una vez el concreto inicia su moviendo la tensión de corte se incrementa directamente proporcional a la tasa de esfuerzo, la cual es definida por la viscosidad plástica (μ). De esta manera, los objetivos en las propiedades reológicas del CAC se resumen en tratar de reducir el esfuerzo de fluencia, de manera que este alcance un flujo newtoniano con un esfuerzo de fluencia cero; y además establecer la adecuada viscosidad.

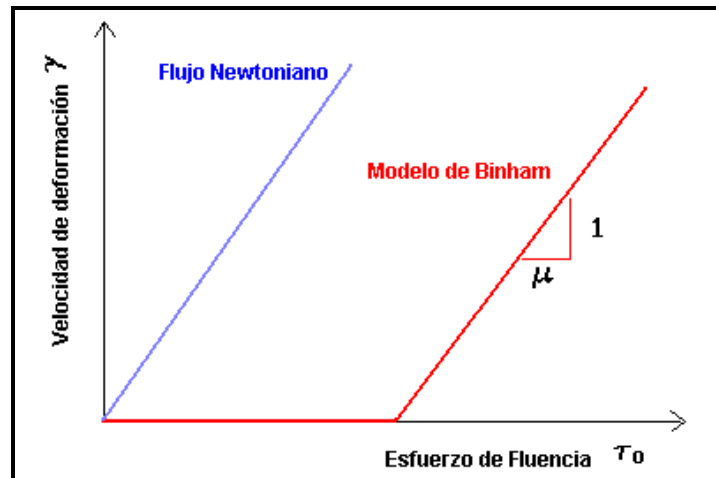


Figura tomada de: Revista Materials Technology (2001).

FIGURA 19: Flujo de Binham y flujo Newtoniano.

La ecuación de Binham es una relación lineal entre el esfuerzo cortante (τ), y la velocidad de deformación ($\dot{\gamma}$). La viscosidad (μ), es la pendiente de la recta y el intercepto es el esfuerzo de fluencia (τ_0), como se muestra en la ecuación siguiente:

$$\tau = \tau_0 + \mu\dot{\gamma}$$

El conocimiento de estos dos parámetros de viscosidad y esfuerzo cortante de fluencia, permiten una descripción cuantitativa de la trabajabilidad.

La adición de agua reduce tanto el esfuerzo de fluencia como la viscosidad; sin embargo este procedimiento permitiría que el concreto se extienda, provocando segregación. Como fue mencionado anteriormente la resistencia a la segregación entre el agua y las partículas sólidas se puede incrementar con una mayor viscosidad, a través de la incorporación de aditivos (véase la Figura 20). Hay que notar que el agua disponible controla las propiedades de flujo y la resistencia a la segregación en el concreto fresco. El agua en movimiento es definida como el agua en la mezcla, la cual nunca es absorbida por la superficie de las partículas sólidas.

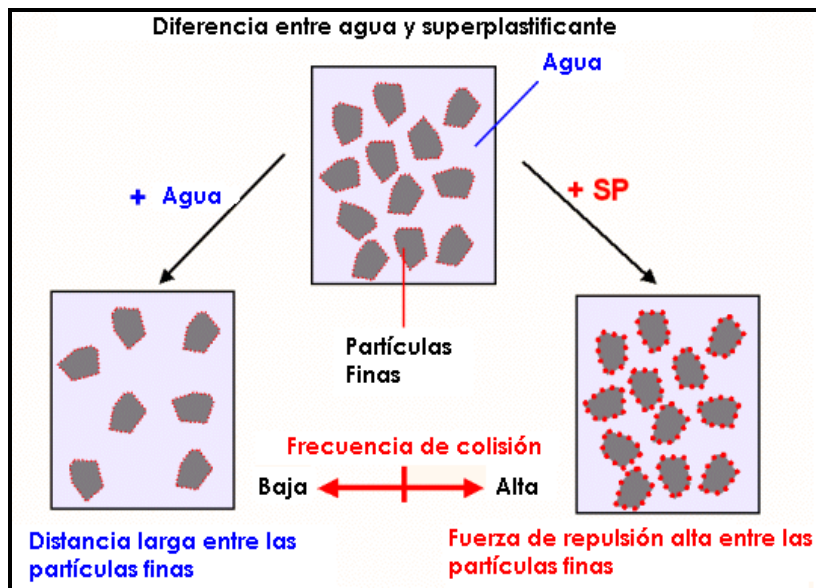


Figura tomada de: Ponencia en CAC, Masahiro Ouchi. México 2003.

FIGURA 20: Comportamiento de la mezcla con agua y con aditivo superplastificante.

Por otra parte la incorporación de superplastificantes reduce la distribución de esfuerzos pero causa una limitada reducción de la viscosidad. El efecto de los superplastificantes en las constantes de Bingham pueden ser mostradas en las investigaciones realizadas por los doctores David Ho y Tam Chat Tim de la universidad Nacional de Singapur (véase la Tabla 12), donde la relación agua/finos en estas pastas fue mantenida en 0.36 con varias combinaciones de cemento Pórtland y piedra caliza. La dosificación de superplastificante es expresada por el porcentaje del contenido total de finos. Como puede verse en la tabla, el esfuerzo de deformación decrece drásticamente en la medida en que la dosificación de superplastificante es incrementada. Sin embargo, el efecto en la viscosidad puede ser relativamente pequeña.

TABLA 12: Constantes de Binham para pastas con relación A/F de 0.36.

Finos (%)		Superplastificante (%)	Esfuerzo de fluencia (Pa)	Viscosidad Plástica (Pa . s)
Cemento	Piedra caliza			
65	35	0.10	33.4	0.26
		0.20	10.8	0.21
		0.30	1.4	0.17
55	45	0.10	23.3	0.22
		0.20	10.2	0.21
		0.30	4.3	0.19
45	55	0.10	12.8	0.20
		0.15	6.3	0.18
		0.20	2.6	0.16

FUENTE: Materials Technology. Artículo: "Some Major of Self Compacting Concrete".

El período en el que el CAC mantiene sus propiedades reológicas deseadas es muy importante para obtener buenos resultados en la colocación del concreto, este tiempo es llamado "tiempo abierto". Este período puede ajustarse seleccionando el tipo correcto de superplastificante o mediante el uso combinado de aditivos retardantes. Los distintos tipos de aditivos presentan efectos diferentes en el tiempo abierto y pueden emplearse en función del tipo de cemento, el tiempo de transporte y colocación del CAC.

Entonces, el comportamiento del concreto es completamente caracterizado por el esfuerzo cortante de fluencia y por la viscosidad plástica. Estos parámetros son propiedades intrínsecas del concreto y podrían ser usados en cálculos de elementos finitos para predecir cualquier flujo del concreto.

De acuerdo a las investigaciones de los doctores David Ho y Tam Chat Tim, se pueden sugerir diferentes valores de viscosidad, (véase la Tabla 13), que dependen de los materiales y del equipo de medición que se esté usando. [29] En este respecto hay una urgente necesidad de determinar las constantes apropiadas de Bingham para materiales locales. Además este reconocimiento del modelo de Bingham es solamente una aproximación de las medidas y está sujeto a una adecuada interpretación.

El uso de los parámetros de Bingham es útil en la descripción del comportamiento del concreto fresco y en la influencia de varios constituyentes de la mezcla. Sin embargo no hay consenso en las limitaciones de los valores apropiados para el CAC.

TABLA 13: Constantes de Binham sugeridas para un CAC.

Equipo	Esfuerzo de fluencia (Pa)	Viscosidad Plástica (Pa . s)
BTRHEOM (Francia)	< 400	< 200
BML (Irlanda)	< 80	20 - 30
BML (Suecia)	< 12	150 - 250

FUENTE: Materials Technology. Artículo: "Some Major of Self Compacting Concrete".

3.4.2 LA TRABAJABILIDAD DEL CONCRETO AUTOCOMPACTABLE

La trabajabilidad es definida cualitativamente por la facilidad de colocación del concreto y cuantitativamente por los parámetros reológicos. ^[30] Es decir, se define que la trabajabilidad de un CAC es aquella que le permita comportarse como un concreto altamente fluido, el cual no únicamente fluye bajo su propio peso, sino que puede llenar completamente el encofrado y lograr una consolidación uniforme sin segregación.

Las características de capacidad de relleno, capacidad de paso y resistencia a la segregación del CAC en estado fresco, ofrecen una perspectiva global de la trabajabilidad y evalúan la idoneidad de las mezclas autocompactables en términos de estabilidad, homogeneidad y consistencia (cohesión y viscosidad).

Como se ha explicado, para que la mezcla de concreto sea considerada autocompactable, debe tener la característica de fluir fácilmente y así llenar completamente los espacios dentro de las formas reforzadas por el efecto de su propio peso y la mezcla deberá tener una buena estabilidad para resistir la segregación; estas prestaciones se consiguen con la fluidez, viscosidad y cohesión apropiadas en las mezclas de estos concretos. El nivel de fluidez se rige básicamente mediante la

dosificación de superplastificante, no obstante, una dosis excesiva puede producir un riesgo de segregación y bloqueo. En el diseño se deben considerar las propiedades esenciales de los componentes para obtener las características técnicas necesarias. [4]

La pérdida de consistencia de concreto puede ser influenciada por algunos factores, como por ejemplo el tipo y dosificación de superplastificante, el tipo y finura del cemento, la relación agua/finos, la temperatura del concreto fresco y las adiciones.

La trabajabilidad y las propiedades de retención de trabajabilidad son de gran importancia, las investigaciones han demostrado que esta propiedad es influenciada por el tipo de material utilizado y la interacción física y química entre ellos. [31] [32]

COMPORTAMIENTO INTERNO DEL CONCRETO AUTOCOMPACTABLE

Para lograr la autocompactabilidad se involucra no solamente la alta deformación de la pasta o mortero, sino también la resistencia a la segregación entre los agregados gruesos y el mortero cuando el concreto fluye a través de una zona confinada de barras de refuerzo. Para lograr un CAC es necesario tomar en cuenta lo siguiente: [2]

1. Limitación en el contenido de agregado.
2. Baja relación agua/finos.
3. Uso de superplastificantes.

La frecuencia de colisión y contacto de las partículas de los agregados, puede incrementar la distancia relativa entre las partículas pequeñas y su esfuerzo interno, el cual tiene importancia en la deformidad del concreto, particularmente cerca de obstáculos. Las investigaciones han demostrado que la energía requerida para el flujo es consumida debido al incremento en el esfuerzo interno, resultado del bloqueo de las partículas de agregado. Resulta ser efectivo para prevenir ciertas particularidades del bloqueo el limitar el contenido de agregado grueso en el concreto, cuyo consumo de energía es particularmente intenso y llevarlo a un nivel relativamente más bajo de lo normal. [33]

El contenido de los agregados es muy bajo en comparación con un concreto convencional que requiere actividades de vibrado y compactación. Por otro lado, la viscosidad de la pasta en el CAC, es un poco alta en relación con varios tipos de concreto debido a su baja relación de agua/finos. Esta característica es efectiva para inhibir la segregación.

Una pasta altamente viscosa es requerida para prevenir el bloqueo de los agregados gruesos cuando el concreto fluye a través de los obstáculos. Cuando el concreto está deformado, la pasta con un alto grado de viscosidad también previene los esfuerzos internos debido a la aproximación de las partículas de agregado grueso. Una alta deformabilidad puede ser lograda únicamente por el empleo de un superplastificante, manteniendo un nivel muy bajo de la relación de agua/finos. ^[34] (véase las Figuras 21 y 22).

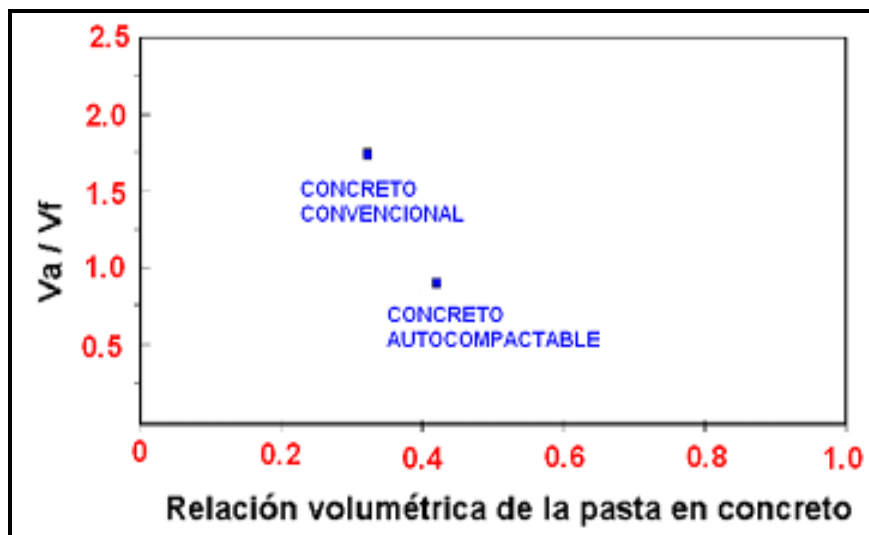


Figura tomada de: Journal of Advanced Concrete Technology, Vol. 1.

FIGURA 21: Relación entre el volumen de pasta y la relación agua/finos. (V_a = volumen de agua; V_f = volumen de finos).

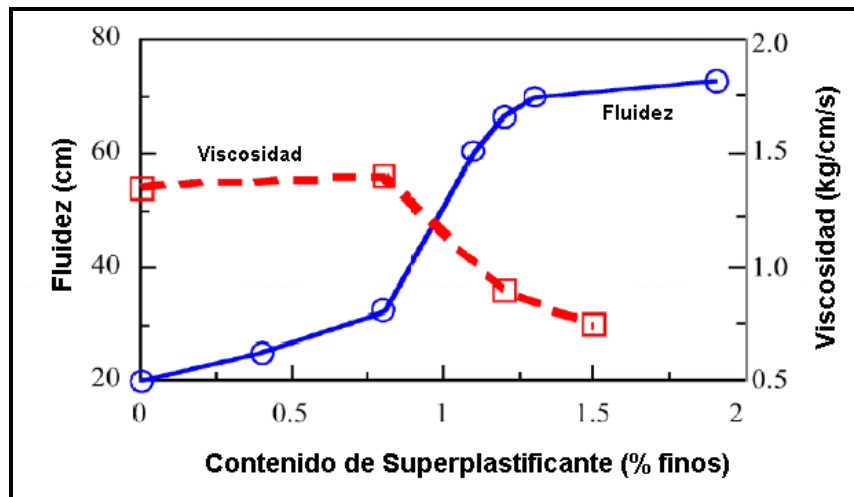


Figura tomada de: Journal of Advanced Concrete Technology, Vol. 1.

FIGURA 22: Efecto del contenido de superplastificante en la fluidez y viscosidad.

La influencia del agregado grueso en la autocompactabilidad del concreto fresco, especialmente en la fluidez a través de obstáculos, puede ser igual a pesar de la forma de las partículas del agregado, ya que es una relación proporcional al contenido de agregado grueso en un volumen sólido dentro de un concreto (Matsuo 1994), [2] sin embargo, la influencia de la granulometría del agregado grueso ha sido también considerada si el espaciamiento de obstáculos es muy cercano al tamaño máximo del agregado grueso.

En el CAC, la fase del mortero proporciona lubricación entre las partículas de agregado grueso y da estabilidad global al concreto. Es decir, sus propiedades requeridas son similares a las del concreto; donde un bajo esfuerzo de fluencia asegura un flujo por su mismo peso y una adecuada viscosidad plástica asegura que el concreto no segregue durante el flujo, [35] ni produzca un flujo demasiado lento para una colocación práctica del concreto.

En los estudios presentados por Okamura [36] se analizó el comportamiento del mortero en la fluidez del concreto fresco; donde se observa que es requerida una alta o suficiente deformabilidad en la fase de mortero para que el concreto pueda ser autocompactado

dentro de estructuras con su propio peso, sin actividades de compactación o de vibrado. Adicionalmente se requiere una modificación de la viscosidad moderada y una deformabilidad de la fase de mortero para que exista un relativo desplazamiento entre el agregado grueso y los obstáculos logrando la inhibición de los factores inadecuados o no requeridos ya que cuando el concreto fluye a través de tales obstáculos, es reducido y luego llevado a una segregación entre los agregados gruesos y el mortero. La importancia del estudio de la viscosidad, fue confirmada por Hashimoto a través de pruebas visuales. (véase la Figura 23).

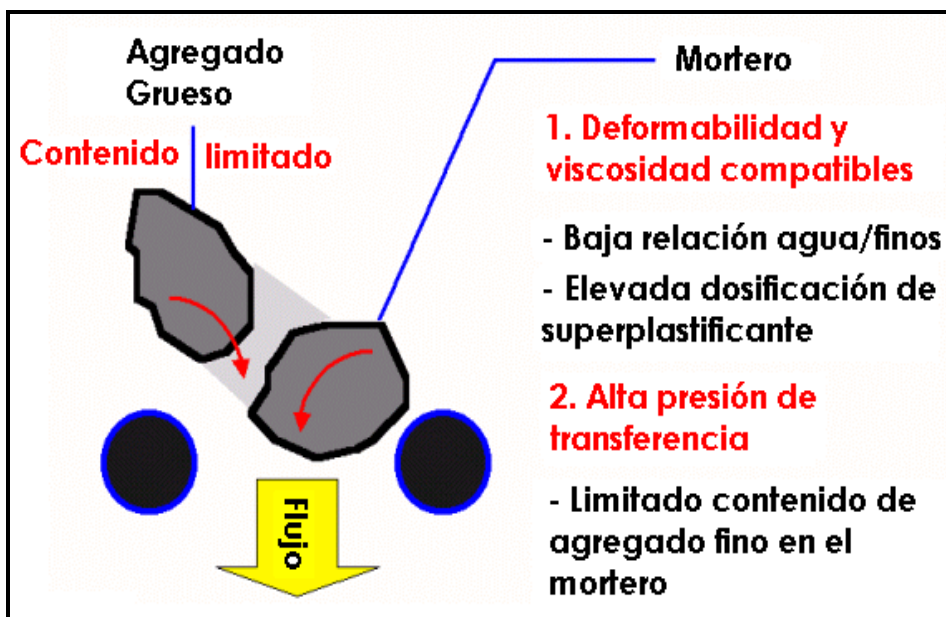


Figura tomada de: Ponencia en CAC, Masahiro Ouchi. México 2003.

FIGURA 23: Comportamiento interno de la mezcla.

El mortero también juega un papel importante entre las partículas sólidas y define la propiedad llamada “presión de transferencia”, la cual se presenta cuando las partículas de agregado grueso se aproximan unas a otras y el mortero está entre dichas partículas, esta situación es semejante a una prueba de esfuerzo normal (véase la Figura 24), por lo que el grado de decrecimiento en la deformabilidad de corte en el mortero depende de

las características físicas de las partículas sólidas. Pero, se ha encontrado que la relación entre la capacidad de fluir de un mortero y un concreto no depende únicamente de las diferencias debido a las características de las partículas sólidas del mortero, a pesar que por las características del agregado grueso su contenido en concreto es constante. [37]

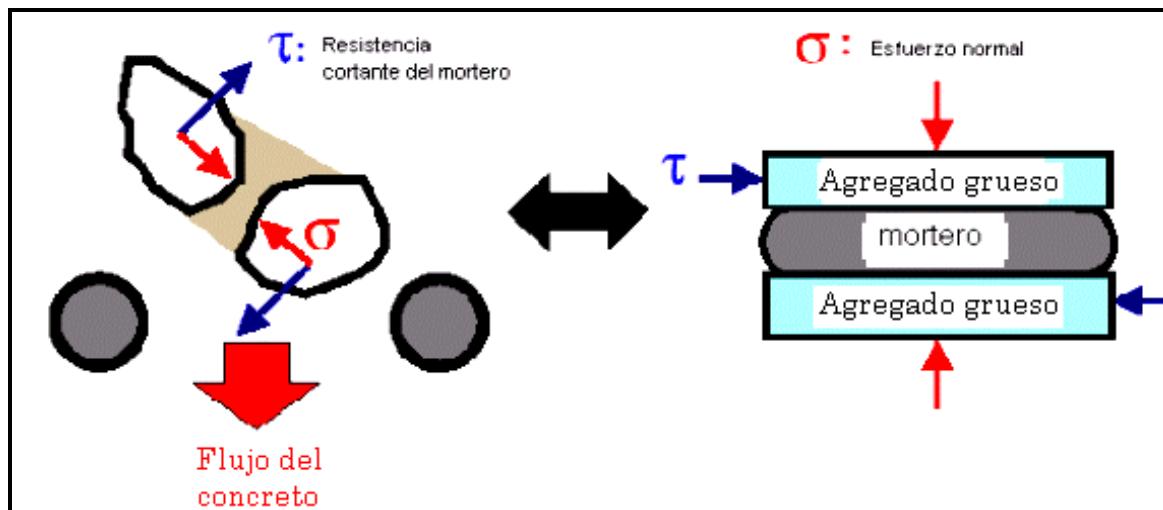


Figura tomada de: Ponencia en CAC, Masahiro Ouchi, México 2003.

FIGURA 24: Esfuerzo normal generado en el mortero debido a la proximidad del agregado grueso.

Un valor de esfuerzo de fluencia entre 20 Pa y 50 Pa y una viscosidad plástica entre 6 Pa-s y 12 Pa-s pueden ser convenientes. [38]

La medida de esfuerzo de tensión y viscosidad plástica requiere un reómetro, y donde no es viable, se usan pruebas más simples disponibles, como alternativas para evaluar la fluidez. La prueba de extensión y la prueba del embudo en V, han sido usadas para evaluar al mortero (véase sección 3.5.2 Procedimiento propuesto por Okamura y Ouchi)

Los estudios de Hawa y colaboradores, [39] han sugerido según la experiencia japonesa, valores entre 250 mm y 280 mm para la prueba de extensión, y de 6 a 10 segundos durante el tiempo de flujo del embudo en V, para producir un CAC exitoso. Chai, quien trabajó con materiales del Reino Unido hizo pensar en valores de la prueba de extensión mínimos de 300 mm, y un tiempo de flujo de embudo en V entre 2 y 10 segundos. [40]

El periodo requerido de retención para las propiedades autocompactables de un concreto variará según las demandas de una aplicación particular, pero un criterio común es tomar un valor designado de dos horas. Las condiciones similares se aplicarán al mortero.

En general, de acuerdo a ensayos realizados muchos de los parámetros importantes que influyen en el comportamiento del CAC pueden ser evaluados por pruebas en morteros. Éstos incluyen la comparación del comportamiento de diferentes superplastificantes, el efecto del tiempo de la adición de superplastificantes durante el proceso de mezclando, la trabajabilidad y características de retención de trabajabilidad de las mezclas. [35]

3.4.3 MÉTODOS DE ENSAYO PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL CONCRETO AUTOCOMPACTABLE

Se han desarrollado distintos métodos de ensayo para intentar caracterizar las propiedades del CAC. Es importante observar que ninguno de estos ha sido estandarizado y que los ensayos descritos no se han perfeccionado ni son definitivos. Hasta el momento, no hay un único método o combinación de métodos que haya obtenido una aprobación universal y cada uno de ellos tiene sus partidarios. De igual manera, no existe un método único para caracterizar todos los aspectos de trabajabilidad relevantes, de modo que cada diseño de mezcla deberá contrastarse con más de un método de ensayo para evaluar los distintos parámetros de trabajabilidad. [4]

Una de las limitaciones mas significativas en el uso de CAC, es el establecer pruebas estándares para cuantificar las propiedades físicas. Para ser precisos en términos del CAC, las especificaciones tienen que asegurar la calidad y los estándares uniformes que deberán ser aceptados y usados por todos en la industria de la construcción.

Los métodos de prueba existentes, son descripciones más que procedimientos completamente detallados; diseñados específicamente para el CAC, tomando en cuenta los siguientes aspectos para su aplicación.

- Una dificultad importante a la hora de diseñar estos ensayos está en que se deben evaluar tres propiedades distintas, aunque relacionadas del CAC: su capacidad de relleno (fluidez), su capacidad de paso (sin bloqueos en la armadura) y su resistencia a la segregación (estabilidad). Hasta el momento, ningún ensayo individual puede medir las tres propiedades.
- Es preciso evaluar los tres parámetros de trabajabilidad en el diseño inicial de la mezcla de CAC para garantizar que se satisfacen las propiedades de fluidez, estabilidad y bloqueo. Debe emplearse un ensayo a escala completa para verificar las características autocompactantes del diseño elegido para una aplicación concreta.
- No existe una relación clara entre los resultados de los ensayos y el rendimiento en la obra.
- Hay pocos datos precisos, por lo tanto no se dispone de una guía clara sobre los límites de aceptación.
- Los valores y los métodos de ensayo se declaran para un tamaño máximo de agregado de hasta 19 mm (malla $\frac{3}{4}$ "); es posible que con otros tamaños de agregado sean procedentes valores de ensayo y dimensiones diferentes del equipo.
- Puede que distintos valores de ensayo sean adecuados para el CAC aplicado en elementos verticales y horizontales con características que así lo permitan. De manera similar, distintos valores de ensayo pueden ser adecuados para diferentes densidades de armadura.
- Al ejecutar los ensayos, pueden tomarse muestras del concreto en conformidad con las especificaciones ASTM. Es aconsejable remezclar primero el concreto con una pala, a no ser que el procedimiento indique otra cosa.
- En cuanto al control de calidad en la obra, dos métodos de ensayo suelen bastar para monitorear la calidad de producción.

- Con una calidad constante de las materias primas, puede bastar un único método de ensayo aplicado por un técnico especializado y experimentado.

En la Tabla 14, se presenta una lista de métodos de ensayo para las propiedades de trabajabilidad del CAC.

TABLA 14: Método de ensayos para las propiedades de trabajabilidad.

	Método	Propiedad
1	Flujo de asentamiento con cono Abrams (mm)	Capacidad de relleno
2	Flujo de asentamiento T _{50 cm} (s)	Capacidad de relleno
3	Anillo J (mm)	Capacidad de paso
4	Embudo V (s)	Capacidad de relleno
5	Embudo V a T _{5 min} (s)	Resistencia a la segregación
6	Caja en L	Capacidad de paso
7	Caja en U (mm)	Capacidad de paso
8	Caja de relleno (%)	Capacidad de paso
9	Ensayo de estabilidad GTM (%)	Resistencia a la segregación
10	Orimet (s)	Capacidad de relleno

FUENTE: EFNARC. (European Federation for Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems).

En la Tabla 15, se presentan las propiedades de trabajabilidad del CAC y los métodos de ensayo alternativos para cada propiedad. ^[4]

TABLA 15: Métodos de ensayo para cada propiedad del CAC en estado fresco.

Propiedad	Métodos de ensayo		
	Laboratorio (Diseño de mezcla)	Campo (Control de calidad)	Modificación del ensayo. (Según el tamaño máximo de agregado)
Capacidad de relleno	Flujo de asentamiento (mm)	Flujo de asentamiento (mm)	Ninguno
	Flujo de asentamiento T _{50 cm} (s)	Flujo de asentamiento T _{50 cm} (s)	máximo 20 mm
	Embudo V (s)	Embudo V (s)	
	Orimet (s)	Orimet (s)	
Capacidad de paso	Caja en L	Anillo J (mm)	Distintas aperturas
	Caja en U (mm)		
	Caja de relleno (%)		
Resistencia a la segregación	Ensayo GTM (%)	Ensayo GTM (%)	Ninguno
	Embudo V a T _{5 min} (s)	Embudo V a T _{5 min} (s)	

FUENTE: EFNARC. (European Federation for Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems).

ENSAYO DE FLUJO DE ASENTAMIENTO Y ENSAYO T_{50 cm}

El flujo de asentamiento se utiliza para evaluar el flujo libre horizontal de CAC en ausencia de obstrucciones. Se desarrolló primero en Japón para su uso en la valoración del concreto sumergido (ASTM C 143). El diámetro del círculo de concreto es una medida de la capacidad de relleno del mismo.

Referente al procedimiento de ensayo, surge la discusión que para que el flujo sea completamente libre, no debe de existir ninguna restricción ni limitación, cosa contraria a lo que realmente sucede en la práctica en un sitio de construcción con concreto, pero el verdadero objetivo de la prueba es entender la consistencia de la mezcla de una batchada a otra. Esta prueba ha tenido una amplia aceptación por todos aquellos que han trabajado con CAC y ha sido generalizado por varias agencias Europeas y Japonesas, por lo que podría ser el primer método de prueba para el CAC a ser publicado por la ASTM Internacional.

Existen dos procedimientos para el llenado del cono Abrams, uno de estos es llenarlo en la posición normal y el otro en posición invertida. La posición del cono invertido puede ser explicada en los documentos Alemanes DafStb Guideline for Self Compacting Concrete, donde muestra en la sección M.1.6.2, que el flujo de revenimiento puede ser un valor alternativo al determinarlo con un molde de cono invertido, resultando un llenado más simplificado. Algunos productores han evaluado la popularidad de ambos procedimientos y el cono invertido es el más comúnmente difundido.

Evaluación del ensayo

Se trata de un procedimiento simple y rápido de ensayo, aunque se precisan dos personas si quiere medirse el período T_{50 cm}. Puede emplearse en la obra, aunque por su tamaño, la placa base de asiento se vuelve difícil de manejar y es ligeramente pesada, así mismo es esencial un terreno nivelado. No presenta indicaciones de la capacidad del concreto para pasar entre la armadura sin bloqueos, pero puede presentar indicios de la resistencia a la segregación. Puede argumentarse que un flujo completamente libre, sin

restricciones de ninguna clase, no es representativo, pero el ensayo puede utilizarse para valorar la consistencia del suministro de concreto amasado en planta o en la obra entre carga y carga.

Equipo

- Molde en forma de un cono truncado, con las siguientes dimensiones internas: 200 mm de diámetro en la base, 100 mm de diámetro en la parte superior y una altura de 300 mm, (véase la Figura 25).
- Placa de asiento cuadrada de un material rígido no absorbente, de por lo menos 700 mm x 700 mm, marcada con un círculo que indica la ubicación central del cono de asiento, y otro círculo concéntrico de 500 mm de diámetro.
- Llana
- Pala
- Cinta métrica
- Cronómetro (opcional)

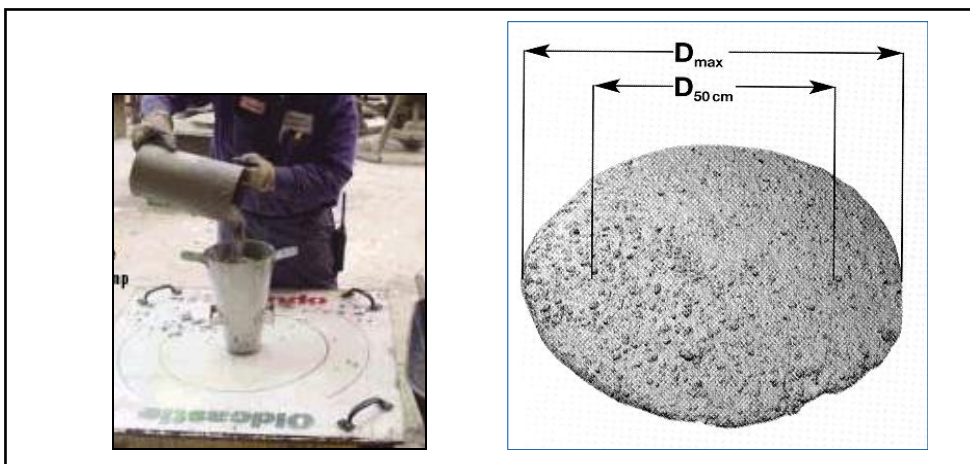


Figura tomada de: Revista "The concrete Producer" (Julio 2003).

FIGURA 25: Equipo para ensayo de flujo de asentamiento y resultado de la prueba.

Procedimiento

- Se requieren 6 litros de concreto para realizar el ensayo, que se toman como muestra de manera normal.
- Humedezca la placa de asiento y el interior del cono de asentamiento.
- Coloque la placa de asiento sobre un terreno uniforme y estable y coloque el cono de asiento en el centro de dicha placa y manténgalo sujeto hacia abajo con firmeza.
- Llene el cono con la pala. No tiene que compactarlo, tan sólo nivelar el concreto de la parte superior del cono con la llana.
- Quite el concreto sobrante de alrededor de la base del cono.
- Eleve el cono verticalmente y permita que el concreto fluya hacia el exterior libremente.
- De manera simultánea, inicie el cronómetro y registre el tiempo que requiere el concreto para alcanzar el círculo de 500 mm. (Éste es el período $T_{50\text{ cm}}$).
- Mida el diámetro final del concreto en dos direcciones perpendiculares.
- Calcule el promedio de los dos diámetros medidos. (Se trata del flujo de asentamiento en mm).
- Observe cualquier borde del mortero o la pasta de cemento sin agregado grueso en el límite del charco de concreto.

Interpretación del resultado

Cuanto mayor sea el valor del flujo de asentamiento, mayor será su capacidad para llenar el encofrado por su propio peso. Se requiere un valor de por lo menos 650 mm para considerar la mezcla como CAC, importante es destacar que actualmente no existe un acuerdo general en cuanto a las tolerancias razonables sobre este parámetro.

El período $T_{50\text{ cm}}$ es una indicación secundaria del flujo. La investigación Brite EuRam sugirió que un tiempo de 3-7 segundos es aceptable en aplicaciones de ingeniería civil, mientras que de 2-5 segundos es correcto para las aplicaciones específicas que demanden mayor fluidez. Períodos inferiores indican una excesiva fluidez en la mezcla.

En el caso de una segregación grave la mayor parte del agregado grueso permanecerá en el centro del charco de concreto, y el mortero y la pasta de cemento en la periferia del concreto. En caso de una segregación menor puede producirse un borde de mortero sin agregado grueso en el límite del charco de concreto. Si no se produce ninguno de estos fenómenos, no es una garantía de que no se producirá segregación, puesto que se trata de un aspecto relacionado con el tiempo y que puede producirse después de un período más extenso.

MÉTODO DE ENSAYO DE CAJA EN L

Este ensayo, basado en un diseño japonés para el concreto submarino, ha sido descrito por Petersson et. al.

El ensayo evalúa la capacidad de fluir del concreto y también la medida en la que está sujeto a bloqueos por parte del armado.

El aparato consiste en una caja de sección rectangular en forma de L, con una sección vertical y otra horizontal, separadas por una puerta móvil, delante de la cual se encajan longitudes verticales de barras de armado, (véase la Figura 26). La sección vertical se llena de concreto, acto seguido se eleva la puerta para permitir que el concreto fluya hacia la sección horizontal, cuando el flujo se ha detenido, la altura del concreto al extremo de la sección horizontal se expresa como una proporción del restante en la sección vertical (H_2/H_1), que indica el alcance del concreto en reposo. Se trata de una medida de la capacidad de paso, o del grado en que se restringe el paso del concreto a través de las barras.

La sección horizontal de la caja puede marcarse a 200 mm y 400 mm de la compuerta y pueden medirse los tiempos necesarios para alcanzar estos puntos. Se conocen como los tiempos T_{20} y T_{40} y constituyen una indicación de la capacidad de relleno.

Las secciones de las barras pueden ser de distintos diámetros y pueden espaciarse a diferentes intervalos, de conformidad con las consideraciones de armado normal, puede ser apropiado un tamaño tres veces superior al tamaño máximo de los agregados.

Las barras pueden ajustarse con cualquier espaciado para imponer una prueba mas o menos exigente a la capacidad de paso del concreto.

Evaluación del ensayo

El uso de este ensayo es muy frecuente; es adecuado para el laboratorio y quizá también para el campo. Evalúa la capacidad de relleno y de paso del CAC y cualquier falta grave de estabilidad (segregación) puede detectarse posteriormente al ensayo cerrando e inspeccionando visualmente las fracciones del concreto en su sección horizontal. Lamentablemente, no existe un acuerdo sobre los materiales y dimensiones, ni sobre la disposición de las barras de armado, de modo que resulta difícil comparar los resultados del ensayo.

Si se miden los tiempos serán necesarios dos operarios y es inevitable un cierto grado de error del operario.

Equipo

- Caja en L de un material rígido no absorbente, (véase la Figura 26).
- Llana
- Pala
- Cronómetro

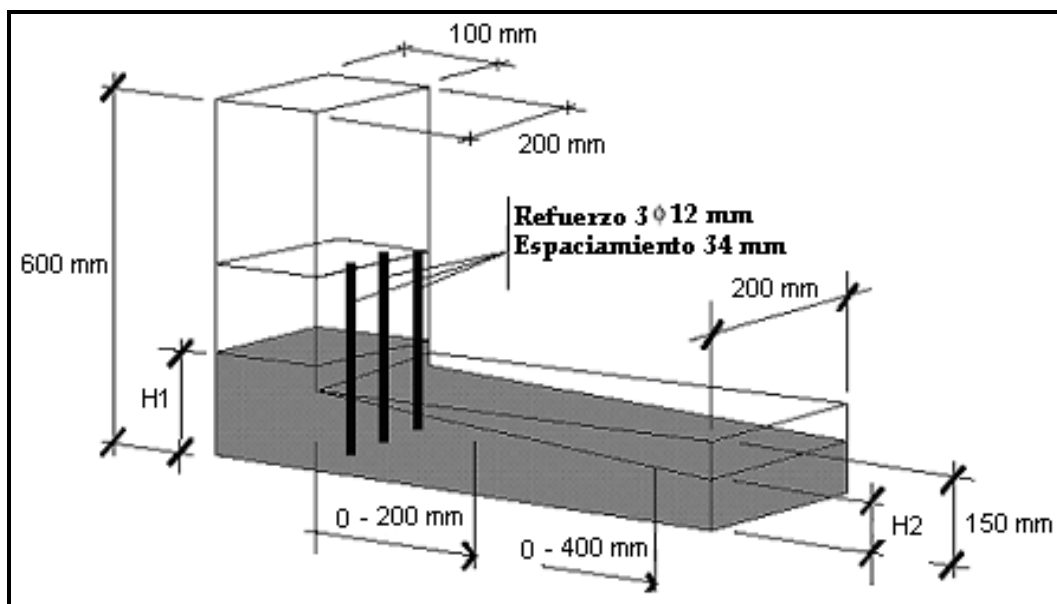


Figura tomada de: Brite EuRam Proposal No. BE96-3801 (SCC), Task 8.4 Quality control. (Junio 2000).

FIGURA 26: Caja en L.

Procedimiento

- Se precisan unos 14 litros de concreto para realizar el ensayo, tomados como muestra de manera normal.
- Coloque el aparato sobre terreno firme y uniforme; asegúrese de que la compuerta deslizante puede moverse con libertad y luego ciérrela.
- Humedezca las superficies interiores del aparato y elimine el agua sobrante.
- Llene la sección vertical del aparato con la muestra de concreto.
- Déjelo reposar durante 1 minuto.
- Eleve la compuerta deslizante y deje que el concreto fluya hacia la sección horizontal.
- De manera simultánea, active el cronómetro y registre los tiempos que requiere el concreto para alcanzar las marcas de 200 mm y 400 mm.

- Cuando el concreto deje de fluir, se miden las distancias H_1 y H_2 .
- Calcule H_2/H_1 , la relación de bloqueo.
- Todo el ensayo ha de realizarse en menos de 5 minutos.

Interpretación del resultado

Si el concreto fluye tan libremente como el agua, en descanso estará horizontal, de modo que $H_2/H_1 = 1$.

En consecuencia, cuanto más cerca esté el valor de este ensayo a la unidad, mejor será el flujo del concreto. Los investigadores sugieren un valor mínimo aceptable de 0.8. Los períodos T_{20} y T_{40} pueden ofrecer una indicación sobre la capacidad de fluir, pero no hay un acuerdo general sobre los valores adecuados. Un bloqueo eficiente del agregado grueso detrás de las barras de refuerzo puede detectarse visualmente.

MÉTODO DE ENSAYO DE CAJA EN U

Este ensayo fue desarrollado por el Technology Research Centre (Centro de Investigación Tecnológica) de Taisei Corporation en Japón. En ocasiones este ensayo se denomina “en forma de caja”. El ensayo se utiliza para medir la capacidad de relleno del CAC. El aparato consiste de un recipiente dividido por una pared intermedia en dos compartimientos (véase la Figura 27).

Se coloca una compuerta deslizante entre ambas secciones. Se instalan barras de refuerzo que presentan un diámetro nominal de 12.5 mm en la compuerta, con espacios entre ejes de 50 mm. De este modo se crea un espaciado libre de 35 mm entre las barras. La sección del lado izquierdo se llena con aproximadamente 20 litros de concreto y a continuación se eleva la compuerta y el concreto fluye hacia arriba hasta la otra sección. Se mide la altura del concreto en ambas secciones.

Nota: La Sociedad Japonesa de Ingenieros Civiles recomienda un diseño alternativo al de esta caja, pero basado en el mismo principio.

Evaluación del ensayo

Se trata de un ensayo fácil de realizar, aunque el equipo puede resultar difícil de fabricar. Ofrece una buena evaluación directa de la capacidad de relleno (esto es, literalmente, lo que tiene que hacer el concreto) modificada por un requisito sin medir de la capacidad de paso. El debate aún es vigente respecto a si el espacio de 35 mm entre las secciones de armadura puede considerarse demasiado estrecho y si una altura de llenado inferior a 30 cm sigue siendo aceptable.

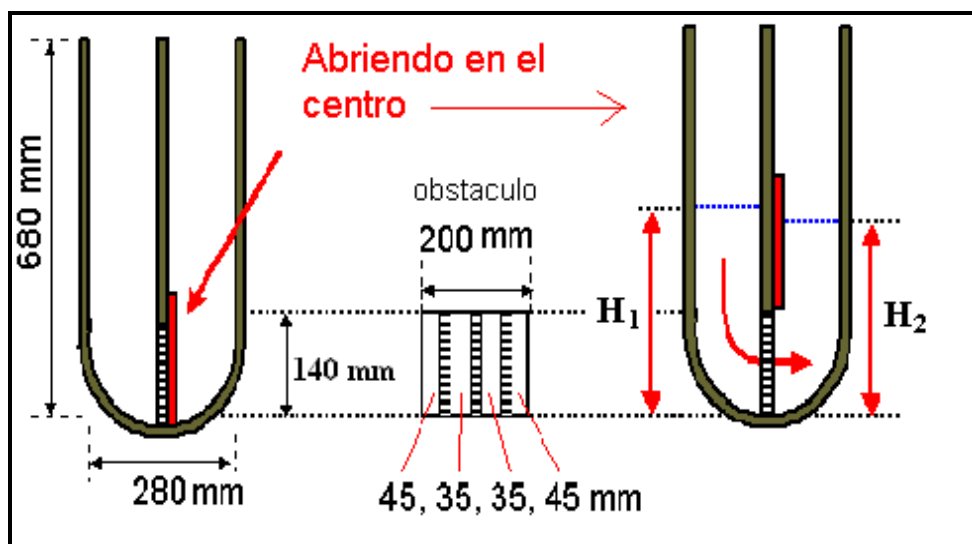


Figura tomada en: Ponencia en CAC, Masahiro Ouchi. México 2003.

FIGURA 27: Caja en U.

Equipo

- Caja en U de un material rígido no absorbente, (véase la Figura 27).
- Llana
- Pala
- Cronómetro

Procedimiento

- Se precisan unos 20 litros de concreto para realizar el ensayo, tomados como muestra de manera normal.
- Coloque el aparato sobre terreno firme y uniforme; asegúrese de que la compuerta deslizante puede moverse con libertad y luego ciérrela.
- Humedezca las superficies interiores del aparato y elimine el agua sobrante.
- Llene una sección del aparato con la muestra de concreto.
- Déjelo reposar durante 1 minuto.
- Eleve la compuerta deslizante y deje que el concreto fluya hacia el otro compartimiento.
- Después de dejar reposar el concreto, mida la altura del mismo en dos puntos en el compartimiento donde se depositó inicialmente el concreto, y calcule la media (H_1). De igual forma mida también la altura en el otro compartimiento (H_2).
- Calcule $H_1 - H_2$, la altura de llenado.
- Todo el ensayo ha de realizarse en menos de 5 minutos.

Interpretación del resultado

Si el concreto fluye tan libremente como el agua, en descanso estará horizontal, de modo que $H_1 - H_2 = 0$.

En consecuencia, cuanto más cercano a cero sea el valor de este ensayo, la “altura de llenado”, mejor será la capacidad de relleno y paso del concreto.

MÉTODO DE ENSAYO DE CAJA DE RELLENO

Este ensayo también se conoce como “ensayo Kajima”. El ensayo se utiliza para medir la capacidad de relleno del CAC con un tamaño máximo de agregado de 20 mm. El aparato consiste en un recipiente transparente con una superficie uniforme y lisa. Dentro del recipiente se disponen 35 obstáculos de PVC con un diámetro de 20 mm y una distancia entre ejes de 50 mm; véase la Figura 28. En el lado superior hay un conducto de llenado (diámetro de 100 mm y altura de 500 mm) con un embudo (altura de 100 mm). El recipiente se llena de concreto a través de este conducto de llenado y la diferencia de altura entre ambos lados del recipiente es una medida de la capacidad de relleno.

Evaluación del ensayo

Este ensayo es difícil de ejecutar en la obra debido a la estructura compleja del aparato y el gran peso del concreto.

Ofrece una buena impresión sobre las características autocompactables del concreto e incluso una mezcla de concreto con una elevada capacidad de relleno obtendrá malos resultados si la resistencia a la segregación y la capacidad de paso no son buenas.

Equipo

- Caja de relleno de material rígido, transparente y no absorbente.
- Pala de 1.5 a 2 litros aproximadamente.
- Cinta métrica
- Cronómetro

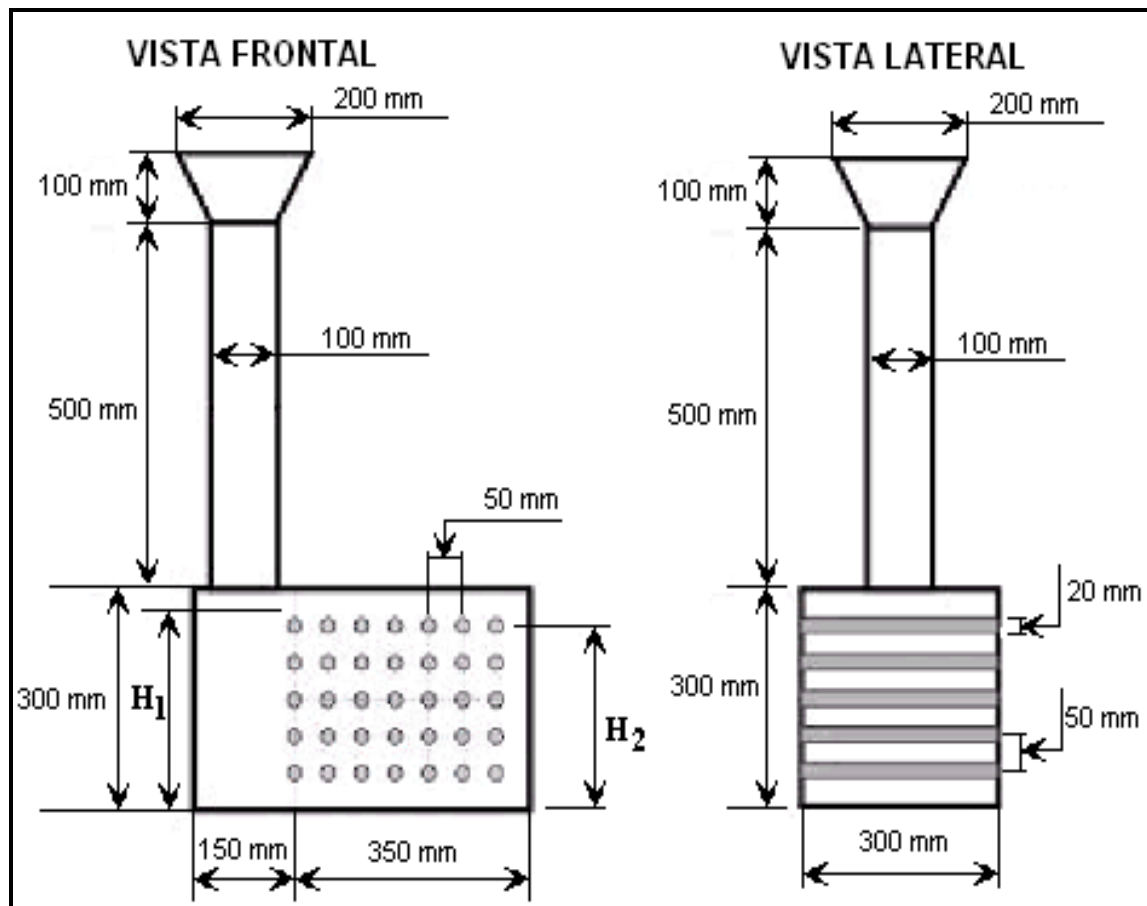


Figura tomada de: EFNARC (European Federation for Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems).

FIGURA 28: Vista frontal y lateral de caja de relleno.

Procedimiento

- Se precisan unos 45 litros de concreto para realizar el ensayo, tomados como muestra de manera normal.
- Coloque el aparato sobre terreno firme.
- Humedezca las superficies interiores del aparato y elimine el agua sobrante.
- Llene el aparato con el concreto de muestra.
- Llene el aparato añadiendo cada 5 segundos una pala con 1.5 - 2 litros de concreto fresco en el embudo hasta que el concreto cubra el primer obstáculo superior.

- Después de que el concreto se haya asentado mida en dos puntos la altura en el lado desde el que se ha llenado el recipiente y calcule el promedio (H_1).
- Haga lo mismo en el lado opuesto (H_2).
- Calcule el porcentaje medio de relleno.
- Porcentaje de relleno: $F = \{H_1 + H_2\} / 2 \times H_1 \times 100\%$.
- La totalidad del ensayo ha de realizarse en menos de 8 minutos.

Interpretación del resultado

Si el concreto fluye con la misma libertad que el agua, en reposo será horizontal, de modo que el porcentaje de relleno medio será igual al 100%. Por consiguiente, cuanto más cerca esté el valor del ensayo al 100%, mejores serán las características de autocompactación del concreto.

ENSAYO DE EMBUDO V Y ENSAYO DE EMBUDO V A $T_{5 \text{ min}}$

El ensayo se desarrolló en Japón y fue utilizado por Ozawa et al. El equipamiento consiste en un embudo en forma de V, (véase la Figura 29). Un tipo alternativo de embudo V, es el embudo O, con una sección circular, también se utiliza en Japón.

El ensayo de embudo V descrito se utiliza para determinar la capacidad de relleno (fluidez) del concreto con un tamaño de agregado máximo de 20 mm. El embudo se llena con aproximadamente 12 litros de concreto y se mide el tiempo necesario para fluir a través del aparato.

Después del proceso, el embudo puede volver a llenarse con concreto, que se deja reposar durante 5 minutos. Si el concreto muestra segregación, entonces el tiempo de flujo aumentará significativamente.

Evaluación del ensayo

Aunque el ensayo se ha diseñado para medir la fluidez, el resultado se ve afectado por propiedades del concreto distintas a las del flujo. La forma de cono invertido consigue que cualquier tendencia del concreto a bloquearse se refleje en el resultado, cuando por ejemplo, hay demasiado agregado grueso. Un tiempo de flujo elevado también puede asociarse con una escasa deformabilidad debido a una alta viscosidad de la pasta, y con una alta fricción entre las partículas.

Aunque el aparato es sencillo, el efecto del ángulo del embudo y el efecto del confinamiento sobre el flujo del concreto no están claros.

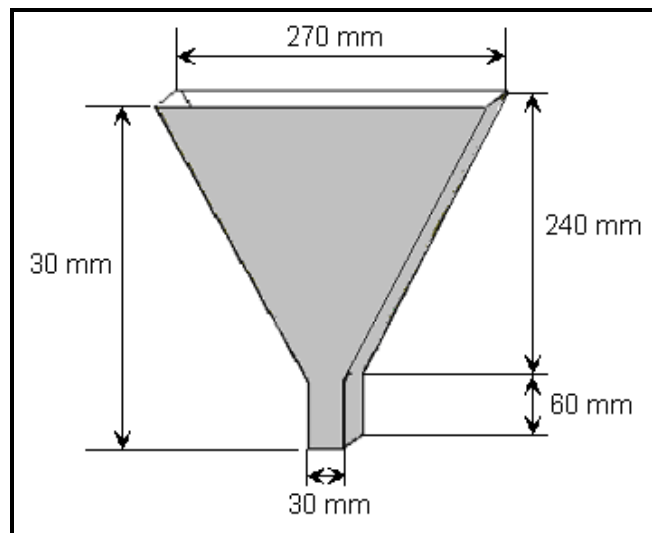


Figura tomada de: Ponencia en CAC, Masahiro Ouchi. México 2003.

FIGURA 29: Embudo en V.

Equipo

- Embudo en V.
- Balde de 12 litros
- Llana
- Pala
- Cronómetro

Procedimiento para el tiempo de flujo

- Se requieren unos 12 litros de concreto para realizar el ensayo, tomados como muestra de manera normal.
- Fije de manera firme el embudo V sobre el suelo.
- Humedezca las superficies interiores del embudo.
- Mantenga la trampilla abierta para permitir el drenaje del agua sobrante.
- Cierre la trampilla y coloque un balde debajo.
- Llene completamente el aparato con concreto sin compactarlo o presionarlo, sólo tiene que nivelar el concreto de la parte superior con la llana.
- Abra la trampilla 10 segundos después del llenado y permita que el concreto salga por su propio peso.
- De manera simultánea, inicie el cronómetro y registre el tiempo.
- Active el cronómetro al abrir la trampilla y registre el tiempo hasta que se complete la descarga (el tiempo de flujo). Se considera que se ha completado cuando se ve la luz desde la parte superior a través del embudo.
- El ensayo completo debe realizarse en 5 minutos.

Procedimiento del tiempo de flujo en $T_{5 \text{ min}}$

- No limpie ni humedezca de nuevo las superficies interiores del embudo.
- Cierre la trampilla y vuelva a llenar el embudo V después de medir el tiempo de flujo.
- Coloque un balde debajo.

- Llene el aparato completamente con concreto sin compactarlo o presionarlo, sólo tiene que nivelar el concreto de la parte superior con la llana.
- Abra la trampilla 5 minutos después del segundo llenado del embudo y deje que el concreto fluya hacia el exterior por su propio peso.
- De manera simultánea, active el cronómetro al abrir la trampilla y registre el período de la descarga hasta su conclusión (el tiempo de flujo a $T_{5 \text{ min}}$). Se considera que ha concluido cuando se ve la luz desde la parte superior a través del embudo.

Interpretación del resultado

Este ensayo mide la facilidad para fluir del concreto, un tiempo de flujo más breve indica una mayor fluidez. Para el CAC, un período de flujo de 10 segundos se considera adecuado. La forma de cono invertido restringe el flujo y los tiempos de flujo prolongados pueden indicar la susceptibilidad de la mezcla al bloqueo.

Después de 5 minutos de reposo, la segregación del concreto mostrará un flujo menos continuo con un aumento en el período de flujo.

ENSAYO DE ORIMET

El Orimet se desarrolló en la Universidad de Paisley, como un método para evaluar mezclas de concreto fresco de elevada fluidez en las obras de construcción, (véase la Figura 30).

El ensayo se basa en el principio de un reómetro de orificio. El Orimet consiste en un conducto de vertido vertical provisto de un orificio en forma de cono invertido variable en el extremo inferior, el de la descarga, con una trampilla de liberación rápida para cerrar dicho orificio. Normalmente el orificio presenta un diámetro interno de 80 mm, que es adecuado para evaluar mezclas de concreto con un tamaño de agregado que no supera los 20 mm. Puede substituirse por orificios de otros tamaños, normalmente de 70 mm a 90 mm de diámetro.

El funcionamiento consiste simplemente en llenar el Orimet con concreto para abrir de inmediato la trampilla y medir el tiempo necesario para que se vea la luz en la parte inferior del conducto (cuando se mira desde arriba).

Evaluación del ensayo

Este ensayo puede simular la capacidad de fluir del concreto fresco durante su colocación real en la obra.

Se trata de un ensayo rápido y el equipamiento es sencillo y su mantenimiento fácil. El ensayo presenta la útil característica de poder diferenciar entre mezclas de alta fluidez; en consecuencia, puede resultar útil para comprobar el cumplimiento de cargas sucesivas en la obra. No obstante, la determinación del tiempo está sujeta a error y en circunstancias ideales requiere a dos personas.

Equipo

- Dispositivo Orimet de un material rígido y no absorbente.
- Balde (10 litros)
- Pala
- Llana
- Cronómetro

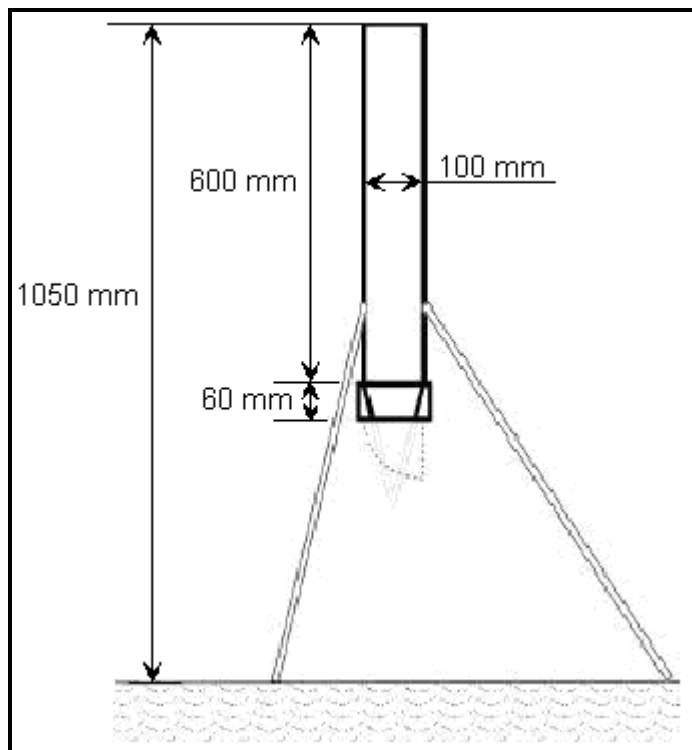


Figura tomada de: EFNARC (European Federation for Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems).

FIGURA 30: Aparato para ensayo Orimet.

Procedimiento

- Se requieren unos 8 litros de concreto para realizar el ensayo, que deben tomarse de manera normal.
- Coloque el Orimet sobre un terreno firme.
- Humedezca la superficie interior del conducto de vertido y el orificio.
- Mantenga la trampilla abierta para permitir el drenaje del agua sobrante.
- Cierre la trampilla y coloque el balde debajo.
- Llene completamente el aparato con concreto sin compactarlo o presionarlo, sólo ha de nivelar la parte superior con la llana.

- Abra la trampilla 10 segundos después del relleno y deje que el concreto fluya por acción de la gravedad.
- Inicie el cronómetro al abrir la trampilla y registre el período hasta que se complete la descarga (el período de flujo). Se considera que ha terminado cuando puede verse la luz desde arriba a través de la sección del orificio.
- La totalidad del ensayo debe llevarse a cabo en 5 minutos.

Interpretación del resultado

Este ensayo mide la capacidad de fluir del concreto; los tiempos de flujo más breves indican una superior fluidez. En el caso del CAC, se considera adecuado un tiempo de flujo de 5 segundos o inferior. La forma de cono invertido en el orificio restringe el flujo y los períodos de flujo pronunciados pueden indicar la susceptibilidad de la mezcla al bloqueo y/o la segregación.

ENSAYO DE ANILLO J

El principio del ensayo de Anillo J puede ser japonés, pero no se conocen referencias. El procedimiento del ensayo de Anillo J ha sido estudiado en la Universidad de Paisley. El ensayo se emplea para determinar la capacidad de paso del concreto. El equipamiento consiste en una sección en forma de anillo de acero abierto (300 mm de diámetro), taladrada verticalmente con agujeros para aceptar secciones roscadas de barras de armado. Estas secciones de barras pueden ser de distintos diámetros y colocarse a intervalos diferentes.

De conformidad con las consideraciones de armado normal, 3 veces el tamaño máximo del agregado puede ser apropiado. El diámetro del anillo de barras verticales es de 300 mm, y la altura de 100 mm.

El anillo J puede utilizarse conjuntamente con el ensayo de flujo de asentamiento, el ensayo Orimet o incluso el embudo V (véase la Figura 31). Estas combinaciones

comprueban la capacidad de fluidez y (la contribución del anillo J) la capacidad de paso del concreto. El período de Orimet y/o extensión del flujo de asentamiento se miden del modo habitual para valorar las características del flujo. Las barras del anillo J pueden colocarse con el espaciado que se prefiera para imponer una prueba menos severa de la capacidad de paso del concreto.

Después del ensayo, se mide la diferencia de altura entre el concreto en el interior y justo en el exterior del anillo J. Se trata de una indicación de la capacidad de paso, o del grado en que el paso del concreto a través de las barras se ve restringido.

Evaluación de la prueba

Estas combinaciones de ensayos se considera que tienen un gran potencial, aunque no existe una perspectiva general sobre cómo deberían interpretarse exactamente los resultados. Existen varias opciones; por ejemplo, puede resultar instructivo comparar la extensión de la combinación anillo J y flujo de asentamiento, con el flujo de asentamiento sin restricciones.

Al igual que el ensayo del flujo de asentamiento, estas combinaciones presentan la desventaja de no estar limitadas, y por lo tanto no reflejan el modo en que el concreto se desplaza y autocompacta en la práctica.

La opción Orimet tiene la ventaja de ser un ensayo dinámico y que también refleja la colocación en la práctica, aunque tiene como inconveniente la exigencia de dos operarios.

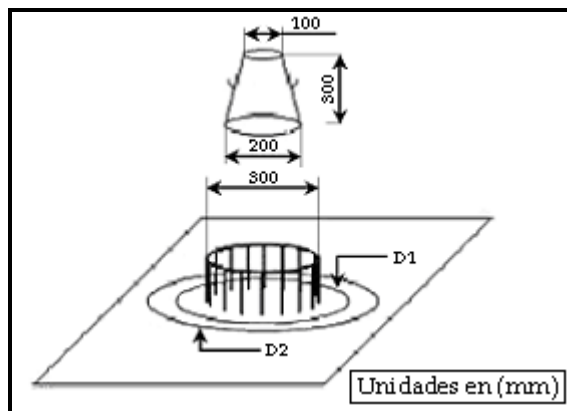


Figura tomada de: EFNARC (European Federation for Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems).

FIGURA 31: Anillo en J utilizado conjuntamente con el flujo de asentamiento.

Equipo

- Molde sin piezas de pie, en forma de un cono truncado, con dimensiones internas de 200 mm de diámetro en la base, 100 mm de diámetro en la parte superior y una altura de 300 mm.
- Placa base de asiento de un material rígido no absorbente, de por lo menos 700 mm x 700 mm, marcada con un círculo que indica la ubicación central del cono de asiento, y otro círculo concéntrico de 500 mm de diámetro.
- Llana
- Pala
- Cinta métrica
- Anillo J, una sección en forma de anillo de acero abierto (300 mm de diámetro), perforado verticalmente con agujeros. En dichos agujeros pueden atornillarse secciones roscadas de barras de armadura (longitud de 100 mm, diámetro de 10 mm, espaciado de 48 mm).

Procedimiento

- Se requieren 6 litros de concreto para realizar el ensayo, que se toman como muestra de manera normal.
- Humedezca la placa base de asiento y el interior del cono de asentamiento.
- Coloque la placa de asiento sobre un terreno estable y coloque el Anillo J centrado en la placa base y el cono centrado en el Anillo J y manténgalo sujeto hacia abajo con firmeza.
- Llene el cono con concreto utilizando una pala. No tiene que compactarlo, tan sólo nivelar el concreto de la parte superior del cono con la llana.
- Quite el concreto sobrante de alrededor de la base del cono.
- Eleve el cono verticalmente y permita que el concreto fluya hacia el exterior libremente.
- Mida el diámetro final del concreto en dos direcciones perpendiculares.
- Calcule el promedio de los dos diámetros medidos (en mm).
- Mida la diferencia de altura entre el concreto justo en el interior de las barras y el que se encuentra justo en el exterior de las mismas. Calcule el promedio de la diferencia de altura en cuatro lugares (en mm).
- Observe cualquier borde del mortero o la pasta de cemento sin agregado grueso en el límite del charco de concreto.

EN CONJUNCIÓN CON EL ORIMET

Equipamiento

- Dispositivo Orimet de un material rígido no absorbente
- Llana

- Pala
- Cronómetro
- Cinta métrica
- Anillo J, una sección en forma de anillo de acero abierto (300 mm de diámetro), perforado verticalmente con agujeros. En dichos agujeros pueden atornillarse secciones roscadas de barras de armadura (longitud de 100 mm, diámetro de 10 mm, espaciado de 48 mm).

Procedimiento

- Se requieren 8 litros de concreto para realizar la prueba, tomados como muestra de manera normal.
- Coloque el Orimet sobre un terreno firme.
- Humedezca las superficies interiores del orificio y el conducto de vaciado.
- Mantenga abierta la trampilla para permitir el drenaje del agua sobrante.
- Cierre la trampilla y coloque un balde debajo.
- Llene completamente el aparato con concreto sin compactarlo o presionarlo, sólo tiene que nivelar el concreto de la parte superior con la llana.
- Abra la trampilla 10 segundos después del llenado y permita que el concreto salga por su propio peso.
- De manera simultánea, inicie el cronómetro y registre el tiempo.
- Active el cronómetro al abrir la trampilla y registre el tiempo hasta que se complete la descarga (el tiempo de flujo). Se considera que se ha completado cuando se ve la luz desde la parte superior a través de la sección del orificio.
- Mida el diámetro final del concreto en dos direcciones perpendiculares.

- El ensayo completo debe realizarse en 5 minutos.
- Calcule el promedio de los dos diámetros medidos (en mm).
- Mida la diferencia de altura entre el concreto justo en el interior de las barras y el que se encuentra justo en el exterior de las mismas. Calcule el promedio de la diferencia de altura en cuatro lugares (en mm).
- Observe cualquier borde del mortero o la pasta de cemento sin agregado grueso en el límite del charco de concreto.

Interpretación del resultado

Hay que tener en cuenta que, a pesar de que estas combinaciones de ensayos miden el flujo y la capacidad de paso, los resultados no son independientes. El flujo medido se ve afectado por el grado en que el movimiento del concreto está bloqueado por las barras de refuerzo. El alcance del bloqueo se ve mucho menos afectado por las características de flujo y podemos decir que, de manera clara, cuanto mayor sea la diferencia de altura, menor será la capacidad de paso del concreto. El bloqueo y/o segregación también puede detectarse visualmente, con frecuencia de manera más fiable que mediante el cálculo.

Los resultados del anillo J se ven influidos por el método de combinación seleccionado y los resultados obtenidos con distintas combinaciones no son comparables.

MÉTODO DE ENSAYO DE ESTABILIDAD DE TAMIZ GTM

Este ensayo ha sido desarrollado por el contratista francés GTM, para evaluar la resistencia a la segregación (estabilidad). Consiste en tomar una muestra de 10 litros de concreto, dejarla reposar durante un tiempo para permitir que se produzca cualquier segregación interna y luego se vierte la mitad de la misma sobre un tamiz de abertura cuadrada de 4.75 mm (malla N° 4) y 350 mm de diámetro, que se encuentra sobre un fondo de tamiz encima de una báscula. Después de dos minutos, el mortero que ha

pasado a través del tamiz se pesa y expresa como porcentaje de la muestra original encima del tamiz.

Evaluación de la prueba

Los ingenieros que han utilizado este ensayo comentan que se trata de un modo muy efectivo para evaluar la estabilidad del CAC. No obstante, aunque es un ensayo sencillo no es rápido y requiere una báscula precisa, de modo que quizá no resulte adecuado para utilizarse en obra.

Equipo

- Balde de 10 litros con tapa
- Tamiz de 4.75 mm (N° 4) con un diámetro de 350 mm (12")
- Fondo de tamiz
- Balanza, precisión de 20 g, capacidad mínima de 20 kg
- Cronómetro

Procedimiento

- Se requieren unos 10 litros de concreto para realizar el ensayo tomados de manera normal.
- Colocar el concreto en un balde y dejarlo reposar durante 15 minutos cubierto con una tapa para impedir la evaporación.
- Determine la masa del fondo de tamiz vacío.
- Inspeccione la superficie de concreto por si hay agua de sangrado y anótelo.
- Vierta los dos litros superiores o aproximadamente 4.8 ± 0.2 kg sólo de la muestra de concreto dentro de un contenedor de vertido.
- Determine la masa del contenedor de vertido lleno.

- Vierta todo el concreto del contenedor de vertido en el tamiz desde una altura de 500 mm, en un movimiento continuado y uniforme.
- Pese el contenedor de vertido vacío (con el residuo de concreto que no pudo ser vertido).
- Calcule la masa del concreto vertido sobre el tamiz, M_a (es decir, la diferencia entre el peso lleno y vacío).
- Permita que la fracción de mortero de la muestra fluya a través del tamiz en dirección al fondo de tamiz durante un período de 2 minutos.
- Quite el tamiz y determine la masa del fondo del tamiz "lleno". Calcule la masa de la muestra que traspasa el tamiz M_b , restando la masa del fondo de tamiz vacío a la masa del recipiente de tamiz lleno.
- Calcule el porcentaje de la muestra que traspasa el tamiz, la relación de segregación es igual a: $(M_b/M_a) \times 100$.

Interpretación del resultado

Las observaciones empíricas sugieren que si el porcentaje de mortero que ha traspasado el tamiz (relación de segregación), oscila entre el 5% y el 15% del peso de la muestra, la resistencia a la segregación se considera satisfactoria. Por debajo del 5% es excesiva, con lo que probablemente afectará al acabado superficial. Por encima de un 15%, en particular por encima de un 30%, existe una fuerte probabilidad de segregación.

3.5 CONSIDERACIONES BÁSICAS EN EL DISEÑO DE MEZCLA DE CONCRETO AUTOCOMPACTABLE

3.5.1 GENERALIDADES SOBRE EL PROCEDIMIENTO PARA LA PROPORCIÓN DE MEZCLA

Las dosificaciones de los distintos componentes que entran a formar parte de un CAC, deben ser cuidadosamente estudiadas para poder realizar un concreto de elevada consistencia, cohesividad suficiente para atravesar un denso armado sin bloqueo del agregado grueso y que sea compatible con la ausencia de segregación.

Como norma general se puede tomar un modelo de diseño simplificado de la mezcla, véase la Figura 32:

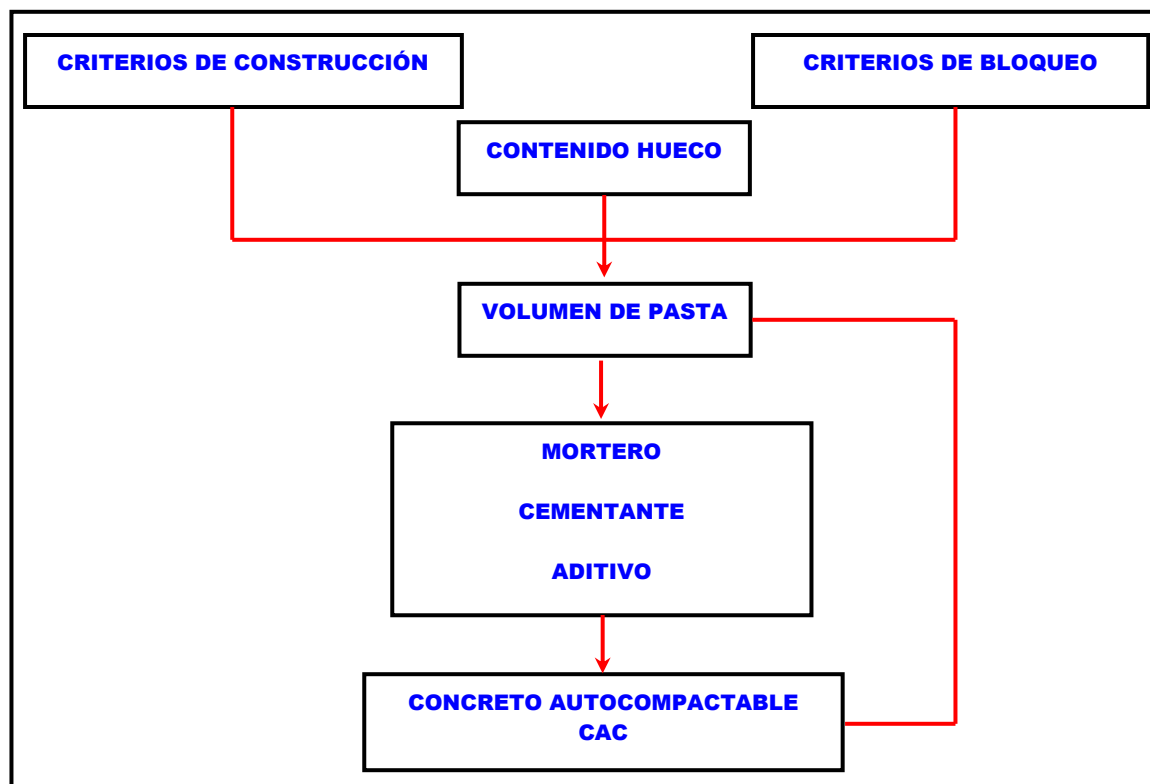


Figura tomada de: Hormigones de última generación. Los hormigones autocompactantes.

FIGURA 32: Modelo para el diseño de la mezcla de CAC.

Los métodos de dosificación de mezclas para CAC, difieren de los métodos tradicionales empleados en el concreto convencional que necesita vibrado, estando fundamentados en la actualidad, en una base esencialmente empírica. En tales mezclas la obtención de las propiedades en fresco asociadas, a la fluidez, viscosidad y cohesión, dependen de la correcta definición de las proporciones de los componentes. Las definiciones que hasta hoy son útiles para establecer la calidad del concreto, como son la relación agua/cemento, la relación grava/arena y el revenimiento, no son aplicables en el caso del CAC, ya que para el manejo de esta tecnología se establecieron en el diseño de la mezcla otros parámetros que permiten controlar las características del comportamiento deseado (Rodríguez J. Arturo 2002) ^[27]. Estos conceptos se describen a continuación:

Relación agua / finos

Se establece como la relación entre el contenido de agua y el contenido de finos menores que la malla N° 100. De acuerdo a las investigaciones el comportamiento de las mezclas realizadas en el laboratorio, recomienda que esta relación se ubique entre 0.30 y 0.35. Esta relación considera como finos a todos los materiales y partículas, incluyendo el cemento y las partículas de los agregados que pasan dicha malla.

El contenido de estos finos recomendado para el CAC se ubica entre los 400 kg y 600 kg por metro cúbico ^[4]. En éstos queda incluido el uso de materiales puzolánicos como la ceniza volante y la microsílíce.

Grava / arena

Se recomienda para esta relación un parámetro entre 0.72 y 0.80, lo que significa que el CAC posee una mayor cantidad de arena que un concreto convencional, y es esta relación combinada con el contenido de finos, lo que define el efecto de autocompactación.

Coeficiente de forma del agregado grueso

El coeficiente de forma del agregado grueso es un factor que influye en el comportamiento del concreto en estado plástico, por lo que se recomienda que el coeficiente de forma del agregado grueso sea mayor o igual a 0.20.

El tamaño máximo nominal del agregado grueso recomendado se encuentra entre 3/4" y 3/8". Tanto la grava como la arena pueden ser cribados o bien producto de trituración.

Requisitos para el diseño de mezcla de CAC

El CAC debe diseñarse para cumplir los requisitos relativos a la densidad, desarrollo de resistencia, resistencia final, durabilidad y características de alta fluidez y viscosidad.

Una alta fluidez es necesaria para asegurar su adecuado escurrimiento por si mismo y sólo bajo su propio peso. Evitando la segregación del agregado grueso y sangrado, garantizando así que el concreto mantenga la homogeneidad, cuando está en posición estática o escurriendo alrededor de las armaduras.

Por otra parte la pasta y mortero de un CAC requieren de una alta viscosidad y deformabilidad, lo cual es logrado mediante el empleo de un superplastificante que demanda una baja relación agua/finos.

En la mezcla proporcionada por un concreto convencional, la relación agua/cemento ha sido fijada de primero desde el punto de vista de obtener la resistencia requerida, sin embargo con un CAC la relación de agua/finos es fijada tomando en cuenta la autocompactabilidad (Bernardo de la Peña R. 2000) ^[41], debido a que este parámetro es muy sensitivo a esta tasa, en la mayoría de los casos, el diseño de la mezcla no es gobernada por una relación agua/finos debido a que es lo suficientemente pequeña como para obtener la resistencia requerida para las estructuras ordinarias a expensas que los materiales que existen en los finos no sean reactivos.

La autocompactabilidad puede ser ampliamente afectada por las características del material y por la proporción de la mezcla. Por ello, es necesario establecer un método de mezcla racional para CAC, que pueda ser usado con una amplia variedad de materiales.

3.5.2 PROCEDIMIENTOS MAS UTILIZADOS PARA EL DISEÑO DE MEZCLA DE CONCRETO AUTOCOMPACTABLE

Existen varios procedimientos sugeridos por los investigadores para la obtención de mezclas de CAC; a continuación se exponen las directrices principales contempladas en los métodos de dosificación más utilizados.

Procedimiento propuesto por Okamura y Ouchi et. al. (1997) [42]

Esta metodología considera que el concreto está constituido por dos fases: agregado grueso y mortero. El volumen de agregado grueso se fija en el 50 % del volumen sólido del esqueleto granular (constituido por el agregado fino y el agregado grueso), mientras que el correspondiente al agregado fino es el 40 % del volumen del mortero (constituido por la pasta de cemento y los agregados finos). Tales proporciones se han determinado mediante estudios de carácter experimental relativos al bloqueo de los agregados; la relación agua/finos y la dosificación del superplastificante se obtienen mediante ensayos de fluidez en mortero.

El procedimiento se determina como se indica a continuación [4]:

1. Definición del contenido de aire deseado (recomendado 2 %)

En general, el contenido de aire puede establecerse en un 2%, o un valor superior que se especifica cuando quiere diseñarse concreto resistente a los ciclos hielo-deshielo.

2. Determinación del volumen de agregado grueso

El volumen de agregado grueso se define por su densidad. El contenido de agregado grueso en general (diámetro > 4.75 mm) debe estar entre el 50 % y el 60 %.

Cuando el volumen de agregado grueso en el concreto supera un cierto límite, las posibilidades de colisión o contacto entre las partículas de agregado grueso aumentan rápidamente y también se incrementa el riesgo de bloqueo cuando el concreto pasa por los espacios entre las armaduras.

El contenido óptimo de agregado grueso depende de los parámetros siguientes:

- **Tamaño máximo del agregado.** Cuanto menor sea el tamaño máximo del agregado, mayor será la proporción de agregado grueso
- **Tipo de agregado (triturado o rodado).** En el caso de los agregados rodados, puede utilizarse un contenido superior en volumen, que en el caso de los agregados triturados.

3. Determinación del contenido de arena

La arena, en el contexto de este procedimiento de composición de mezcla, se define como todas las partículas de tamaño superior a 0.150 mm (malla N° 100) y menor a 4.75 mm (malla N° 4).

El contenido de arena se define por su densidad. El contenido de volumen óptimo de arena en el mortero varía entre el 40 % y el 50 %, en función de las propiedades de la pasta.

4. Diseño de la composición de la pasta

Inicialmente, la relación agua/finos para un flujo cero (véase la Figura 33), se determina en la pasta, con la proporción elegida de cemento y adiciones. Se realizan los ensayos de cono de flujo con relaciones de agua/finos en volumen para 1.1, 1.2, 1.3 y 1.4, con el propósito de conocer los resultados habituales. El punto de intersección con el eje Y se designa como valor β_p (relación agua/finos, para un flujo relativo cero).

Este valor β_p suele utilizarse para el control de calidad respecto a la demanda de agua en nuevos lotes de cemento y adiciones.

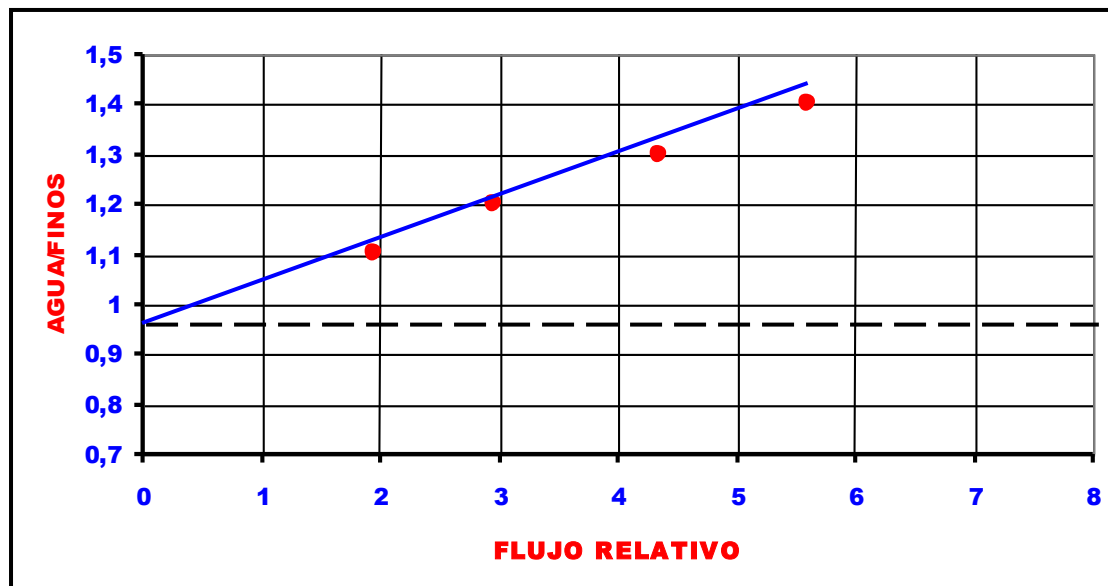


Figura tomada de: EFNARC (European Federation for Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems).

FIGURA 33: Ejemplo del gráfico para la determinación de la relación agua/finos para un flujo cero.

5. Determinación de la relación óptima agua/finos y la dosificación del superplastificante en el mortero.

Los ensayos con cono de flujo y embudo V para el mortero (véase la Figura 34), se efectúan con diferentes relaciones agua/finos (entre 0,8 - 0,9) y dosificaciones de superplastificante. Como se mencionó anteriormente, el superplastificante se utiliza para equilibrar la reología de la pasta.

Los valores requeridos son un flujo de 24 cm a 26 cm en el cono de flujo y un tiempo de 7 s a 11 s, en el embudo V para mortero.

Cuando se alcanza el objetivo de flujo y el tiempo del embudo V es inferior a 7 s, debe disminuirse la relación de agua/finos. Cuando se cumple el objetivo de flujo y el tiempo del embudo V es superior a 11 s, hay que aumentar la relación de agua/finos.

Si no pueden cumplirse estos criterios, la combinación concreta de materiales no es la adecuada. Un ensayo con un superplastificante distinto será la alternativa preferida. La segunda alternativa es un nuevo aditivo y como último recurso, un cemento diferente.

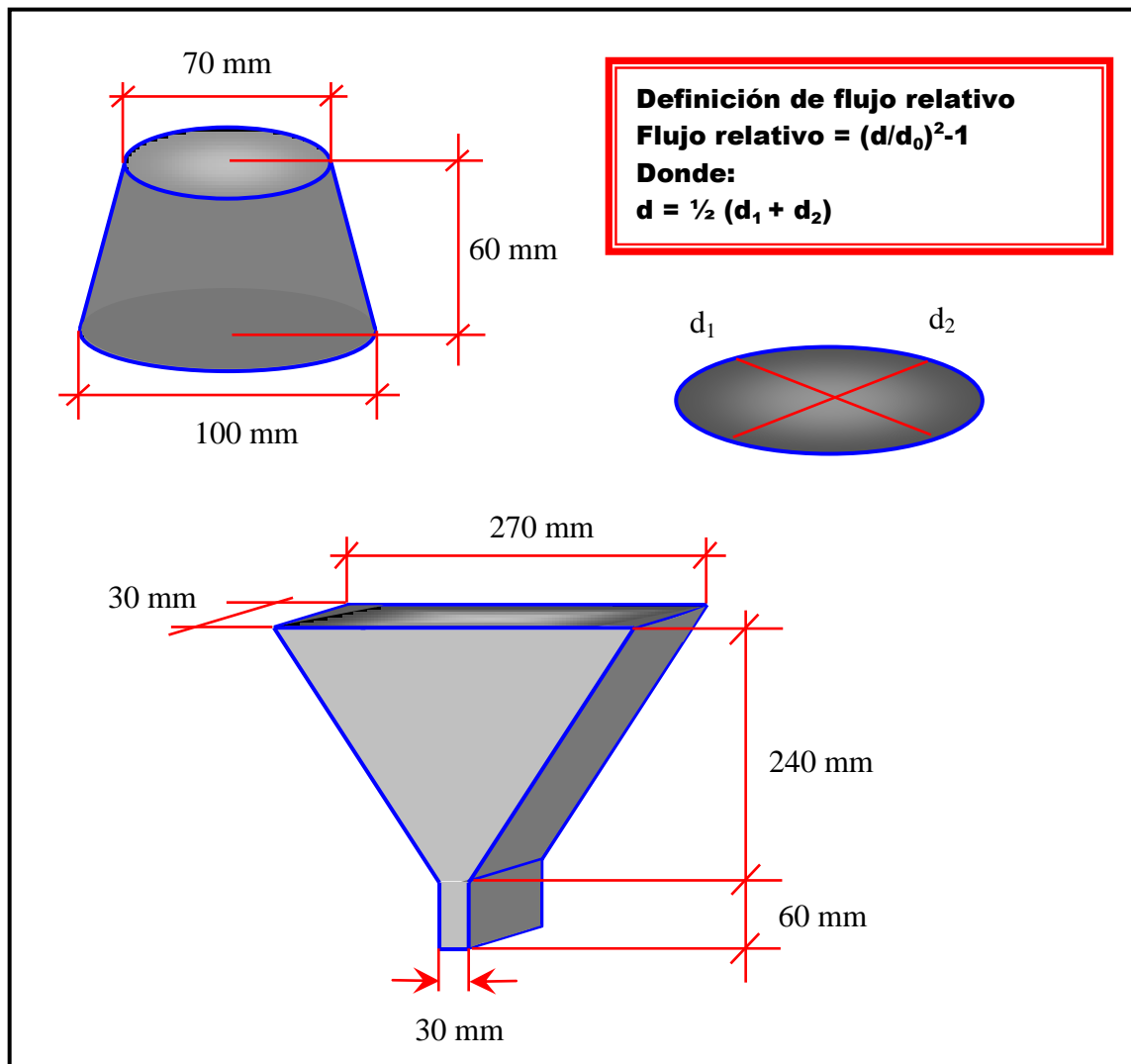


Figura tomada de: EFNARC (European Federation for Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems).

FIGURA 34: Cono de flujo y embudo V, para la determinación óptima de agua/finos y superplastificante.

6. Ensayos con concreto

La composición del concreto ya está determinada, y finalmente se ajusta la dosificación necesaria de superplastificante basándose en los ensayos con concreto.

Procedimiento propuesto por Petersson et. al. (1996) ^[43]

Consiste en determinar el mínimo volumen de pasta y un determinado esqueleto granular que garanticen el paso del concreto por una determinada separación entre armaduras, sin que se presente el bloqueo de la mezcla. La determinación del contenido de finos, agua y superplastificante se ajusta mediante la utilización de un viscosímetro coaxial.

El proceso de diseño de la mezcla se puede dividir en cuatro pasos:

1. Identificación del conjunto de criterios para el material (resistencia, evolución de la ganancia de resistencia, durabilidad, aberturas entre barras, fluidez, pérdida de fluidez, etc.). Los criterios se definen a partir de la mezcla que se requiere y el método de producción que se ha de utilizar.
2. Determinación del volumen de la fase líquida. (micromorteros incluyendo agua, aditivos y todas las partículas inferiores a la malla N° 100). Este volumen se obtiene mediante la evaluación del contenido de huecos de la combinación de las fracciones de agregados de uso previsto, y a partir de una evaluación del criterio de bloqueo según el modelo elegido.
3. Formulación de la fase líquida considerando el tipo de cemento, la relación agua/cemento, tipo y cantidad de superplastificante, adiciones (mineralogía, tamaños y forma de partículas, cantidad, etc.) y un posible agente de viscosidad. Las propiedades a cumplir están relacionadas con los datos reológicos y en esta fase del desarrollo se basan principalmente en la experiencia. Los datos se obtienen mediante el uso de un viscosímetro de pasta/mortero.
4. La formulación del concreto, es decir la adición de agregados al mortero fino, se ejecuta mediante la aplicación de pruebas de campo relacionadas con la medición de las propiedades de agregados para la mezcla de concreto fino, por ejemplo flujo, pérdida de fluidez, homogeneidad, bloqueo y resistencia. El uso de un viscosímetro de concreto mejora las posibilidades de lograr una formulación final correcta del concreto.

Procedimiento propuesto por Sedran et. al. (1996) [21]

Consiste en utilizar un modelo computacional mediante el cual se establece un esqueleto granular compacto con el mínimo de vacíos. La dosificación de finos se fija inicialmente, dependiendo de la resistencia y de los materiales disponibles. El contenido de superplastificante para las posibles combinaciones de finos se define mediante el ensayo del cono de Marsh. El ajuste final de agua y del superplastificante para obtener una viscosidad aceptable se realiza utilizando un reómetro y el ensayo de extensión de flujo.

La dosificación de superplastificante se determina mediante el ensayo del cono de Marsh (Larrard, 1990) con apertura de salida de 8 mm (véase la Figura 35). El procedimiento consiste en introducir 1 litro de pasta en el cono y medir el tiempo (T) que tarda en fluir por la apertura inferior una cantidad de 500 ml. Este tiempo de flujo se adopta como una medida inversa de la fluidez de la pasta. Variando la relación superplastificante/cemento (sp/c) se obtiene una curva $\log(T)$ -sp/c (véase la Figura 36). En este sentido, se reitera que la relación sp/c se refiere siempre al contenido sólido del superplastificante y que el contenido de agua presente en el mismo se tiene en cuenta en la relación agua /cemento.

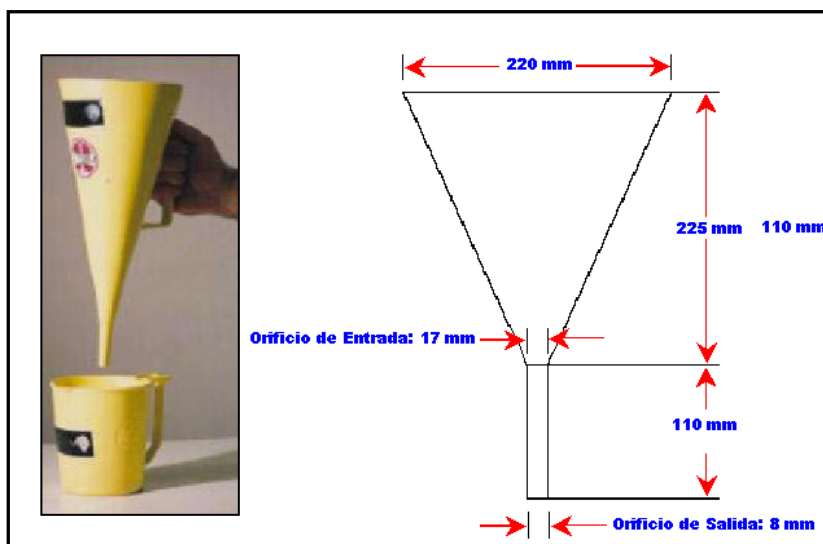


Figura tomada de: Revista Hormigón. Diseño de hormigones autocompactables de alta resistencia procedimiento para su dosificación y métodos de caracterización.

FIGURA 35: Ensayo para la dosificación de superplastificante utilizando el cono Marsh.

La gráfica $\log(T)$ -sp/c se utiliza para la definición del punto de saturación del superplastificante, que constituye el porcentaje óptimo de aditivo para la pasta considerada (Larrard et. al., 1997). Este punto de saturación se entiende como la relación sp/c para la cual un incremento en la dosificación de superplastificante no provoca mejoras significativas en la fluidez de la mezcla (Aitcin et. al., 1994; Gettu et. al., 1997).

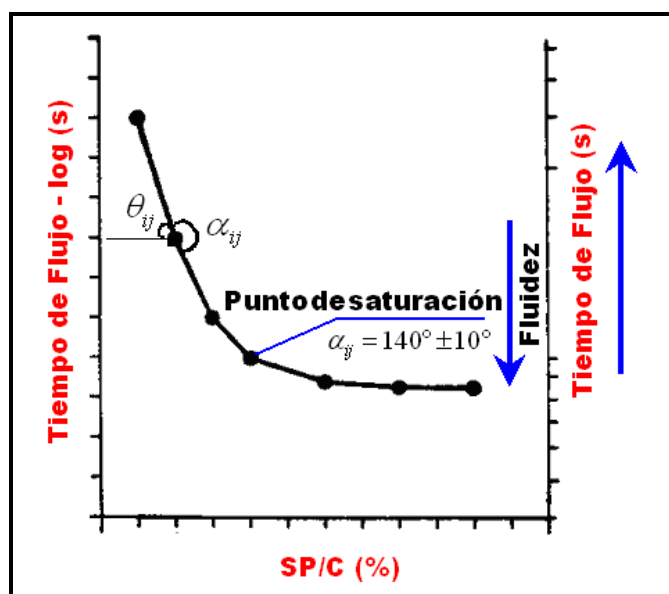


Figura tomada de: Revista Hormigón. Diseño de hormigones autocompactables de alta resistencia procedimiento para su dosificación y métodos de caracterización.

FIGURA 36: Gráfica $\log(T)$ -sp/c, para la determinación del punto de saturación del superplastificante.

La dosificación óptima de adiciones se determina mediante el ensayo de mini-slump, que ha sido utilizado por varios investigadores en trabajos relativos al estudio de la fluidez de la pasta y la compatibilidad cemento-superplastificante (Aitcin et. al., 1994; Kantio, 1980). El equipo utilizado es el propuesto por Kantro (1980) y consiste, esencialmente, en un molde en forma de cono truncado, que se rellena con la pasta a ensayar (véase la Figura 37). En el ensayo se mide el diámetro de la extensión final junto con el tiempo transcurrido hasta alcanzar un diámetro de 115 mm (denominado como T_{115}).

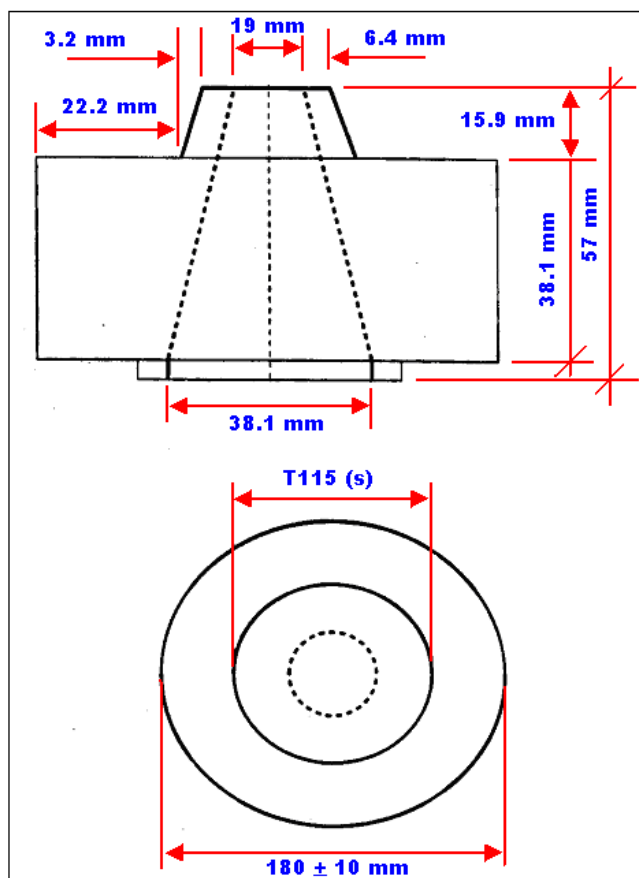


Figura tomada de: Revista Hormigón. Diseño de hormigones autocompactables de alta resistencia procedimiento para su dosificación y métodos de caracterización.

FIGURA 37: Equipo para el ensayo Mini Slump.

El ensayo se realiza en pastas con diferentes relaciones adición/cemento (ad/c) cada una de ellas con la dosis de superplastificante correspondiente al punto de saturación determinado previamente mediante el procedimiento propuesto. Basado en un extensivo estudio experimental, la relación ad/c óptima de cada pasta es aquella que presenta un diámetro de extensión final de 180 ± 10 mm y un tiempo T_{115} del orden de 2.0 s a 3.5 s.

La utilización del cono de Marsh y del mini slump permiten obtener, respectivamente las relaciones sp/c y ad/c que dan lugar a mezclas con una fluidez máxima sin segregación y con un alto nivel de cohesión interna que no perjudique significativamente la fluidez del material.

3.5.3 COMPOSICIÓN DE LA MEZCLA

Al diseñar la mezcla es preciso tener en cuenta las proporciones relativas de los componentes en cuanto al volumen y no a la masa.

Los márgenes indicativos habituales de las proporciones según el EFNARC [4], y las cantidades para alcanzar la autocompactación se presentan a continuación. Pueden requerirse otras modificaciones para cumplir ciertos requisitos de resistencia y rendimiento.

- Relación agua/finos en volumen de 0.80 a 1.10.
- Contenido total de finos de 160 a 240 litros (400 kg - 600 kg) por metro cúbico de concreto.
- En la relación agua/finos, normalmente el contenido de agua no supera los 200 litros/m³
- El contenido de arena es mayor que la grava y equilibra el volumen de los demás componentes.

En general, a partir de los parámetros anteriores se aconseja una táctica conservadora de diseño para garantizar que el concreto pueda mantener sus propiedades especificadas en fresco a pesar de las variaciones en la calidad de las materias primas. También deben esperarse y permitirse algunas variaciones en el contenido de humedad de los agregados en la fase de diseño de la mezcla. Normalmente, los aditivos que modifican la viscosidad constituyen una útil herramienta para compensar las fluctuaciones debidas a cualquier variación en la granulometría de la arena y el contenido de humedad de los agregados.

3.5.4 DISEÑO DE LA MEZCLA

Una alta fluidez así como una alta viscosidad en el CAC, se obtienen sin inconvenientes, empleando un aditivo químico de última generación con una elevada capacidad de reducción de agua (hasta 40 %).

El CAC puede ser afectado por las características de los materiales y por la proporción de sus componentes. La cantidad de cemento, junto con el material fino y el aditivo afectan fuertemente las propiedades del concreto, por lo que la relación agua/finos y la dosis de aditivo no pueden ser determinadas sin la realización de mezclas de prueba. Por lo tanto, una vez que se ha decidido la proporción de la mezcla, deben realizarse los ensayos necesarios para confirmar la autocompactación.

Entre los muchos métodos de ensayo propuestos para evaluar la capacidad de autocompactación del concreto, se destacan el flujo de asentamiento, la caja L, la caja en U y el embudo V, siendo el primero el más utilizado en la práctica debido a su sencillez.

El diseño de la mezcla de CAC puede efectuarse siguiendo la propuesta de la Figura 38.

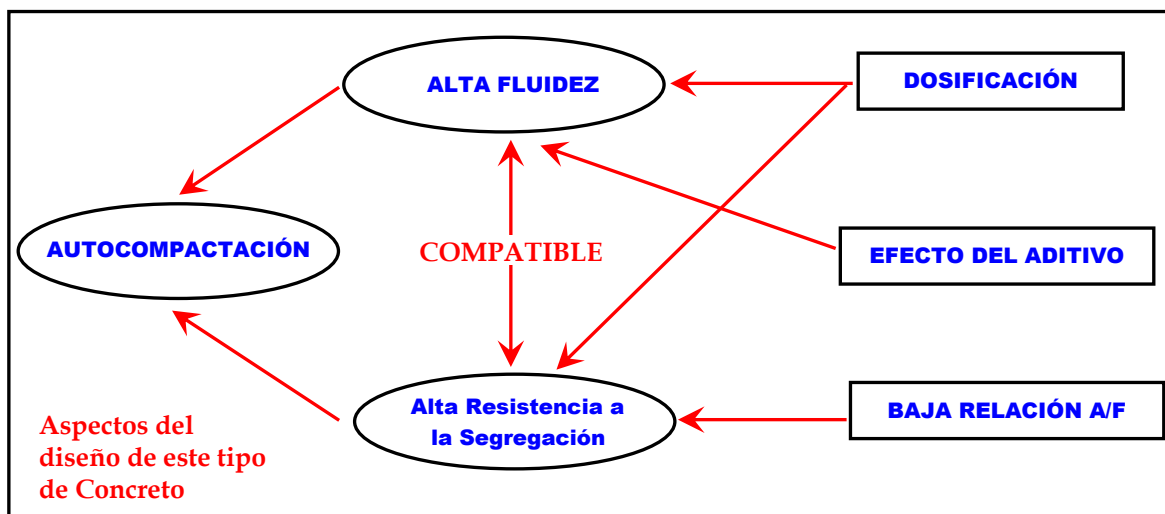


Figura tomada de: LACER. Self-Compacting Concrete (SCC). Time Development of the Material Properties and the Bond Behaviour.

FIGURA 38: Procedimiento para el diseño de mezcla.

3.5.5 AJUSTE DE LA MEZCLA

Los ensayos de laboratorio sirven para verificar las propiedades de la composición inicial de la mezcla. Si es preciso, en ese momento deberán aplicarse los ajustes en dicha composición (véase la Figura 39). Una vez satisfechos todos los requisitos, la mezcla debe contrastarse a escala completa en la planta de concreto o en la obra.

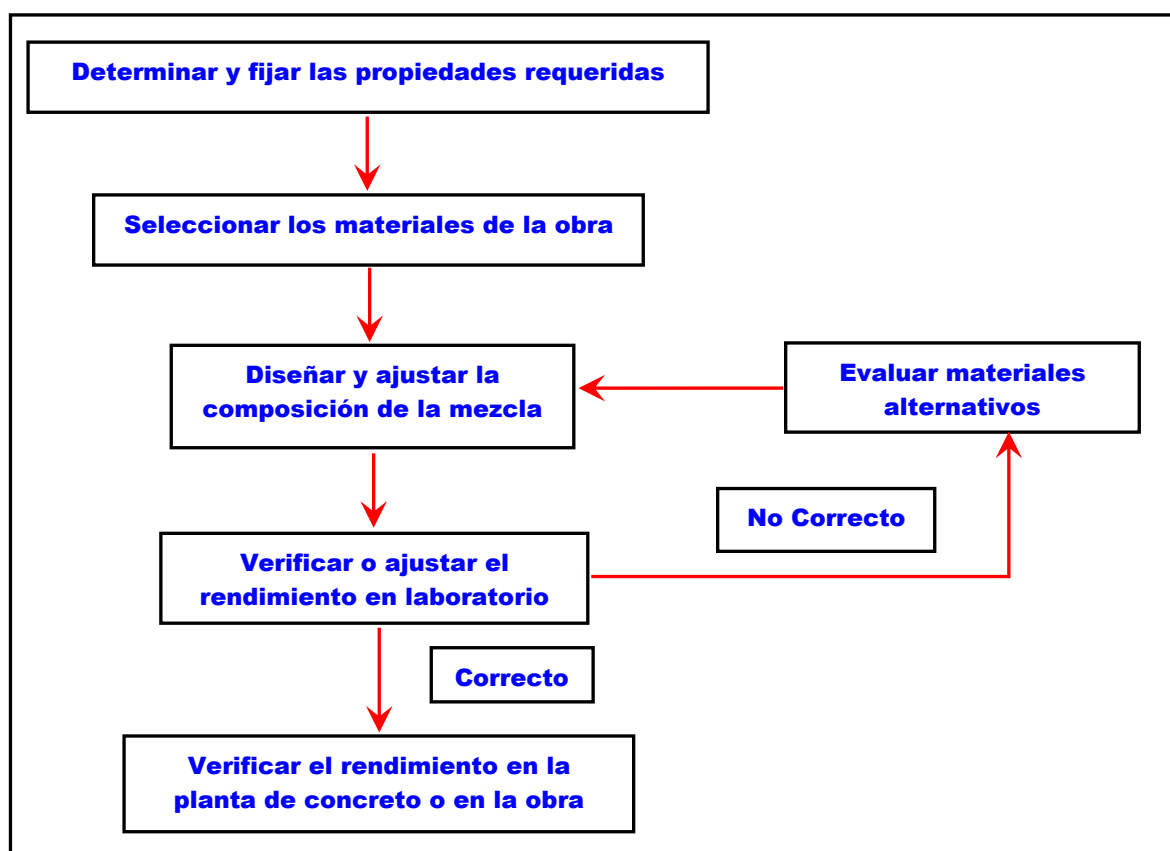


Figura tomada de: EFNARC (European Federation for Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems).

FIGURA 39: Procedimiento para el ajuste de la mezcla.

En caso de que no pueda obtenerse un rendimiento satisfactorio, será preciso tener en cuenta un rediseño fundamental de la mezcla. En función del problema, pueden resultar pertinentes los siguientes tipos de actuación:

- Uso de adiciones específicas (si están disponibles).
- Modificación de las proporciones de arena o del agregado grueso.
- Uso de un agente modificador de la viscosidad, si no se incluye ya en la mezcla.
- Ajuste de la dosificación del superplastificante y/o del agente modificador de la viscosidad.
- Uso de tipos alternativos de superplastificante, más compatibles con los materiales locales.
- Ajuste de la dosificación de aditivos para modificar el contenido de agua y por consiguiente la relación agua/finos.

El momento de la adición de aditivos es importante y es preciso acordar los procedimientos con el proveedor después de los ensayos en planta. Si es necesario ajustar la consistencia después de la mezcla inicial, en general debe hacerse con aditivos. Si pueden mantenerse los requisitos respecto a la relación agua/finos, el contenido de agua puede variarse para aplicar las modificaciones necesarias.

3.5.6 COMPROBACIÓN ANTES DE LA COLOCACIÓN

Antes de la colocación del CAC en una obra específica debe comprobarse que todos los elementos esenciales han sido tomados en cuenta y se encuentran dentro de los requerimientos sugeridos. Debido a lo anterior se presenta a continuación una lista de comprobación diseñada para ayudar a los proyectistas, productores y contratistas a garantizar el correcto desempeño de la mezcla diseñada. (véase la Tabla 16)

TABLA 16: Lista de comprobación de los requisitos del CAC, antes de su puesta en obra.

PROPIEDAD	REQUISITO
COMPONENTES DE LA MEZCLA	
CEMENTO	Cumplimiento de la norma ASTM C 187, C 188, C 191, C 150, C 595
	Control del tipo de Cemento
	Cantidad recomendada de cemento: 350 - 450 kg
AGREGADO	Cumplimiento de la norma ASTM C 33
	Control de las partículas menores que la malla N° 100 (0.150 mm)
	Control del contenido de humedad
	Determinación de la curva granulométrica ASTM C 136
AGUA DE MEZCLADO	Compatibilidad con el espacio entre armaduras
ADITIVOS	Cumplimiento de la norma ASTM C 94
	Cumplimiento de la norma ASTM C 494
	Determinación de la combinación necesaria
ADICIONES	Determinación de la dosificación esperada
	Cumplimiento de las especificaciones y control de calidad para cada adición
	Determinación de la granulometría
	Definición de la adición que va a utilizarse
	Determinación del aumento en la demanda de agua
COMPOSICIÓN DE LA MEZCLA	
Diseño de la mezcla	Ejecutar la mezcla diseñada
	Agregado grueso < 50%
	Relación agua/finos = 0.80 - 1.1
	Contenido total de finos de 400 kg - 600 kg, para un metro cúbico
	Contenido de arena > 40 % del mortero (volumen)
	Arena 50 % del volumen de la pasta
	Arena > 50 % por peso del agregado total
	Agua de mezclado > 200 l
Pasta > 40 % del volumen de la mezcla	
ENSAYO DE TRABAJABILIDAD	
Flujo de Asentamiento (Abrams)	650 mm - 800 mm
Flujo de Asentamiento T _{60cm}	2 s - 5 s
Anillo J	0 mm - 10 mm
Embudo V	6 s - 12 s
Embudo V - T _{5min}	Más de 3 s
Caja en L	H ₂ /H ₁ = 0.8 - 1.0
Caja en U	H ₁ - H ₂ = 30 mm máximo
Caja de relleno	90 % - 100%
Estabilidad GTM	0 % - 15%
Ensayo Orimet	0 s - 5 s
PROPIEDADES EN ESTADO ENDURECIDO	
Resistencia mecánica	Consecución de los valores esperados después de 24 h, 7 d, 28 d.
Retracción	Según lo especificado
Módulo de Elasticidad	Consecución de los valores esperados por el diseñador
ENSAYOS DE CONFIRMACIÓN	
Ensayos a escala completa	Capacidad de relleno
	Capacidad de paso
	Resistencia a la segregación
	Mantenimiento de la trabajabilidad > 1 hora

FUENTE: EFNARC (European Federation for Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems).

3.6 MEZCLADO, TRANSPORTE Y BOMBEO DEL CONCRETO AUTOCOMPACTABLE

3.6.1 GENERALIDADES

Dado que la calidad del concreto recién fabricado puede fluctuar al principio de la producción en las plantas concreteras, se recomienda que los ensayos de trabajabilidad sean realizados por el productor en cada carga, hasta obtener resultados satisfactorios y consistentes. Posteriormente, cada lote de concreto debe inspeccionarse visualmente antes de transportarlo a la obra y los ensayos rutinarios deben aplicarse con frecuencia.

Según el tamaño de la estructura de concreto que vaya a producirse con CAC, es necesario equilibrar la capacidad de producción, el período de transporte y la capacidad de ejecución. Las paradas de producción inesperadas pueden provocar variaciones en la consistencia que afecten negativamente al resultado final.

El CAC debe diseñarse de modo que las propiedades en estado fresco se mantengan, a fin de cumplir los requisitos de la obra. La colocación es más rápida, en especial si se utiliza una bomba, pero es esencial asegurarse de que la entrega y la ejecución puedan completarse en el período de retención de la trabajabilidad (autocompactabilidad) del concreto.

3.6.2 EFECTOS DEL MEZCLADO, TRANSPORTE Y BOMBEO EN LAS PROPIEDADES DEL CONCRETO AUTOCOMPACTABLE EN ESTADO FRESCO

Acerca del manejo del material en la planta, para la producción de CAC, es importante que las variaciones de los materiales para toda la producción sean bajas y estén estrictamente controladas (sin segregación, aglomeración de materiales, variaciones de temperatura, etc.), y que el peso de cada material sea lo más exacto posible.

El CAC es más sensible a cualquier desviación en la dosificación especificada y al procedimiento técnico de mezclado que un concreto convencional que necesita vibrado.

Esto implica, que el margen aceptable especificado es más pequeño y que las variaciones aceptables en los materiales del concreto (por ejemplo, las variaciones en las curvas granulométricas y el contenido de humedad) son más pequeñas, además el orden y tiempo de mezclado deben seguirse estrictamente.

En general, los períodos de mezcla para CAC deben ser más largos que en el caso de las mezclas convencionales. Considerando más grande el riesgo de segregación y obstaculización de la bomba, en los procedimientos del transporte y bombeo.

3.6.3 MEZCLADO

Se sabe que la eficacia del mezclado es importante, cuando se produce CAC, debido a la alta influencia en la calidad del concreto. Lo anterior fue confirmado, en el estudio japonés de Okamura et. al., 1993, citado por Takada et. al., 1998 . [44] [45]

En el caso del CAC, no hay un requisito específico para ningún tipo de mezcladora. Pueden utilizarse las mezcladoras tradicionales para mezclar el concreto convencional que necesita vibración.

Cuando las plantas de concreto difieren grandemente en su estructura y manejo del equipo para la mezcla, se convierte en un arduo trabajo evaluar las tendencias generales del comportamiento del CAC. Es por ello que la producción, debe ejecutarse en plantas donde el equipamiento, el funcionamiento y los materiales se controlen de la manera más adecuada.

La planta concretera podría ser de un tipo horizontal (véase la Figura 40) donde los módulos de la entrada y silos de agregado, se ponen a nivel de tierra, o de un tipo vertical (planta de torre) donde el material se transporta a silos localizados sobre el módulo de mezclado (véase la Figura 41).



Figura tomada de: Centro de planta de concreto Liebherr Betomat II.

FIGURA 40: Planta de concreto tipo horizontal.

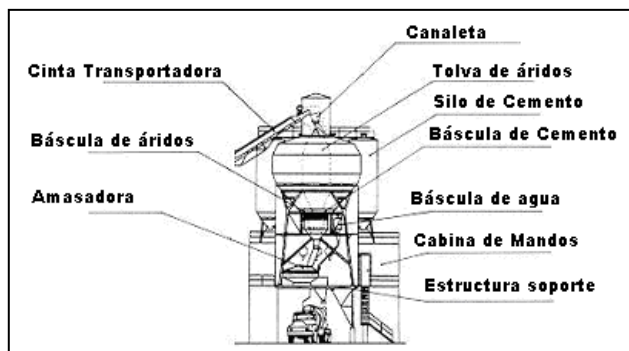


Figura tomada de: Centro de planta de concreto Liebherr Betomat II.

FIGURA 41: Planta de concreto tipo vertical.

Existen diferentes sistemas para dosificar los materiales en el mezclador pero cualquier cambio en la humedad del agregado debe ser considerada previamente, por lo que se requiere un control de la misma, a través de varios ensayos durante el día. Los aditivos normalmente se dosifican por peso, por lo que es esencial que todo el aditivo sea vaciado de las cubetas o cañerías. A menudo, para asegurar esto, la parte del agua de mezclado también se transporta a través de las cañerías o cubetas de aditivos. Preferentemente los aditivos deben diluirse para reducir las restricciones de exactitud del equipo.

El momento de la aplicación de los aditivos es importante y es preciso acordar los procedimientos con el proveedor después de los ensayos en planta. Si es necesario ajustar la consistencia después de la mezcla inicial, en general, debe hacerse con aditivos. Si pueden mantenerse los requisitos respecto a la relación agua/finos, el contenido de agua puede variarse para aplicar las modificaciones necesarias.

El equipo de mezclado podría ser de caída libre (tambor rotatorio) (véase la Figura 42) o de remo forzado. Los mezcladores de caída libre son los tipos más comunes en plantas concreteras, su intensidad varía dependiendo del tamaño, la cantidad de aspas, la horizontalidad del eje, etc. Los mezcladores de remo forzado a menudo son utilizados en el laboratorio y en la industria del prefabricado, pueden ser con agitadores de tipo planetario (forcer pan mixer) o con uno o dos astiles rotatorios (pugmill mixer) (véase la Figura 43).



Figura tomada de: Centro de investigación y asistencia técnica Barcelona.

FIGURA 42: Mezclador de tambor rotatorio.

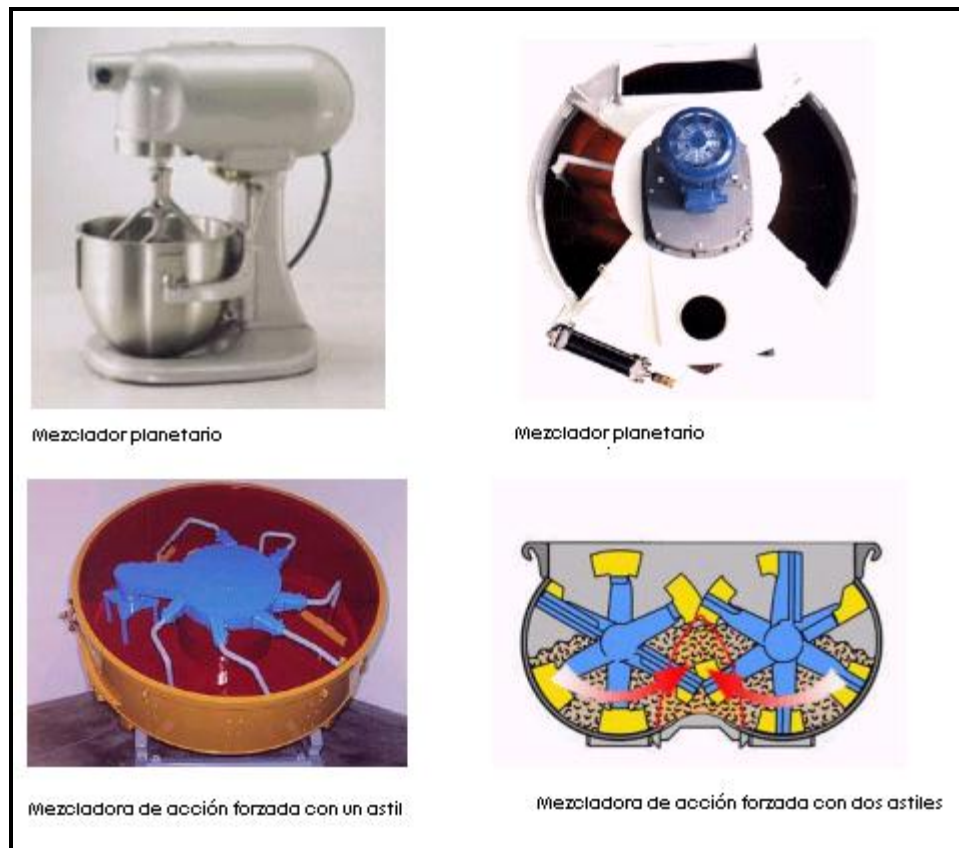


Figura tomada de: Catálogo BETONMASS.

FIGURA 43: Mezclador tipo planetario.

El mezclado también se realiza en el camión concretero (véase la Figura 44), el material seco se dosifica en él y luego se agrega el agua. Este método de mezclado no es tan eficaz como el que se realiza en la planta ya que necesita tiempos mayores a 20 minutos. Sin embargo, por razones de calidad según una amplia experiencia, este método no será recomendado si se necesita producir un concreto de alta resistencia, o que necesite hielo.



Figura tomada de: Centro de planta de concreto Liebherr Betomat II.

FIGURA 44: Camión concretero.

En muchos países el mezclador más común es el de tambor rotatorio, que tiene una intensidad de mezclado más baja para dispersar las partículas finas. Por consiguiente, ha sido importante verificar si la rotación de los tambores proporciona un proceso eficiente.

Takada et. al. (1998), ^[45] realizó una investigación sobre la influencia de un eficiente procedimiento de mezclado en las propiedades del concreto fresco, concluyendo que la proporción de agua/finos podría ser definida por el tipo de mezclador que se pretenda usar y del tiempo de mezclado. También la dosificación de superplastificante es influenciada por el tipo de mezclador y la intensidad que este tenga para dispersar las partículas. Explicando la ocurrencia de este fenómeno a través de dos efectos:

(1) Mezclado no intensivo; aquí se aglomeran los finos y las partículas permanecen en la fase de pasta que hace al concreto más viscoso. Por otra parte las aglomeraciones tienen una superficie de absorción más pequeña para los polímeros del superplastificante por lo que una cantidad más pequeña de este es suficiente para dar el mismo flujo de revenimiento.

(2) Mezclado intensivo; aquí los polímeros del superplastificante que se atan en la superficie de los productos de hidratación de la mezcla, se rompen liberándose de la

superficie. Este proceso se repite una y otra vez durante el mezclado lo que implica una mayor cantidad de superplastificante para obtener el mismo flujo de revenimiento.

Debe notarse que las influencias debidas al tipo de mezclador para la producción a gran escala, no son las mismas según lo observado en el laboratorio. A menudo, los mezcladores de la planta aumentan la eficacia en el mezclado comparada a las condiciones del laboratorio con un mezclador de remo o tipo forzado. La explicación de la eficacia aumentada por el mezclador de tambor probablemente es el resultado de una energía más grande debido a las fuerzas de gravedad producidas al darle revoltura al concreto.

Orden y Tiempo de Mezclado

Existe un antecedente sobre la sucesión de mezcla de los materiales constituyentes del CAC y el efecto de este procedimiento en los resultados finales, para las condiciones de laboratorio y a gran escala.

1. En laboratorio

Por ejemplo, Takada et. al. (1998), ^[45] estudió las variaciones de la sucesión en el mezclado (véase la Figura 45). También determinó el tiempo de mezclado más corto (4.5 min en total) utilizando un mezclador forzado (menos intenso). Al comparar diferentes sucesiones para obtener el mismo flujo de revenimiento (65 cm), el tiempo más corto implicó menos dosificación de superplastificante. Por el contrario, utilizando el mezclador de gravedad, se necesitó más superplastificante para lograr en el mismo tiempo igual revenimiento.

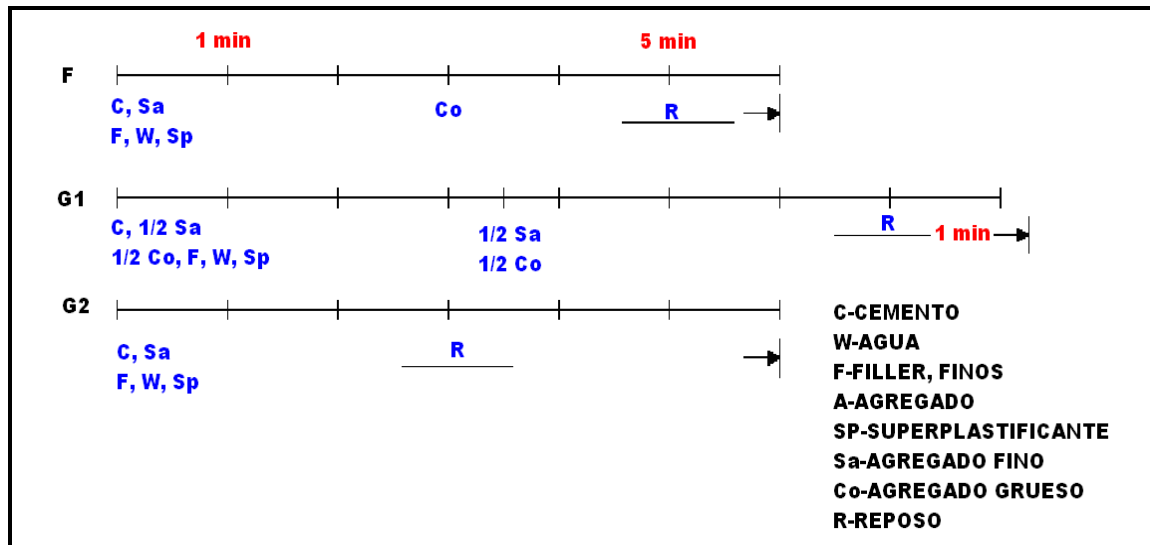


Figura tomada de: Self compacting concrete. Task 8.1 Mixing and transport.

FIGURA 45: Ejemplo de sucesiones de mezclas para un mezclador forzado (F) y un mezclador de gravedad (G). Basado en Figura de Takada et. al. (1998)).

Diferentes sucesiones de mezclado en el laboratorio también pueden encontrarse en algunos documentos del Rilem (conferencia en Stockholm). Por ejemplo, Khayat et. al. (1999) ^[46] logró un mezclado óptimo en un mezclador a una sucesión de 4 min para homogenizar la arena con partes de agua, (véase la Figura 46). Edamatsu et. al. (1999) ^[47] usó para un mezclador forzado un tiempo de mezclado de 3 min en total.

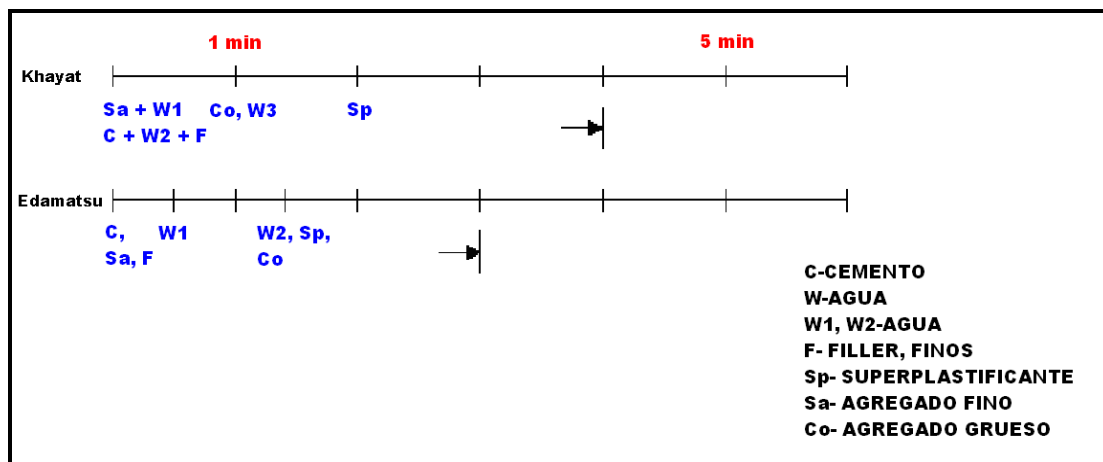


Figura tomada de: Self compacting concrete. Task 8.1 Mixing and transport.

FIGURA 46: Ejemplo de mezclado en laboratorio según Khayat et. al. (1999) y Edamatsu et. al. (1999).

El tema de la forma de adición del superplastificante en el laboratorio, también ha sido estudiado por Domone y Jin (1999) [35], obteniendo como resultado una sucesión de mezclado muy larga: fino + arena + 80% de agua (mezclado de 2 min), agrega 20% de agua (mezclado de 5 min), luego reposo de 2 min y vuelve a mezclar durante 1 min. La suma de superplastificante fue variando y los resultados indican un incremento de extensión para cada superplastificante entre 0.5 min a 2 min (véase la Figura 47). Los autores mencionaron que es bien conocido este efecto para el naphtalene y melamine, base de los aditivos (SP1 y SP2 en la figura) pero se observa ahora también para el vinilo copolimero (SP3) y el éter policarboxilato modificado (SP4). Claramente, este efecto tiene implicaciones para el procedimiento del colado.

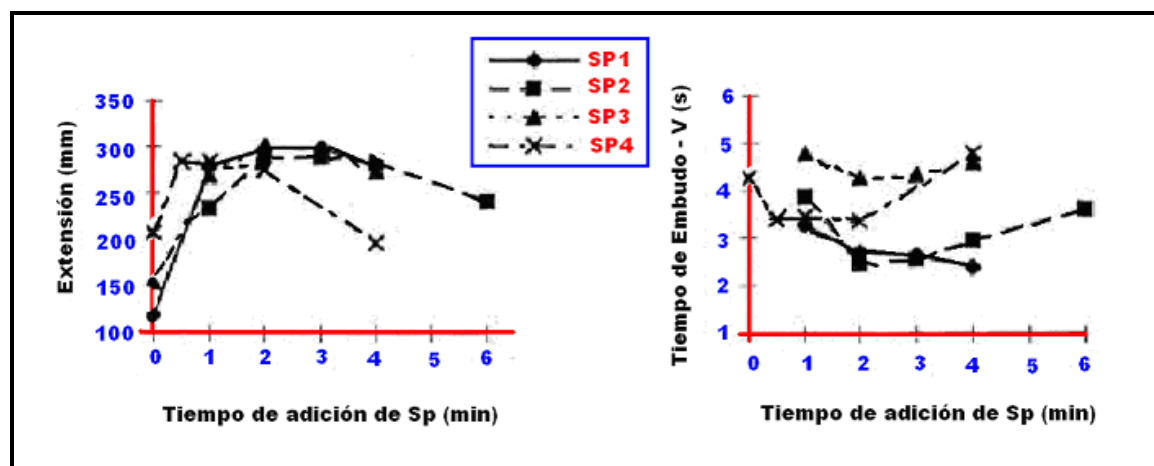


Figura tomada de: Self compacting concrete. Task 8.1 Mixing and transport.

FIGURA 47: Adición del superplastificante y su efecto a través del tiempo, Domone y Jin (1999).

2. Producción en la planta

La información sobre el mezclado en la producción a escala completa indica que la duración es más corta, (véase la Figura 48). En la investigación de Billberg et al. (1999) [44], fue sugerido: que todo el material excepto el agua y el aditivo, se mezclaran 1 min; luego el agua + 1/2 de superplastificante, 2 min; dejar reposar 1 min, agregar la otra 1/2 de superplastificante, y mezclar 2 min. En la planta, el tiempo de mezclado se ve

reducido en aproximadamente 3 ½ min, porque, entre otras cosas disminuyen el periodo de reposo, obteniendo aceptables resultados en las propiedades del concreto. Remontándose al Simposio de Rilem, Matabee et. al. [49], (1999) informó con éxito un simple procedimiento de mezcla de todos los ingredientes para 2 m³ en un pan mixer, durante tres minutos. El concreto se usó en una prueba modelo a escala completa de un edificio de dos pisos.

Además, Nishizaki et. al. (1999) [50] en el estudio para el tanque de almacenamiento LNG (12,000 m³) obtiene con un Twin-shaft Mixer; lo siguiente: el agregado, cemento y mezcla expansiva fueron mezcladas durante 30s, luego, se agregó agua y superplastificante y se mezclaron durante otros 120 s.

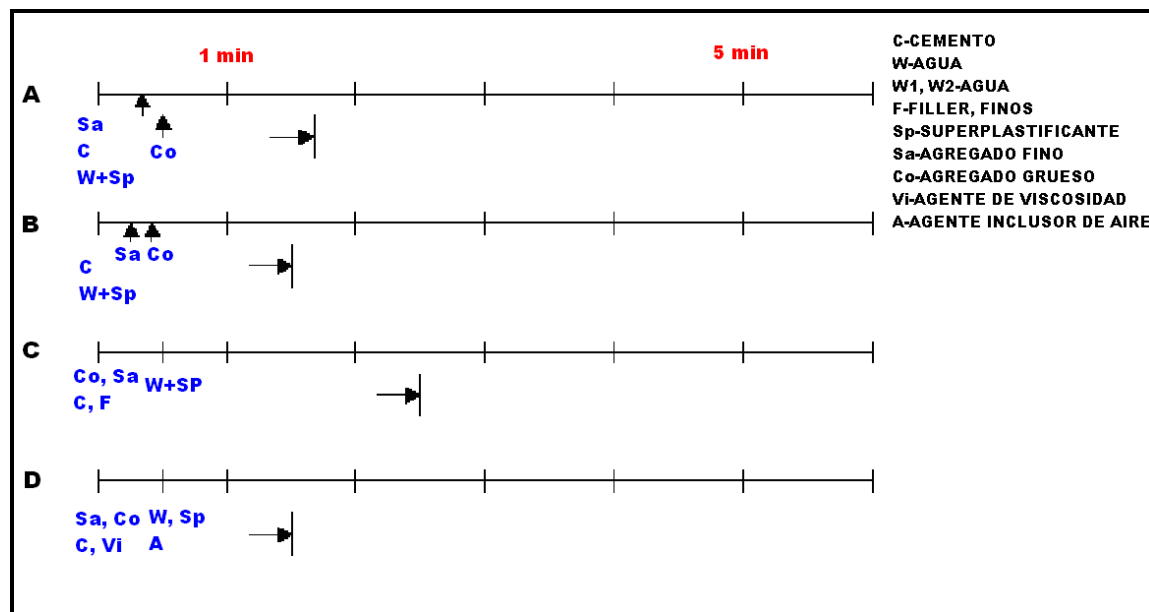
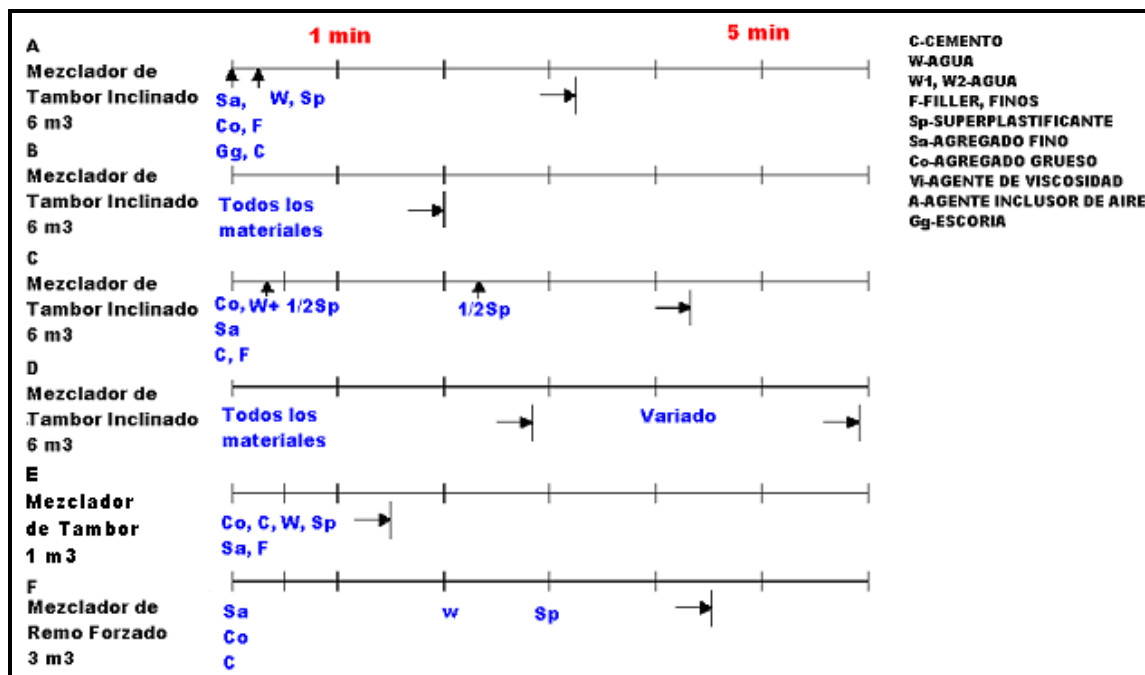


Figura tomada de: Self compacting concrete. Task 8.1 Mixing and transport.

FIGURA 48: Ejemplos de sucesiones de mezcla para las condiciones de escala completa, Petersson (1998).

3. Pruebas a Escala Completa

De acuerdo a las investigaciones en la escala completa dentro del proyecto, las sucesiones en los tiempos y el orden de mezclado han sido muy variadas, (véase la Figura 49). Las variaciones dependen principalmente de la fluidez requerida en el concreto y el tipo de mezclador. En la mayoría de los casos, casi todo ha sido directamente colocado en el mezclador, probablemente para facilitar el mezclado. Los tiempos de mezclado son cortos comparados a las condiciones de laboratorio. Dentro del proyecto se ha probado también agregar partes del superplastificante después de un tiempo, para lograr una mejor homogenización temprana del material más duro. Sin embargo, este método lleva a una tensión más grande en el equipo de mezclado que puede ser un problema para algunas plantas concreteras.



FUENTE: Self compacting concrete. Task 8.1 Mixing and transport.

FIGURA 49: Ejemplos de sucesiones de mezcla informadas dentro de los proyectos. A-Universidad de Paisley, B- Norrköping, C-Startboxen, D-Millennium y Frösundaport, E-Bretonneau, F-Bunol.

3.6.4 TRANSPORTE

Es esencial que las propiedades del CAC, se adapten para el tipo de transporte disponible y la longitud requerida. Así, los parámetros siguientes deben ser considerados con anticipación:

- El cambio de consistencia.
- Segregación.
- Pérdida del contenido de aire.
- Cambios de temperatura.

Las experiencias referentes al transporte, se resumen en observaciones experimentales realizadas en diversos lugares.

Por ejemplo, considerando posibles cambios en las propiedades del CAC durante el transporte, Billberg et. al., (1999) ^[48], a través de estudios informa de un ligero aumento en el flujo de asentamiento durante el transporte (véase la Figura 50), esta tendencia ha sido explicada haciendo alusión a un mezclado insuficiente del superplastificante en el concreto. Otra explicación puede ser que existan ligeras variaciones en las técnicas utilizadas por las personas y en las condiciones de los equipos (uniformidad y humedad en la superficie, etc).

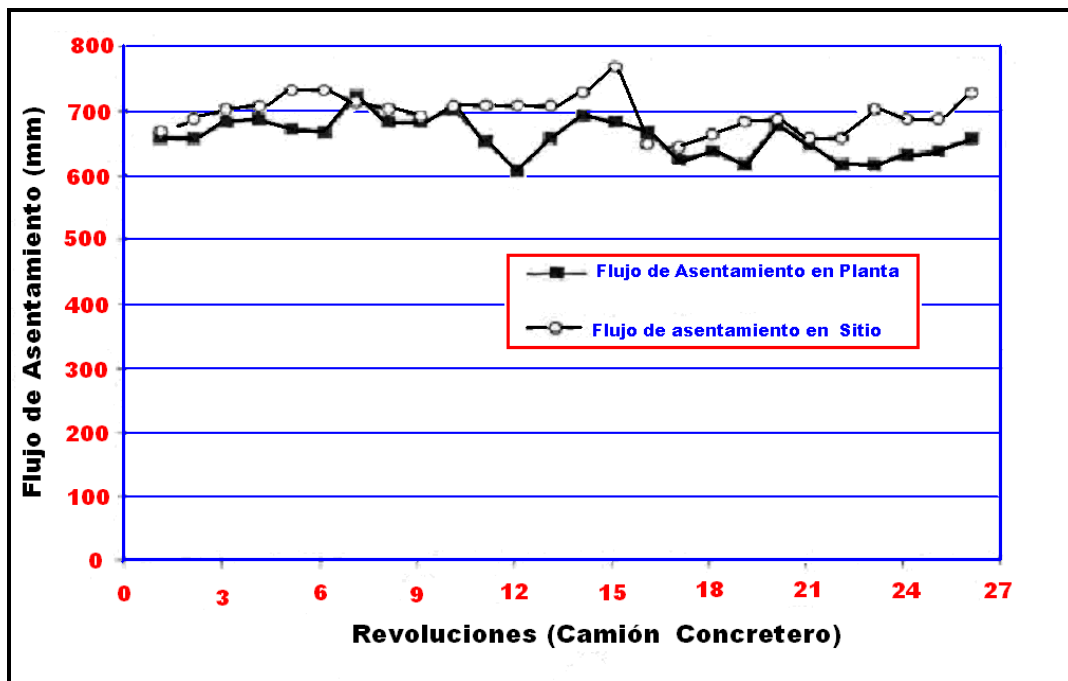


Figura tomada de: Self compacting concrete. Task 8.1 Mixing and transport.

FIGURA 50: Valores de flujo de revenimiento en planta y en sitio, producción a escala completa, Gävle Suecia, Billberg, et. al. (1999).

Tendencias similares son informadas por Chikamatsu et. al. (1999) ^[51] adjudicando este aumento de depresión en las mezclas, a que se diseñan para sostener su efecto dispersor. Para prevenir esto se experimento con otra marca de superplastificante formulado para reducir la proporción de absorción del componente dispersante por el fino. De esta manera, los cambios en el flujo de revenimiento durante el transporte se controlaron dentro de 5 cm, siendo los principales factores influyentes el tiempo de transporte y la condición de temperatura.

En general, para las longitudes normales de transporte (menos de aproximadamente 1 hora) no se ha observado que haya ningún problema relacionado al CAC. Sin embargo, para evitar la segregación, se recomienda que el rodar del tambor durante el transporte

sea incesante. Este número de revoluciones/minutos en el transporte, varía con respecto al tipo de camión.

La influencia del aire y la temperatura del concreto durante el transporte parece ser igual que para el concreto convencional que necesita vibración.

Los ejemplos del flujo de revenimiento al envío y llegada al sitio se encuentran en las Figuras 49 y 50. Mientras los valores de flujo de asentamiento disminuyen durante el transporte en la Figura 51, no cambia para las condiciones de la Figura 52. El concreto de la Figura 52, no se dosificó con relleno de caliza (si no con un tipo de relleno natural) lo cual podría ser una explicación de la ausencia de pérdidas de flujo de asentamiento. En otros sitios se ha observado que el concreto bastante duro (valores grandes de T50) parece ser más sensible a las pérdidas en el revenimiento, especialmente con altas temperaturas (durante verano).

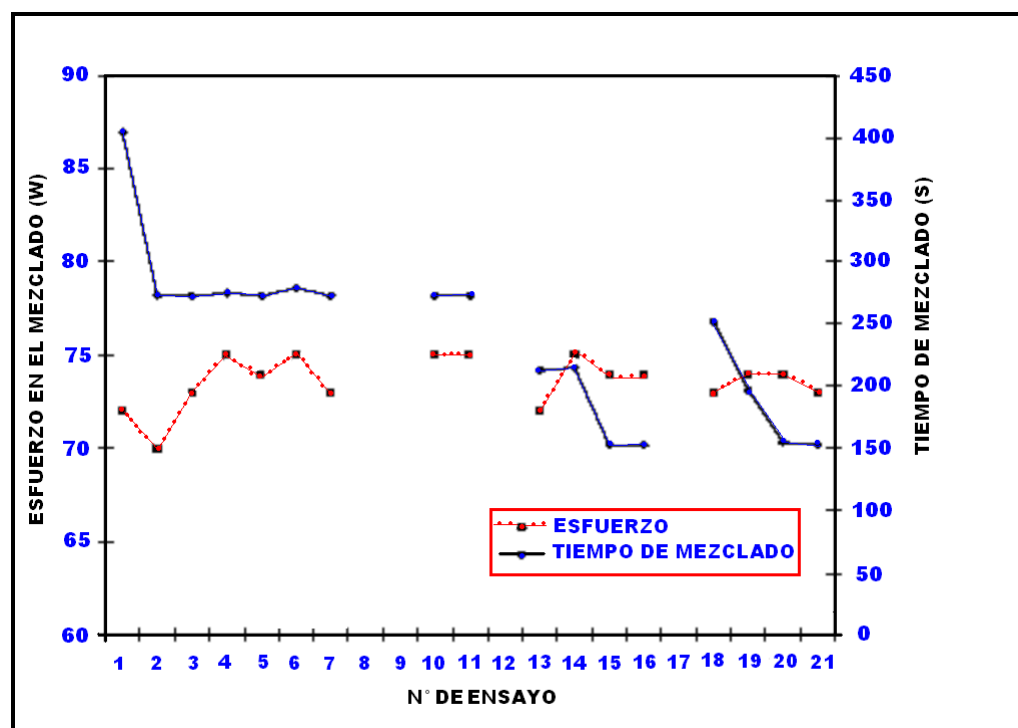


Figura tomada de: Self compacting concrete. Task 8.1 Mixing and transport.

FIGURA 51: Ejemplo de pérdida de flujo de revenimiento.

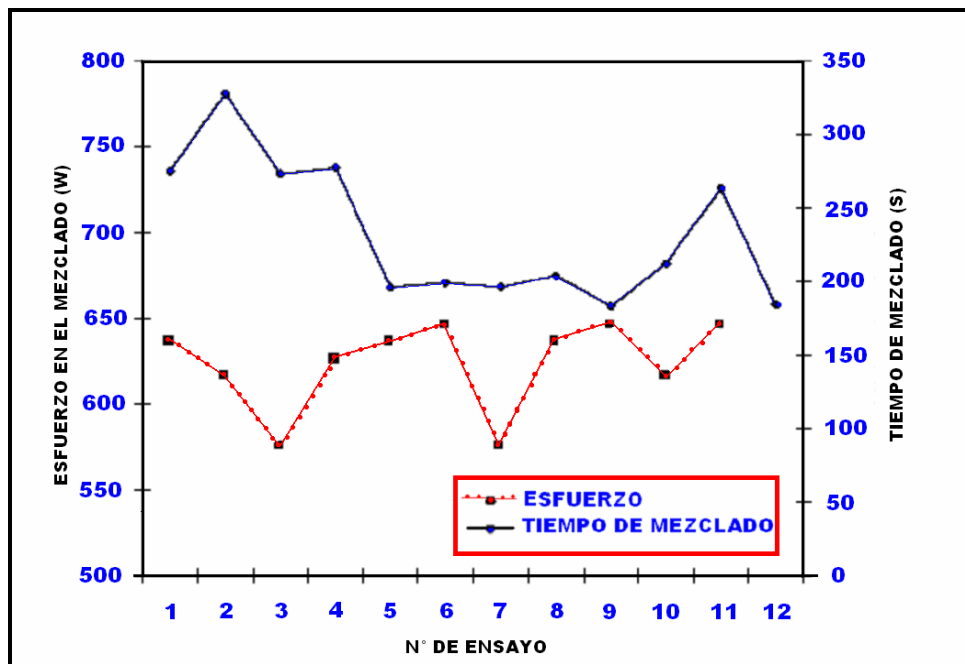


Figura tomada de: Self compacting concrete. Task 8.1 Mixing and transport.

FIGURA 52: Ejemplo de perdida del flujo de revenimiento entre la planta y el sitio.

En un reciente trabajo de Johansson y Simonsson (2000) [52] sobre pruebas a escala completa, se concluyó que el efecto del transporte, modifica en aproximadamente 72 % las características del CAC, la investigación revela pérdidas de flujo de revenimiento en 4 cm aproximadamente y aumento en el contenido de aire de un 0.8%. El tiempo medio de transporte fue de ½ h, y no se registró influencia directa entre el tiempo de transporte (de 17 min a 43 min).

Llegada al Sitio

Para que al llegar al sitio, se conserve un material homogéneo y exista un óptimo mezclado de aditivos, se ha considerado que los mejores resultados son obtenidos con un rodar a toda velocidad por lo menos de tres minutos en el tambor. Este número de revoluciones varía fuertemente con el tipo de camión y no puede ser especificado. Para

los camiones modernos, el número puede ser de 10 rev/min - 20 rev/min, aproximadamente.

Fue descubierto que en algunas ocasiones, cuando el concreto es demasiado duro la fluidez se ajusta a través de superplastificantes que son agregados directamente en el camión. No se recomienda agregar agua en el transporte en camión por ser un método bastante incierto. La segregación puede ocurrir fácilmente si la mezcla no es buena y si el volumen de agua crítico no es conocido.

En caso de un concreto demasiado fluido (no segregado) es posible permitir al camión algún tiempo con el tambor rodando. En varias ocasiones un concreto más rígido ha sido aceptado.

Entrega en el Sitio

Para las situaciones normales de entrega (duración normal de envío, temperatura, etc), no existen mayores problemas.

En el caso de una entrega sumamente larga, en especial de volúmenes pequeños, debe prestarse atención para verificar continuamente las propiedades del concreto, para evitar en la estructura (paredes espesas con refuerzo muy denso), colmenas, fluctuación del color y una directa segregación.

Para las entregas prolongadas se recomendó ciertos intervalos, para detener la descarga y durante algunos minutos mezclar el concreto con un rodado rápido. Para entregas largas extremas de concreto, el ingeniero en sitio debe ser consciente de que el tiempo de la puesta del concreto tiene que ser alcanzado antes que las reacciones químicas hallan empezado. Esto se descubre por pérdida rápida de consistencia, un fenómeno bien conocido también para los tipos normales de concreto.

3.6.5 BOMBEO

Considerando que la presión de la bomba no debe afectar las propiedades del concreto este debe resistir sin mostrar ningún tipo de cambios en la trabajabilidad, la cantidad de aire y/o en la pérdida total de volumen de aire.

El bombeo inadecuado se descubre a menudo cuando la presión de la bomba es tan grande que puede exceder un límite aceptable. En términos generales se considera una buena presión de bombeo si esta se encuentra entre 2 MPa - 2.5 MPa.

El bombeo debe ser posible para distancias largas (varios cientos de metros) y para grandes alturas.

Una trabajabilidad alta y moderado contenido de agregado grueso en el volumen de CAC tiene un efecto positivo mitigando la presión de la bomba. Sin embargo, una cantidad grande de finos puede llevar a aumentar la presión de la bomba.

Aunque el CAC, comparado al concreto convencional, tiene una excelente fluidez y capacidad de llenado, la presión de la bomba podría ser negativa debido a la gran cantidad de finos y a la viscosidad relativamente alta.

A continuación se mencionan algunas experiencias del comportamiento del CAC, utilizando el bombeo como técnica de colocación.

Matabee et. al. (1999) ^[49] examinó el bombeo en pruebas a escala completa en una cañería de 410 m de largo y diámetro de 12.5 cm. La presión de la bomba estaba modificada en diferentes situaciones a lo largo de la tubería de descarga para CAC (flujo de asentamiento 65 cm, aire 4 %, cemento 260 kg, agua 160 l) y comparó con un tipo de concreto convencional (revenimiento 12 cm), (véase la Figura 53), se observa que la presión de la bomba para estas circunstancias fue 1.3 kgf/cm² - 1.4 kgf/cm² más alto para el CAC . Esto indica que la fuerza de fricción contra la cañería así como la fricción interna, es más alta para el CAC que consume la presión inicial de la bomba. Sin

embargo, estas tendencias se relacionan a la viscosidad del concreto el cual es un parámetro sin antecedentes, en este experimento.

Kitamura et. al. (1998) [53] en la construcción de un tanque de almacenamiento donde el colado se realizó a través de bombeo, informó que la altura de colado fue mayor de 40 m y el concreto se distribuyó a seis cañerías separadas a lo largo de la pared. Las medidas de presión de la bomba se llevaron a cabo y fue documentado que la presión cerca de la bomba afectaba las propiedades del concreto. Así, la viscosidad bajaba con relación directa a la presión en la cañería.

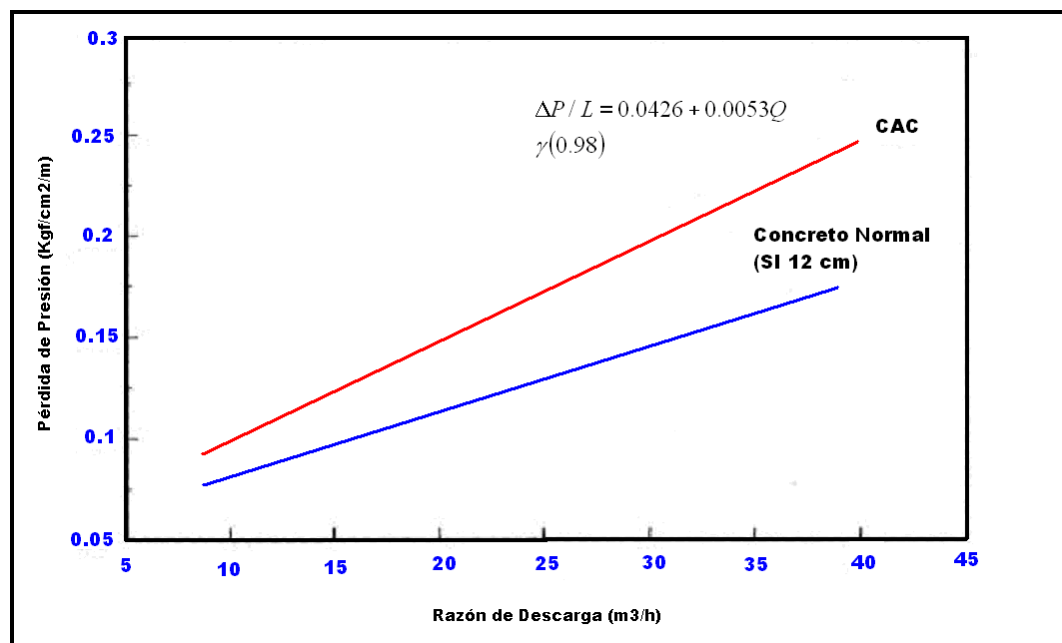


Figura tomada de: Self compacting concrete. Task 8.1 Mixing and transport.

FIGURA 53: Relación entre la pérdida de presión y la proporción de descarga en la cañería de 410 m de largo y 12.5 cm de diámetro, Matabee et. al.

En Suecia se han usado varios modelos de bombas de tipos normales para las pruebas, Billberg (1999), las variaciones en los resultados del bombeo que han tenido lugar se adjudican a factores como: tipo de concreto, tipo de estructura que se pretende colar,

longitud de la bomba, altura de la bomba, temperatura del concreto, etc; y ningún problema extraordinario se ha informado usando CAC .

Según Izumi e Inoue (1998) ^[54], el valor de flujo de revenimiento y el contenido de aire de CAC, puede ser que decrezca después del bombeo al compararlo con los valores iniciales. Sin embargo, los autores concluyen que si la variación es representativa la influencia en la dosificación del concreto, adquiere mayor importancia.

Pruebas a escala completa

Algunos colados de CAC, utilizando la técnica del bombeo en la ingeniería civil que han sido informados son por ejemplo: la viga de la cima del túnel de Öresund. Con una longitud de cañería de 100 m, el concreto se bombeó y se coló a través de 7 puntos de inyección.

Otro ejemplo de concreto bombeado es la reparación de una presa de agua, bajo una carretera en Lyon. Se bombeó concreto largas distancias para formar una nueva superficie delgada dentro de la vieja tubería de agua.

El bombeo se ha llevado a cabo sin mayores problemas comparado a las condiciones para los tipos normales de concreto. Sin embargo, puede ser concluido un importante requisito previo a la realización de un bombeo y es que el bombeado se realice continuamente. Sin embargo, si hay una parada de entrega, parece que el riesgo de atascar la bomba aumenta debido a la ocurrencia de segregación.

3.7 PUESTA EN OBRA DE CAC

Antes de iniciar la puesta en obra del CAC, es preciso confirmar que la armadura y el encofrado se hallen dispuestos según el modo planificado. El CAC no requiere de instalaciones especiales en la obra. Se aplican los mismos encofrados, equipos de transporte y alturas de vaciado (véase la Figura 54). Debe tenerse en cuenta que por su alta fluidez las uniones de los moldes deben estar adecuadamente selladas. La presión

sobre los moldes es un poco mayor que el concreto convencional pero no supera la que se ejerce cuando se aplica concreto bombeado.



Figura tomada de: A Very Close Precursor of Self-Compacting Concrete (SCC).

FIGURA 54: Colocación de CAC, a través de canaletas.

El llenado del encofrado se realiza por simple gravedad, para cualquier forma, dimensiones o densidad de armaduras. El CAC escurre fácilmente varios metros y llena completamente los moldes (véase la Figura 55).



Figura tomada de: Revista Bit. Departamento Técnico-Sika S.A. Chile.

Figura 55: Vaciado de CAC directo mediante canastilla.

La presión sobre el encofrado varía según la velocidad con que aumenta la altura del concreto dentro del encofrado. Sin embargo, en muchos casos, la altura del concreto sube rápidamente y por razones de seguridad es conveniente considerar el concreto como un líquido para calcular la presión lateral sobre el encofrado.

En el caso de encofrados con una altura superior a los 3 metros, es necesario tomar en consideración la presión hidrostática completa. Debido a esto es posible que se requiera la modificación del diseño y/o del encofrado para la colocación de CAC, (véase la Figura 56).

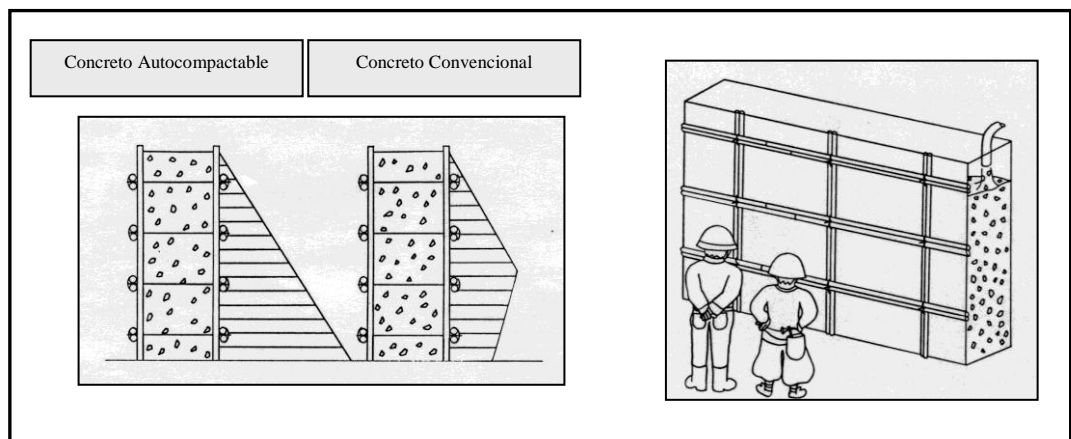


Figura tomada de: Kochi University of Technology Japan. Development of Self-Compacting Concrete.

FIGURA 56: Comparación del encofrado para concreto convencional vrs. CAC.

LA PRUEBA DE ACEPTACIÓN EN SITIO

Desde que el grado de compactación en una estructura depende principalmente de la autocompactabilidad del concreto, y esta propiedad no puede ser compensada por obras alternativas en una construcción, deberá ser verificada por completo justo antes de colar el concreto en el sitio de trabajo. Sin embargo los métodos de prueba tradicionalmente utilizados para medir la autocompactabilidad requieren varios muestreos y esto puede ser extremadamente laborioso si la autocompactabilidad y las pruebas de aceptación de las mismas son llevadas a cabo para el cargamento total de concreto. Ouchi et. al. (1999) ^[42], ha desarrollado un método para la aceptación de la autocompactabilidad del lote completo de concreto. Los aparatos de prueba son instalados entre el camión agitador y la bomba en el sitio de trabajo (véase la Figura 57). Si el concreto fluye a través del aparato es considerado como autocompactable para la estructura. Si el concreto es detenido, este mismo será considerado como poseedor de un grado insuficiente de autocompactabilidad y significa que la proporción de la mezcla deberá ser ajustada.



Figura tomada de: Kochi University of Technology Japan. Development of Self-Compacting Concrete.

FIGURA 57: Método de ensayo para el total de concreto.

Este aparato fue exitosamente utilizado en los sitios de construcción de la constructora Japonesa Osaka Gas LNG y ha sido registrada y considerada como una prueba de campo lo suficientemente segura (Kitamura 1999) [42].

El CAC se puede diseñar de manera que tenga un comportamiento tixotrópico. Esta propiedad se puede utilizar para desarrollar un procedimiento de colocación que disminuya la presión del molde, incluso si se incrementa la velocidad de colocación.

Cuando el concreto fluye hacia el fondo simultáneamente por ambos lados de una cavidad, puede formarse un espacio de aire sin concreto. Así, el concreteado debe realizarse sólo desde un extremo, dejando que el concreto escurra y llene el espacio.

DISTANCIAS DE EJECUCIÓN

La distancia horizontal a la que puede llegar el CAC difiere según las formas y dimensiones de la estructura, por lo tanto, es fundamental tomar las medidas necesarias para evitar que el concreto escurra más allá de lo deseado. En todo caso, el

CAC forma una determinada pendiente que limitará el escurrimiento horizontal en función de la altura que alcance en el punto de vaciado.

Por otra parte, las alturas de vaciado pueden superar las alturas tradicionales al hacer un correcto diseño. Se ha llegado a colar desde 12 m de altura sin problemas de segregación. Sin embargo, si hay requisitos estéticos para la calidad de la superficie, se recomienda vaciar el concreto a través de tubos o inyectarlo mediante bombeo desde la parte inferior del encofrado.

Aunque es más fácil colocar el CAC que el concreto convencional, se aconseja seguir las reglas siguientes para minimizar el riesgo de segregación:

- limitar la distancia de caída libre vertical a 5 m.
- limitar la distancia permisible de flujo horizontal desde el punto de descarga a 10 m.

JUNTAS FRÍAS

La fluidez a través del tiempo depende de las condiciones ambientales, la dosificación y el aditivo empleado, por lo tanto, se debe conocer y manejar este tiempo y adaptar el proceso de colocación.

En el caso de juntas, es conveniente que la capa siguiente sea colocada lo antes posible sobre la precedente a manera de evitar juntas frías o cambio de color.

Aunque el CAC se adhiere bien con el concreto colocado previamente, la probabilidad de daños resultantes de una junta fría no puede mitigarse mediante vibración, como sucede con el concreto convencional.

ACABADO SUPERFICIAL

Las superficies de CAC han de nivelarse aproximadamente según las dimensiones especificadas y luego debe aplicarse el tratamiento de acabado en el momento adecuado antes de que se endurezca el concreto. Pueden producirse dificultades

durante el proceso convencional de endurecimiento final de la superficie en áreas horizontales que deben ser acabadas. Puede que sea preciso emplear un procedimiento alternativo o bien herramientas distintas.

CURADO

El curado tiene que realizarse de igual forma que en el concreto convencional y debe ser especialmente cuidadoso en el caso de superficies muy expuestas, tales como losas. El efecto de un curado deficiente en la resistencia del CAC ha sido analizada, demostrándose que la resistencia del CAC es menos afectada que la del concreto convencional, cuando el curado es inapropiado. Esto se atribuye a una mejor capacidad de retención de agua.

El CAC tiende a endurecerse más rápido que el concreto convencional porque hay muy poca o ninguna agua de sangrado en la superficie. Por consiguiente, el curado debe iniciarse en cuanto sea posible después de la colocación con objeto de minimizar el riesgo de fisuras por retracción.

3.8 CONCRETO AUTOCOMPACTABLE EN ESTADO ENDURECIDO

Cuando todas las propiedades del concreto en estado fresco han cubierto las especificaciones indicadas, el siguiente punto más relevante es definir el comportamiento del concreto en estado endurecido. Las investigaciones confirman que no hay cambios significativos en el fraguado y endurecimiento de la mezcla. A pesar de esto, es necesario conocer su comportamiento con respecto a los parámetros del concreto convencional que necesita vibrado, con el objeto de desarrollar antecedentes en el uso de este material.

La calidad del concreto está frecuentemente relacionada con su resistencia, la cual depende entre otros factores del grado de compactación obtenido. De tal forma que si el concreto presenta valores favorables de resistencia es posible concluir que posee un adecuado grado de compactación.

La experiencia que se ha obtenido hasta el momento en la comparación del concreto convencional con el CAC, bajo los mismos parámetros de fluidez, es que las propiedades de resistencia y permeabilidad parecen mejorar para el CAC sobre el concreto convencional. Esta teoría ha sido experimentada a través de los ensayos de materiales realizados en estructuras de ingeniería civil, (Billberg et. al. 1990).^[48] Las mezclas fueron diseñadas con una relación agua/finos de 0.40. Las resistencias medidas fueron superiores a las del concreto convencional, y la impermeabilidad fue comparable a la de un concreto convencional para puentes, pero con una relación inferior de agua/cemento. La hipótesis que explica este efecto en el concreto, es que la microestructura del CAC es más densa, especialmente en las zonas de transición entre los agregados gruesos y la pasta. Esto se ha verificado mediante el análisis del ensayo de cortes finos realizados a las muestras, (Tragardh et. al., 1999).^[55]

Otra propiedad que ha podido ser verificada, a través de la experiencia obtenida en proyectos, es la porosidad, donde el CAC tanto de moderada como de alta resistencia, reporta mejores superficies e incluso más homogéneas de color que lo común para el concreto convencional. La superficie lisa fue muy evidente en las pruebas pertenecientes al concreto bombeado, desde la parte inferior del encofrado a través de válvulas.

En términos generales el análisis del CAC en estado endurecido servirá para establecer una tendencia de su comportamiento, sometido a la expectativa de obtener un mejor resultado que el concreto convencional; debido principalmente a las características de los materiales constitutivos, diseño de mezcla y autocompactabilidad.

3.8.1 PROPIEDADES DEL CONCRETO AUTOCOMPACTABLE EN ESTADO ENDURECIDO

3.8.1.1 RESISTENCIA MECÁNICA

El comportamiento del CAC en estado fresco, requiere mayor atención para obtener las especificaciones requeridas, y una vez dosificado, mezclado, colocado y curado, debe procederse a una verificación del material terminado a través de la aplicación de los

procedimientos de ensayo tradicionales para el concreto convencional que requiere vibrado, donde el parámetro más utilizado es la evaluación de la resistencia mecánica.

A lo largo de las investigaciones, el ensayo de resistencia a la compresión se ha realizado para diferentes combinaciones de materiales constitutivos, con el objeto de establecer la influencia de estos en el comportamiento del CAC. Por ejemplo a través del estudio para prefabricados ROTONDO en Fredericksburk, Vancouver, se compararon los resultados de mezclas con cemento tipo III vs Cemento y puzolanas, evaluando el desarrollo de la resistencia para tres diferentes mezclas (véase la Figura 58). Como se esperaba, la resistencia temprana del cemento puro fue ligeramente mayor comparada con las mezclas con puzolana. Es decir que la presencia de las puzolanas en la mezcla retarda ligeramente la obtención de la resistencia a edades tempranas pero no influye en la resistencia esperada de diseño (Ramsburg, 2002).^[56]

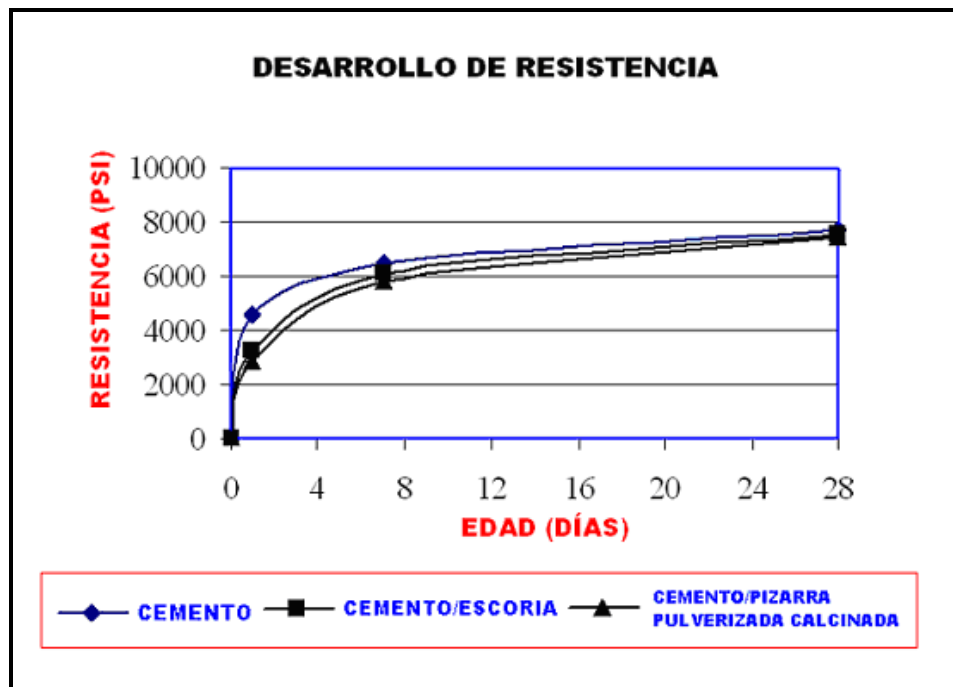


Figura tomada de: Durability Of Self Consolidating Concrete In Precast Applications.

FIGURA 58: Desarrollo de la resistencia en las mezclas.

De un estudio realizado en condiciones de planta en México y con una mezcla cuya dosificación fue agua/finos = 0.31 y grava/arena = 0.72; se realizaron estudios en el concreto en estado endurecido para verificar la eficiencia del cemento en la mezcla de concreto; obteniendo los resultados de la Figura 59. En esta gráfica se observa que entre el concreto convencional y el CAC existe una diferencia atribuible a la modificación en el diseño de la mezcla (Rodríguez J. Arturo 2002). [27]

En términos generales, dentro del comportamiento mecánico de la mezcla, el valor de la resistencia a compresión no representa un reto importante debido al alto contenido de finos, y altas cantidades de material cementante.

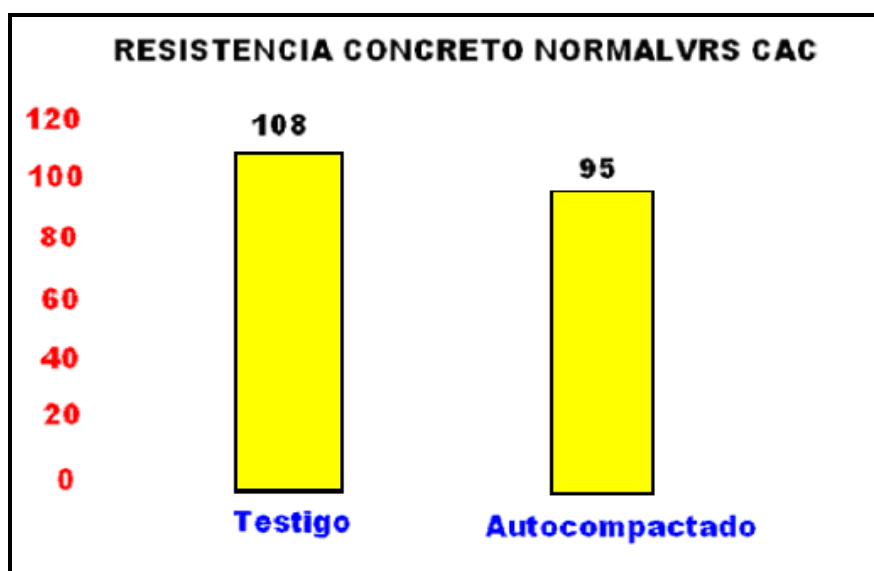


Figura tomada de: Revista Tecnología. "Concreto Autocompactable".

FIGURA 59: Eficiencia del cemento en el comportamiento del concreto convencional y el CAC.

3.8.1.2 RESISTENCIA A LA FLEXIÓN

La resistencia que se genera por adherencia entre la pasta de cemento y los agregados es más importante en el comportamiento del concreto a tensión que a compresión. Por las características constitutivas del CAC, la cantidad de cementante, representa un punto de interés en el comportamiento del concreto sometido a tensión. Además la influencia que

este tenga en la fragilidad, y presencia de microfisuras o discontinuidades, provocaría una prematura cedencia ante los esfuerzos de tensión inducidos en los ensayos de laboratorio que deben realizarse anticipadamente. Por tanto, se requiere un buen control de los aspectos como la relación agua/finos, autocompactación y el curado, para obtener un desarrollo pleno del concreto.

En la Figura 60, se analizan los resultados obtenidos en un ensayo a flexión, para una mezcla tradicional de CAC con adición de Fly Ash. Estos tipos de concreto normalmente tienen una fuerza de tensión baja debido al bajo porcentaje de hidratación del Fly Ash. Por ello, es difícil de comparar la fuerza de tensión con un concreto convencional de 28 días de edad (Ramsburg, 2002) . [56]

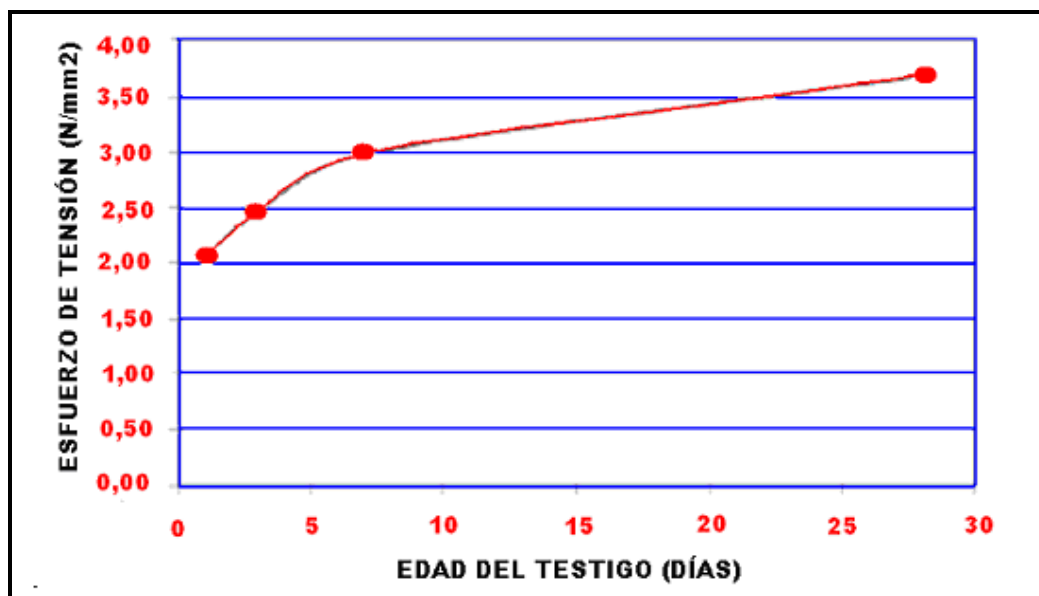


Figura tomada de: LACER. Self-Compacting Concrete (SCC) Time Development of the Material Properties and the Bond Behaviour.

FIGURA 60: Cilindros de mezclas con contenidos de Fly Ash, sometidos a fuerza de tensión.

3.8.1.3 DEFORMABILIDAD BAJO CARGA

La deformabilidad bajo carga, es un aspecto que se encuentra relacionado con las fuerzas internas del material, definiendo los cambios volumétricos en el concreto.

Por otra parte, el módulo de elasticidad representa las deformaciones que sufren los especímenes de concreto en la dirección de la carga y varía en función del estado de humedad, compactación del concreto, relación agua/cemento, edad de la pasta y las características de los agregados.

El estudio de los parámetros mecánicos para CAC realizado para un diplomado en la Universidad de Leipzig (Jianxin Ma y Jörg Dietz) ^[57], utilizó especímenes cúbicos (lado = 150 mm) curados en agua por 28 días. En la Tabla 17, se muestra la fuerza de compresión y los módulos de elasticidad pertenecientes al promedio de 3 especímenes.

TABLA 17: Módulo de elasticidad, de cubos con 28 días de edad.

		Cubo 1	Cubo 2	Cubo 3	Promedio
RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN (CUBO)	(N/mm ²)	56.17	55.25	54.81	55.41
MÓDULO DE ELASTICIDAD	(N/mm ²)	29190	29754	31217	30100

FUENTE: LACER. Self-Compacting Concrete (SCC) Time Development of the Material Properties and the Bond Behaviour.

En la Figura 61, se muestra el desempeño del valor de la constante K para el módulo de elasticidad. En esta prueba se evaluó el comportamiento del concreto convencional y CAC, producidos en una planta concretera, con el propósito de verificar las variaciones producidas en el concreto por el cambio en la relación grava/arena y/o agua/cemento.

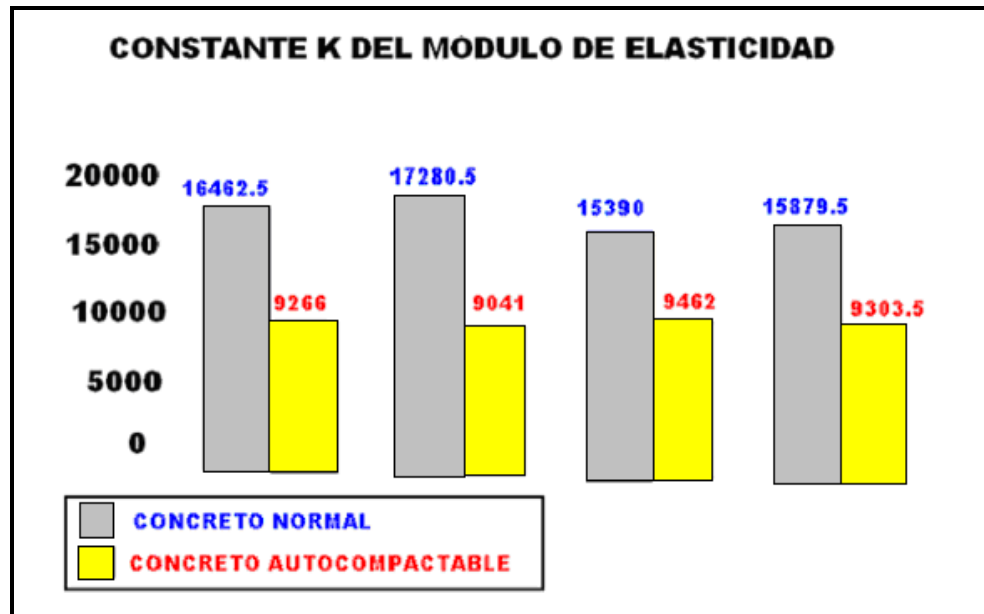


Figura tomada de: Revista Tecnología. "Concreto Autocompactable".

FIGURA 61: Módulo de elasticidad para un concreto convencional y un CAC.

En el gráfico, el comportamiento del módulo de elasticidad para el CAC, indica una disminución en el nivel alcanzado. Sin embargo, es suficiente para poder garantizar su correcto comportamiento, tanto en concreto convencional como estructural (DDE, Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto 1996). [58]

PERMEABILIDAD

La permeabilidad del concreto influye grandemente en la durabilidad de las estructuras. Los elementos constituyentes y la relación agua/finos, deben ser correctamente manipulados para obtener la permeabilidad necesaria y con esto hacer las estructuras más duraderas.

La permeabilidad depende de la homogeneidad y compacidad de la masa de concreto, es por ello que los procedimientos empleados desde el diseño de la mezcla hasta la puesta en obra deben garantizar la autocompactabilidad.

La ASTM C 1202, “Métodos de prueba estándar para las cargas eléctricas en la medición de la habilidad del concreto para resistir la penetración del ion cloruro”, es considerada como un indicador de la penetración del ion cloruro dentro del concreto. El resultado de la Figura 62, muestra que la escoria al igual que la pizarra calcinada ayudan a reducir la carga eléctrica que pasa a través del concreto.

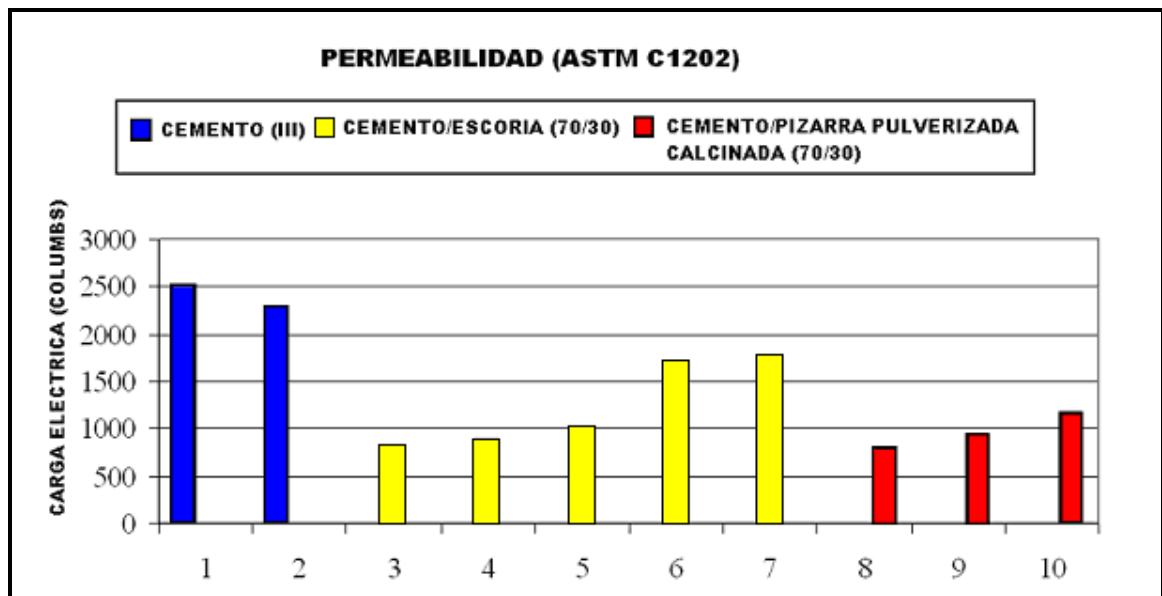


Figura tomada de: Durability Of Self Consolidating Concrete In Precast Applications.

FIGURA 62: Carga eléctrica (coulombs) de muestras con proporciones de mezcla diferentes.

3.8.1.4 CONTRACCIÓN

El fenómeno de la contracción se ve influido por las condiciones ambientales, y por las características de la pasta y los agregados. La pasta a su vez, se encuentra definida por las características del cemento y la relación agua/finos.

En general, como se mencionó anteriormente, las mezclas de CAC requieren más partículas finas en orden de tener mejor fluidez y prevenir la segregación y el sangrado. Un concreto convencional puede necesitar alrededor del 38% de partículas finas, mientras que el CAC necesita cerca de un 46 %. Esta cantidad adicional de partículas

puede ser lograda sustituyendo el cemento en peso con puzolanas, ceniza volante, escoria o pizarra pulverizada calcinada (PCS), desde el momento en que la gravedad específica de esos materiales es menor que la del cemento.

En la tecnología del concreto convencional, uno de los factores por los cuales el uso de finos en las mezclas de concreto estructural está altamente contraindicado es la contracción por secado, que éstos pueden provocar en el concreto al generar mayor demanda de agua y/o aditivos.

En el mismo estudio realizado por la Universidad de Leipzig (Jianxin Ma y Jörg Dietz) ^[57], las contracciones fueron medidas con cinco diferentes mezclas M1, M2, M3, M4 y M5. El cambio en la longitud de los especímenes de concreto fue medida cada 15 min. La deformación total de todas las mezclas es mostrada en la Figura 63. Después del período durmiente en las primeras 24 horas, por efecto del superplastificante, los concretos empezaron a contraerse. Esta contracción fue el resumen de dos deformaciones contrarias: la contracción química causada por la hidratación del cemento y la expansión térmica causada por el incremento de temperatura en el concreto. A unas pocas horas posteriores, la expansión térmica fue dominante, lo cual resulta en una leve expansión. Posteriormente la temperatura del concreto disminuyó, dando lugar a la contracción química.

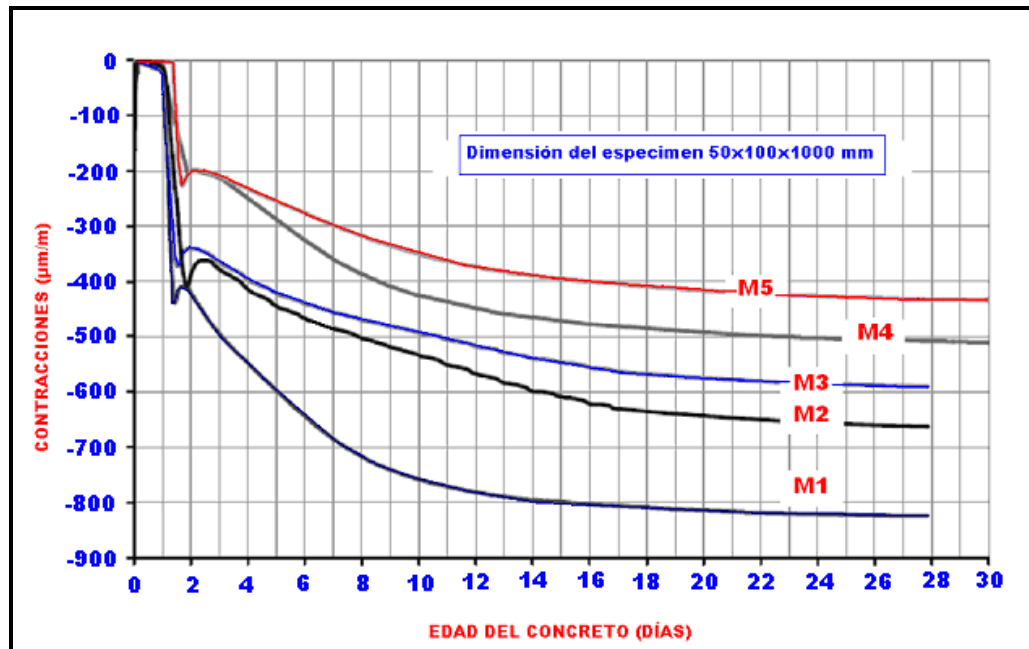


Figura tomada de: LACER. Ultra High Performance Self Compacting Concrete.

FIGURA 63: Evolución de las contracciones en el concreto.

Las influencias del agua para las relaciones de sellado y el contenido de sílice en una contracción, tuvieron la misma tendencia que en un concreto convencional de alta resistencia. Es notable que la gran parte de las diferencias en la contracción, entre estos tipos de concreto ocurriera en los primeros 14 días posteriores al colado. Después de todo, los concretos mostraron un desarrollo similar en términos de su contracción.

Los resultados de las contracciones de diferentes proporciones de mezcla en el estudio para prefabricados ROTONDO en Fredericksburk, Vancouver, se muestran en la Figura 64. Las muestras de cemento íntegro obtuvieron los mayores valores de contracción, y las mezclas con escoria y pizarra calcinada mostraron una menor contracción en las pruebas a los 28 días.

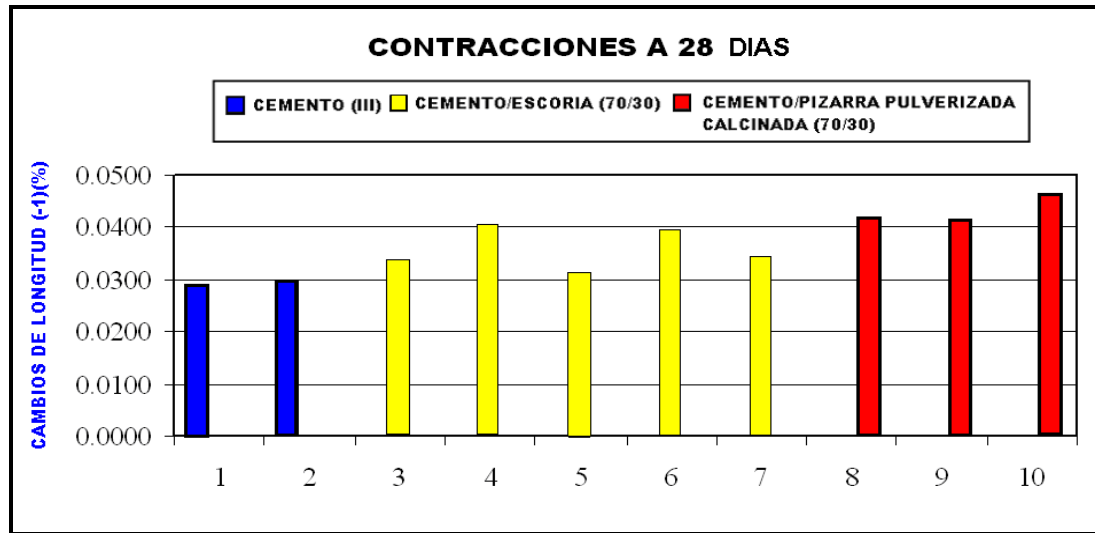


Figura tomada de: Durability Of Self Consolidating Concrete In Precast Applications.

FIGURA 64: Contracción de muestras con diferentes proporciones de mezcla.

3.8.1.5 RESISTENCIA GRADUAL (ASTM C 672)

La prueba de resistencia gradual fue conducida y requerida por la Administración de vías rápidas del estado de Maryland, en el estudio realizado para prefabricados ROTONDO. Las muestras fueron evaluadas a 20 h y 24 h, después de coladas y curadas, además se le dio un curado adicional de 14 días. Una solución de Dicing fue utilizada en 4 g de cloruro de calcio anhidro, diluido en 100 ml de agua. Aproximadamente de ¼" a ½ " de solución fue mantenida por encima de la superficie del concreto. Los resultados de las mezclas conteniendo escoria y PCS, son mostradas en la Tabla 18, sin ninguna indicación de escalamiento en las muestras.

TABLA 18: Resistencia gradual de las mezclas con escoria y PCS.

Ciclos	Tiempo(días)	Cemento/Escoria	Cemento/PCS
0	0	0	0
5	7	0	0
10	14	0	0
15	21	0	0
25	35	0	0
50	70	0	0

Nota: Valor 0 = No escalamiento, Valor 5 = Escalamiento Severo

FUENTE: Durability Of Self Consolidating Concrete In Precast Applications.

3.8.1.6 VACÍOS DE AIRE EN EL CONCRETO ENDURECIDO

El contenido de aire es un parámetro importante para alcanzar un concreto durable bajo condiciones de hielo y deshielo. Un buen sistema de vacíos deberá permitir la entrada del aire y los factores de espaciamiento deben ser medidos sobre la norma ASTM C 457. El concreto se corta en capas, luego es pulido para obtener una superficie más fina y ser observada bajo las condiciones del microscopio.

Los resultados para las mezclas con PCS fueron presentados en la Tabla 19. El contenido de aire en un concreto endurecido fue un poco menor que en la muestra de comparación de concreto fresco. El área de superficie específica para la muestra A se mostró con límites ligeramente mayores, mientras que la muestra B estuvo en el límite. La frecuencia de vacíos fue ligeramente mayor de 8 como se recomienda.

TABLA 19: Propiedades del concreto endurecido utilizando PCS.

	A	B	Valores Recomendados
Contenido de Aire,%	4.18	6.37	
Área de superficie específica, in ² /in ³	1,151	892	600-1100
Factor de Espaciamiento, in.	0.0050	0.0053	0.004 - 0.008
Contenido de Vacíos	12.03	14.22	>8
Contenido de Pasta de Cemento, %	33.54	33.30	
Pasta-Contenido de Vacíos	8.03	5.22	
Longitud Transversal, in	95.7	98.1	
Área Transversal, in ²	19.4	19.6	
Número de Paradas	1,914	1,961	
Tamaño Maximo de Agregado, in	3/4	3/4	

FUENTE: Durability Of Self Consolidating Concrete In Precast Applications.

3.8.1.7 FACTOR DE DURABILIDAD DE HIELO - DESHIELO

Una prueba de hielo y deshielo fue conducida para un concreto íntegro y mezclas de cemento, utilizando el procedimiento A de la ASTM C 666, "Método estándar de resistencia del concreto para el efecto de hielo y deshielo"

La prueba se dirigió durante 300 ciclos. En el estudio realizado, ambas muestras tienen 96 % de factor de durabilidad, y pérdida de peso entre (0 % y 0.8%) como se muestra en la Tabla 20. Ambas muestras tenían resistencia excelente para el efecto del hielo y deshielo debido a la combinación apropiada de superplastificante y aditivos inclusores de aire.

TABLA 20: Resistencia al efecto de hielo y deshielo en el cemento y mezclas de cemento/PCS.

MEZCLA	FACTOR DE DURABILIDAD (%)	PERDIDA DE PESO (%)
Resistencia del cemento	96	0
Cement/PCS	96	0.8
VTRC limites	60 (min)	7.0 (max)

FUENTE: Durability Of Self Consolidating Concrete In Precast Applications.

3.8.1.8 ADHERENCIA

La adherencia del concreto con el acero de refuerzo es un parámetro esencial para el diseño y correcto funcionamiento de las estructuras. Existen factores que influyen en la magnitud de la adherencia como por ejemplo el revenimiento, la compactación de las mezclas, la resistencia mecánica del concreto, etc.

El comportamiento de unión para cargas monolíticas fueron probadas (RILEM 1970) [59], a través de especímenes de CAC, sometidos a tensión, (véase la Figura 65). Donde fue posible tener una cubierta de concreto uniforme alrededor de todas las barras de refuerzo. Los especímenes tuvieron 10 cm de diámetro y 10 cm de alto. Las pruebas fueron llevadas a cabo en una máquina de prueba electromecánica con especímenes de

carga de rastreo controlada (véase la Figura 66). La fuerza aplicada por la máquina fue medida correspondientemente al desplazamiento lateral de las barras de refuerzo en el sitio donde no hay carga.

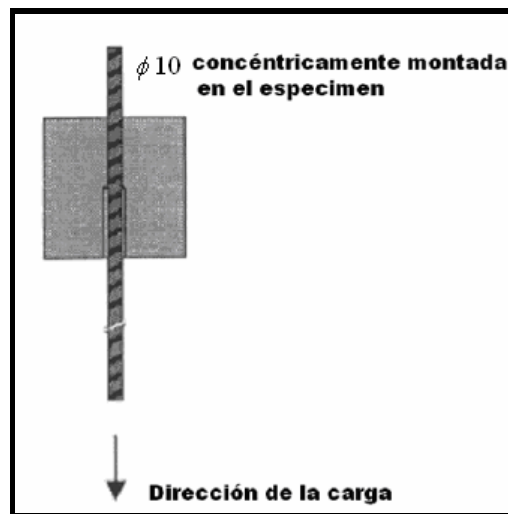


Figura tomada de: LACER. Self-Compacting Concrete (SCC) Time Development of the Material Properties and the Bond Behaviour.

FIGURA 65: Especimen de CAC, sometido al ensayo de adherencia entre el acero y el concreto.

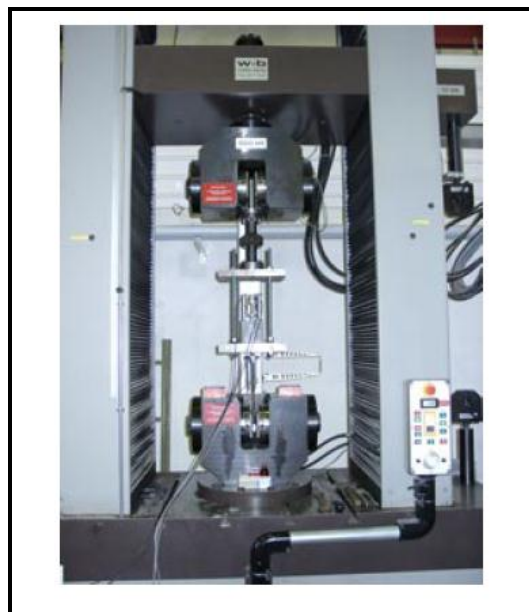


Figura tomada de: LACER. Self-Compacting Concrete (SCC) Time Development of the Material Properties and the Bond Behaviour.

FIGURA 66: Máquina de prueba electromecánica.

El comportamiento de unión fue medido a 1, 3, 7 y 28 días después del moldeo. Importante es destacar que no fueron visibles rajaduras en la cobertura del concreto. Los resultados son mostrados en la Figura 67.

El trabajo de las pruebas para un CAC, son mejores que para un concreto normalmente vibrado, debido principalmente al grado de compactación de este tipo de mezclas y a la escasez de agua de sangrado en la superficie, además de buenas resistencias mecánicas obtenidas a través de altos contenidos de cemento.

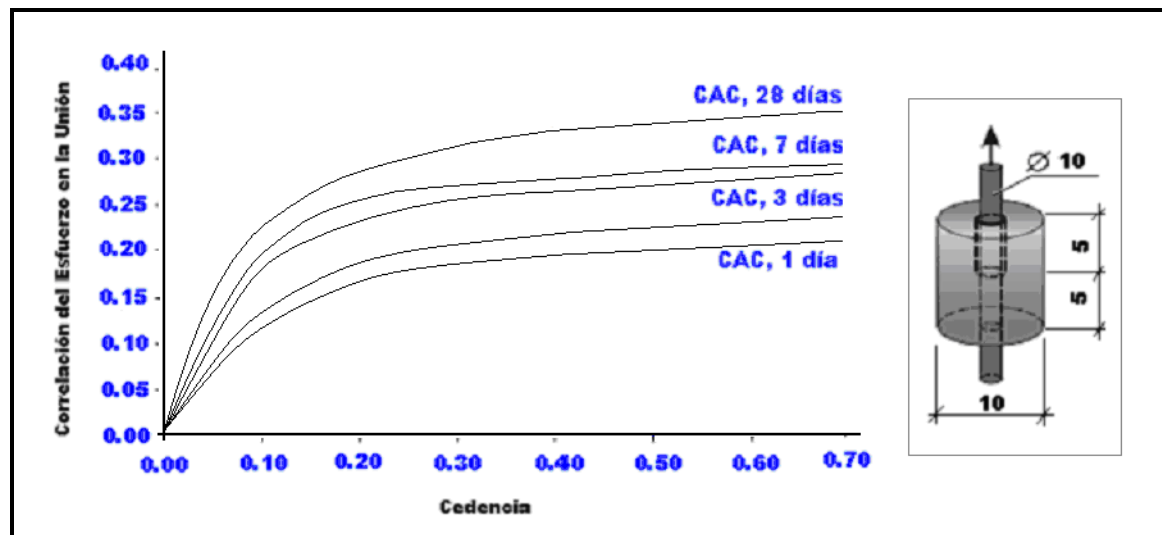


Figura tomada de: LACER. Self-Compacting Concrete (SCC) Time Development of the Material Properties and the Bond Behaviour.

FIGURA 67: Desarrollo de la adherencia del acero sometido a cargas de tensión.

3.8.1.9 UNIÓN PARA CARGAS MONOLÍTICAS

El CAC puede utilizarse para la reparación de estructuras de concreto. A través de la aplicación de varios procedimientos. Las mezclas óptimas son sensibles a pequeñas variaciones en las características de los componentes, como el tipo de cemento, el tipo y cantidad de superplastificante, el tipo de arena y adiciones. La fabricación de CAC requiere de un control de calidad más riguroso en los materiales y en la selección de la mezcla en las diferentes fases de construcción.

Hay una necesidad creciente por el acercamiento más eficaz a la evaluación y reparación de estructuras existentes. Las formas de daño mas frecuentes incluyen agrietamiento, descascaramiento, laminación, corrosión de refuerzo, y fatiga. El problema mayor para la colocación in situ del concreto es asegurar la buena calidad del concreto, apropiado grado de vibración, evitar huecos y reducir agrietamientos por contracción. El CAC es un material muy eficaz para la reparación de estructuras. Puede usarse para llenar grandes oquedades, y reparar proyectos con un acceso restringido para bombear concreto. [60]

Los ensayos para el concreto en estado endurecido revelan una fuerza de compresión muy alta. Para pruebas realizadas en Polonia fue encontrado que el más alto valor podría obtenerse por mezclas que satisfacen el criterio de autocompactación.

El aumento o disminución del flujo de revenimiento más allá de los límites aceptados puede causar una disminución de la fuerza de compresión. Esto es debido a una pobre compactación en caso de los flujos de revenimiento reducidos y segregación de los componentes para flujos de revenimiento excesivos.

Para una mezcla de CAC, se llevaron a cabo pruebas de compresión y tensión en muestras constituidas por dos capas: un concreto "viejo" a ser reparado y un "nuevo" la cubierta de CAC (véase la Figura 68). Esto simuló una aplicación de CAC como un material de la reparación.

El arreglo para pruebas de compresión y tensión se muestran en la Figura 69 y 70.



Figura tomada de: Department of Civil Engineering, Technical University of Szczecin, Poland.

FIGURA 68: Prueba de dos capas.

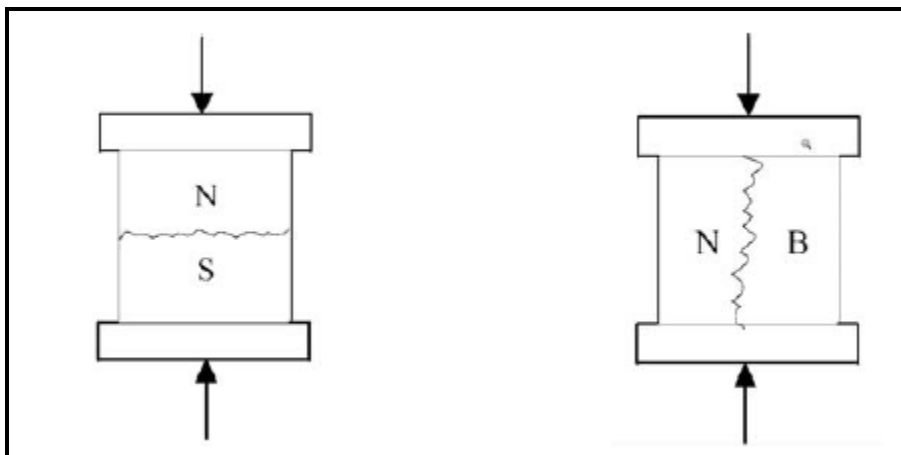


Figura tomada de: Department of Civil Engineering, Technical University of Szczecin, Poland.

FIGURA 69: Distribución de las muestras en el ensayo a la Compresión.

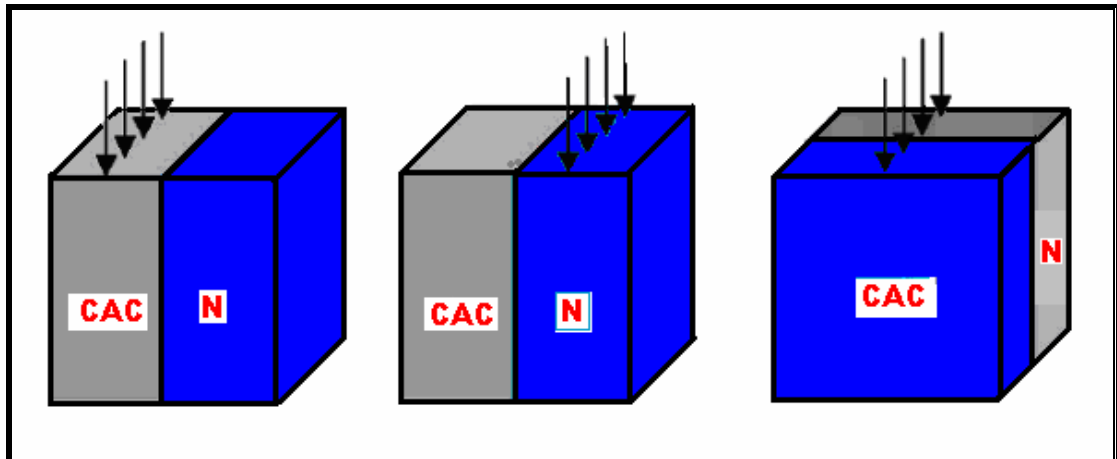


Figura tomada de: Department of Civil Engineering, Technical University of Szczecin, Poland.

FIGURA 70: Distribución de las muestras en el ensayo a Tensión.

Las pruebas confirmaron una unión muy buena entre el concreto viejo y el CAC. Las muestras se comportaron como un material homogéneo. Las muestras después de las pruebas a tensión (Figura 70) se presenta en las Figuras 71, 72 y 73.



Figura tomada de: Department of Civil Engineering, Technical University of Szczecin, Poland.

FIGURA 71: Carga aplicada en el medio de la capa de CAC.



Figura tomada de: Department of Civil Engineering, Technical University of Szczecin, Poland.

FIGURA 72: Carga aplicada en el medio de la capa de Concreto Viejo.



Figura tomada de: Department of Civil Engineering, Technical University of Szczecin, Poland.

FIGURA 73: Carga aplicada perpendicularmente entre los dos materiales.

CAPITULO IV
PROPUESTA PARA EL DISEÑO DE MEZCLA
DEL CONCRETO AUTOCOMPACTABLE

4.1 INTRODUCCIÓN

El CAC, fue desarrollado por primera vez en la década de los ochenta y desde entonces se han realizado intensivos programas de investigación. El objetivo es establecer un método racional para el diseño de mezcla y normalizar las pruebas de laboratorio con el propósito de hacer del CAC un concreto estándar.

En términos generales el diseño para un CAC es asociado con altos contenidos de aditivos, agentes modificadores de la viscosidad y partículas finas, para cumplir con los parámetros en estado fresco, lo que prevé un mayor énfasis en el desarrollo de la tarea para lograr un equilibrio entre la autocompactabilidad y la racionalidad de los materiales.

El siguiente capítulo presenta una propuesta para el diseño de mezcla de CAC con el propósito de ser aplicada en El Salvador utilizando los componentes disponibles en el mercado local, se evalúa el cumplimiento de sus propiedades en estado fresco y endurecido. Además, se presentan detalles de los procedimientos de ensayo utilizados para la caracterización del CAC, y un estudio estadístico del diseño para valorar la capacidad de reproducción del mismo definido a través de la fluctuación de los resultados obtenidos.

En El Salvador el diseño de mezcla para CAC, no posee un antecedente que permita justificar dosificaciones preliminares, por lo que es necesario que la metodología propuesta cuente con un respaldo experimental de cada una de las proporciones sugeridas.

Los criterios de optimización adoptados en la aplicación del procedimiento son definidos por el cumplimiento de las características autocompactables en fresco y una resistencia mínima a compresión, todo ello con el contenido óptimo de superplastificante y de cemento.

4.2 DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO EXPERIMENTAL

El trabajo experimental consiste en diseñar dos mezclas denominadas mezcla A y B, con características autocompactables para resistencias de 350 kg/cm², donde los componentes como el agregado, agua y cemento poseen las mismas propiedades físicas en cada una de ellas; es decir que la única variable de esta investigación, esta definida por el aditivo superplastificante utilizado.

Se inicia el procedimiento de diseño analizando la calidad de los materiales, con el objeto de verificar su aplicabilidad en mezclas de CAC, luego se procede al calculo teórico experimental propio del diseño, donde se obtiene una dosificación óptima, que posteriormente deberá ser sometida a una reproducción en serie valorando el control de calidad en estado fresco y endurecido para crear un historial y validar su consistencia y capacidad de reproducirse.

En términos generales, la presente investigación enfatiza en el detalle de un procedimiento de diseño sin precedentes para el caso de El Salvador, por lo que los procedimientos rutinarios de ensayo para el control de calidad de los materiales, son analizados a partir de los resultados obtenidos por el proveedor. Para el caso del CAC los parámetros de calidad de los materiales están basados en los mismos que para el concreto convencional según las normas ASTM y AASHTO.

El agregado fue muestreado y acopiado de las reservas que utiliza la planta de Concretera Salvadoreña S.A. de C.V. para su producción, con el objeto de mantener constantes las propiedades de los materiales durante el análisis de las mezclas de CAC, y de igual manera reducir las variables en el diseño. El cemento utilizado Pórtland Tipo I ASTM C 595, fue retirado periódicamente del acopio del proveedor y los aditivos reductores de agua y superplastificantes de última generación fueron trasegados y almacenados en recipientes plásticos de cinco galones a temperatura ambiente.

Los parámetros de los que parte el diseño de mezcla en cuanto al agregado, fueron proporcionados por Concretera Salvadoreña S.A. de C.V., solicitándoles un record de cinco muestreos anteriores a la fecha de acopio del material, los cuales fueron procesados y analizados para obtener un promedio y evaluar la desviación estándar para efectos de definir el grado de confiabilidad.

La calidad del cemento está apoyada en la carta de calidad proporcionada por Cemento de El Salvador S.A. de C.V. (CESSA), durante los meses de Octubre de 2004 a Marzo de 2005, que comprende el periodo del trabajo experimental.

La calidad de los aditivos es determinada por las especificaciones de cada proveedor a través de la hoja técnica, para el caso del aditivo VISCOCRETE 5000 y ULTRA FLOW de la casa distribuidora SIKA e IMI respectivamente.

El diseño de mezcla de CAC, está basado en la propuesta de Okamura y Ouchi y los parámetros sugeridos por el EFNARC, además de incluir procedimientos empíricos sugeridos por otros investigadores como es el caso de la determinación del esqueleto granular. La capacidad de autocompactación de la mezcla óptima es evaluada a través de los parámetros obtenidos en los ensayos de capacidad de relleno, capacidad de paso y resistencia a la segregación. Importante es destacar que en esta nueva gama de experimentos existe una relación con las normas ASTM, pero la particularidad radica en la exclusión de cualquier método de compactación del concreto.

El procedimiento de reproducción de la mezcla óptima A y B, tiene como objetivo verificar el comportamiento de la misma a través de un estudio estadístico de población, por lo que se dosificó CAC en varias cantidades y cada bachada fue sometida a un control de sus propiedades en fresco y posteriormente se verificó su resistencia a compresión simple y flexión.

Para el control de calidad en estado fresco de las mezclas de CAC, se evaluaron las propiedades de autocompactabilidad a través de los resultados obtenidos en el ensayo de fluidez y T_{50cm} , ensayo de caja en L y ensayo de resistencia a la segregación utilizando

el tamiz GTM, además se valoraron los parámetros de temperatura, contenido de aire, tiempo de fraguado inicial y final del concreto y evaluación de la pérdida de trabajabilidad de la mezcla a través de un procedimiento totalmente empírico.

En estado endurecido se consideró el ensayo de resistencia a compresión simple muestreando cincuenta especímenes por cada diseño de mezcla, para verificar su comportamiento con respecto a la ganancia de resistencia esperada, además se evaluó el peso unitario y la flexión a través del ensayo de seis especímenes prismáticos.

4.3 CONTROL DE CALIDAD Y PRUEBAS DE LABORATORIO A LOS COMPONENTES DE LA MEZCLA

Para la presente investigación cada una de las mezclas de CAC, esta constituida por un material aglutinante, dos materiales de relleno, agua y aditivo; combinación que por la calidad de las propiedades físicas y mecánicas de cada componente, se prevé sea capaz de producir una mezcla, con el grado de trabajabilidad requerido en estado fresco y las características mecánicas y estéticas esperadas en estado endurecido.

El objetivo es diseñar dos mezclas de 350 kg/cm², donde se pretende que las propiedades físicas sean constantes, para que la investigación este sometida a una sola variable, determinada por el efecto fluidificante del aditivo utilizado.

Para el caso del CAC, los materiales deben ser sometidos al mismo control de calidad que para un concreto convencional. Los materiales elegidos poseen un antecedente de uso bastante extenso y de calidad, por lo que en términos generales el control de laboratorio de cada uno de ellos está regido por el proveedor. La presente investigación parte de los resultados proporcionados por dichos estudios y verifica la calidad y consistencia de los mismos.

4.3.1. AGREGADO

La función principal de los agregados en la matriz de concreto es actuar como material de relleno, haciendo mas económica la mezcla. Los agregados, en combinación con la pasta fraguada proporcionan parte de la resistencia del concreto, por lo que su grado de calidad influye directamente en el material final.

El agregado utilizado en el presente trabajo de investigación, pertenece a los depósitos naturales del la región de Aguilares y La Cantera de San Diego para el caso de la arena y la grava respectivamente.

Con el propósito de someter el estudio solamente a una variable, se determinó realizar un acopio total del material que se utilizaría durante la investigación, de esta manera se obtendría uniformidad en las características del agregado (véase la Figura 74).

La grava y arena son sometidos a un estricto control de calidad por parte del proveedor, por lo que la presente investigación es solamente una verificación de la consistencia de los parámetros obtenidos en cinco muestreos anteriores al acopio del material.



FIGURA 74: Acopio de grava y arena utilizada en los ensayos de mezcla de CAC.

4.3.1.1 DESCRIPCIÓN DEL AGREGADO

AGREGADO GRUESO

El material grueso utilizado para la mezcla de CAC, pertenece a las reservas de Concretera Salvadoreña S.A. de C.V. Es una grava, procedente de la pedrera denominada La Cantera S.A. de C.V., ubicada en el Km 57 ½ , carretera al Puerto de La Libertad, San Diego (véase anexo A).

Por su origen: Es definida como un “Agregado Natural”, formado a partir de rocas ígneas o endógenas de tipo extrusivo, producto de la solidificación por enfriamiento rápido del magma fundido; geológicamente es definido como un basalto con una superficie fina de color negro.

Por el método de fragmentación: Se considera una “Grava Manufacturada” producto de la trituración artificial, que garantiza la forma, granulometría y limpieza del mismo.

Por el tamaño de las partículas: Se clasifica como un “Agregado Grueso” con tamaño máximo nominal de 3/8”.

Por sus propiedades químicas: Se considera un “Material Inerte”, es decir que no reacciona químicamente con los otros componentes del concreto.

AGREGADO FINO

El material fino utilizado para la mezcla de CAC, pertenece a las reservas de Concretera Salvadoreña S.A. de C.V. Es una arena natural de color gris con presencia de pómez (*), procedente del km 40 en Aguilares (véase anexo B).

Por su origen: Es definida como un “Agregado Natural”, producto de la desintegración o fragmentación de rocas preexistentes por causa del intemperismo y erosión; su ubicación es producto del proceso de transporte y depósito por causas naturales en las riveras del cause.

* La presencia de pómez en la arena, fue identificada cualitativamente por observación.

Por el método de fragmentación: Se considera una “Arena Natural” triturada únicamente por fuerzas de origen natural, sometida posteriormente a un proceso de sanidad a través de un lavado antes del acopio, por lo que se define como “Arena de Mediano Proceso”.

Por el tamaño de las partículas: Se clasifica como un “Agregado Fino” con partículas de tamaños menores a 4.75 mm (malla N° 4).

Por sus propiedades químicas: Se considera un “Material Inerte”, es decir que no reacciona químicamente con los otros componentes del concreto.

4.3.1.2 ENSAYOS REALIZADOS AL MATERIAL

Las pruebas realizadas al agregado, son definidas a partir de los requerimientos del diseño de mezcla y de las características de calidad demandada; en la Tabla 21, se muestran las pruebas de laboratorio periódicamente realizadas por Concretera Salvadoreña S.A. de C.V. a la grava de 3/8” y arena de Aguilares.

TABLA 21: Pruebas realizadas al agregado.

PRUEBAS REALIZADAS AL AGREGADO	
Prueba de laboratorio	Designación ASTM
1. Análisis por malla del Agregado Grueso y Fino	C 136
2. Propiedades Físicas	
Densidad, Densidad Relativa (Gravedad Específica), y Absorción del Agregado Grueso y Fino.	C 127 y C 128
Densidad Bruta (Peso Unitario) y Vacíos en los Agregados.	C 29
Contenido de Humedad Total del Agregado por Secado.	C 566

En términos generales, se requiere que los agregados sean limpios, duros, sanos y durables, y que los tamaños de las partículas estén comprendidos entre los límites establecidos por la norma ASTM C 33. Sin embargo, aspectos importantes para el diseño y reproducción de la mezcla óptima de CAC, como son la uniformidad y distribución del tamaño de las partículas, requieren que la gradación y características físicas del material se mantengan razonablemente constantes.

El estudio básicamente se resume a un análisis de la granulometría del agregado y las propiedades físicas, como se muestra a continuación.

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DEL AGREGADO

El análisis por malla del agregado es una característica de gran influencia sobre el proporcionamiento de las mezclas, porque afecta la relación agua/finos, trabajabilidad del concreto en estado fresco, porosidad y la durabilidad en estado endurecido. La inestabilidad en la granulometría puede afectar seriamente la uniformidad del concreto de una revoltura a otra.

A continuación en la Tabla 22 y 23, se presenta el resumen de cinco muestreos realizados a la grava de 3/8" y arena de Aguilares respectivamente, elaborados entre los meses de Abril y Agosto de 2004, que refleja el porcentaje acumulado que pasa con respecto a cada malla, para compararlo con los límites superiores e inferiores especificados en la norma ASTM C 33; para valorar su consistencia se calcula el promedio y desviación estándar por cada distribución de tamaños, información que posteriormente es graficada para una mejor apreciación de las variaciones (véase la Figura 75, 76 y 77). Los resultados del análisis granulométrico representado por sus respectivas curvas de granulometría o líneas de cribado es presentado en el anexo C, para la grava de 3/8" y en el anexo D, para la arena de Aguilares.

TABLA 22: Análisis granulométrico del muestreo periódico de la Grava 3/8".

Malla #	Fecha	24/04/2004		28/05/2004		24/06/2004		20/07/2004		16/08/2004		Promedio	Desviación Estándar
	Muestreo	01		02		03		04		05			
	ASTM C-33	% Retenido Acumulado	% Acumulado que Pasa	% Retenido Acumulado	% Acumulado que Pasa	% Retenido Acumulado	% Acumulado que Pasa	% Retenido Acumulado	% Acumulado que Pasa	% Retenido Acumulado	% Acumulado que Pasa		
1/2"	100	-	100	-	100	-	100	-	100	-	100	100	0
3/8"	90-100	6	94	6	94	5	95	6	94	6	94	94	1
4	20-55	71	29	69	31	72	28	74	26	74	26	28	2
8	5-30	89	11	87	13	89	11	88	12	88	12	12	1
16	0-10	99	1	97	3	99	1	98	2	98	2	2	1

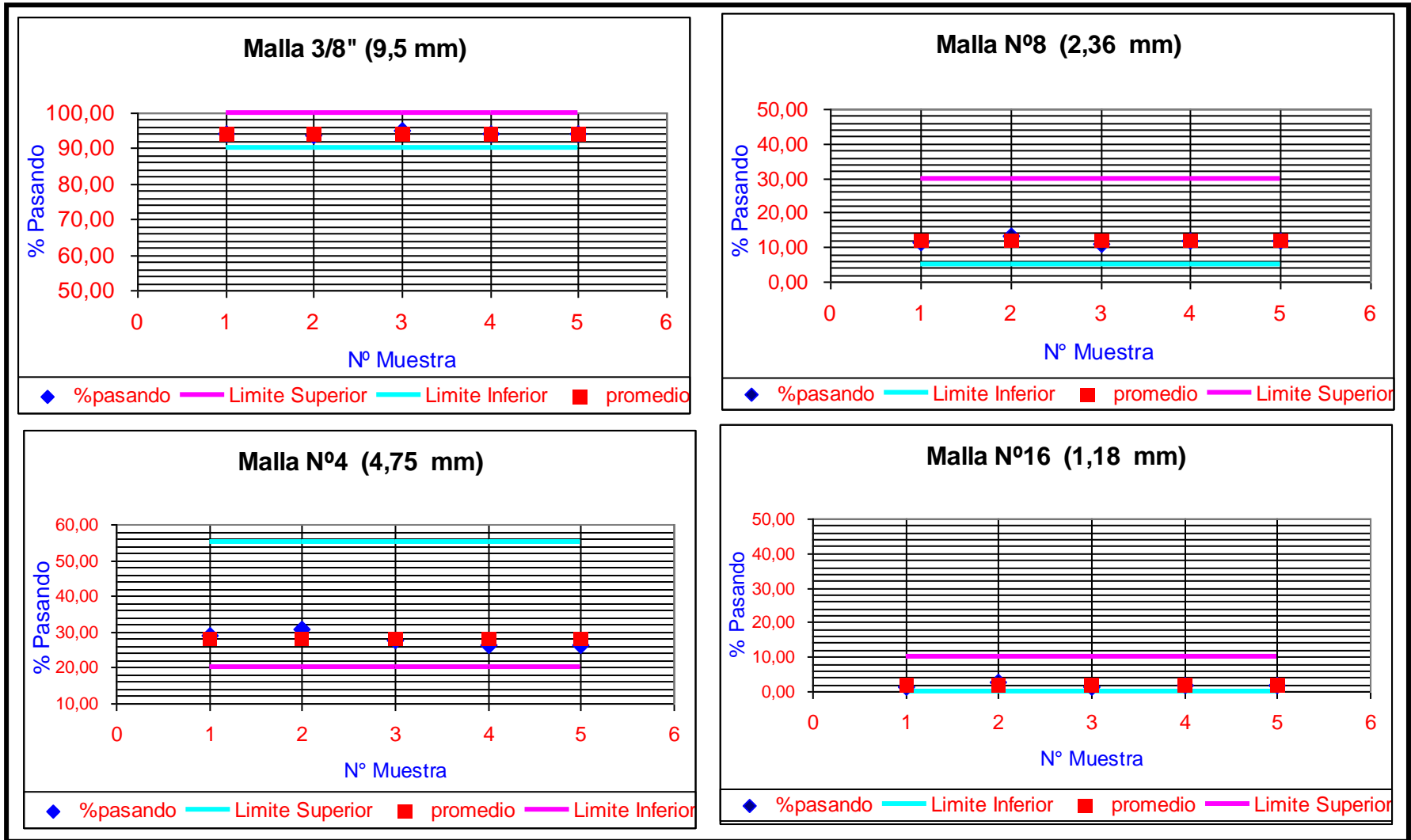


FIGURA 75: Gráfico de variación de la granulometría durante los muestreos periódicos para la Grava 3/8".

TABLA 23: Análisis granulométrico del muestreo periódico de la Arena de Aguilares.

Malla #	Fecha	14/04/2004		09/05/2004		14/06/2004		15/07/2004		18/08/2004		Promedio	Desviación Estándar
	Muestreo	01		02		03		04		05			
	ASTM C-33	% Retenido Acumulado	% Acumulado que Pasa	% Retenido Acumulado	% Acumulado que Pasa	% Retenido Acumulado	% Acumulado que Pasa	% Retenido Acumulado	% Acumulado que Pasa	% Retenido Acumulado	% Acumulado que Pasa		
3/8"	100	-	100	-	100	-	100	-	100	-	100	100	0
Nº 4	95-100	2	99	1	99	1	99	2	99	2	99	99	0
Nº 8	80-100	8	92	7	93	8	93	8	93	7	93	93	0
Nº 16	50-85	23	77	23	78	23	77	24	77	23	77	77	0
Nº 30	25-60	54	46	53	47	54	46	54	46	53	47	47	0
Nº 50	10-30	83	17	83	17	83	17	82	18	81	19	18	1
Nº 100	2-10	95	5	95	5	95	5	95	6	94	6	5	0

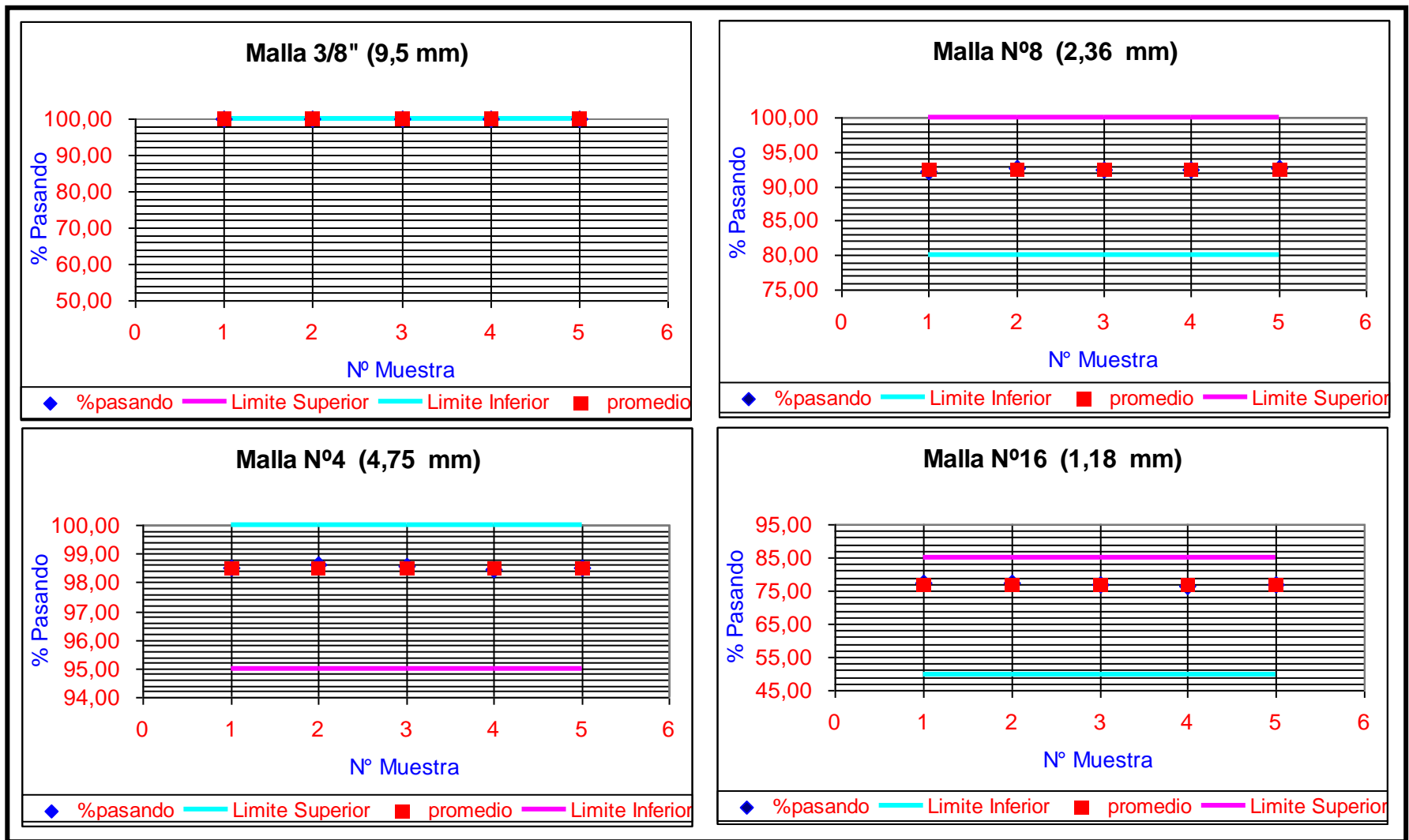


FIGURA 76: Gráfico de variación de la granulometría durante los muestreos periódicos para la Arena de Aguilares (Parte 1).

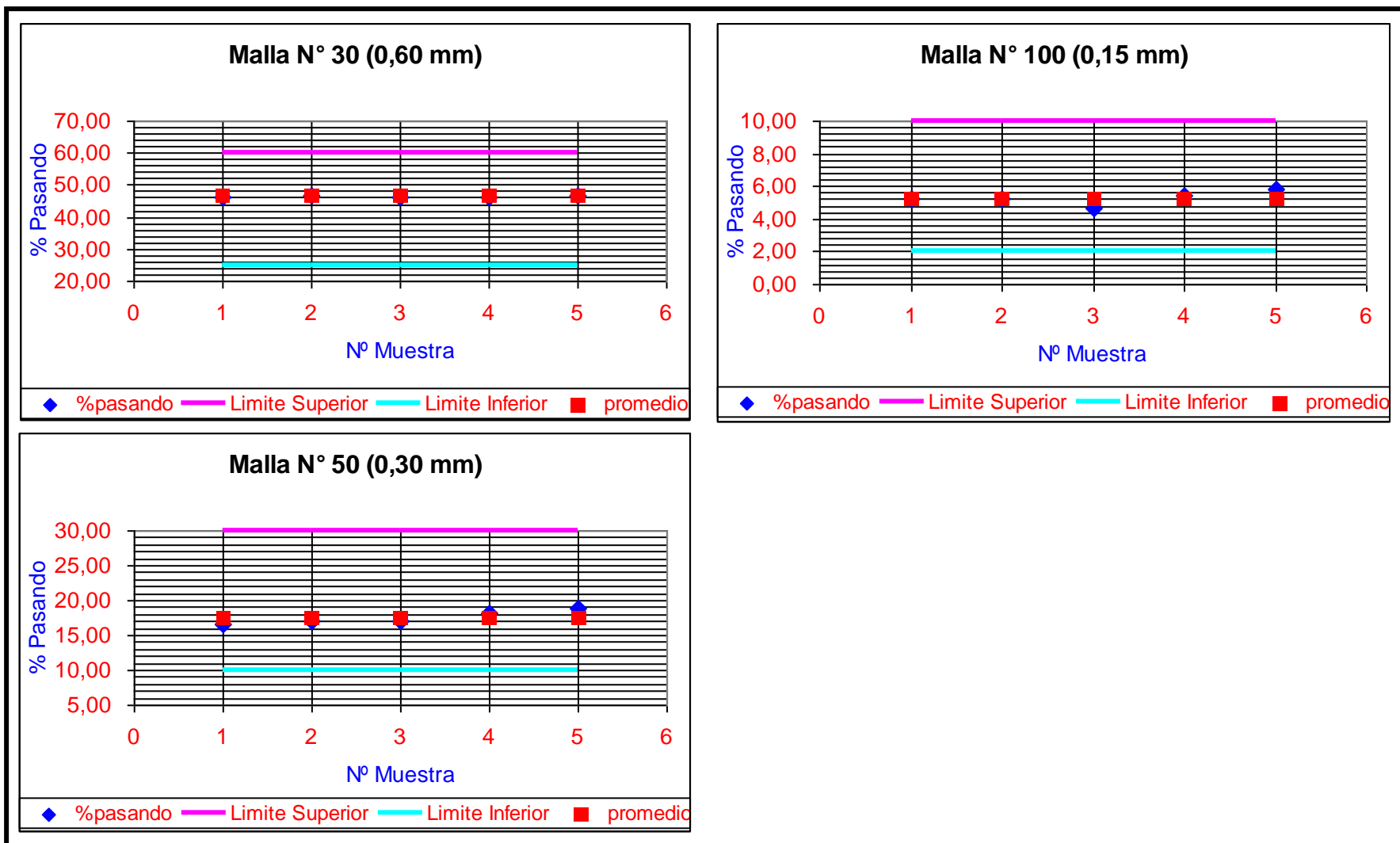


FIGURA 77: Gráfico de variación de la granulometría durante los muestreos periódicos para la Arena de Aguilares (Parte 2).

ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS

El estudio de las propiedades físicas del agregado es importante, debido a su influencia en el cálculo de las proporciones de mezcla, como es el caso de la gravedad específica, absorción, humedad total y peso unitario suelto. La certificación de los resultados para el agregado grueso y fino, utilizado en la presente investigación, son presentados en el anexo C y D respectivamente.

La gravedad específica no se emplea como un índice de la calidad del agregado, mas sin embargo su valor debe oscilar entre 2.4 y 2.8 ^[6], para garantizar una porosidad normal que no influya en un detrimento del material como parte componente de la mezcla de concreto en estado endurecido.

Para el caso de esta investigación, la gravedad específica es un valor utilizado en los cálculos del proporcionamiento, específicamente en la determinación del peso de las partículas de forma irregular a partir de un volumen saturado superficialmente seco o viceversa.

Con respecto a la absorción no existe una relación clara entre la resistencia del concreto y la absorción de agua por parte del agregado, los poros de la superficie de la partícula afectan la adherencia entre el agregado y la pasta de cemento, fenómeno que puede ejercer cierta influencia en la resistencia del concreto. Los niveles de absorción teóricos oscilan abajo del 3% y el 5% para el agregado grueso y fino respectivamente ^[6]. El agregado grueso retiene mucho menos agua que la arena y su contenido de humedad es menos variable lo que favorece el proporcionamiento.

La humedad total es un parámetro únicamente de control y utilizado principalmente en la determinación del contenido de agua de mezclado, que apoyada en el valor de absorción determina la corrección por humedad, que para el caso de esta investigación fue realizada periódicamente antes de la dosificación de cada batchada de CAC.

Para el caso del CAC, que no necesita de métodos de compactación externos, el peso unitario en los cálculos de proporciones corresponde al peso unitario suelto, es decir que el valor depende del acomodo por parte del agregado, utilizando únicamente la fuerza de gravedad, además de la influencia del tamaño y forma de las partículas.

Otros parámetros presentados en el siguiente análisis como la pérdida por lavado, contaminación de arena en grava y viceversa y el módulo de finura, son únicamente ensayos de referencia para valorar la calidad, limpieza y sanidad del material, es decir no están involucrados directamente en el cálculo de la proporción de las mezclas.

Las propiedades de los materiales son evaluadas en conformidad con las especificaciones sugeridas por la norma ASTM C 33.

En las Tablas 24 y 25 se evalúan las propiedades físicas de los agregados gruesos y finos respectivamente, el objetivo de este análisis radica en obtener un promedio con una desviación estándar relativamente baja para garantizarlo como el valor de cada propiedad física en el cálculo de las proporciones del CAC; posteriormente se presentan los gráficos respectivos para cada propiedad que reflejan las variaciones en el comportamiento (véase la Figura 78, 79, 80 y 81).

TABLA 24: Análisis de las Propiedades Físicas de Grava 3/8".

Propiedad Física	Muestreo	01	02	03	04	05	Promedio	Desviación Estándar
	Fecha	24/04/2004	28/05/2004	24/06/2004	20/07/2004	16/08/2004		
Gravedad Específica		2.451	2.451	2.463	2.451	2.451	2.453	0.005
Absorción	%	2.300	2.330	2.560	2.410	2.830	2.486	0.217
Humedad Total	%	7.240	7.760	7.410	7.530	8.700	7.728	0.575
Peso Unitario Suelto	Kg/m ³	1.393	1.394	1.384	1.372	1.384	1.385	0.009
Peso Unitario Compactado	Kg/m ³	1.478	1.489	1.481	1.479	1.436	1.473	0.021
Contaminación de Arena en Grava	%	28.850	30.850	27.670	26.180	24.370	27.584	2.479
Módulo de Finura	–	6.650	6.620	6.660	6.680	6.680	6.658	0.025

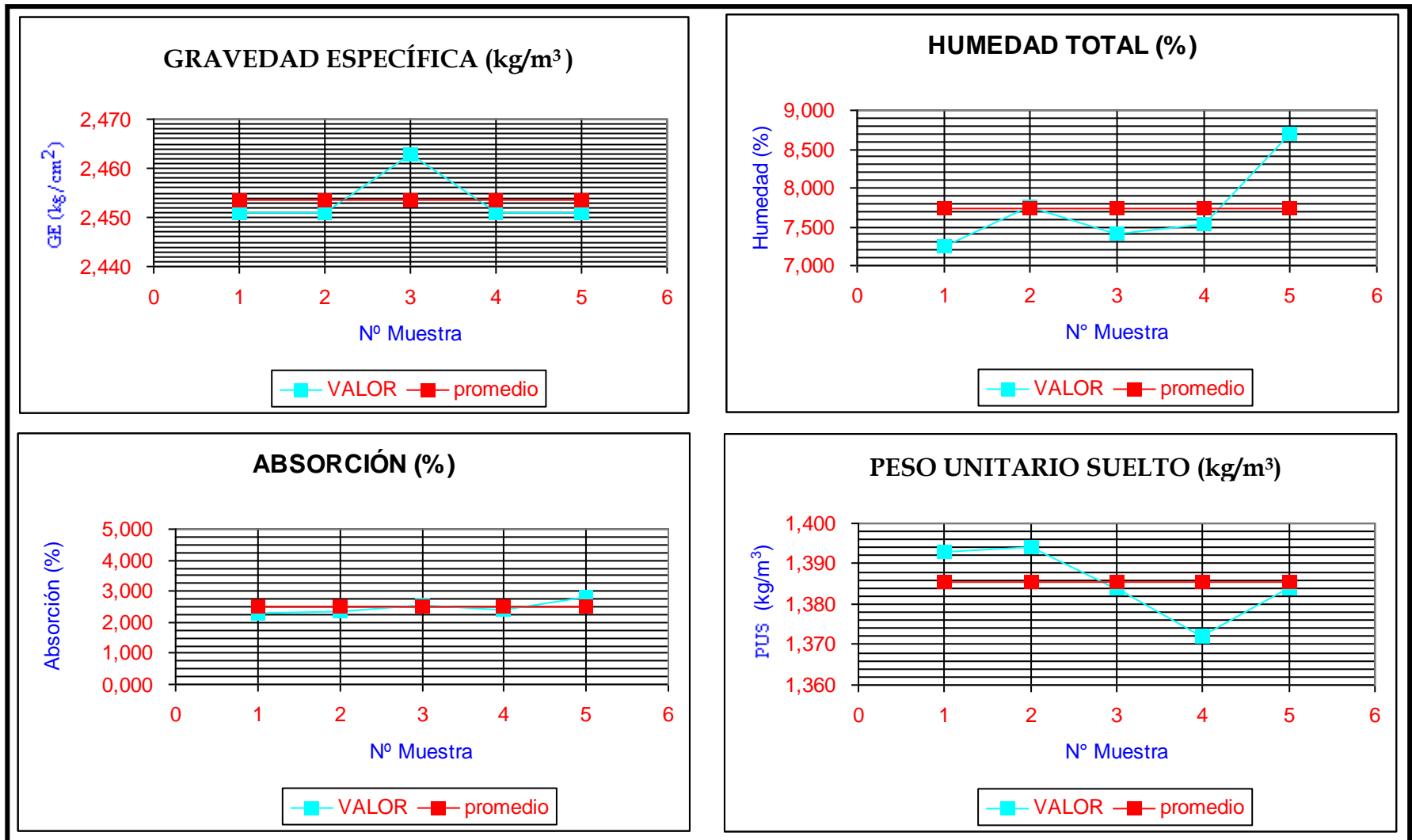


FIGURA 78: Gráfico de variación de las propiedades físicas durante los muestreos periódicos para la Grava 3/8" (Parte 1).

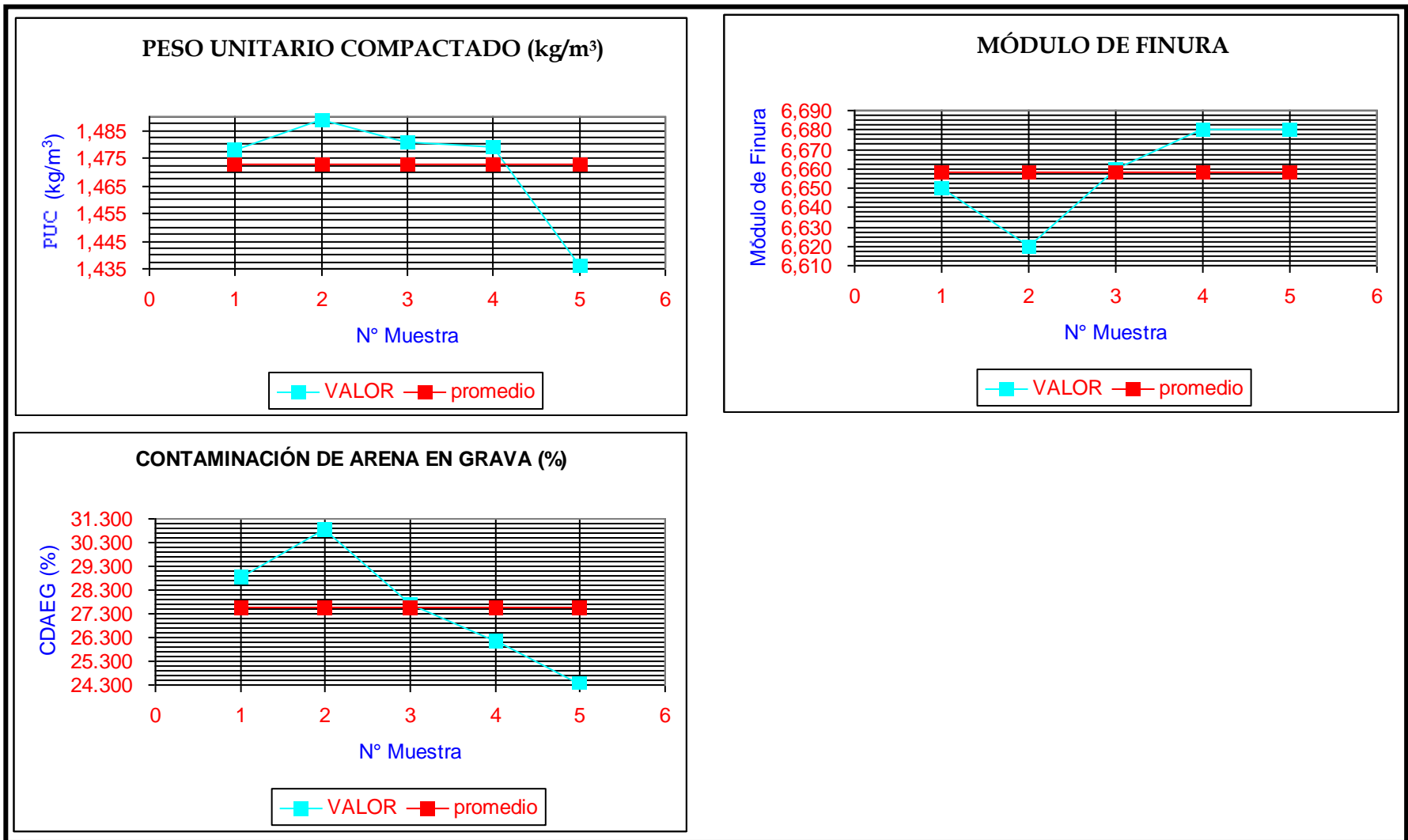


FIGURA 79: Gráfico de variación de las propiedades físicas durante los muestreos periódicos para la Grava 3/8" (Parte 2).

TABLA 25: Análisis de las Propiedades Físicas de Arena de Aguilares.

Propiedad Física	Muestreo	01	02	03	04	05	Promedio	Desviación Estándar
	Fecha	14/04/2004	09/05/2004	14/06/2004	15/07/2004	18/08/2004		
Gravedad Específica		2.476	2.474	2.475	2.479	2.475	2.476	0.002
Absorción	%	4.710	4.600	4.730	4.690	4.600	4.666	0.062
Humedad Total	%	18.480	18.810	18.500	18.340	18.110	18.448	0.255
Peso Unitario Suelto	Kg/m ³	1.405	1.402	1.409	1.411	1.406	1.407	0.004
Peso Unitario Compactado	Kg/m ³	1.589	1.589	1.589	1.589	1.692	1.610	0.046
Perdida por lavado	%	4.250	4.200	4.370	4.620	4.300	4.348	0.165
Contaminación de Grava en Arena	%	1.470	1.380	1.430	1.530	1.510	1.464	0.061
Módulo de Finura	-	2.640	2.620	2.640	2.620	2.610	2.626	0.013

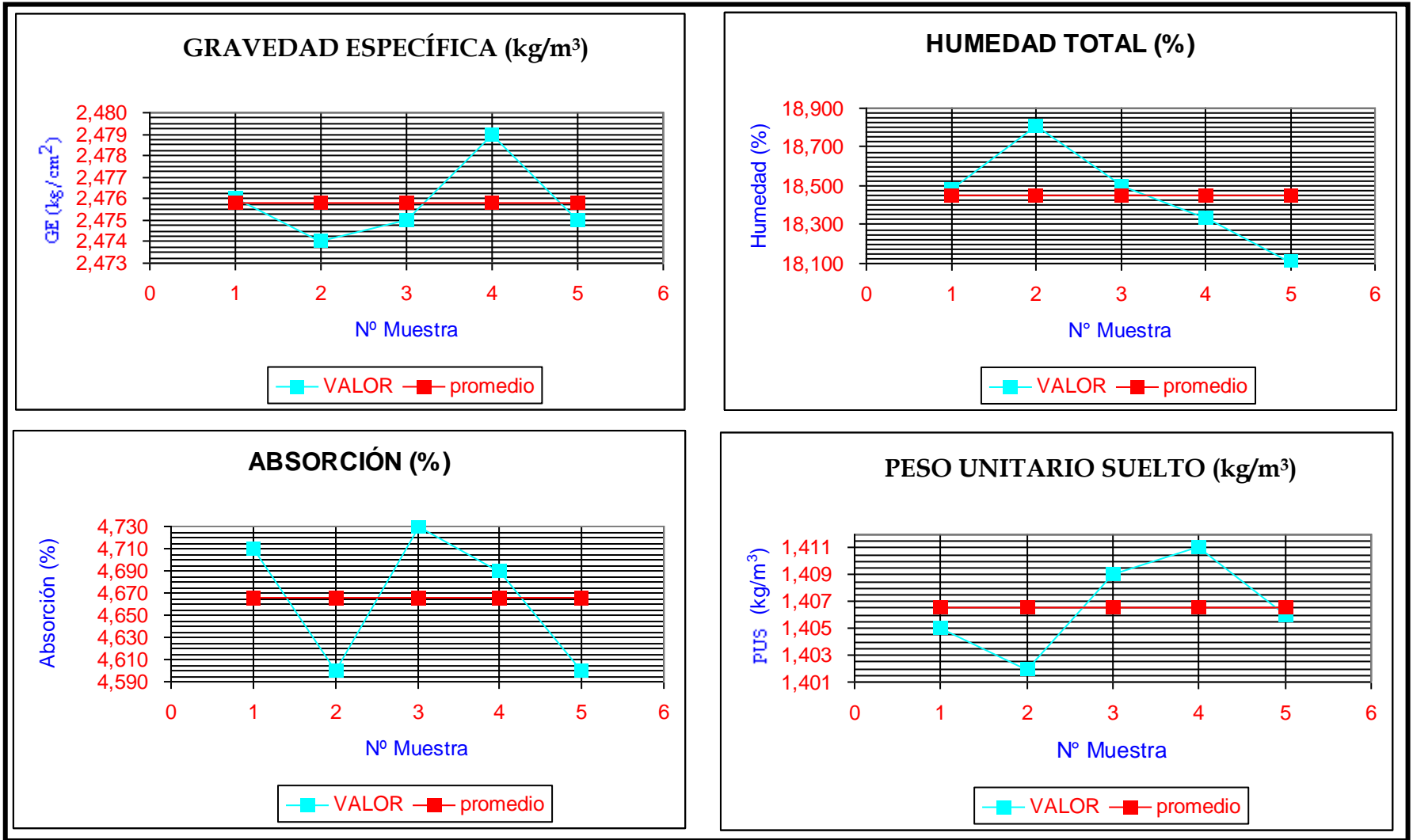


FIGURA 80: Gráfico de variación de las propiedades físicas durante los muestreos periódicos para la Arena de Aguilares (Parte 1).

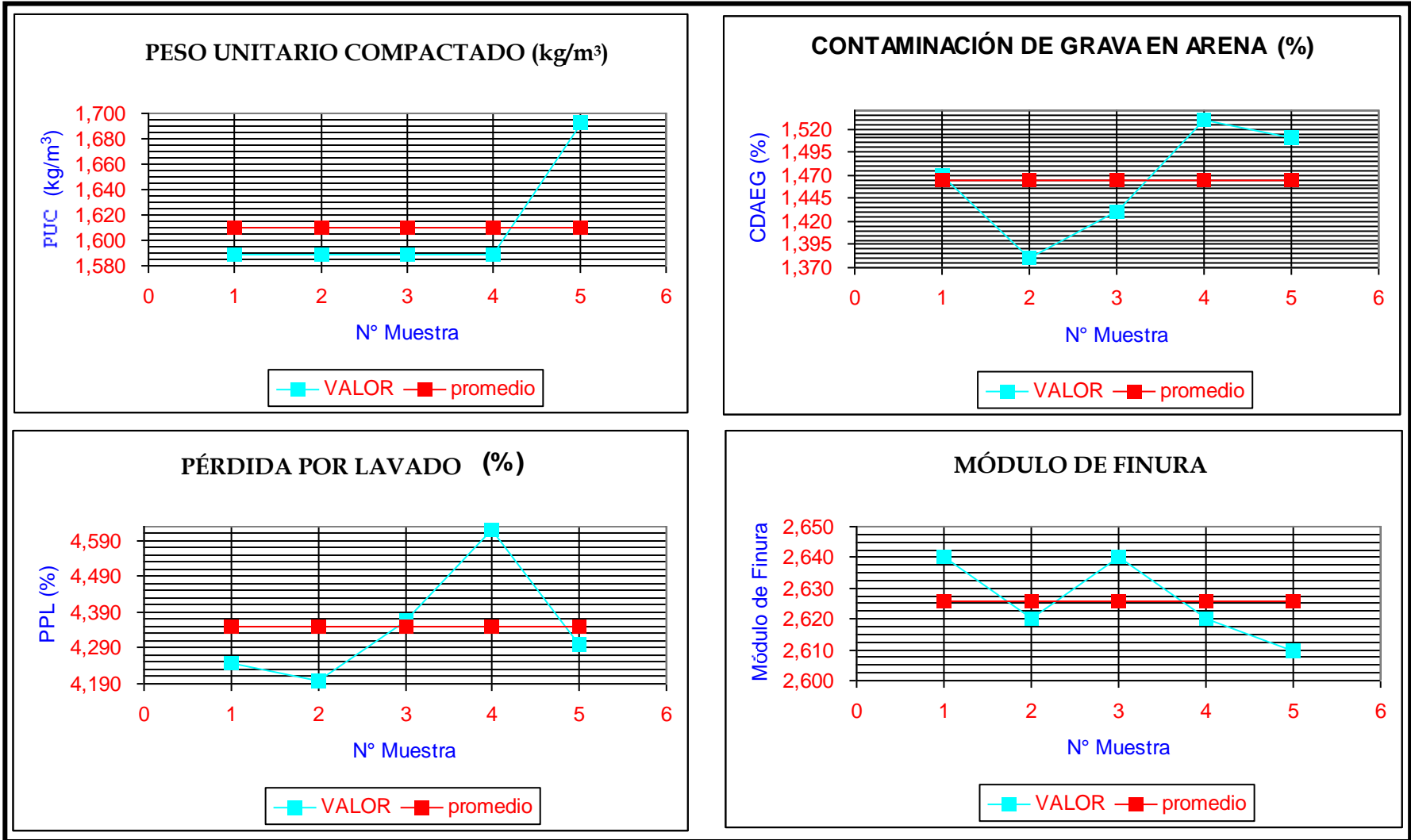


FIGURA 81: Gráfico de variación de las propiedades físicas durante los muestreos periódicos para la Arena de Aguilares (Parte 2).

4.3.2 CEMENTO

El cemento utilizado es marca CESSA denominado tipo I (Pórtland modificado con puzolana) según la norma ASTM C 595, el requisito de elección de este cemento para el caso del CAC, esta basado en su disponibilidad en el país y la presencia de puzolana que es un fino incluido en el cemento en cantidades menores al 15%, particularidad que es favorable para una mezcla que demanda la presencia de finos para mejorar las características de autocompactabilidad.

En el anexo E, se presentan las cartas de calidad, proporcionadas por el proveedor que garantizan la calidad del cemento.

4.3.3 AGUA

El agua como componente del concreto es el elemento que hidrata las partículas de cemento y hace que éstas desarrollen sus propiedades aglutinantes.

El agua utilizada para esta investigación es potable, clasificada como satisfactoria para agua de mezclado según el criterio de calidad que se especifica usualmente a través de la norma AASHTO M 157.

4.3.4 ADITIVOS

Son utilizados dos tipos de aditivos, SIKA VISCOCRETE 5000 y ULTRAFLOW de IMI, denominados aditivos superplastificantes reductores de agua de última generación a base de polycarboxilatos. En el anexo F y G se muestran las cartas de calidad.

Los polycarboxilatos se desarrollaron hace cinco años aproximadamente, las investigaciones confirman un comportamiento superior comparado con otros aditivos tradicionalmente utilizados, permitiendo el desarrollo del CAC. En El Salvador este tipo de aditivos son nuevos de importación, razón que también contribuye al hecho que el tema del CAC carezca de antecedentes.

Los Policarboxilatos se basan químicamente en copolímeros de ácido acrílico y grupos éter de ácido acrílico que poseen largas cadenas laterales a diferencia de los plastificantes tradicionales. La capacidad reductora de agua o poder plastificante es incrementado drásticamente (hasta 40 % de reducción de agua).

Los polímeros de tipo acrílico permiten fluidificar las mezclas de concreto porque producen un efecto dispersante en las moléculas de cemento al cargarlas electrostáticamente con polaridad negativa lográndose la repulsión de las partículas del aglomerante, además producen un efecto adicional llamado repulsión estérica, debido a la forma compleja de las moléculas del aditivo, que poseen un alto grado de flexibilidad y diferentes grupos funcionales y longitudes de cadena. Las largas cadenas laterales crecen más allá de los productos de hidratación del cemento formados, ya que interaccionan con el agua reduciendo aún más la fricción entre las mismas y permiten que una segunda molécula se active mediante el mismo efecto estérico aumentando el efecto dispersante. Además, esta mayor separación física, sumada a la menor velocidad de absorción de la molécula de aditivo por parte del cemento, es también la responsable de mantener la trabajabilidad por más tiempo.

Por otra parte no son caracterizados como inclusores de aire en la mezcla por lo que no afectan el sistema de vacíos de aire en la matriz de concreto.

4.4 CÁLCULO TEÓRICO EXPERIMENTAL DEL DISEÑO DE MEZCLA DEL CONCRETO AUTOCOMPACTABLE

Importante es destacar la carencia en El Salvador de un antecedente y una normativa que permita obtener de primera instancia proporciones óptimas en la dosificación de mezcla para CAC, por lo que el siguiente calculo de diseño es descrito como un procedimiento de ajuste a base de prueba y error que finaliza con una mezcla óptima, que posteriormente será sometida a una comprobación de la reproductividad de sus parámetros en estado fresco y endurecido.

Para la elección del procedimiento de diseño es importante reducir el uso de parámetros arbitrarios y fundamentar todas las proporciones a través de procedimientos de ensayo y análisis de los resultados. El diseño de mezcla para el CAC en esta investigación, está basado en la propuesta de Okamura y Ouchi y los parámetros sugeridos por el EFNARC resumidos en la Tabla 16 del Capítulo III de este documento.

A continuación se detalla una investigación preliminar referente a los diseños de mezcla del CAC, popularizados a nivel internacional, información que posteriormente será utilizada como base de datos que favorecerá el enfoque y criterios aplicados en el procedimiento de diseño teórico experimental utilizado para la presente investigación.

4.4.1 ANTECEDENTES EXTRANJEROS EN EL DISEÑO DE MEZCLA PARA CONCRETO AUTOCOMPACTABLE

Partiendo de que no existe una metodología internacionalmente aceptada para diseñar la mezcla de CAC, es importante evaluar los diseños de mezcla divulgados por sus autores y considerados como satisfactorios para los contratistas, por lo anterior a continuación en la Tabla 26 se presenta un resumen de los diseños y los parámetros importantes de cada uno.

El objetivo de crear una base de datos con parámetros establecidos a partir de materiales con características diferentes a las utilizadas en esta investigación, radica en la posibilidad de fundamentar en términos generales los ajustes dentro del procedimiento empleado a base de prueba y error. No se pretende reproducir una propuesta de dosificación específica, pues cada diseño presentado posee una particularidad diferente en términos de aplicación.

TABLA 26: Parámetros generales en los diseños de mezcla de CAC de autores extranjeros.

Estudio	Grava	Arena	Aditivo	Cemento	Agua	Adiciones	Aire	PROPORCIONES			Observaciones
								Agua/Finos	C/A	a/c	
1	28% - 35% por volumen de mezcla	El contenido de arena equilibra los demás componentes			< de 200 l por m ³			0.8 a 1.10 en volumen			Finos = 400 kg/m ³ a 600 kg/m ³
2	Diámetro > 4 mm Volumen entre 50% - 60%	0.125 mm - 4 mm (malla N° 100 - N° 4) 40% - 50% en el mortero					> 2%	0.8 - 0.9 en volumen			
3	Volumen < del 50%	Volumen > del 40 % del mortero y > 50% por peso del Agregado			< 200 l			0.8 - 1.0 en volumen Finos 400 kg/m ³ a 600 kg/m ³			pasta > 50% del volumen de la mezcla
4	TM < 20 mm (TM usuales entre 10 mm y 16 mm)			200 kg/m ³ - 400 kg/m ³	160 kg/m ³ - 200 kg/m ³			Finos 400 kg/m ³ a 600 kg/m ³ ; 0.9 - 1.0 en volumen	0.5 - 1.0		Volumen de pasta 35% - 40%
5	Esqueleto granular TM = 12 mm (1/2")					10% del peso de cemento filler TM aprox 0.80 mm filler/ cemento = 0.1 - 0.5			50% grava 50% arena	< 0.4	Contenido de pasta 32% - 42% en volumen
6	Coefficiente de forma = 0.2 TMN 3/8" - 1/2"		Tipo G	Cemento Portland Mezclado 360 kg/m ³		Filler inerte del 6% - 35% (ceniza volante, microsíllica y puzolana)		Fino 450 kg/m ³ a 650 kg/m ³ ; 0.3 - 0.35 en peso	0.72 - 0.80		
7			Polyeterpolicarboxilato 2% de la masa de finos	Cemento Portland Normal		Vapor de sílica 18% - 25% en peso de cemento			30% de arena y 70% de basalto en masa	0.28 - 0.38	agregado grueso = 50%; agregado fino = 20%; agua = 30%; pasta 46% - 55%
8	Basalto triturado de 2 mm - 5 mm	Arena fina de cuarzo (0 mm - 10 mm) Volumen = 205 kg/m ³ Arena de cuarzo (0.3 mm - 0.8 mm) Volumen = 475 kg/m ³	14.9 oz	480 kg/m ³	162 l	Microsíllica = 144 kg/m ³		0.543			volumen de pasta en el concreto 46%
9	Tamaño (5 mm - 15 mm) (N°4 - 3/4") 630 kg/m ³	Arena fina (0.075 mm - 0.60 mm) (N° 200-30) Volumen 180 kg/m ³ Arena (0 mm - 5 mm) (0 a N°4) Volumen 990 Kg/m ³	Superplastificante = 7 kg/m ³	Portland Normal 400 Kg/m ³	190 Kg/m ³			0.47			densidad del concreto endurecido 2590 kg/m ³
10	Tamaño (N°4 - 3/4") Volumen 305 kg/m ³ Tamaño (3/8" - 3/4") Volumen 710 kg/m ³	Arena (0 mm - 5 mm) (0 a N°4) 670 Kg/m ³	Superplastificante = 4 kg/m ³	Portland Normal 300 Kg/m ³	187 kg/m ³	Ceniza Volante 90 kg/m ³		0.48		0.62	
11	Granito TMN 3/4" Volumen 914.5 kg/m ³	Natural = 820.69 kg/m ³	AMV de sal de sodio Tipo "Soap" 0.3 oz/cwt Policarboxilato 8.0 oz/cwt	Portland tipo III 280,84 Kg/m ³	164.61 kg/m ³	Puzolana Natural ASTM 618 Clase N 120.36 kg/m ³		0.41			
12	Granito TMN 1/2" Volumen 793,55 kg/m ³	Natural = 915.68 kg/m ³	AMV Neutralized Vinsol rosin 0.13 oz/cwt Policarboxilato 12.0 oz/cwt	Portland tipo III 266,09 Kg/m ³	159.3 kg/m ³	escoria = 40% ASTM C- 989 Grado 120; 177.59 Kg/m ³		0.36			
13	Granito TMN 1/2" Volumen 793,55 kg/m ³	Natural = 915.68 kg/m ³	AMV Neutralized Vinsol rosin 0.13 oz/cwt Policarboxilato 12.0 oz/cwt Azúcar y solución de lignito 14.0 oz/cwt	Portland tipo III 266,09 Kg/m ³	159.3 kg/m ³	escoria = 40% ASTM C- 989 Grado 120; 177,59 Kg/m ³		0.36			
14	TM 1/2" (12.5 mm)		Carboxilato copolímero								
15	TM 1/2" (12.5 mm)		AMV = 5.22; Policarboxilato = 5, 51							0.427	arena/total agregados = 0.501
16	TM 1/2" (12.5 mm)		AMV = 5.22; Policarboxilato = 10,19							0.427	arena/total agregados = 0.571
17	TM 1/2" (12.5 mm)		AMV = 5.22; Policarboxilato = 12,23							0.349	arena/total agregados = 0.569
18	3/4" Tamaño Máximo	Natural	Viscocrete	Cemento: tipo III (cemento y puzolana) 750 lbs/yd ³		escoria = 30% (sustitución del peso total de cemento)				0.37	cemento/escoria = 70% - 30%
19	Agregado grueso 5mm - 20 mm Volumen = 317 l/m ³	TM = 5 mm Modulo de Finura = 2.6								0.275 - 0.375 (0.87 - 1.18)	Contenido de arena en el mortero = 45% del volumen

TM: Tamaño Máximo
TMN: Tamaño Máximo Nominal
AMV: Agente Modificador de la Viscosidad

4.4.2 PROCEDIMIENTO DE DISEÑO

Existen al menos tres alternativas para el diseño de mezcla de CAC, expuestas en el Capítulo III de este documento. Pero con el objetivo de implementar esta tecnología en El Salvador, se optó por la propuesta de Okamura y Ouchi la cual a través de un análisis se definió como la más completa, detallada y capaz de reproducirse fielmente con los recursos disponibles según el procedimiento de referencia, además es la metodología sugerida por el EFNARC autor de uno de los documentos fundamentales para el análisis del tema.

El diseño del CAC, se basa en un análisis de concreto en estado fresco valorando principalmente su capacidad de autocompactabilidad y en estado endurecido verificando principalmente la resistencia a compresión simple.

Teóricamente el procedimiento propuesto se divide en cinco pasos como sigue:

1. Definición del contenido de aire deseado.
2. Determinación del volumen de agregado grueso y contenido de arena.
3. Diseño de la composición de la pasta.
4. Determinación de la relación óptima agua/finos y la dosificación del superplastificante en el mortero.
5. Ensayos de ajuste en la mezcla de concreto.

A continuación se presenta el diseño por volumen, para dos mezclas A y B con resistencia a la compresión simple de 350 kg/cm², que discrepan entre si únicamente por el aditivo utilizado.

4.4.2.1 DEFINICIÓN DEL CONTENIDO DE AIRE

Para el caso de esta investigación, en el diseño de mezcla de CAC, no se considera la inclusión de aire como una opción para mejorar la consistencia de la mezcla, por lo que el contenido de aire se define como aquel que naturalmente queda atrapado entre los materiales y se estima en un 2% del volumen de la mezcla total, como lo sugieren los diseños de concreto convencional. Además no se asume una exposición a la intemperie nociva para el concreto y ninguno de los aditivos superplastificantes utilizados en la mezcla A y B, son denominados inclusores de aire.

4.4.2.2 DETERMINACIÓN DEL VOLUMEN DE AGREGADO GRUESO Y CONTENIDO DE ARENA

El procedimiento de diseño propuesto por Okamura y Ouchi no especifica una metodología para determinar la proporción de la grava y arena con respecto al agregado total, más sin embargo sugiere que el contenido de agregado grueso debe ser menor al 50 % del total de agregado (véase la Tabla 16). Para obtener la mejor compactación entre grava - arena y cumplir el parámetro anterior, se efectuó el ensayo de diseño del esqueleto granular basado en la teoría del peso unitario sin compactar, propuesto por Petersson et. al. (1996) ^[41], el cual es expuesto a continuación.

Diseño del Esqueleto Granular

La composición del esqueleto granular en términos de la relación grava/arena según el criterio de máxima compactación en seco y sin compactar, pretende propiciar el mínimo contenido de vacíos en el mismo. Para ello, existen distintos procedimientos de ensayo, habiéndose adoptado en este caso el método experimental de la norma ASTM C 29, pero sin realizar la compactación del material. El ensayo consiste esencialmente, en llenar un recipiente de 5 litros con una mezcla seca correspondiente a una determinada relación grava/arena. A partir de las gravedades específicas y pesos unitarios de los componentes se determina el peso unitario de la mezcla y el contenido de vacíos. El ensayo se realiza para distintas relaciones grava/arena optando por la relación con el

esqueleto granular de máxima compacidad o mínimo volumen de vacíos. Este procedimiento toma en cuenta, para cada tipo de agregado, sus características físicas y granulométricas.

Procedimiento experimental

El ensayo fue realizado tomando como base las combinaciones teóricas obtenidas a partir de los pesos unitarios sueltos y gravedades específicas de los materiales a utilizar (véase la Tabla 27), con el objeto de crear una referencia para analizar los resultados que posteriormente fueron realizados en el laboratorio (véase la Tabla 28).

Utilizando un recipiente de aproximadamente cinco litros, como especifica la metodología se mezclaron diferentes combinaciones grava - arena, entre 60% - 40% y 40% - 60% respectivamente, para un peso total de 10 kg en condición de secado al aire; se llenó tres veces el recipiente utilizando únicamente gravedad para el acomodo del material, luego fue enrazado y pesado, logrando obtener de esta manera el peso unitario suelto de la mezcla, para posteriormente determinar el porcentaje de vacíos. La secuencia del procedimiento experimental se ilustra en la Figura 82.

Para el diseño del esqueleto granular y calculo del porcentaje de vacíos se utilizan los datos siguientes:

DATOS

Material :	10 kg
Volumen del molde :	4.96 l
Peso del molde:	1.982 kg
Peso Unitario grava:	1385.4 kg/m ³
Peso Unitario arena:	1406.6 kg/m ³
Gravedad especifica grava:	2.453
Gravedad especifica arena:	2.476

TABLA 27: Combinaciones de material teórico para el diseño del esqueleto granular.

A	B	D	C	E
% Grava	% Arena	Grava kg	Arena kg	Peso unitario suelto de la mezcla (kg/m ³)
20	80	2	8	1402.36
25	75	2.5	7.5	1401.3
30	70	3	7	1400.24
35	65	3.5	6.5	1399.18
40	60	4	6	1398.12
45	55	4.5	5.5	1397.06
50	50	5	5	1396.00
55	45	5.5	4.5	1394.94
60	40	6	4	1393.88
65	35	6.5	3.5	1392.82

Formulas utilizadas:

$$C = (A \times 10 \text{ kg})$$

$$D = (B \times 10 \text{ kg})$$

$$E = (A \times 1385.4 \text{ kg/m}^3) + (B \times 1406.6 \text{ kg/m}^3)$$



FIGURA 82: Proceso de mezclado y llenado de la grava y arena para el procedimiento experimental del esqueleto granular.

TABLA 28: Combinaciones de material ensayado para el diseño del esqueleto granular.

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
% Grava	% Arena	Grava (kg)	Arena (kg)	Peso (kg) mezcla 1 + molde	Peso (kg) mezcla 2 + molde	Peso (kg) mezcla 3 + molde	Peso Promedio Mezcla + molde (kg)	Peso (kg) mezcla - molde	Peso unitario suelto de la mezcla (kg/m ³)	Volumen Grava (l)	Volumen Arena (l)	volumen Grava (%)	volumen Arena (%)	volumen de vacíos (%)
40	60	4.0	6.0	9.541	9.547	0	9.544	7.562	1524.15	1.23	1.83	24.854	36.934	36.212
45	55	4.5	5.5	9.491	9.565	9.540	9.532	7.550	1521.73	1.39	1.68	27.916	33.803	36.281
50	50	5.0	5.0	9.559	9.447	9.555	9.520	7.538	1519.38	1.54	1.52	30.970	30.682	36.348
55	45	5.5	4.5	9.388	9.364	0	9.376	7.394	1490.29	1.66	1.34	33.415	27.085	37.500
60	40	6.0	4.0	9.180	9.256	0	9.218	7.236	1458.44	1.77	1.17	35.673	23.561	38.765

Fórmulas utilizadas:

$$C = A \times 10 \text{ kg}$$

$$D = B \times 10 \text{ kg}$$

$$H = (E + F + G) / 3$$

$$I = H - 1.982 \text{ kg}$$

$$J = I / 0.00496 \text{ m}^3$$

$$K = (I \times A) / 2.453$$

$$L = (I \times B) / 2.476$$

$$M = (K \times 100\%) / 4.96 \text{ l}$$

$$N = (L \times 100\%) / 4.96 \text{ l}$$

$$O = 100\% - M - N$$

Según la Tabla 16 del Capítulo III de este documento, el contenido de arena debe ser mayor del 50% del agregado total, por lo que inicialmente se analizará el comportamiento de la proporción de 45% de grava y 55% de arena con una cantidad de vacíos de 36.281% como se muestra en la Tabla 28.

4.4.2.3 DISEÑO DE LA COMPOSICIÓN DE LA PASTA

El CAC, es un tipo de concreto especial que para obtener los parámetros que permitan su acomodo utilizando únicamente la influencia de la gravedad, necesita cantidades considerables de finos. La naturaleza de esta investigación no incluye el experimentar con adiciones por lo que la mezcla solamente cuenta con el cemento como material fino pasante de la malla N° 100. Para la definición de las proporciones de la pasta se experimento con dos tipos de cemento, el cemento puro ASTM C 150 (CESSA 5000) y el cemento mezclado puzolánico ASTM C 595 (CESSA PÓRTLAND). Con gravedades específicas de 3.15 y 2.96 respectivamente.

Procedimiento experimental

El término pasta se refiere a la mezcla de cemento y agua; cuando el concreto se encuentra en estado plástico, la pasta actúa como lubricante de los agregados, proporcionando fluidez a la mezcla, lo cual permite que la colocación sea adecuada; la pasta de cemento al aglutinarse, llena los espacios que hay entre las partículas y reduce la permeabilidad del concreto.

Para el proporcionamiento del agua y cemento en la composición de la pasta, inicialmente debe fijarse la cantidad de cemento a utilizar, la Tabla 16 del Capítulo III sugiere una proporción entre 400 y 600 kg por metro cúbico de concreto, por lo que el contenido de cemento inicial para esta investigación fue el punto medio de 500 kg/m³, el volumen de agua depende de la relación agua/finos como se muestra en la Tabla 29 y 31. Los tiempos de mezclado se realizaron según la indicación de la norma ASTM C 305.

La fluidez de la mezcla es medida a través del ensayo de fluidez utilizando el mini slump, como se especifica en la sección 3.5.2 para el procedimiento de Okamura y Ouchi, con respecto a este procedimiento es importante mencionar que para el llenado del mini slump, se utilizó únicamente la capacidad de acomodo de la pasta, producto de la fluidez proporcionada por la relación agua/finos y que la lectura de la fluidez se realizó sobre la superficie lisa de un vidrio humedecido, disminuyendo de esta forma las fuerzas de fricción que pudieran alterar la lectura; la secuencia del procedimiento experimental se muestra en la Figura 83.



FIGURA 83: Proceso de mezclado y lectura de la extensión de la pasta.

El cálculo del flujo relativo cero, se basa en el principio de proporcionar una mezcla de consistencia dura que se encuentre al límite de la hidratación necesaria demandada por el cemento (véase la Tabla 30 y 32); los resultados de la tendencia se muestran en los gráficos de flujo relativo vrs agua/finos mostrados en las Figuras 84 y 85.

ENSAYO N° 1 (CEMENTO CESSA 5000 ASTM C 150)

TABLA 29: Proporcionamiento para el diseño de pasta (CEMENTO CESSA 5000 ASTM C 150)

Nota: El volumen de pasta dosificado depende de la relación agua/finos utilizada.

Para la dosificación de la pasta, debe suponerse una cantidad de concreto (2500 cm³), de la cual el único componente conocido es el cemento que representa el 15.9% (1.25 kg).

A	B	C	D	E
Volumen de Mezcla de concreto (cm ³)	Relación Agua/Finos	Peso Cemento (kg)	Volumen Cemento (l)	Volumen Agua (l)
2500	1.1	1.25	0.3968	0.437
2500	1.2	1.25	0.3968	0.476
2500	1.3	1.25	0.3968	0.516
2500	1.4	1.25	0.3968	0.556
2500	1.5	1.25	0.3968	0.595

Formulas utilizadas:

$$C = (A \times 500 \text{ kg}) / 100^3 \text{ cm}^3$$

$$D = (C / 3.15)$$

$$E = (B \times D)$$

TABLA 30: Resultados del diseño de pasta (CEMENTO CESSA 5000 ASTM C 150)

A	B	C	D	E
A/F	Flujo 1 (cm)	Flujo 2 (cm)	Flujo Promedio (cm)	Flujo Relativo (cm)
1.1	10.2	10.4	10.3	0.1
1.2	12.4	12.6	12.5	0.6
1.3	18.3	18.4	18.4	2.4
1.4	19.5	19.8	19.7	2.9
1.5	23.0	22.9	23.0	4.3

Formulas utilizadas:

$$D = (B + C) / 2$$

$$E = (D / 10.0 \text{ cm})^2 - 1$$

ENSAYO N° 2 (CEMENTO CESSA PORTLAND ASTM C 595)

TABLA 31: Proporcionamiento para el diseño de pasta (CEMENTO CESSA PORTLAND ASTM C 595)

Nota: El volumen de pasta dosificado depende de la relación agua/finos utilizada.

Para la dosificación de la pasta, debe suponerse una cantidad de concreto (2500 cm³), de la cual el único componente conocido es el cemento que representa el 15.9% (1.25 kg).

A	B	C	D	E
Volumen de Mezcla de concreto (cm ³)	Relación Agua/Finos	Peso Cemento (kg)	Volumen Cemento (l)	Volumen Agua (l)
2500	1.1	1.25	0.4223	0.465
2500	1.2	1.25	0.4223	0.507
2500	1.3	1.25	0.4223	0.549
2500	1.4	1.25	0.4223	0.591
2500	1.5	1.25	0.4223	0.633

Formulas utilizadas:

$$C = (A \times 500 \text{ kg}) / 100^3 \text{ cm}^3$$

$$D = (C / 2.96)$$

$$E = (B \times D)$$

TABLA 32: Resultados del diseño de pasta (CEMENTO CESSA PÓRTLAND ASTM C 595)

A	B	C	D	E
A/F	Flujo 1 (cm)	Flujo 2 (cm)	Flujo Promedio (cm)	Flujo Relativo (cm)
1.1	11.2	11.0	11.1	0.232
1.2	11.8	11.9	11.9	0.404
1.3	14.3	14.3	14.3	1.045
1.4	16.5	16.7	16.6	1.756
1.5	20.5	20.5	20.5	3.203

Formulas utilizadas:

$$D = (B + C) / 2$$

$$E = (D / 10.0 \text{ cm})^2 - 1$$

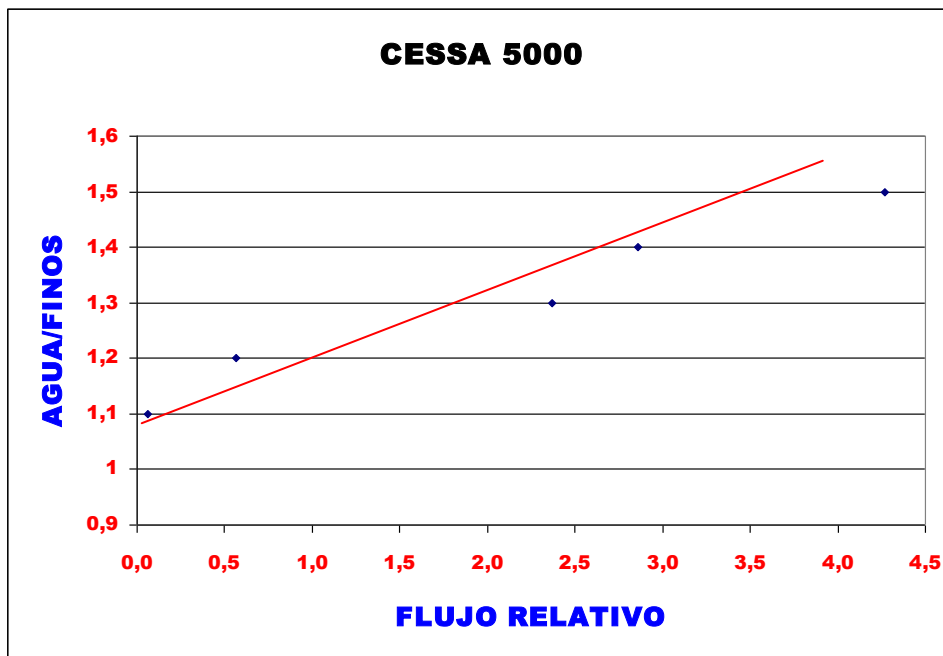


FIGURA 84: Gráfico de Flujo Relativo vrs Agua/Finos

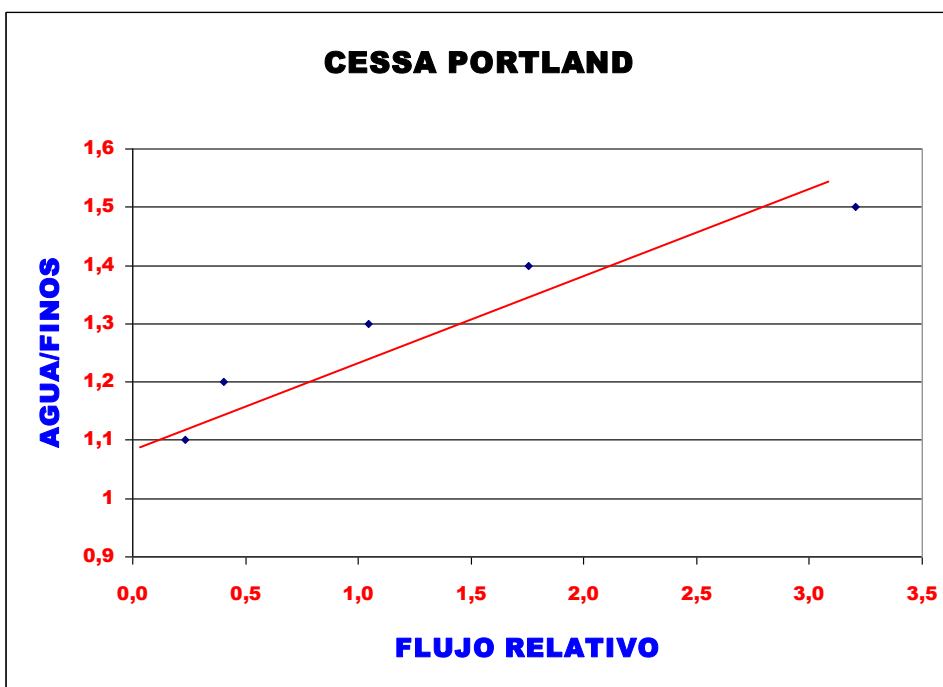


FIGURA 85: Gráfico de Flujo Relativo vrs Agua/Finos

Del procedimiento anterior se determina al cemento mezclado ASTM C 595, como el material cementante para ser utilizado en esta investigación, por presentar mejores características en la consistencia de la pasta, en términos de retención de trabajabilidad aunque gráficamente en el concepto de flujo relativo cero, no exista una diferencia significativa en comparación con el cemento puro ASTM C 150.

La relación agua/finos para flujo cero se define extrapolando hacia el eje Y la línea de tendencia de la Figura 85, la lectura obtenida oscila entre 1.0 y 1.1. La proporción se fija en 1.0, por ser el valor de mayor seguridad.

Proporcionamiento preliminar para la mezcla de CAC

Con los datos obtenidos hasta el momento es posible efectuar un primer proporcionamiento de mezcla que deberá ser ajustado posteriormente.

A pesar de que el EFNARC, sugiere valores abajo del 60% para el volumen de agregado, se ha considerado una cantidad del 62%, apoyados en los resultados del diseño de esqueleto granular (véase la Tabla 28) que proyectan un valor de 36.281 % de vacíos que corresponderían al contenido de pasta; por lo que la implementación de esta proporción racionalizaría la cantidad de cemento.

A continuación se presenta la memoria de calculo para el diseño de mezcla de CAC.

$$\begin{aligned} \text{Concreto} &= \text{Esqueleto Granular} + \text{Pasta} + \text{Aire} \\ 100\% &= 62\% + 36\% + 2\% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Esqueleto Granular} &= \text{Grava} + \text{Arena} \\ 100\% &= 45\% + 55\% \end{aligned}$$

Sí:

El Esqueleto Granular representa un 62% en la mezcla de CAC

Donde:

La Grava representa un 28% de la mezcla de concreto

La Arena representa un 34% de la mezcla de concreto

Sí:

La relación agua/finos es de 1.0 (véase la Figura 83)

Entonces:

$$Pasta = Agua + Finos$$

y

$$Pasta = 36\%$$

$$\frac{Agua}{Finos} = 1.0$$

Entonces :

$$Finos = 18\%$$

$$Agua = 18\%$$

Proporción parcial final:

MATERIAL	PROPORCIÓN
AIRE	2%
GRAVA	28%
ARENA	34%
CEMENTO	18%
AGUA	18%
TOTAL	100%

4.4.2.4 DETERMINACIÓN DE LA RELACIÓN ÓPTIMA AGUA/FINOS Y LA DOSIFICACIÓN DEL SUPERPLASTIFICANTE EN EL MORTERO.

La dosificación del aditivo se hace en una mezcla de mortero, proporcionado a partir de la dosificación de concreto anteriormente definida, que permita evaluar preliminarmente el comportamiento del mismo en el concreto. Como teóricamente ha sido especificado anteriormente las mezclas de CAC, en términos generales poseen mayores cantidades de arena con respecto a la grava por lo que la propuesta de dosificación del aditivo en una matriz de mortero se adjudica a que la arena posee mayor influencia en la asimilación del aditivo, además que permite dosificaciones mas exactas en una mezcladora de paleta.

Procedimiento Experimental

El procedimiento experimental se divide en dos mezclas de mortero definidas a partir del aditivo superplastificante utilizado, la mezcla A corresponde al aditivo SIKA VISCOCRETE 5000 y la mezcla B al aditivo ULTRAFLOW de IMI, ambas mezclas mantienen constantes las características de los materiales restantes.

Los procedimientos utilizados para verificar el comportamiento del aditivo en la mezcla de mortero son el ensayo de fluidez y el ensayo del embudo V, cuyos parámetros deben oscilar entre 24 cm - 26 cm y 7s - 11s respectivamente, el procedimiento puede observarse en la Figura 86.

El embudo V, no es un equipo comúnmente utilizado en El Salvador, por lo que no posee un distribuidor con garantía bajo norma; fue necesario construirlo específicamente para esta investigación utilizando las dimensiones de la Figura 34 de este documento.



FIGURA 86: Ensayo de fluidez y proceso de llenado y apertura del embudo en V.

La dosificación del mortero se calcula a partir del proporcionamiento preliminar para concreto, especificado como sigue: aire 2%, grava 28%, arena 34%, cemento 18% y agua 18%, del cual se extraen los porcentajes únicamente de arena, cemento y agua para luego proceder al mezclado según la especificación de la norma ASTM C 305, (véase la Tabla 33 y 34).

La arena utilizada en la mezcla de mortero es secada al aire, cuarteada y libre de partículas mayores que influyan en el procedimiento de homogenización, el aditivo por su parte es dosificado al final del proceso general de mezclado, demandando un tiempo de revoltura adicional para garantizar su efecto en la matriz de mortero.

Para efectos de esta investigación es importante mencionar que la determinación del superplastificante y el procedimiento de la sección 4.4.2.5 denominado "Ajuste de la mezcla de concreto", se realizaron consecutivamente primero para la mezcla A y posteriormente para la mezcla B, por lo que los parámetros iniciales de la Tabla 34 poseen la ventaja de conocer el antecedente del comportamiento de la mezcla A.

En la Tabla 33 y 34 se muestran los ensayos de mortero con variaciones en la relación agua/finos y dosificación de superplastificantes, en cada ensayo se pretendía obtener parámetros superiores a los propuestos por la Tabla 16 del Capítulo III, el detalle de este proporcionamiento se muestra a continuación.

TABLA 33: Diseño de mortero y dosificación de superplastificante. MEZCLA A (SIKA VISCOCRTE 5000).

Ensayo	1	2	3	4
A/F	1.00	1.05	1.10	1.10
Proporción en Concreto				
Arena (Gravedad específica 2.476)	34.00%	34.00%	34.00%	34.00%
Cemento (Gravedad específica 2.960)	18.00%	17.56%	17.14%	17.14%
Agua	18.00%	18.44%	18.86%	18.86%
Total	70.00%	70.00%	70.00%	70.00%
Proporción en Mortero				
Fórmula utilizada:				
70% ----- 100%				
Porcentaje en concreto ----- X%				
Arena	48.57%	48.57%	48.57%	48.57%
Cemento	25.71%	25.09%	24.49%	24.49%
Agua	25.71%	26.34%	26.94%	26.94%
Total	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
Proporción de la mezcla ensayada				
Fórmula utilizada:				
Proporción de cada material = (Proporción en mortero) X (Gravedad específica del material) X (volumen de la mezcla ensayada)				
Volumen de la mezcla ensayada (l)	1.2	1.25	1.2	1.2
Arena (kg)	1.443	1.503	1.443	1.443
Cemento (kg)	0.913	0.928	0.870	0.728
Agua (l)	0.309	0.329	0.323	0.800
Aditivo				
Dosificación (ml X kg de cemento)	9.0	9.43	9.43	9.60
Proporción (ml)	8.22	8.75	8.20	6.99
Resultados de ensayos				
FLUIDEZ (cm)	20.1	22.5	24.6	24.85
EMBUDO V (s)	25.2	20.87	15	10

TABLA 34: Diseño de mortero y dosificación de superplastificante. MUESTRA B (ULTRA FLOW).

Ensayo	1	2	3
A/F	1.25	1.25	1.25
Proporción en Concreto			
Arena (Gravedad específica 2.476)	40.60%	40.60%	40.60%
Cemento (Gravedad específica 2.960)	17.78%	17.78%	17.78%
Agua	22.22%	22.22%	22.22%
Total	80.60%	80.60%	80.60%
Proporción en Mortero			
Fórmula utilizada: $\frac{80.60\%}{100\%} = \frac{X\%}{100\%}$			
Porcentaje en concreto ----- X%			
Arena	50.37%	50.37%	50.37%
Cemento	22.06%	22.06%	22.06%
Agua	27.57%	27.57%	27.57%
Total	100.00%	100.00%	100.00%
Proporción de la mezcla ensayada			
Fórmula utilizada: $\text{Proporción de cada material} = \frac{(\text{Proporción en mortero}) \times (\text{Gravedad específica del material})}{(\text{volumen de la mezcla ensayada})}$			
Proporción de la mezcla ensayada			
Volumen de la mezcla ensayada (l)	1.1	1.1	1.1
Arena (kg)	1.372	1.372	1.372
Cemento (kg)	0.718	0.718	0.718
Agua (l)	0.303	0.303	0.303
Aditivo			
Dosificación (ml X kg de cemento)	9.0	10.0	9.50
Proporción (ml)	6.46	7.18	6.82
Resultados de ensayos			
FLUIDEZ (cm)	24.0	27.0	25.0
EMBUDO V (s)	16.0	10.0	11.0

De los resultados anteriores para la mezcla A, se obtuvo mejores resultados en el ensayo cuatro con una dosificación de aditivo de 9.60 ml X kg de cemento, y para la mezcla B, el ensayo tres con 9.50 ml X kg de cemento cumplió racionalmente con las expectativas de diseño.

4.4.2.5 AJUSTE EN LA MEZCLA DE CONCRETO

Es necesario que las proporciones de las mezclas de concreto A y B, anteriormente definidas sean experimentadas en mezclas de prueba, para efectuar el último ajuste a través de la evaluación de los parámetros de autocompactabilidad que se mencionan en el trabajo experimental de este Capítulo y definir el procedimiento de dosificación y mezclado mas conveniente para cada mezcla (véase la Tabla 35 y 36).

El ajuste de la proporción en mezclas de concreto fue realizado en el laboratorio de Concretera Salvadoreña S.A. de C.V., utilizando una mezcladora de motor de gasolina con capacidad de una bolsa de cemento; los materiales fueron pesados en una balanza digital con precisión de 0.01 kg, el agua y aditivo fueron dosificados utilizando probetas con diferentes capacidades según el volumen necesario.

Cada una de las proporciones fue sometida a los ensayos de capacidad de relleno y capacidad de paso, utilizando el cono Abrahams y La Caja en L respectivamente, la resistencia a la segregación para el caso específico de la dosificación en el diseño fue determinada únicamente por observación.

El ensayo de fluidez, utilizando el cono Abrams invertido, es una práctica necesaria para verificar la capacidad de relleno de la mezcla, el procedimiento demanda una base rígida no absorbente previamente humedecida y nivelada para medir la extensión de la mezcla, simultáneamente se tomo el tiempo T_{50cm} , que es una medida de fluidez alternativa que depende del mismo ensayo.

El ensayo de Caja en L, somete la mezcla de CAC a una situación de reposo que permite la segregación en caso de existir y a una obstrucción por parte de un sistema de barras de acero estratégicamente colocado, permitiendo la verificación de la capacidad de paso de la mezcla; para el caso de esta investigación, la diferencia de niveles que se obtienen a través del ensayo, fue un parámetro medido siempre posteriormente al resultado satisfactorio del ensayo de fluidez, ya que la capacidad de cumplimiento de la Caja L, se consideró de mayor rigor.

En el caso del equipo de Caja en L, no existe un distribuidor local con garantía bajo norma, por lo fue necesario construirla específicamente para esta investigación utilizando las dimensiones de la Figura 26 de este documento.

En la Figura 87 se muestra el procedimiento de mezclado y en la Figura 88, los ensayos realizados durante el proporcionamiento de la mezcla de CAC.



FIGURA 87: Proceso de mezclado en concreteira de sitio, para CAC.



FIGURA 88: Ensayo de Cono Abrahams y Caja en L, para CAC.

TABLA 35: Ajustes en Mezclas de Concreto. Mezcla A

Proporción General de Concreto										
Ensayo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Aire	2,00%	2,00%	2,00%	2,00%	2,00%	2,00%	2,00%	2,00%	2,00%	2,00%
Esqueleto Granular	62,00%	62,00%	62,00%	62,00%	58,00%	58,00%	58,00%	58,00%	58,00%	58,00%
Pasta	36,00%	36,00%	36,00%	36,00%	40,00%	40,00%	40,00%	40,00%	40,00%	40,00%
TOTAL	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
Proporción de Esqueleto Granular										
% Grava	45%	45%	45%	45%	42%	42%	38%	30%	30%	30%
% Arena	55%	55%	55%	55%	58%	58%	62%	70%	70%	70%
Proporción Específica de Concreto										
A/F	1,10	1,3	1,2	1,25	1,15	1,2	1,25	1,3	1,3	1,25
Aire	2,00%	2,00%	2,00%	2,00%	2,00%	2,00%	2,00%	2,00%	2,00%	2,00%
Grava	28,00%	28,00%	28,00%	28,00%	24,36%	24,36%	22,04%	17,40%	17,40%	17,40%
Arena	34,00%	34,00%	34,00%	34,00%	33,64%	33,64%	35,96%	40,60%	40,60%	40,60%
Cemento	17,14%	15,65%	16,36%	16,00%	18,60%	18,18%	17,78%	17,39%	17,39%	17,78%
Agua	18,86%	20,35%	19,64%	20,00%	21,40%	21,82%	22,22%	22,61%	22,61%	22,22%
TOTAL	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
Aditivo (ml X kg de cemento)	9,6	9,6	9,43	9,6	9,43	9,43	9,43	10	11	10,5
Resultado de Ensayos										
T_{50cm} (s)	6	7	12	8	10	9	9	3	4	5
Extensión (cm)	61	66,5	57,5	60	62,5	63	63	65	69	67
Caja L	0,64	0,85	-	-	-	-	-	1	1	1
Tiempo de Mezclado	Agua + Aditivo + Arena = Mezclado 1 min + Grava = Mezclado 5 min									

TABLA 36: Ajustes en Mezclas de Concreto. Mezcla B

Proporción General de Concreto				Proporción de Esqueleto Granular			
Aire	2 %	% Grava	30 %	Esqueleto Granular	58 %	% Arena	70 %
Pasta	40 %						
Proporción Específica de Concreto							
ENSAYO	1	2	3	4	5	6	7
A/F	1,25	1,25	1,2	1,15	1,2	1,15	1,3
Aire	2,00%	2,00%	2,00%	2,00%	2,00%	2,00%	2,00%
Grava	17,40%	17,40%	17,40%	17,40%	17,40%	17,40%	17,40%
Arena	40,60%	40,60%	40,60%	40,60%	40,60%	40,60%	40,60%
Cemento	17,78%	17,78%	18,18%	18,60%	18,18%	18,60%	17,39%
Agua	22,22%	22,22%	21,82%	21,40%	21,82%	21,40%	22,61%
TOTAL	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
Aditivo (ml x kg)	9.50	9.50	9,50	9,00	9,00	7,00	9,00
Resultado de Ensayos							
Remezclado	-	-	-	-	-	#1	#2
T _{50cm} (s)	5	4	4	3	5	3	3
Extensión (cm)	66,5	67,5	73	68	70,5	65-67	65
Caja L	0.90	0.90	1	1	1	-	-
Tiempo de Mezclado	(problemas con la mezcladora)	(Repetición de ensayo #1) 10 min de mezclado SIN REPOSO	6 min de mezclado SIN REPOSO	6 min de mezclado reposo de 15 min y remezclado 5 min	6 min de mezclado SIN REPOSO	6 min, 15 min reposo 1 min remezclado	8,5 min de mezclado 3 min de reposo
Observaciones	Mezclado	-	Mezclado	-	Mezclado	-	Mezclado
	Segregación	Leve	Segregación	Leve	Segregación	Ninguna	Segregación
	Lechada blanca	Alta	Lechada blanca	Alta	Lechada blanca	Leve	Lechada blanca
				Mezclado	-	Mezclado	#1
				Segregación	Ninguna	Segregación	Baja
				Lechada blanca	Alta	Lechada blanca	Muy alta
				Mezclado	-	Mezclado	#2
				Segregación	Ninguna	Segregación	Ninguna
				Lechada blanca	Alta	Lechada blanca	Muy baja
				Mezclado	-	Mezclado	
				Segregación	Ninguna	Segregación	
				Lechada blanca	Alta	Lechada blanca	Alta

En la mezcla A el ensayo N° 10 representa la mezcla óptima y en la mezcla B el ensayo N° 4, dichas mezclas serán sometidas a una reproducción en serie para valorar la consistencia del diseño y el grado de resistencia, que en este caso particular por las cantidades elevadas de cemento no se considera un parámetro difícil de obtener, por el contrario la dificultad radica en establecer una metodología para obtener resistencias controladas.

Durante el procedimiento de ajuste se determinó que el tiempo de mezclado se especificara como sigue:

Mezcla A:

Agua + Cemento + Aditivo + Arena = Mezclado 1 min + Grava = Mezclado 5 min.

Mezcla B:

Agua + Cemento + Aditivo + Arena + Grava = Mezclado 6 min + Reposo entre 5-15 min + Remezclado = 5 min.

4.5 REPRODUCCIÓN DE LAS MEZCLAS ÓPTIMAS Y CONTROL DE CALIDAD DEL CONCRETO AUTOCOMPACABLE EN ESTADO FRESCO Y ENDURECIDO

Una vez obtenidos los ajustes en las proporciones, se realiza la reproducción de las mezclas de concreto en varias bachadas de prueba, que proporcionen resultados suficientes para evaluar el comportamiento continuo de las mismas; tal evaluación solo es posible si se realiza un estudio que establezca parámetros tanto en estado fresco como endurecido para valorar el comportamiento de la proporción diseñada de CAC.

4.5.1 CONCRETO FRESCO

4.5.1.1 DOSIFICACIÓN Y MEZCLADO DEL CONCRETO

Para la mezcla A y la mezcla B se incorporaron los componentes a la mezcladora como quedó determinado en el diseño de mezcla, a través de los diferentes ajustes de cada proporción de mezcla respectiva. Los resultados de tiempo de mezclado para cada bachada de prueba son mostrados en las Tablas 37 y 38.

4.5.1.2 ENSAYOS PARA LA DETERMINACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE AUTOCOMPACTABILIDAD

En las mezclas de concreto en estado fresco se realizaron los ensayos para la evaluación de las características de autocompactabilidad, al igual que en la determinación de las proporciones, las cuales son capacidad de paso, capacidad de relleno y resistencia a la segregación. Para ello se utilizaron los métodos de ensayo para cada propiedad sugeridos por el EFNARC, descritos en el Capítulo III de este documento, los cuales corresponden al Flujo de asentamiento y Flujo de asentamiento $T_{50\text{cm}}$; Caja en L y ensayo de Estabilidad GTM.

En ambas mezclas se estableció una prueba para cada bachada, verificando el cumplimiento de cada propiedad, excepto para el ensayo de estabilidad GTM, para el cual se estableció un promedio de tres ensayos para cada mezcla. (véase las Figuras 89, 90, 91 Y 92)

Los resultados obtenidos se muestran a continuación en las Tablas 37 y 38; y el tamiz GTM en las Tablas 39 y 40.

TABLA 37: Resultados de ensayos de las características del CAC en estado fresco, mezcla A.

Resultado de Ensayos en Concreto Fresco Mezcla A												
Bachada		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Mezclado		6 min sin reposo	6 min sin reposo	6 min reposo 15 min y re-mezclado 5 min	6 min reposo 15 min y re-mezclado 5 min	6 min reposo 15 min y re-mezclado 5 min	6 min reposo 15 min y re-mezclado 5 min	6 min reposo 15 min y re-mezclado 5 min	6 min sin reposo	6 min sin reposo	6 min sin reposo	6 min sin reposo
Hora del mezclado		05:30 p.m.	07:00 p.m.	06:45 p.m.	08:00 p.m.	08:30 p.m.	09:00 p.m.	06:45 p.m.	07:00 p.m.	06:30 p.m.	07:45 p.m.	08:30 p.m.
Propiedad	Ensayo											
Capacidad de relleno	Flujo de asentamiento (cm)	73	73	70	72	70	70	65	68	73	73	73
	Flujo de asentamiento T _{50cm} (s)	2	2	2	2	2	2	3	3	2	2	2
Capacidad de paso	Caja en "L"	1	1	0.95	1	1	1	0.86	0.93	1	1	1
Temperatura del concreto	ASTM C 1064	26 °C	25 °C	25 °C	25 °C	25 °C	25 °C	26 °C	26 °C	25 °C	25 °C	25 °C

TABLA 38: Resultados de ensayos de las características del CAC en estado fresco, mezcla B.

Resultado de Ensayos en Concreto Fresco Mezcla B									
Bachada		1	2	3	4	5	6	7	8
Mezclado		6 min reposo 10 min y remezclado 5 min	6 min reposo 10 min y remezclado 5 min	6 min reposo 10 min y remezclado 5 min	6 min reposo 5 min y remezclado 5 min	6 min reposo 5 min y remezclado 5 min	6 min reposo 5 min y remezclado 5 min	6 min sin reposo	6 min sin reposo
Hora de mezclado		01:30 p.m.	03:15 p.m.	06:30 p.m.	11:30 a.m.	12:45 m	01:15 p.m.	03:15 p.m.	05:45 a.m.
Propiedad	Ensayo								
Capacidad de relleno	Flujo de asentamiento (cm)	70	65	70	78	71.5	76	70	70
	Flujo de asentamiento T _{50cm} (s)	2	3	2	1	2	2	2	2
Capacidad de paso	Caja en "L"	1	0.81	1	1	1	1	1	1
Temperatura del concreto	ASTM C 1064	27.6 °C	27.5 °C	27.0 °C	26.5 °C	27 °C	27.5 °C	27.5 °C	27.0 °C



FIGURA 89: Fluidez del CAC en la mezcla A.



FIGURA 90: Fluidez del CAC en la mezcla B.



FIGURA 91: Ensayo de caja en L que se realizó al CAC.

TABLA 39: Resultados de ensayos del tamiz GTM, mezcla A.

ENSAYO DE ESTABILIDAD DEL TAMIZ GTM MEZCLA "A"			
DATOS			
FECHA	19/03/2005	19/03/2005	19/03/2005
ENSAYO	1	2	3
EXTENSIÓN (cm)	65	68	70
HORA INICIO	01:22 p.m.	03:10 p.m.	05:34 p.m.
Peso Fondo #1 (kg)	494	494	494
Peso Fondo #2 (kg)	162	162	162
PASA MALLA N ° 4 #1 (kg)	651	736	651
PASA MALLA N ° 4 #2 (kg)	501	589	621
Peso Recipiente lleno (kg)	5237	5989	4897
Peso Recipiente vacío (kg)	867	867	867
RELACIÓN DE SEGREGACIÓN	11.35%	13.06%	15.29%

TABLA 40: Resultados de ensayos del tamiz GTM, mezcla B.

ENSAYO DE ESTABILIDAD DEL TAMIZ GTM MEZCLA "B"			
DATOS			
FECHA	19/03/2005	19/03/2005	19/03/2005
ENSAYO	1	2	3
EXTENSIÓN (cm)	76	75	77
HORA INICIO	02:00 p.m.	04:05 p.m.	06:15 p.m.
Peso Fondo #1 (kg)	494	494	494
Peso Fondo #2 (kg)	162	162	162
PASA MALLA N ° 4 #1 (kg)	816	715	678
PASA MALLA N ° 4 #2 (kg)	319	610	489
Peso Recipiente lleno #1 (kg)	3733	4998	3968
Peso Recipiente vacío #2 (kg)	892	867	867
RELACIÓN DE SEGREGACIÓN	16.86%	16.19%	16.48%



FIGURA 92: Sucesión de pasos en el ensayo de estabilidad del Tamiz GTM que se realizó al CAC.

4.5.1.3 ENSAYOS DE CONTENIDO DE AIRE, TEMPERATURA, PESO UNITARIO Y FRAGUADO DEL CONCRETO

Se realizaron ensayos complementarios para la evaluación del concreto en estado fresco, los cuales sirvieron de parámetros importantes para valorar el comportamiento del CAC frente a estas propiedades; las cuales corresponden al contenido de aire, temperatura, peso unitario y fraguado del concreto, cuyos métodos están especificados en las normas ASTM, con la variante que no se utilizó ningún tipo de vibrado requerido en la especificación para estos ensayos, por conservar las características de autocompactación del concreto.

CONTENIDO DE AIRE

Para el contenido de aire se utilizó el método “Contenido de Aire en una Mezcla de Concreto Fresco por el método de Presión” (ASTM C 231) con medidor tipo B . El medidor utilizado tiene un factor de corrección por agregado de 0.08 %, y calibrado para que la lectura de aire sea tomada directamente cuando se aplica la carga predeterminada; es decir, que la presión aplicada comprime el aire dentro de la muestra de concreto, incluyendo al que se le encuentra en los poros del agregado. (véase la Figura 93)

Para este ensayo se tomaron tres muestras de prueba para cada una de las mezclas. Los resultados de las lecturas se muestran en la Tabla 41.

TABLA 41: Resultados contenido de aire del CAC.

CONTENIDO DE AIRE DEL CAC						
MEZCLA	A			B		
ENSAYO	1	2	3	1	2	3
Contenido de aire (%)	3.8	4.2	3.4	2	2	1.8



FIGURA 93: Equipo de presión utilizado en el ensayo para la determinación del contenido de aire del CAC.

TEMPERATURA

En el procedimiento experimental se determinó la temperatura de acuerdo a la norma ASTM C 1064, para el cual se utilizó un medidor electrónico de pantalla con precisión de 0.1°C , y fueron tomadas las temperaturas en cada bachada de prueba introduciendo el termómetro un tiempo de aproximadamente 2 minutos en concreto recién mezclado. Las lecturas se presentan en las Tablas 37 y 38.

PESO UNITARIO

El peso unitario de las mezclas de concreto fueron determinadas de acuerdo a la norma ASTM C 138.

Para el ensayo fueron tomadas tres muestras de prueba tanto para la mezcla A como para la mezcla B (véase la Figura 94); los resultados son mostrados en la Tabla 42.

TABLA 42: Resultados del ensayo de peso unitario al CAC.

PESO UNITARIO DEL CAC						
PESO DEL MOLDE =		5.336 Kg				
VOLUMEN DEL MOLDE =		2757.81 cm ³				
MEZCLA	A			B		
ENSAYO	1	2	3	1	2	3
Peso del concreto + molde (Kg)	11.658	11.608	11.622	11.53	11.45	11.5
Peso del concreto (Kg)	6.322	6.272	6.286	6.194	6.114	6.164
Peso unitario (Kg / m³)	2292.399	2274.268	2279.345	2245.985	2216.977	2235.107



FIGURA 94: Equipo utilizado en el ensayo del peso unitario del CAC.

FRAGUADO DEL CONCRETO

En cuanto al fraguado del concreto se utilizó la norma ASTM C 403 “Tiempo de Fraguado de mezclas de Concreto por Resistencia a la Penetración”; como el ensayo lo especifica se utilizaron agujas de penetración de diferentes áreas de contacto; las cuales son introducidas en el concreto a medida este va fraguando en el tiempo, y se toma la lectura de carga, con lo que se obtiene el esfuerzo de penetración. La especificación sugiere una lectura de fraguado inicial a los 500 PSI y el fraguado final a los 4000 PSI, los cuales se establecen en la curva Esfuerzo - Tiempo, a partir de los datos tomados a lo largo del ensayo.

De esta forma se tomo un promedio de tres muestras de prueba para la mezcla A y B, con 8 a 9 lecturas por ensayo (véase la Figura 95), dependiendo del comportamiento de cada mezcla. Los resultados se muestran en las Tablas 43, 44, 45, 46, 47 y 48.



FIGURA 95: Equipo y prueba realizada en el ensayo de fraguado del CAC.

TABLA 43: Resultados del ensayo 1 de fraguado al CAC, mezcla A.

ENSAYO N ° 1 DE FRAGUADO MEZCLA "A"					
# LECTURA	AREA AGUJA (in ²)	CARGA (lb)	HORA	HORA (min)	ESFUERZO (lb/in ²)
0	0	0	12:15 p.m.	0	0
1	1/4	50	02:55 p.m.	160	200.00
2	1/4	112	03:54 p.m.	219	448.00
3	1/4	140	04:20 p.m.	245	560.00
4	1/10	62	04:51 p.m.	276	620.00
5	1/10	90	05:22 p.m.	307	900.00
6	1/10	130	05:52 p.m.	337	1,300.00
7	1/20	102	06:21 p.m.	366	2,040.00
8	1/40	56	06:53 p.m.	398	2,240.00
9	1/40	77	07:21 p.m.	426	3,080.00
10	1/40	82	07:35 p.m.	440	3,280.00
11	1/40	100	07:51 p.m.	456	4,000.00

TABLA 44: Resultados del ensayo 2 de fraguado al CAC, mezcla A.

ENSAYO N° 2 DE FRAGUADO					
MEZCLA "A"					
# LECTURA	AREA AGUJA (in²)	CARGA (lb)	HORA	HORA (min)	ESFUERZO (lb/in²)
0	0	0	09:48 a.m.	0	0
1	1/2	154	01:55 p.m.	247	308.00
2	1/10	38	02:25 p.m.	277	380.00
3	1/10	60	02:48 p.m.	300	600.00
4	1/10	112	03:18 p.m.	330	1,120.00
5	1/20	72	03:48 p.m.	360	1,440.00
6	1/20	134	04:18 p.m.	390	2,680.00
7	1/20	138	04:33 p.m.	405	2,760.00
8	1/20	194	04:50 p.m.	422	3,880.00
9	1/40	102	05:03 p.m.	435	4,080.00
10	1/40	120	05:18 p.m.	450	4,800.00

TABLA 45: Resultados del ensayo 3 de fraguado al CAC, mezcla A.

ENSAYO N ° 3 DE FRAGUADO					
MEZCLA "A"					
# LECTURA	AREA AGUJA (in²)	CARGA (lb)	HORA	HORA (min)	ESFUERZO (lb/in²)
0	0	0	10:29 a.m.	0	0
1	1/2	70	01:49 p.m.	200	140.00
2	1/2	116	02:19 p.m.	230	232.00
3	1/10	44	02:49 p.m.	260	440.00
4	1/10	46	03:19 p.m.	290	460.00
5	1/20	46	03:49 p.m.	320	920.00
6	1/20	78	04:19 p.m.	350	1,560.00
7	1/20	128	04:49 p.m.	380	2,560.00
8	1/40	84	05:04 p.m.	395	3,360.00
9	1/40	108	05:19 p.m.	410	4,320.00
10	1/40	128	05:34 p.m.	425	5,120.00

TABLA 46: Resultados del ensayo 1 de fraguado al CAC, mezcla B.

ENSAYO N ° 1 DE FRAGUADO MEZCLA "B"					
# LECTURA	AREA AGUJA (in²)	CARGA (lb)	HORA	HORA (min)	ESFUERZO (lb/in²)
0	0	0	11:45 a.m.	0	0
1	1/2	72	04:05 p.m.	260	144.00
2	1/4	64	04:35 p.m.	290	256.00
3	1/10	42	05:05 p.m.	320	420.00
4	1/20	42	05:35 p.m.	350	840.00
5	1/20	80	06:05 p.m.	380	1,600.00
6	1/40	48	06:35 p.m.	410	1,920.00
7	1/40	82	07:05 p.m.	440	3,280.00
8	1/40	106	07:20 p.m.	455	4,240.00

TABLA 47: Resultados del ensayo 2 de fraguado al CAC, mezcla B.

ENSAYO N ° 2 DE FRAGUADO MEZCLA "B"					
# LECTURA	AREA AGUJA (in²)	CARGA (lb)	HORA	HORA (min)	ESFUERZO (lb/in²)
0	0	0	10:50 a.m.	0	0
1	1/2	78	03:08 p.m.	258	156.00
2	1/4	134	03:50 p.m.	300	536.00
3	1/10	82	04:20 p.m.	330	820.00
4	1/20	74	04:50 p.m.	360	1,480.00
5	1/40	56	05:20 p.m.	390	2,240.00
6	1/40	90	05:35 p.m.	405	3,600.00
7	1/40	106	05:50 p.m.	420	4,240.00
8	1/40	148	06:05 p.m.	435	5,920.00

TABLA 48: Resultados del ensayo 3 de fraguado al CAC, mezcla B.

ENSAYO N ° 3 DE FRAGUADO MEZCLA "B"					
# LECTURA	AREA AGUJA (in ²)	CARGA (lb)	HORA	HORA (min)	ESFUERZO (lb/in ²)
0	0	0	10:29 a.m.	0	0
1	1/2	18	01:49 p.m.	200	36.00
2	1/2	22	02:49 p.m.	260	44.00
3	1/2	50	03:19 p.m.	290	100.00
4	1/4	118	03:49 p.m.	320	472.00
5	1/10	98	04:19 p.m.	350	980.00
6	1/20	70	04:49 p.m.	380	1,400.00
7	1/40	62	05:04 p.m.	395	2,480.00
8	1/40	70	05:19 p.m.	410	2,800.00
9	1/40	91	05:34 p.m.	425	3,640.00
10	1/40	103	05:49 p.m.	440	4,120.00

4.5.2 CONCRETO ENDURECIDO

Para analizar las propiedades del CAC en estado endurecido fueron realizados ensayos de resistencia a la compresión y resistencia de tensión por flexión, en cumplimiento con las especificaciones de las normas ASTM.

4.5.2.1 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

Para los especímenes de prueba a compresión se utilizaron moldes de 15 cm de diámetro por 30 cm de altura (ASTM C 192), los cuales fueron llenados sin utilizar ningún método de vibrado (véase las Figuras 96 y 97), de tal manera que el concreto fue vertido directamente hasta llenar su contenido, debido a que sus características de autocompactación no lo requerían.



FIGURA 96: Vertido del concreto para elaborar los especímenes de prueba a compresión del CAC.



FIGURA 97: Especímenes de prueba moldeados.

En total se realizaron 50 especímenes para cada mezcla a edades de prueba de 3 , 7, 14, 28 y 56 días, bajo la especificación de la norma ASTM C 39, para la construcción de la curva edad - resistencia, la cual nos definirá el comportamiento del concreto en el tiempo; de tal manera que cada punto representa el promedio de 3 cilindros a los 3 días, 5 a los 7 y 14 días, 30 a los 28 días y 5 a los 56 días. Dichos especímenes se realizaron a partir de diferentes bachadas de concreto; las cuales fueron once bachadas para la mezcla A y ocho para la mezcla B.

Todos los cilindros fueron desmoldados a las 24 horas después de haber sido colados, y posteriormente fueron inmersos en agua (véase la Figura 98); y se dejaron en pilas de curado hasta cumplir la edad establecida para su ensayo.



FIGURA 98: Pila de curado utilizada para los especímenes de prueba.

El cabeceo se realizó bajo la norma ASTM C 1231, con el uso de placas de hule neopreno que cumplen con las características de espesor y dureza especificadas y son confinados en moldes metálicos e interpuestas entre las cabezas del espécimen y las placas metálicas de la máquina de ensayo. (véase la Figura 99).



FIGURA 99: Ensayo a compresión realizado al CAC, y cabeceo.

Los resultados de las rupturas para cada espécimen de las mezclas A y B son mostrados en las Tablas 49 y 50.

TABLA 49: Resultados del ensayo de resistencia a la compresión al CAC, mezcla A.

Mezcla: A					Fecha de colado: 8 / 01 / 05 al 12 / 01 / 05				
Aditivo: Sika Viscocrete 5000									
Proporción mezcla:									
Relación A/F = 1.25					Cemento = 17.78 %				
Agregado grueso = 17.4 %					Agua = 22.22 %				
Agregado fino = 40.60 %					Aditivo = 10.5 ml x kg de cemento				
CILINDRO	EDAD	ALTURA	DIAMETRO	AREA	VOLUMEN	PESO	PESO UNITARIO	ESFUERZO	CARGA
Nº	(Días)	(cm)	(cm)	(cm ²)	(cm ³)	(kg)	(Kg / m ³)	(Kg / cm ²)	(Kg)
37	3	30.5	15.15	180.267	5498.14	12.16	2210.75	211.50	38370.00
43	3	30.5	15.3	183.854	5607.56	12.31	2195.25	200.90	36460.00
49	3	30.5	15.3	183.854	5607.56	12.51	2230.92	212.00	38450.00
Promedio 3 días =								208.13	
Desviación Estándar =								6.27	
9	7	30.50	15.10	179.079	5461.91	12.32	2255.62	277.20	49630.00
17	7	30.50	15.10	179.079	5461.91	12.40	2270.27	286.20	51260.00
25	7	30.50	15.10	179.079	5461.91	12.01	2198.86	300.50	53810.00
38	7	30.20	15.20	181.459	5480.06	11.98	2186.11	302.20	54120.00
50	7	30.20	15.20	181.459	5480.06	12.03	2195.23	306.90	54950.00
Promedio 7 días =								294.60	
Desviación Estándar =								12.42	
1	14	30.50	15.25	182.655	5570.96	12.35	2216.85	379.70	67990.00
10	14	30.50	15.15	180.267	5498.14	12.37	2249.85	340.90	61050.00
18	14	30.50	15.15	180.267	5498.14	12.33	2242.58	348.10	62340.00
26	14	30.45	15.20	181.459	5525.42	12.09	2188.07	327.50	58650.00
31	14	30.50	15.20	181.459	5534.49	12.11	2188.10	348.90	62480.00
Promedio 14 días =								349.02	
Desviación Estándar =								19.18	
2	28	30.60	15.15	180.267	5516.17	12.33	2235.25	431.00	78200.00
3	28	30.45	15.20	181.459	5525.42	12.34	2233.31	416.70	75610.00
4	28	30.50	15.10	179.079	5461.91	12.32	2255.62	443.10	80400.00
6	28	30.60	15.20	181.459	5552.64	12.21	2198.95	420.90	76370.00
7	28	30.45	15.20	181.459	5525.42	12.35	2235.12	444.90	80730.00
8	28	30.40	15.25	182.655	5552.70	12.62	2272.77	417.80	75810.00
12	28	30.35	15.35	185.058	5616.51	12.56	2236.27	399.80	72550.00
13	28	30.40	15.20	181.459	5516.35	12.39	2246.05	410.10	74410.00
14	28	30.40	15.15	180.267	5480.12	12.23	2231.70	407.20	73880.00
15	28	30.35	15.30	183.854	5579.98	12.51	2241.94	392.70	71260.00
16	28	30.50	15.10	179.079	5461.91	12.20	2233.65	405.70	73620.00
20	28	30.40	15.15	180.267	5480.12	12.06	2200.68	380.20	69000.00
21	28	30.40	15.15	180.267	5480.12	12.04	2197.03	414.10	75140.00
22	28	30.50	15.15	180.267	5498.14	12.14	2208.02	438.70	79600.00
23	28	30.50	15.20	181.459	5534.49	12.23	2209.78	445.60	80860.00
24	28	30.40	15.15	180.267	5480.12	12.34	2251.78	442.00	80200.00
27	28	30.50	15.25	182.655	5570.96	12.04	2161.21	428.00	76650.00
28	28	30.50	15.20	181.459	5534.49	12.05	2177.25	408.70	73190.00
29	28	30.50	15.15	180.267	5498.14	12.08	2197.11	439.50	78710.00
30	28	30.30	15.20	181.459	5498.20	12.11	2202.54	417.10	74690.00
33	28	30.25	15.10	179.079	5417.14	12.08	2229.96	413.70	74090.00
34	28	30.30	15.40	186.265	5643.84	12.28	2175.82	434.90	77880.00
35	28	30.35	15.20	181.459	5507.28	12.12	2200.73	416.50	74590.00
36	28	30.40	15.20	181.459	5516.35	12.25	2220.67	395.70	70870.00
41	28	30.20	15.10	179.079	5408.19	12.25	2265.08	436.00	78080.00
42	28	30.30	15.10	179.079	5426.10	12.14	2237.34	408.30	73130.00
45	28	30.65	15.00	176.715	5416.31	12.15	2243.22	418.00	74850.00
46	28	30.70	15.25	182.655	5607.50	12.28	2189.93	414.50	74220.00
47	28	30.55	15.15	180.267	5507.16	12.27	2228.01	434.00	77710.00
48	28	30.70	15.10	179.079	5497.73	12.32	2240.93	430.20	77050.00
Promedio 28 días =								420.19	
Desviación Estándar =								16.80	
5	56	30.5	15.3	183.85	5607.56	12.27	2188.12	485	90490.00
11	56	30.45	15.1	179.08	5452.96	12.43	2279.50	476.9	86530.00
19	56	30.4	15.2	181.46	5516.35	12.48	2262.37	495	89880.00
32	56	30.35	15.1	179.08	5435.05	11.92	2193.17	464.2	84240.00
39	56	30.2	15.15	180.27	5444.06	12.03	2209.75	470.1	85300.00
44	56	30.4	15.3	183.85	5589.17	12.32	2204.26	508.55	93500.00
Promedio 56 días =								483.29	
Desviación Estándar =								16.48	

TABLA 50: Resultados del ensayo de resistencia a la compresión al CAC, mezcla B.

Mezcla: B				Fecha de colado: 23 / 01 / 05 al 30 / 01 / 05					
Aditivo: Ultraflow IMI									
Proporción mezcla:									
Relación A/F = 1.15				Cemento = 18.60 %					
Agregado grueso = 17.4 %				Agua = 21.40 %					
Agregado fino = 40.60 %				Aditivo = 9.0 ml x kg de cemento					
CILINDRO	EDAD	ALTURA	DIAMETRO	AREA	VOLUMEN	PESO	PESO UNITARIO	ESFUERZO	CARGA
Nº	(Días)	(cm)	(cm)	(cm ²)	(cm ³)	(kg)	(Kg / m ³)	(Kg / cm ²)	(Kg)
19	3	30.5	15.00	176.715	5389.81	12.19	2261.68	341.5	61150.00
31	3	30.3	15.05	177.895	5390.22	12.14	2252.23	329.6	59020.00
43	3	30.55	15.1	179.079	5470.87	12.35	2257.41	340.4	60950.00
Promedio 3 días =								337.17	
Desviación Estándar =								6.58	
20	7	30.50	15.25	182.655	5570.96	12.33	2213.26	429.00	77840.00
25	7	30.20	15.10	179.079	5408.19	12.44	2300.22	415.00	75310.00
32	7	30.50	15.30	183.854	5607.56	12.55	2238.05	422.20	76610.00
37	7	30.25	15.10	179.079	5417.14	12.31	2272.42	415.20	75340.00
44	7	30.10	15.15	180.267	5426.04	12.26	2259.48	440.10	79860.00
Promedio 7 días =								424.30	
Desviación Estándar =								10.55	
1	14	30.65	15.05	177.895	5452.48	12.22	2241.18	470.80	85427.00
7	14	30.60	15.30	183.854	5625.94	12.28	2182.75	495.70	89945.00
13	14	30.35	15.25	182.655	5543.57	12.10	2182.71	450.10	81671.00
21	14	30.30	15.10	179.079	5426.10	12.37	2279.72	501.00	90830.00
26	14	30.25	15.20	181.459	5489.13	12.29	2238.97	467.00	84750.00
38	14	30.35	15.15	180.267	5471.10	12.43	2271.94	448.50	81390.00
49	14	30.30	15.20	181.459	5498.20	12.18	2215.27	504.80	91590.00
Promedio 14 días =								476.84	
Desviación Estándar =								23.71	
2	28	30.45	15.10	179.079	5452.96	12.17	2231.82	507.50	92086.00
3	28	30.40	15.35	185.058	5625.76	12.67	2251.25	505.20	91669.00
4	28	30.50	15.30	183.854	5607.56	12.79	2280.85	506.90	91977.00
5	28	30.50	15.10	179.079	5461.91	12.37	2263.86	507.50	92086.00
8	28	30.50	15.15	180.267	5498.14	12.00	2181.65	502.50	91179.00
9	28	30.50	15.15	180.267	5498.14	12.03	2187.10	519.90	94336.00
10	28	30.25	15.30	183.854	5561.59	12.34	2218.79	509.60	92467.00
11	28	30.35	15.10	179.079	5435.05	12.06	2218.93	509.80	92503.00
12	28	30.45	15.30	183.854	5598.36	12.47	2226.54	521.50	94626.00
14	28	30.30	15.15	180.267	5462.09	12.19	2231.75	505.10	91650.00
15	28	30.35	15.30	183.854	5579.98	12.49	2238.36	507.60	92104.00
16	28	30.40	15.10	179.079	5444.00	12.42	2280.49	498.60	90471.00
17	28	30.35	15.10	179.079	5435.05	12.48	2296.21	495.50	89908.00
22	28	30.40	15.10	179.079	5444.00	12.44	2285.08	553.70	100500.00
23	28	30.50	15.10	179.079	5461.91	12.47	2283.08	564.40	102400.00
27	28	30.40	15.10	179.079	5444.00	12.30	2259.37	537.80	97580.00
28	28	30.35	15.10	179.079	5435.05	12.40	2281.49	577.20	104700.00
29	28	30.35	15.10	179.079	5435.05	12.39	2279.65	572.50	103900.00
33	28	30.40	15.15	180.267	5480.12	12.31	2246.30	533.20	96750.00
34	28	30.45	15.10	179.079	5452.96	12.38	2270.33	538.90	97780.00
35	28	30.40	15.25	182.655	5552.70	12.68	2283.57	528.60	95920.00
36	28	30.30	15.15	180.267	5462.09	12.24	2240.90	538.90	97780.00
39	28	30.50	15.20	181.459	5534.49	12.44	2247.72	517.10	93830.00
40	28	30.35	15.10	179.079	5435.05	12.30	2263.09	546.90	99240.00
41	28	30.35	15.10	179.079	5435.05	12.35	2272.29	515.80	93600.00
45	28	30.15	15.15	180.267	5435.05	12.25	2253.89	568.50	103200.00
46	28	30.30	15.10	179.079	5426.10	12.33	2272.35	582.40	105700.00
47	28	30.35	15.10	179.079	5435.05	12.33	2268.61	557.10	101100.00
48	28	30.40	15.10	179.079	5444.00	12.48	2292.43	572.10	103800.00
50	28	30.35	15.15	180.267	5471.10	12.26	2240.86	554.40	100600.00
Promedio 28 días =								531.89	
Desviación Estándar =								26.97	
6	56	30.05	15.15	180.267	5417.02	12.46	2300.16	570.5	103517.00
18	56	30.35	15.15	180.267	5471.10	12.48	2281.08	588.2	106700.00
24	56	29.5	15.2	181.459	5353.04	12.388	2314.20	600.2	108500.00
30	56	29.5	15.2	181.459	5353.04	12.342	2305.61	608.5	110000.00
42	56	30.30	15.10	179.079	5426.10	12.23	2253.74	550.10	99816.00
Promedio 56 días =								583.5	
Desviación Estándar =								23.508	

4.5.2.2 RESISTENCIA A LA TENSIÓN POR FLEXIÓN

Para los ensayos de flexión se utilizaron moldes de vigueta de 60 cm x 15 cm x 15 cm (ASTM C 293), las cuales fueron llenadas utilizando el mismo procedimiento de los cilindros. (véase la Figura 100)



FIGURA 100: Muestras para los especímenes de prueba a flexión del CAC.

En total se realizaron seis especímenes prismáticos o viguetas para cada mezcla, distribuidas en edades de prueba a los 7 y 28 días; para llevar a cabo la prueba de tensión por flexión, dichas viguetas fueron ensayadas con dos cargas concentradas iguales aplicadas en los tercios del claro (ASTM C 78). El ensayo nos proporcionará el esfuerzo de tensión máxima o Módulo de Ruptura (M_r) del CAC.

Los resultados de las rupturas para cada espécimen de las mezclas "A" y "B" son mostrados en las Tablas 51 y 52.

TABLA 51: Resultados del ensayo de resistencia a la tensión al CAC, mezcla A.

ENSAYO PARA LA RESISTENCIA A LA TENSIÓN POR FLEXIÓN MEZCLA A						
VIGUETA	EDAD	LONGITUD	ALTURA 1	ALTURA 2	Mr	CARGA
Nº	(Días)	(cm)	(cm)	(cm)	(Kg / cm ²)	(Kg)
2	7	61.00	15.3	15.3	54.17	4140.00
4	7	61.00	15.3	15.2	37.50	4913.00
6	7	61.00	15.3	15.2	48.29	3690.00
Promedio a 7 días:					46.65	
1	28	61.00	15.3	15.2	46.65	4620.00
3	28	61.00	15.3	15.2	58.81	4490.00
5	28	61.00	15.3	15.2	60.41	4610.00
Promedio a 28 días:					55.29	

NOTA: Distancia entre apoyos = 46 cm

TABLA 52: Resultados del ensayo de resistencia a la tensión al CAC, mezcla B.

ENSAYO PARA LA RESISTENCIA A LA TENSIÓN POR FLEXIÓN MEZCLA B						
VIGUETA	EDAD	LONGITUD	ALTURA 1	ALTURA 2	Mr	CARGA
Nº	(Días)	(cm)	(cm)	(cm)	(Kg / cm ²)	(Kg)
2	7	61.00	15.3	15.2	57.60	4400.00
4	7	61.00	15.3	15.2	56.69	4330.00
6	7	61.00	15.3	15.2	52.43	4000.00
Promedio a 7 días:					55.57	
1	28	61.00	15.4	15.3	74.9	5870.00
3	28	61.00	15.3	15.2	71.35	5450.00
5	28	61.00	15.3	15.2		
Promedio a 28 días:					73.125	

NOTA: Distancia entre apoyos = 46 cm

CAPITULO V

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

5.1 INTRODUCCIÓN

La principal propiedad que define al CAC es su trabajabilidad para lograr un correcto acomodo que dependa únicamente de la fuerza de gravedad y no de factores externos. La trabajabilidad es definida cualitativamente como la fácil colocación de la mezcla de concreto y cuantitativamente por el desempeño de los parámetros reológicos de la misma.

La propuesta de diseño y caracterización del CAC para su aplicación en El Salvador, debe necesariamente implementar procedimientos de ensayo para evaluar la capacidad de fluir del material, dentro de unos rangos de cohesión que permitan su colocación sin segregación y con un efecto de autocompactación; estos procedimientos de ensayo se apartan de los procedimientos clásicos utilizados para definir el comportamiento en fresco del concreto, siendo actualmente la mayor parte de los mismos procedimientos aún no estandarizados.

En el siguiente capítulo se presentan los resultados del análisis de la propuesta de diseño y el comportamiento de la mezcla de CAC expuesta en la parte experimental, el cual es definido como un procedimiento de carácter introductorio que constituye una integración del desarrollado por Okamura y Ochi en 1997 y otros criterios de diseño propuestos por investigadores extranjeros, tomados en cuenta en este estudio por cumplir con la condición de ser adaptables a las condiciones actuales de El Salvador.

Se analiza la calidad de los materiales constituyentes y la propuesta de diseño de mezcla para definirla como antecedente en la investigación del comportamiento del CAC en El Salvador, además son evaluados los parámetros reológicos y su desempeño mecánico.

La evaluación de las proporciones, el estudio del efecto de la dosis de aditivo en las propiedades de autocompactabilidad y la evaluación del comportamiento mecánico en estado endurecido, definen la capacidad de implementar el CAC, en obras civiles salvadoreñas.

5.2 GENERALIDADES DEL TRABAJO EXPERIMENTAL

El anteproyecto desarrollado para la elaboración de este documento, se inició con la investigación para resistencias a la compresión de 280 kg/cm² y 350 kg/cm², pero durante el análisis del Capítulo III y Capítulo IV se observó la tendencia del CAC a ser aplicado en estructuras de alto desempeño y que en casos de uso convencional debe necesariamente incluirse dosificaciones de adiciones las cuales permiten disminuir la cantidad de cemento y al mismo tiempo moderar la resistencia y mejorar la consistencia de la mezcla, por lo que finalmente se optó por realizar el estudio únicamente en base a la resistencia de 350 kg/cm².

Los resultados presentados en este estudio, han sido obtenidos utilizando procedimientos de ensayo tradicionales y no tradicionales en nuestro medio, que excluyen cualquier proceso de compactación, pero que en términos generales se basan en los mismos principios de calidad que rigen las normas estandarizadas utilizadas en El Salvador; debido a esto es posible analizar y garantizar este estudio como preliminar dentro de la categoría del CAC y de apertura para promover otros estudios mas específicos, bajo el conocimiento de la existencia de un amplio campo potencial de aplicación.

El diseño de mezcla propuesto en el Capítulo IV, es apoyado en procedimientos perfectamente adaptables a los recursos disponibles en El Salvador, pero existen equipos como el embudo V y la Caja en L; que debido a la carencia de un distribuidor local, se construyeron a partir de especificaciones extranjeras, bajo la consideración que para efectos de investigación los parámetros obtenidos con estos ensayos complementarían el análisis del comportamiento de este material.

En términos generales la elección de los materiales componentes de las mezclas ensayadas, esta basado en la disponibilidad en el mercado nacional y la capacidad de cada uno para contribuir a la autocompactabilidad de la mezcla, el procedimiento de diseño de mezcla empleado parte de una propuesta específica apoyada en los estudios del comportamiento de la mezcla popularizados por diseñadores extranjeros; la reproducción en serie de las mezclas garantiza la capacidad de cumplir con los parámetros esperados.

5.3 CONTROL DE CALIDAD Y PRUEBAS DE LABORATORIO A LOS COMPONENTES DE LA MEZCLA

5.3.1 AGREGADO

La calidad del agregado ha sido analizada en base a los resultados proporcionados en cinco muestreos anteriores al acopio, valorando el análisis por malla del agregado y las propiedades físicas.

ANÁLISIS POR MALLA DEL AGREGADO

El porcentaje acumulado que pasa en cada malla, tanto de la grava como la arena se mantiene constante durante cada muestreo, con desviaciones estándar entre 1 a 2 y 0 a 1 respectivamente (véase Tabla 22 y 23), por lo que los datos proporcionados son confiables.

El promedio de los porcentajes pasantes de cada malla permanecen dentro de los límites superiores e inferiores sugeridos por la norma ASTM C 33, por lo que se considera que estos materiales poseen un balance proporcional con respecto al tamaño de las partículas. La curva granulométrica descrita es suave y por su distribución de tamaños permite obtener una mezcla más estable (véase Anexo C y D).

El material grueso posee un tamaño máximo nominal de 3/8", factor que es favorable para la fluidez de la mezcla, como lo sugiere la teoría de CAC consultada en esta investigación; debido a esto no se necesitó incorporar procesos adicionales de tamizado para mantener constante este requerimiento (véase la Figura 76).

PROPIEDADES FÍSICAS

En el CAC, es necesario incluir materiales con cantidades considerables de finos, para el caso de la arena en promedio el módulo de finura es de 2.626 (véase Tabla 25), clasificándose según la ASTM C 125 como una arena media fina, es decir utilizable en mezclas de CAC.

La gravedad específica de la grava y la arena es 2.457 y 2.476 respectivamente (véase Tabla 24 y 25), la analogía resulta satisfactoria para la suspensión homogénea de partículas mejorando la fluidez de la mezcla y la resistencia a la segregación.

La gravedad específica de la mayoría de agregados de origen natural oscila entre 2.4 y 2.8 [6]; los valores promedios obtenidos experimentalmente para el tipo de agregado seleccionado, corresponden al parámetro mencionado lo que garantiza obtener una mezcla de CAC de peso normal, pues un valor debajo de 2.4 pertenece a un agregado de peso liviano y su utilización debería ser objetable en esta investigación.

El grado de absorción de un agregado es difícil de cuantificar ya que depende de otros parámetros como la distribución granulométrica, el contenido de finos y el tamaño máximo. Existen parámetros de control que especifican que el porcentaje de absorción no debe exceder del 3% y 5% [6]; para el caso del agregado grueso y fino respectivamente, partiendo de este argumento se observa que el material granular utilizado experimentalmente en este trabajo de investigación posee un porcentaje de absorción entre 2.486 % para la grava y 4.666 % para la arena; es decir que la cantidad de poros oscila dentro de los parámetros normales y garantiza un buen desempeño mecánico en mezclas de CAC.

La humedad de acopio del agregado fue un valor a considerar únicamente como parámetro inicial, pero debido a que el material fue almacenado y protegido con una carpeta plástica a la intemperie, se calculó el nuevo valor antes de cada bachada de acuerdo a la temperatura de exposición.

Considerando que la mezcla diseñada de CAC, pertenece a un concreto de peso normal, se estima que el peso unitario suelto de los agregados utilizados como componentes de relleno de la misma oscilen entre 1,200 kg/m³ y 1,760 kg/m³ [5]; experimentalmente se determinó que en promedio para la grava el peso unitario suelto y compactado es de 1,385 kg/m³ y 1,473 kg/m³ respectivamente; y para la arena es de 1,407 kg/m³ y 1,610 kg/m³; por lo que no existe objeción para utilizar este material en CAC.

5.3.2 CEMENTO

Para el caso de este trabajo de investigación el contenido de finos está determinado únicamente por el cemento, la calidad del mismo, fue establecida por el proveedor, por lo que el parámetro a evaluar es únicamente su comportamiento como componente de la mezcla de CAC.

5.3.3 ADITIVO

El tipo de aditivo a utilizar depende de su disponibilidad en el mercado local, el aditivo superplastificante de última generación constituido básicamente de policarboxilatos, fue sometido a un control de calidad por parte del proveedor lo que garantizó su desempeño en este trabajo de investigación.

5.4 DISEÑO DE MEZCLA DEL CONCRETO AUTOCOMPACTABLE

La tecnología del CAC es nueva en El Salvador, no se cuenta con antecedentes para su diseño, por lo que inicialmente fue necesario analizar las proporciones de autores extranjeros (véase la Tabla 26) donde se observó la particularidad de considerar las adiciones como componente fundamental de la mezcla de CAC y no como una opción para mejorar las características de la misma, además de combinar aditivos en proporciones relativamente altas y que la mayoría de los diseñadores buscan valores de resistencia elevados.

Entre los procedimientos para diseñar el CAC mencionados en el Capítulo III de este documento, se observó que el propuesto por Okamura y Ouchi, era adaptable a los recursos disponibles en el medio y proponía una lógica práctica para obtener proporciones iniciales.

En el diseño preliminar del esqueleto granular se busca obtener una relación entre grava-arena con un mínimo de vacíos, los cuales son equivalentes a la demanda de pasta; la relación supone un aumento de la cantidad de pasta con respecto a una

disminución en la proporción de arena (véase la Tabla 28). Inicialmente se decidió utilizar una proporción conservadora grava - arena de 45% - 55% respectivamente, considerando que los parámetros establecido por el EFNARC en la Tabla 16, sugerían una cantidad de arena mayor al 50% y además los modelos propuestos por otros investigadores oscilaban entre estos valores.

El diseño de pasta se realizó utilizando dos tipos de cemento, el cemento puro ASTM C 150 y el cemento mezclado ASTM C 595, obteniéndose valores de flujo relativo entre 1.0 y 1.1 para ambos casos (véase la Tabla 30 y 32). Finalmente se resolvió utilizar cemento puzolánico, debido a su mejor desempeño en la mezcla, lo cual se refleja en el período de trabajabilidad del ensayo; la composición del cemento mezclado identifica mayor cantidad de finos y esto mejora la calidad de la mezcla, además debido a la puzolana la retención de trabajabilidad es mas extensa y este factor es importante en el parámetro de fluidez para un CAC.

El $F'c = 350 \text{ kg/cm}^2$ que demanda este trabajo de investigación, no requiere cantidades excesivas de cemento pero las cantidades de finos necesarias para cumplir con los parámetros de autocompactabilidad son altas (véase la Tabla 16), lo que sugiere utilizar un cemento mezclado y trabajar al limite de las proporciones máximas de cemento.

El CAC es una mezcla donde la consistencia se define como fluida y su comportamiento es comparable con el agua, a pesar de esto la relación agua/finos es baja es decir inicialmente se diseña un concreto de consistencia dura y el aditivo es el componente que lo hará fluir. La relación agua/finos inicial fue de 1.0, lo que hace suponer la necesidad de utilizar grandes cantidades de cemento.

Con el objeto de racionalizar el contenido de cemento se proporcionó inicialmente con 62% agregado, 36% pasta y 2% aire; pero el comportamiento de esta dosificación no fue satisfactoria (véase la Tabla 35) y se modificó nuevamente a los valores sugeridos por el comité EFNARC, el agregado un 60% de la mezcla incluyendo aire es decir que realmente se utilizó un 58% en masa y un 2% de aire, logrando cumplir con los parámetros esperados.

El objeto del diseño de mortero es un primer acercamiento al comportamiento del aditivo en la mezcla; es necesario empezar a dosificar el aditivo de forma ascendente tomando en cuenta los parámetros propuestos por los proveedores en las hojas técnicas, importante es tomar en cuenta que si los valores esperados en los ensayos de fluidez y embudo V no son alcanzados es posible alterar la relación agua/finos para luego probar en las verdaderas mezclas de CAC y ajustar las proporciones si es necesario, con el objeto de encontrar un punto limite en el que la mezcla es fluida pero no segrega.

Para el caso de la dosificación del aditivo SIKA VISCOCRETE 5000, en la mezcla A, fue necesario hacer cuatro diseños de mortero (véase la Tabla 33) y aumentar la relación agua/finos debido a que no se obtenía la fluidez necesaria entre 24 cm y 26 cm del cono de flujo y el tiempo del embudo en V oscilaba fuera de los parámetros de 7s y 11s, además se trataba de optimizar la proporción de aditivo manteniéndose abajo de 10 ml X kg de cemento.

En el proporcionamiento del aditivo ULTRAFLOW para la mezcla B, influyó el haber completado la proporción de la mezcla A y tener un antecedente del ensayo, por lo que no fue necesario ajustes adicionales de agua/finos. En la Tabla 34, se observan tres ensayos con una relación agua/finos = 1.25 y cantidades de aditivo entre 9.0 ml X kg y 10.0 ml X kg, donde este último posee mejores resultados que los esperados, pero con el objeto de disminuir la proporción se resuelve utilizar 9.50 ml X kg de cemento y proceder hacer el último ajuste en la mezcla de concreto.

Para el caso de la mezcla A los ensayos de ajustes en concreto (véase la Tabla 35) permiten observar que: 1) el contenido de agregado de 62% es excesivo y se modificó a 58%, 2) la relación agua/finos se aumentó a 1.25, lo que contribuye a reducir la cantidad de cemento y 3) la dosificación de aditivo de 9.60 ml X kg de cemento fue aumentada a 10.5 ml X kg de cemento y así mejoró la fluidez.

En la mezcla B fueron necesarios siete ensayos de ajuste, cambiando cuatro veces la proporción con objeto de obtener la mezcla óptima, los problemas fueron de saturación de aditivo y baja estabilidad, características que tratan de mejorarse aumentando los

tiempos de mezclado; la relación de agua/finos = 1.25 debe reducirse a 1.15, lo que favorece una disminución en la dosificación de aditivo a 9.0 ml X kg de cemento, el ensayo cuatro es el considerado como satisfactorio (véase la Tabla 36).

Con respecto a las mezclas de CAC, el fenómeno mas común es la saturación de aditivo, la proporciones finales corresponden a 10.5 ml X kg y 9.0 ml X kg para la mezcla A y B respectivamente, calificadas entre las cantidades mas elevadas propuestas por los proveedores, estas dosificaciones, provocan una lechada blanquecina superficial que fue posible disminuirla únicamente aumentando los tiempos de mezclado o con hechuras de mezcla en horas del mediodía.

Para la mezcla A, la temperatura es un factor importante en el mezclado ya que influye en la asimilación del aditivo, con temperaturas mas cálidas el aditivo es absorbido mas rápido y la influencia en la consistencia de la mezcla se obtiene en tiempos menores de mezclado de aproximadamente 6 min en total, por lo que periodos de reposo y remezclado fueron incorporados de forma opcional. Para esta mezcla se incorporaron los materiales a la concretera de sitio de la siguiente manera: agua + aditivo + arena + cemento = mezclado 1 min + grava = mezclado 5 min, obteniéndose la mezcla esperada y evitando que pasta quedara adherida a las paredes de la tolva.

Para la mezcla B se experimento con un mezclado mas largo, por lo que se adicionaron todos los materiales al mismo tiempo evitando un complicado procedimiento; el mezclado fue de 6 min luego un reposo entre 5 min y 15 min para un remezclado final de 5 min, con lo que se obtuvo una mezcla satisfactoria, los diferentes tiempos de reposo se decidieron en base a la temperatura ambiente, incluso la mezcla después de los 6 min de mezclado se sometía a observación para luego determinar cuanto reposo necesitaba.

Con respecto a la producción de concreto es importante mencionar que la condición de humedad inicial del material influye en la absorción del aditivo y estabilidad de la mezcla, cuando la arena está húmeda asimila mejor el aditivo y se reducen los tiempos de mezclado.

5.5 ANÁLISIS EN LA REPRODUCCIÓN DE MEZCLAS DE CONCRETO AUTOCOMPACTABLE

5.5.1 COMPORTAMIENTO EN ESTADO FRESCO DEL CONCRETO AUTOCOMPACTABLE

5.5.1.1 DOSIFICACIÓN Y MEZCLADO

En lo que respecta a la dosificación de los componentes del concreto, resultó efectiva la sucesión de la colocación de los mismos en la concretora, y los respectivos tiempos de mezclado, tal y como fue determinado en el diseño, ya que en ambas mezclas se obtuvieron concretos homogéneos, los cuales presentaron características adecuadas tanto para el concreto fresco como endurecido.

En la mezcla A la revoltura total fue de 6 min para todas las bachadas, tal y como se estableció para el tiempo de mezclado en el diseño de mezcla; pero como se observó en la Tabla 37 del capítulo anterior hubieron variaciones en cinco muestras, en las cuales fue necesario un reposo de 15 min con remezclado de 5 min, porque se observó saturación del aditivo.

En la mezcla B la revoltura total fue también de 6 min en todas las bachadas, pero en la mayoría de las muestras fue necesario un reposo entre 5 min a 10 min con remezclado de 5 min, dependiendo de la apariencia que presentó el concreto, en tal caso el uso de este superplastificante también presentó saturación, incluso mayor que el de la mezcla A.

5.5.1.2 CARACTERÍSTICAS DE AUTOCOMPACTABILIDAD Y ENSAYOS COMPLEMENTARIOS EN EL CONCRETO FRESCO

Previo al análisis de las características y propiedades del CAC en estado fresco, en el Capítulo IV fueron presentados todos los resultados obtenidos en cada una de las mezclas, a continuación, en la Tabla 53 se presentan los resultados promedio de cada ensayo.

TABLA 53: Resultados promedio de ensayos al CAC en estado fresco.

Propiedad	Ensayo	MEZCLAS	
		A	B
Capacidad de relleno	Flujo de asentamiento	70.91 cm	71.31 cm
	Flujo de asentamiento T _{50 cm}	2 s	2 s
Capacidad de paso	Caja en L	1	1
Resistencia a la segregación	Ensayo de estabilidad GTM	13.23 %	16.51 %
Contenido de Aire	ASTM C 231	3.8 %	1.93 %
Temperatura	ASTM C 1064	25.27 ° C	27.2 ° C
Peso unitario	ASTM C 138	2282.004 kg/m ³	2232.689 kg/m ³
Fraguado inicial	ASTM C 403	4 h 33 min	7 h 18 min
Fraguado final		5 h 8 min	7 h 0 min

CARACTERÍSTICAS DE AUTOCOMPACTABILIDAD

Capacidad de relleno

Para esta propiedad fue utilizado el ensayo de flujo de asentamiento y flujo de asentamiento T_{50 cm}, ya que para este ensayo solo se requería el cono Abrahams, el cual es de uso generalizado en el país, lo cual contribuye al desarrollo de los objetivos de este trabajo de investigación. En la reproducción de las mezclas se realizó este ensayo con mayor frecuencia, ya que es un parámetro inmediato y sencillo, que destaca el comportamiento del concreto como un flujo libre, sin presentar segregación, y que se complementa con los demás ensayos.

En la reproducción de la mezcla A se observó un flujo en promedio de 70.91 cm, con un tiempo de flujo de $T_{50\text{ cm}}$ de 2 s en promedio (véase Tabla 53); en esta mezcla se pudo ver una apreciable fluidez en el concreto, y su comportamiento fue bastante homogéneo; ambos datos son satisfactorios para una mezcla autocompactable, considerando que los parámetros estudiados por el EFNARC (véase la Tabla 16) recomiendan una fluidez entre 65 cm - 80 cm y entre 2 s - 5 s para el $T_{50\text{ cm}}$ con lo cual se observó que todas las mezclas se encontraron dentro de dichos parámetros.

En cuanto a la mezcla B se observó un flujo en promedio de 71.31 cm, con un tiempo de flujo de $T_{50\text{ cm}}$ de 2 s en promedio (véase Tabla 53), con lo cual se observó que las mezclas se encontraron dentro de los parámetros antes mencionados.

Adicionalmente, el ensayo de flujo de asentamiento fue utilizado para verificar la pérdida de fluidez de las mezclas de concreto, realizando un ensayo para cada mezcla. Este ensayo representa una prueba empírica, para observar el tiempo en el cual el concreto comienza a disminuir su fluidez o extensión.

En tal caso se presentan los datos obtenidos en las Tablas 54 y 55, donde podemos analizar que tanto la mezcla A como la B empiezan a perder fluidez a los 30 min de haber sido mezclada, ya que el concreto comienza a tener una fluidez debajo de 65 cm; estos resultados indican que si bien es cierto el concreto aun puede ser manejable o moldeable, no necesariamente continuará comportándose como un CAC; con lo cual puede pensarse que el tiempo de colocación del concreto o tiempo abierto es muy reducido, en este sentido cabe la posibilidad de incluir un aditivo retardante, para prolongar el tiempo en el cual el concreto permanece con las propiedades autocompactables. Sin embargo, para establecer un análisis del tiempo abierto es necesario realizar un estudio del CAC a diferentes temperaturas.

TABLA 54: Resultado de la prueba empírica de pérdida de fluidez del CAC, mezcla A.

PERDIDA DE FLUIDEZ MEZCLA A			
ENSAYO	1	2	3
HORA INICIO	04:00 p.m.	04:16 p.m.	04:30 p.m.
TEMPERATURA AMBIENTE (° C)	28.0	28.0	28.0
TEMPERATURA CONCRETO (° C)	26.5	26.5	26.8
EXTENSIÓN (cm)	76.0	67.0	62.0
T _{50 cm} (s)	3.0	6.0	8.0

TABLA 55: Resultado de la prueba empírica de pérdida de fluidez del CAC, mezcla B.

PERDIDA DE FLUIDEZ MEZCLA B			
ENSAYO	1	2	3
HORA INICIO	03:00 p.m.	03:15 p.m.	03:33 p.m.
TEMPERATURA AMBIENTE (° C)	29.0	29.0	29.0
TEMPERATURA CONCRETO (° C)	27.6	27.5	27.0
EXTENSIÓN (cm)	78.0	76.0	61.0
T _{50 cm} (s)	5.0	3.0	7.0

Capacidad de paso

Para la evaluación de este parámetro se utilizó el ensayo de Caja en L, que si bien no es de uso en el país, refleja de manera sencilla la capacidad que tiene el concreto de fluir ante los bloqueos de las barras de refuerzo y acomodarse en el molde; en este ensayo el EFNARC sugiere una relación de bloqueo entre 0.8 y 1.0 (véase la Tabla 16), para establecer que el concreto tiene adecuada capacidad de paso.

En la mezcla A y B se obtuvieron valores satisfactorios, gracias a la fluidez que presentaron las muestras, ya que en general los resultados estuvieron dentro de los parámetros sugeridos por el EFNARC, pudiendo observar en todas las bachadas, un flujo sin obstrucciones por las barras colocadas en dicha caja.

Los resultados promedio de ambas mezclas pueden verse en la Tabla 53.

Resistencia a la segregación

Para esta propiedad se utilizó el ensayo de estabilidad GTM, debido a que esta prueba demanda equipo comúnmente usado en el país, como son los tamices N° 4, para el caso el tamiz propuesto por el EFNARC de 12" de diámetro tiene mayor dificultad de obtenerse, por lo que el ensayo fue practicado utilizando 2 mallas N° 4 de 8" de diámetro, que se complementaron para cumplir el parámetro establecido.

La investigaciones del EFNARC (véase Tabla 16) sobre este ensayo, sugieren que el porcentaje de mortero que pase el tamiz establezca la relación de segregación, la cual es recomendable que esté entre el 0 % - 15 % del peso de la muestra, para considerar que la resistencia a la segregación es satisfactoria, pero es arriba del 30 % donde se corre el mayor riesgo de segregación.

En la mezcla A, los valores de resistencia a la segregación oscilaron entre 11.4 % y 15.3 % (véase Tabla 39), con un promedio de 13.23 %, puede observarse que cumple con los parámetros establecidos. En tanto que en la mezcla B, los valores de resistencia a la segregación oscilaron entre 16.2 % y 16.8 % (véase Tabla 40), con un promedio de 16.51 %, el cual cumple con los parámetros establecidos, pero requiere mayor cuidado por su tendencia a una posible segregación. (véase Tabla 53)

CONTENIDO DE AIRE

Se encontró que este método fue bastante adecuado para el CAC porque es de uso más generalizado en el país, y está adecuado para concretos de peso normal.

El contenido de aire tomado en la mezcla A fue de 3.8 % en promedio (véase la Tabla 53), el cual se considera alto con respecto al contenido de aire de diseño; comportamiento que puede adjudicarse a la composición química del aditivo que no está totalmente definida y podría tener alguna influencia en el concreto, o bien al Tamaño Máximo Nominal de 3/8" del agregado. En cuanto al contenido de aire en la mezcla B se obtuvo un valor de 1.93 % (véase la Tabla 53), lo cual representa que el contenido de aire de diseño es un valor muy cercano al real.

TEMPERATURA

Se consideró importante el parámetro de la temperatura para el estudio del control de calidad del CAC, debido a su importante influencia sobre las propiedades en estado fresco y endurecido. Es un parámetro que debe tomarse en cuenta al momento de diseñar el concreto, sobre todo en un clima cálido. Es por ello que los estudios recomiendan anticipar los efectos que podría causar en el concreto temperaturas muy elevadas. No hay un parámetro establecido para la temperatura del CAC, sin embargo las especificaciones del ACI recomiendan que cuando se coloque el concreto convencional, este tenga una temperatura menor que 29°C o que 32°C ; pero el límite se deberá establecer para las condiciones prevalecientes en una obra determinada teniendo como base mezclas de prueba hechas a temperaturas ideales.

En cuanto a la reproducción del CAC, las temperaturas se mantuvieron en general constantes y dentro de los rangos ya mencionados; ya que la temperatura de la mezcla A tomada para todas las bachadas de prueba, dio un promedio de 25.27°C y la temperatura de la mezcla B fue de 27.2°C (véase la Tabla 53), considerando que la mezcla A solo se llevó a cabo en horas nocturnas (6:00 p.m. - 9:00 p.m.), y la mezcla B en horas de la tarde (1:00 p.m. - 6:00 p.m.), como puede verse en las Tablas 37 y 38 del capítulo IV de este documento.

PESO UNITARIO

El valor del peso unitario se considera importante para identificar la correlación entre el volumen de mezcla diseñado teóricamente y la producción de concreto que se verifica en estado fresco.

En promedio los valores de peso unitario obtenidos fueron de 2282 kg/m^3 para la mezcla A y 2232.69 kg/m^3 para la mezcla B; semejantes al valor promedio en un concreto de peso normal. Adicionalmente podemos observar que el peso unitario del concreto fresco es muy próximo al peso unitario seco obtenido en este estudio. (véase Tabla 56)

TABLA 56: Resultados promedio del peso unitario del CAC.

PESO UNITARIO DEL CAC (kg/m³)		
MEZCLA	A	B
Peso unitario del CAC en estado fresco	2282.004	2232.689
Peso unitario del CAC en estado endurecido	2221.440	2255.410

FRAGUADO DEL CONCRETO

Este ensayo fue realizado para observar en estado fresco todos los límites del CAC, con el objetivo de medir el fraguado inicial y final, lapso en el cual inicia la rigidización de este. Este método puede ser utilizado para determinar efectos variables, tales como el agua, tipo y cantidades de materiales cementantes o aditivos, en el tiempo de fraguado del concreto. También este método puede ser utilizado para determinar el cumplimiento con requerimientos especificados del tiempo de fraguado.

En las mezclas A y B se realizaron tres pruebas para determinar un promedio, con lo cual se obtuvieron las curvas Tiempo - Esfuerzo, respectivamente para cada mezcla, en las cuales se determinó el fraguado inicial y final.

Es de destacar que este ensayo se realizó bajo una temperatura especificada de 25 ° C en un cuarto de curado, por lo que puede considerarse que no es muy representativa en relación al comportamiento que puede presentar en campo, ya que para esto deben hacerse ensayos propios que dependen del clima, a diferentes horas, estableciendo promedios y tendencias que establezcan los estados del CAC en condiciones de ambiente.

En la mezcla A se obtuvo un fraguado inicial a las 4 horas 33 min (273 min), y un fraguado final a las 7 horas 18 min (438 min), valores promediados de las curvas trazadas en cada ensayo, presentadas en los gráficos de las Figuras 101, 102 y 103.

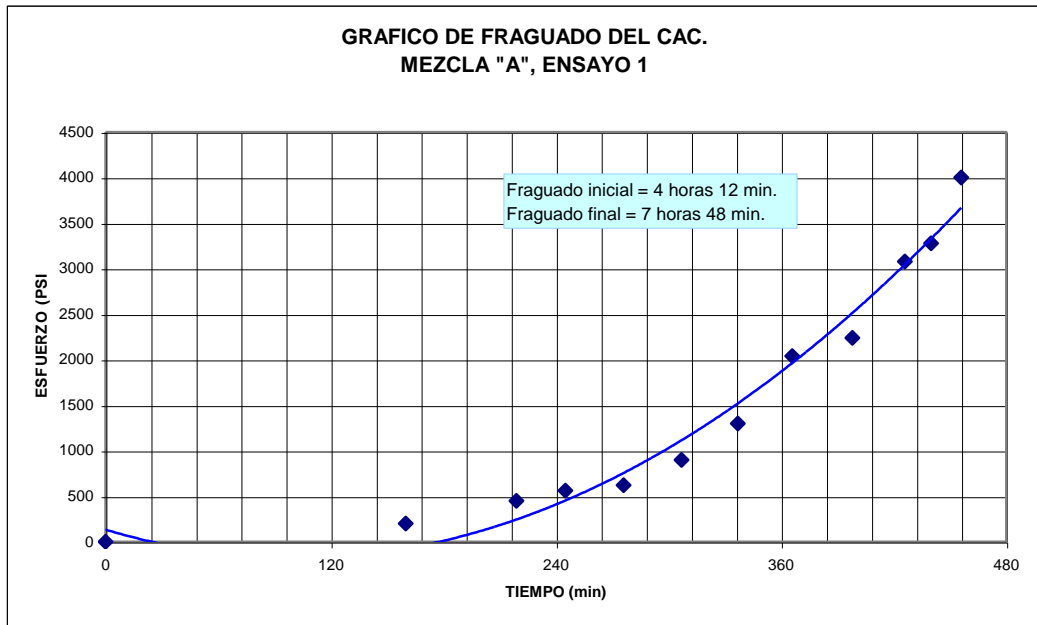


FIGURA 101: Curva de fraguado ensayo 1, mezcla A.

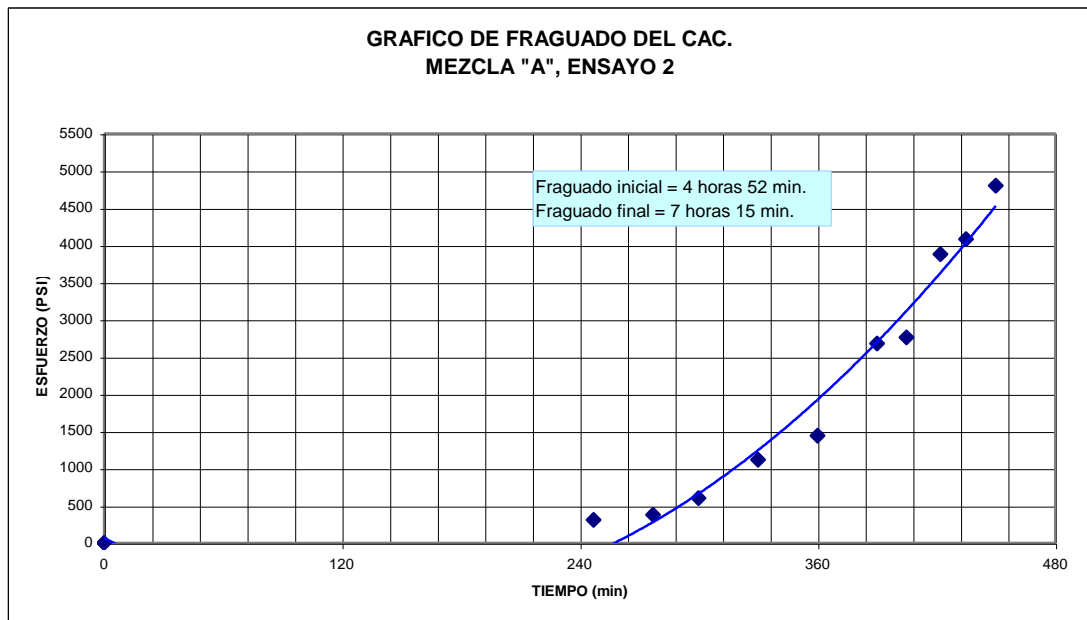
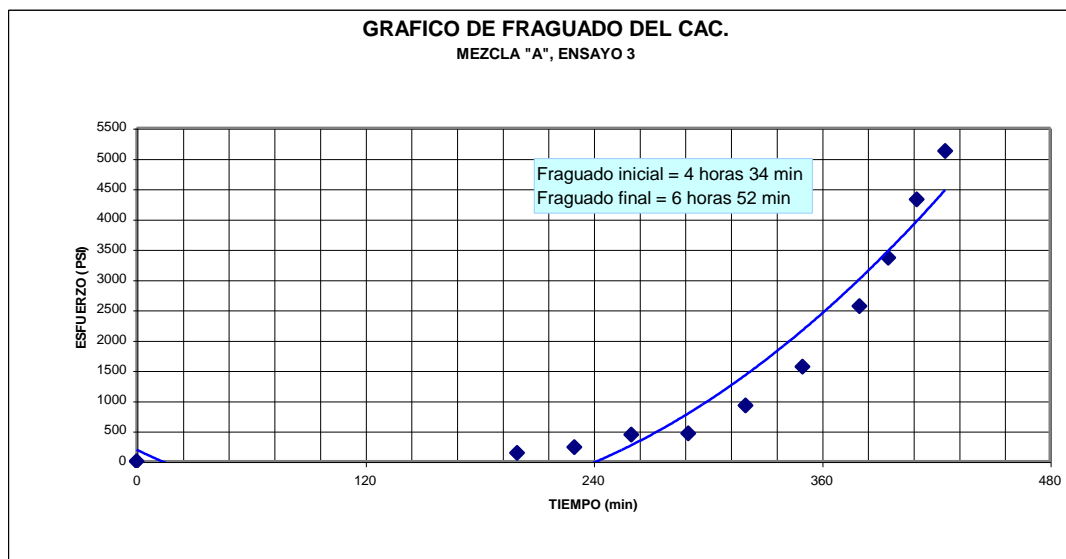


FIGURA 102 : Curva de fraguado ensayo 2 , mezcla A.



FIGURAS 103: Curva de fraguado ensayo 3, mezcla A.

En la mezcla B se obtuvo el Fraguado inicial a las 5 horas 8 min (308 min), y un fraguado final a las 7 horas 0 min (420 min), valores promediados de las curvas trazadas en cada ensayo, las cuales se presentan en los gráficos de las Figuras 104, 105 y 106.

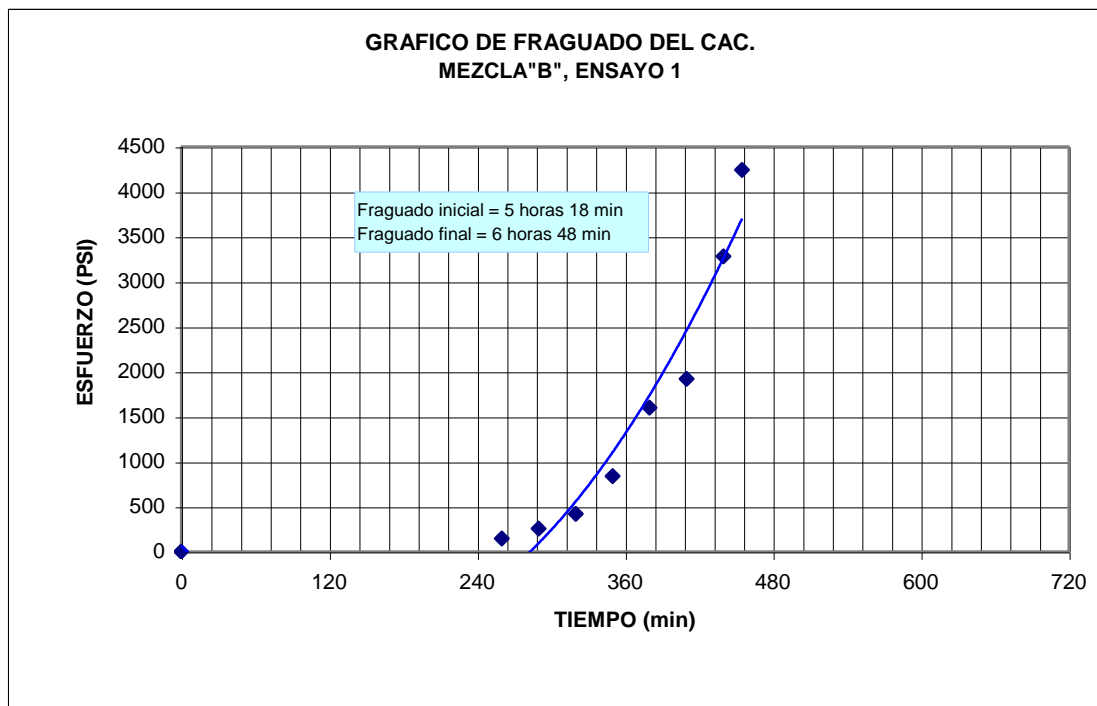


FIGURA 104: Curva de fraguado ensayo 1, mezcla B.

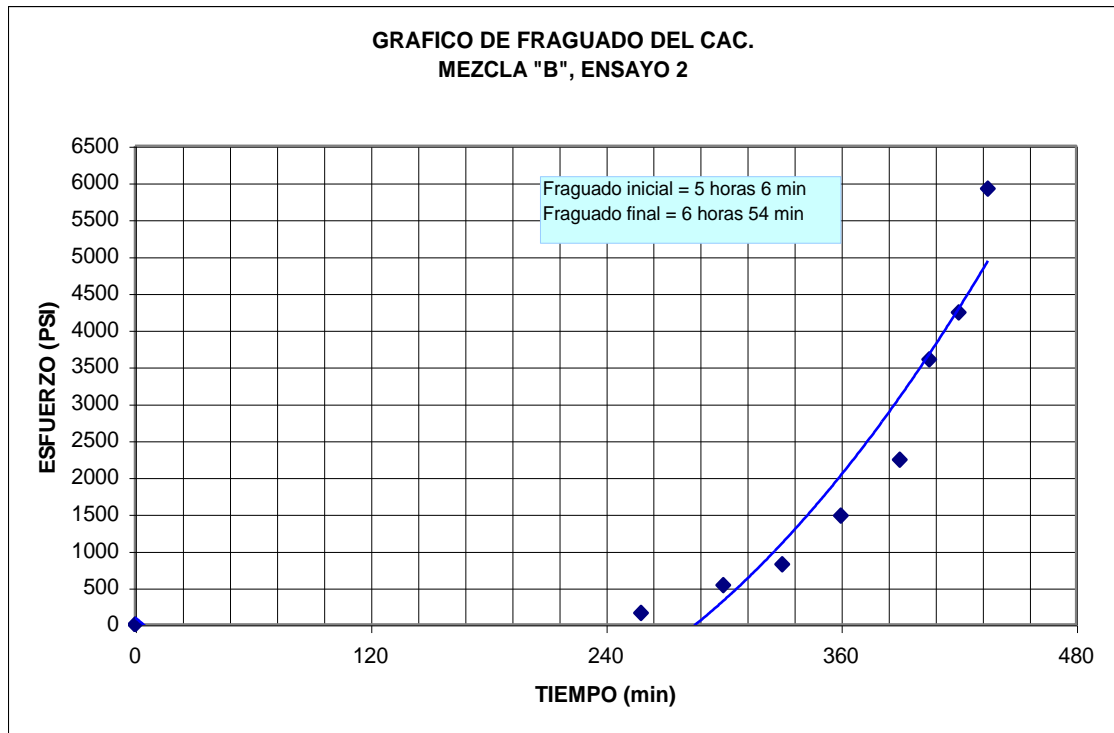


FIGURA 105: Curva de fraguado ensayo 2, mezcla B.

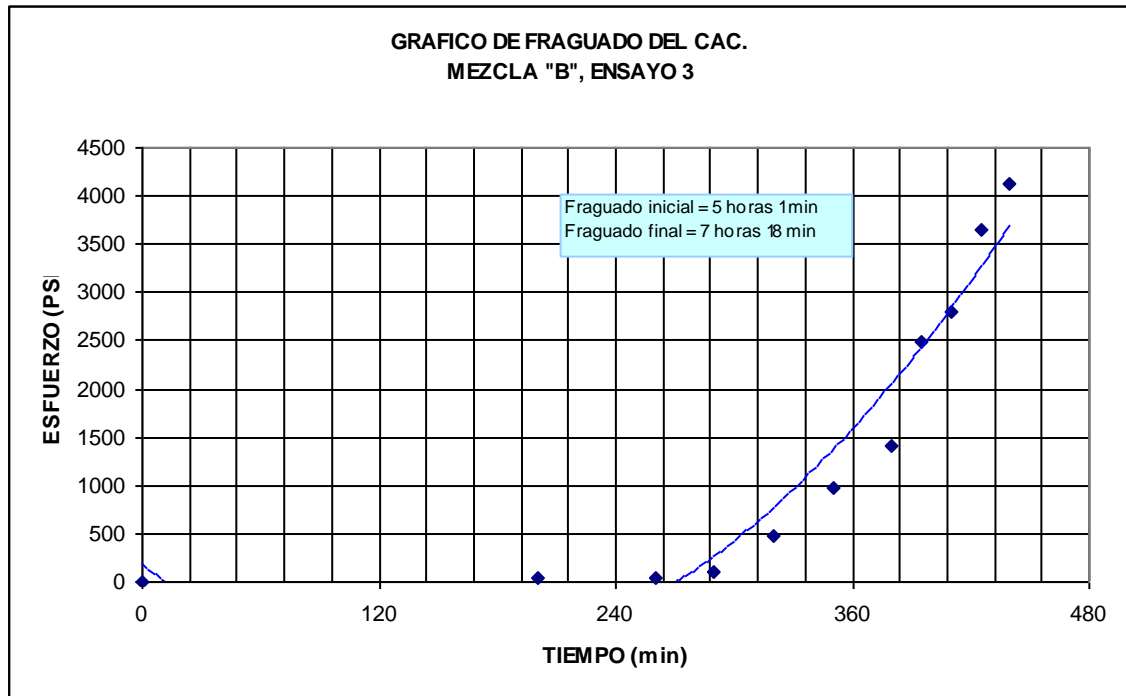


FIGURA 106: Curva de fraguado ensayo 3, mezcla B.

Podemos observar que la mezcla A obtiene su fraguado inicial en promedio unos 30 min más temprano que la mezcla B, sin embargo, ambas mezclas alcanzan su fraguado final aproximadamente a las 7 horas de haber sido mezclado. Esto indica que las etapas son similares a las de un concreto convencional en cuanto al período de fraguado.

5.5.2 COMPORTAMIENTO EN ESTADO ENDURECIDO DEL CONCRETO AUTOCOMPACTABLE

5.5.2.1 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN OBTENIDA A DIFERENTES EDADES

Los resultados de las resistencias a compresión promedio obtenidos en los diferentes especímenes de prueba a diferentes edades y sus respectivas desviaciones estándar, se muestran a continuación en la Tabla 57.

TABLA 57: Resultados promedio de la resistencia a la compresión del CAC.

MEZCLA	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN A DIFERENTES EDADES (Kg/cm ²)				
	EDAD (días)				
	3	7	14	28	56
A	208.13	294.6	349.02	420.19	483.19
Desviación estándar	6.27	12.42	19.18	16.8	16.48
B	337.17	424.3	476.84	531.89	5835
Desviación estándar	6.58	10.55	23.71	26.97	23.51

Las resistencias a la compresión de las mezclas A y B mostraron una tendencia similar en todas sus edades, ya que sus desviaciones estándar (véase la Tabla 57) se encontraron dentro de los parámetros establecidos presentados en las normas para el control del concreto (ACI 214) (véase la Tabla 58), lo cual puede establecer que el control en cuanto

a las propiedades del concreto y los métodos de prueba tuvieron poca variabilidad, a tal punto que influyera en los resultados de resistencia. En los gráficos de las Figuras 107 y 108 donde se ilustra el comportamiento de la curva edad – resistencia del concreto para las diferentes bachadas de prueba en diferentes edades, se puede observar que en todas las mezclas se presenta una tendencia similar entre bachada y bachada en términos de resistencia, los puntos del grafico representan todos los cilindros de concreto ensayados a la compresión para las diferentes edades presentadas con anterioridad en las Tablas 49 y 50 del Capítulo IV de este documento.

TABLA 58: Desviación estándar para las normas del control del concreto.

NORMAS PARA EL CONTROL DEL CONCRETO (ACI 214)					
Variación total					
Clase de Operación	Desviación Estándar para diferentes normas de control kg/cm ²				
	Excelente	Muy buena	Buena	Aceptable	Pobre
Pruebas de control en campo	Por debajo de 25	de 25 a 35	de 35 a 40	de 40 a 50	sobre 50
Mezclas de prueba en laboratorio	Por debajo de 15	de 15 a 17	de 17 a 20	de 20 a 25	sobre 25

FUENTE: Documento ACI 214

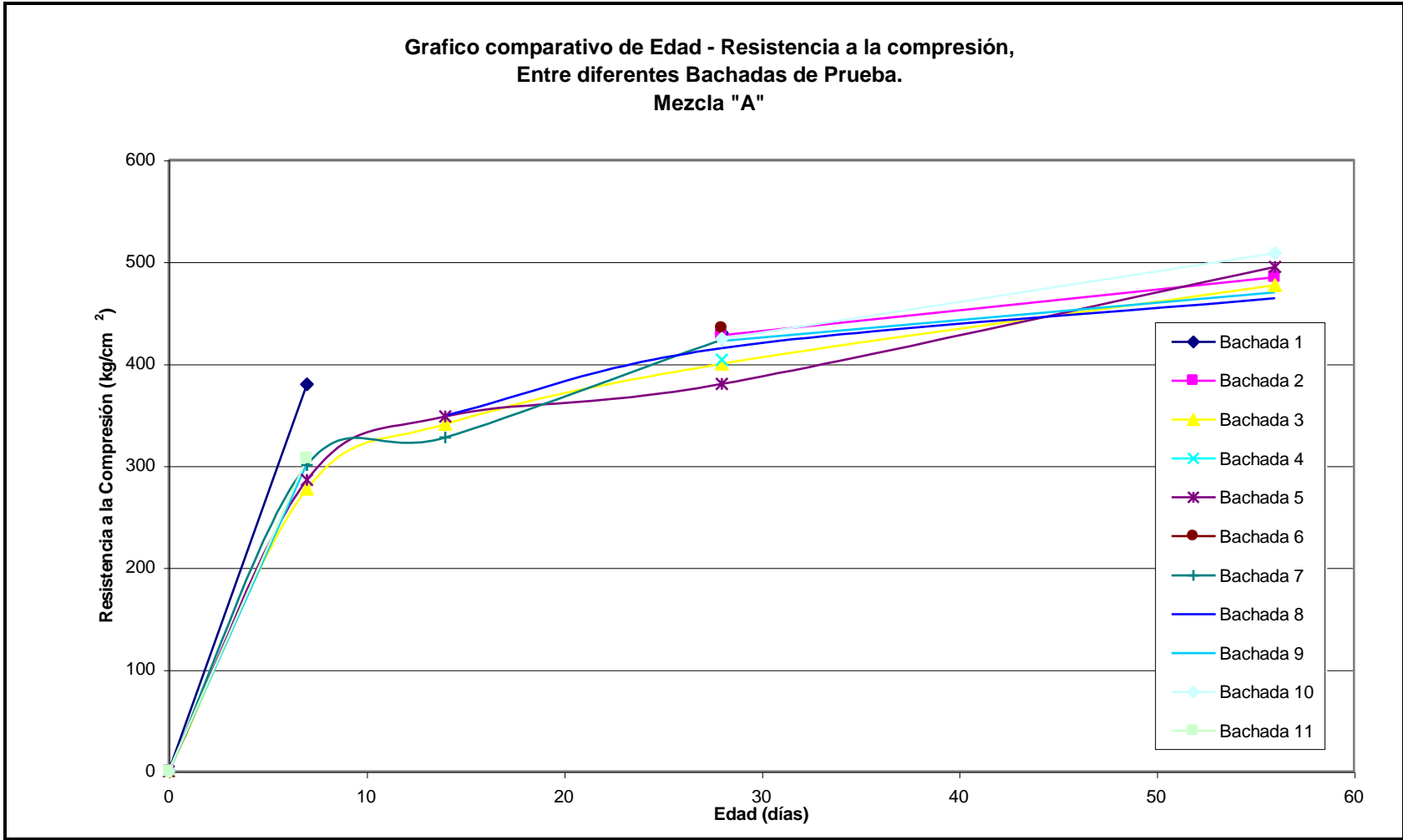


FIGURA 107: Gráfico de la resistencia a la compresión de las diferentes bachadas de la mezcla A.

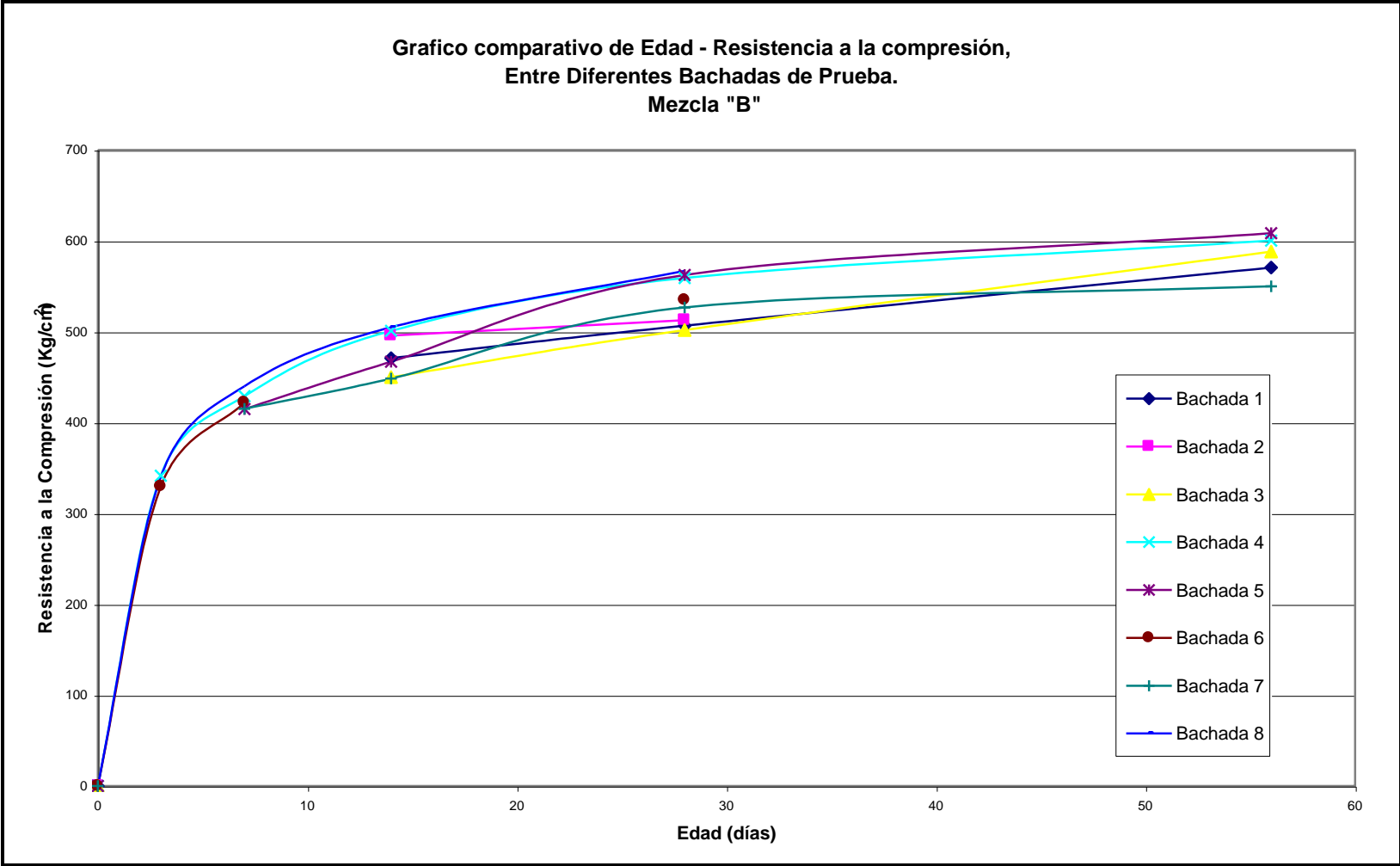


FIGURA 108: Gráfico de la resistencia a la compresión de las diferentes bachadas de la mezcla B.

De esta manera puede verse que los resultados de las mezclas A y B obtenidos en los especímenes de prueba en la reproducción de dichas mezclas, tuvieron un comportamiento mayor de lo esperado para las diferentes edades de prueba, ya que inicialmente se había propuesto un máximo de 350 kg/cm² a los 28 días, estos resultados sobrepasaron dicho valor a los 14 días en la mezcla A y a los 7 días en la mezcla B (véase la Tabla 57). También podemos ver este comportamiento en la Tabla 59, donde observamos el porcentaje de resistencia ganada en las diferentes edades en base a la resistencia de diseño.

TABLA 59: Porcentajes de resistencia ganada a diferentes edades.

MEZCLA	% RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN GANADA A DIFERENTES EDADES (en base a la resistencia de diseño de 350 kg/cm ²)			
	Edad (días)			
	3	7	14	28
A	59.47%	84.0 %	99.72 %	120%
B	96.33 %	121.23%	136.24%	152 %

En promedio las resistencias obtenidas a las diferentes edades del concreto en la mezcla A y B, generan un grafico edad - resistencia (véase la Figura 109 y 110) con una tendencia en aumento a medida que el tiempo pasa, puede analizarse que dicho concreto alcanza una alta resistencia a edades tempranas y continúa aumentando en el tiempo; en tal caso puede decirse que han alcanzado y sobrepasado la resistencia para la cual fueron diseñadas.

Es notable que la cantidad de cemento con que ambas mezclas fueron diseñadas, influyó en gran parte en tan elevadas resistencias, ya que el cumplimiento de autocompactabilidad requiere un alto contenido de finos, y en el caso de ambas mezclas, el diseño no incluía adiciones que contribuyeran a la cantidad de finos, más que el cemento. De hecho en el grafico de la Figura 111, puede verse una comparación entre las

resistencias de la mezcla A y la mezcla B; donde se observa una notoria diferencia en las resistencias entre ambas mezclas, ya que la mezcla B presenta resistencias mucho mayores que la mezcla A; esto se debe a que en la mezcla B el aditivo utilizado no generó mejores condiciones para las características de autocompactabilidad, como puede observarse en el diseño, su relación agua/finos tuvo que disminuirse por la cantidad de finos necesarios para la mezcla.

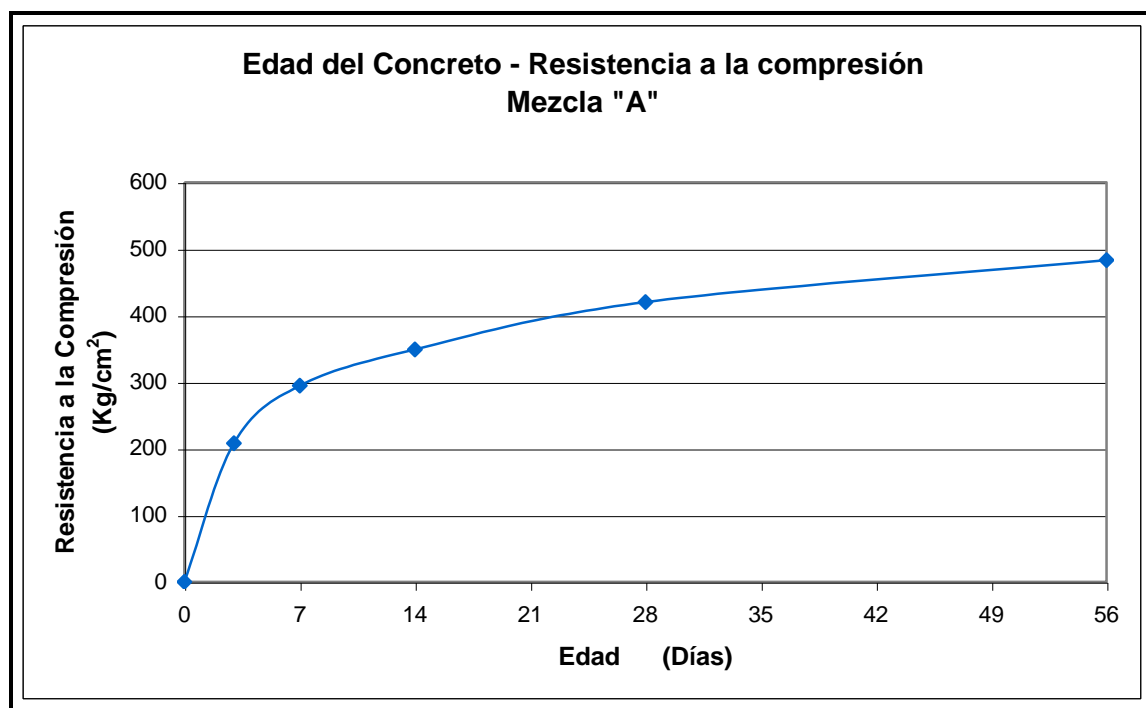


FIGURA 109: Curva de edad - resistencia a la compresión, mezcla A.

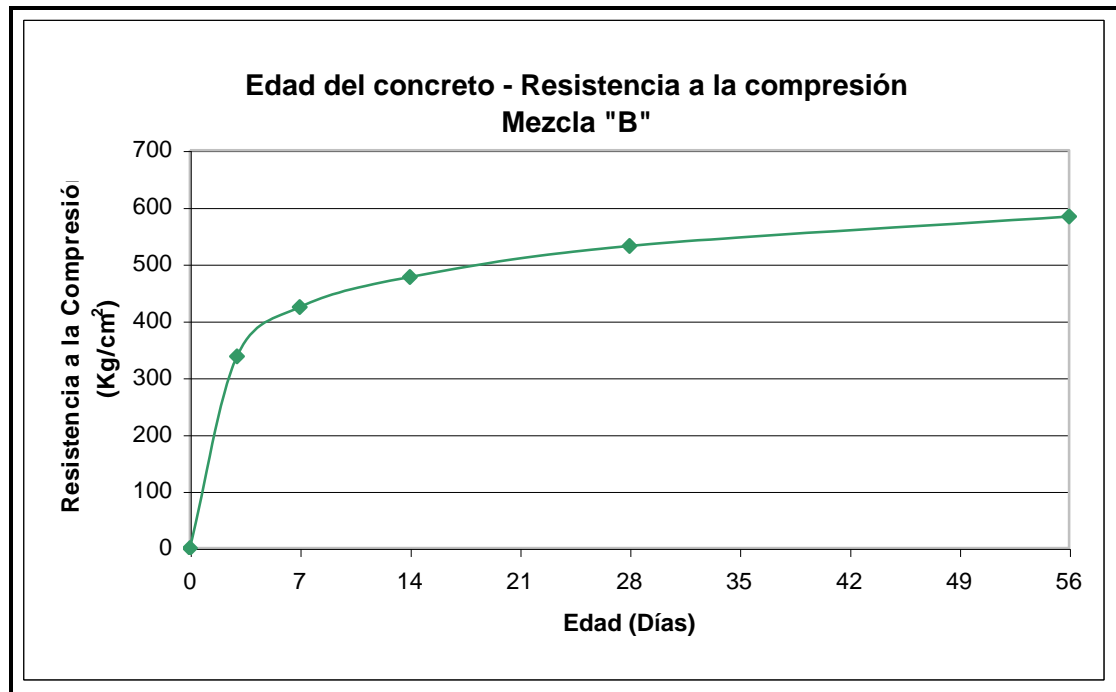


FIGURA 110: Curva de edad - resistencia a la compresión, mezcla B.

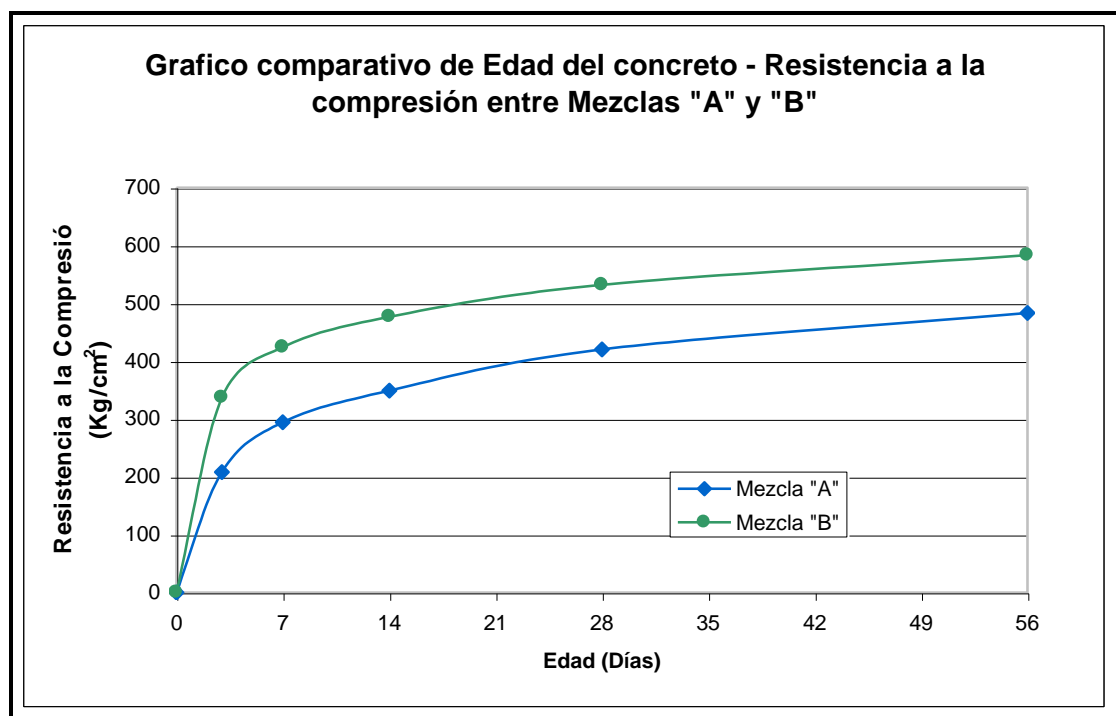


FIGURA 111: Curva de edad - resistencia a la compresión, mezclas A y B.

Por otra parte, el acabado de los especímenes luego de ser desmoldados fueron satisfactorios, ya que en toda la estructura externa del cilindro no se observaron oquedades de ningún tipo; en cuanto al acabado en la superficie se observó una pequeña lámina irregular a pesar de que se le realizó un enrasado previo al fraguado; y en cuanto a la estructura interna pudo observarse una clara homogeneidad en la distribución de la matriz del concreto (véase la Figura 112 y 113). Estos resultados nos indican que el concreto se acomodó y distribuyó homogéneamente en los moldes sin necesidad de algún tipo de compactación.

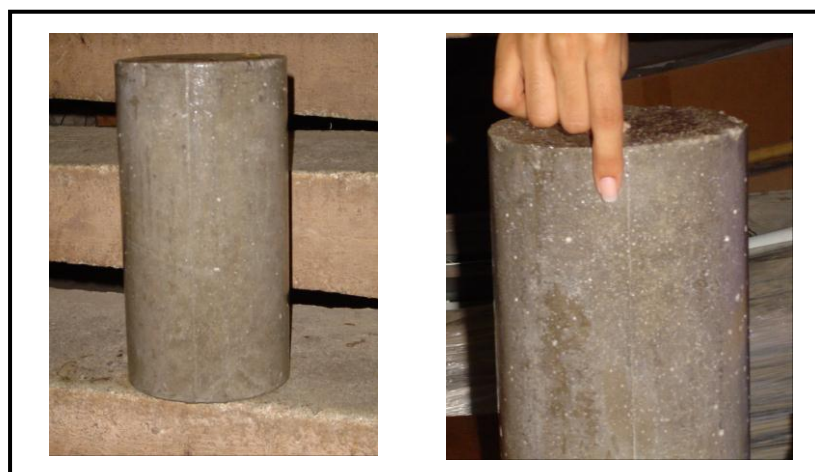


FIGURA 112: Acabado en la superficie de los especímenes de CAC.

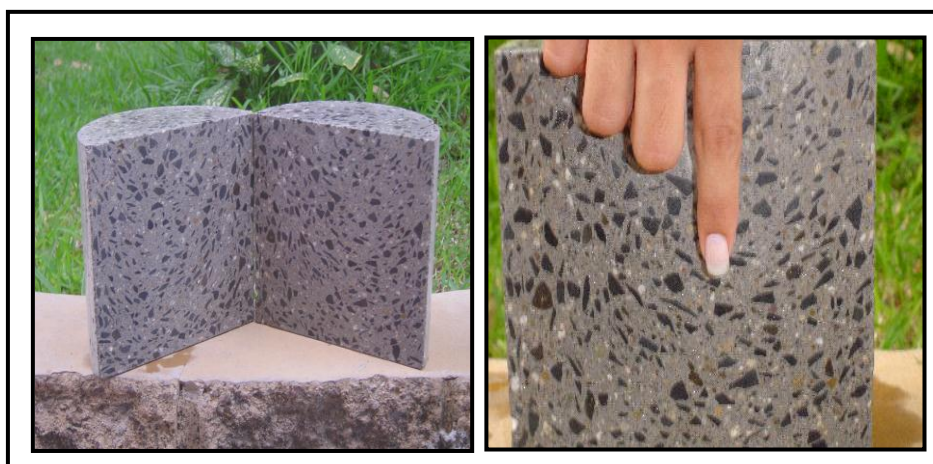


FIGURA 113: Distribución de los agregados en la matriz de los especímenes de CAC.

Finalmente el tipo de falla que los cilindros de CAC presentaron, fueron en un 70 % fallas por cortante. (véase la Figura 114)

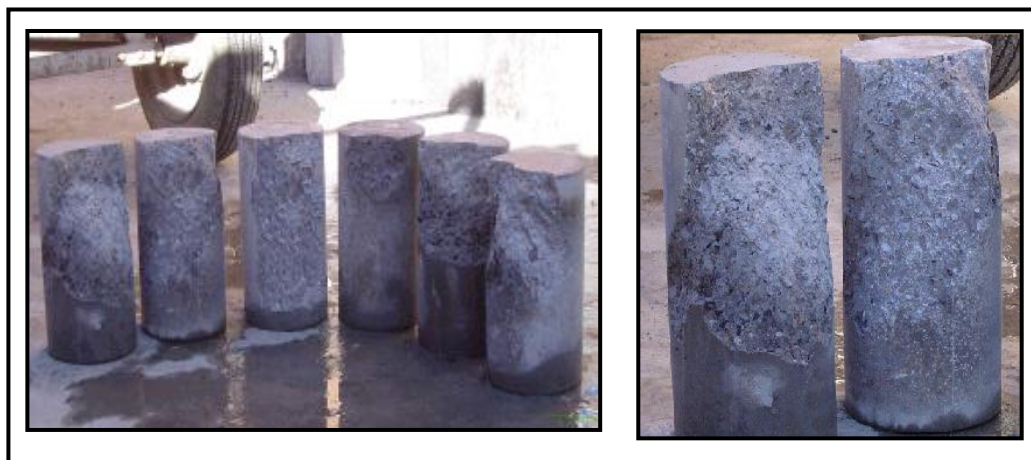


FIGURA 114: Falla observada en los especímenes de prueba a compresión.

5.5.2.2 RESISTENCIA A LA TENSIÓN POR FLEXIÓN

Para el ensayo a tensión por flexión se valoró más recomendable utilizar las dos cargas aplicadas en los tercios del claro (ASTM C 78), porque en esta condición de carga todo el tercio central del espécimen queda sometido al momento máximo de flexión y al correspondiente esfuerzo máximo de tensión, creando un estado constante de esfuerzo que da oportunidad para que la falla ocurra dentro de este tramo central.

En este sentido las fallas vistas en las viguetas de prueba en ambas mezclas se dieron en los tramos centrales de la viga (véase la Figura 115). En la mezcla A el resultado promedio del módulo de ruptura (M_r) a los 28 días es 55.29 kg/cm^2 , en tanto que en la mezcla B fue 73.125 kg/cm^2 .



FIGURA 115: Falla observada en las viguetas sometidas al ensayo de flexión realizado al CAC.

El informe del ACI 363 menciona que de acuerdo con los resultados experimentales obtenidos por diversos investigadores, el módulo de ruptura correspondiente a concreto de peso normal, suele hallarse en el intervalo comprendido entre $1.99 \sqrt{f'_c}$ y $3.18 \sqrt{f'_c}$ expresado en kg/cm^2 . Donde se observa la relevante influencia que tiene la resistencia a la compresión para estimar la resistencia a la tensión por flexión.

Tomando en cuenta la resistencia a la compresión a los 28 días de ambas mezclas, se estimó el módulo de ruptura, el cual vemos en la Tabla 60, y se puede observar que en base a este parámetro el M_r obtenido en los ensayos se encuentra dentro de los rangos establecidos.

TABLA 60: Relación entre la resistencia a la compresión y el módulo de ruptura del CAC.

RELACIÓN ENTRE $f'c$ Y Mr		
Mezcla	A	B
$f'c$ a los 28 días	420.19	531.89
Mr a los 28 días	55.29	73.125
$1.99 \sqrt{f'c}$	40.79	45.89
$3.18 \sqrt{f'c}$	65.19	73.34

En el grafico de la Figura 116 se puede ver también el comportamiento del concreto en el tiempo, y observamos la misma tendencia en aumento del esfuerzo.

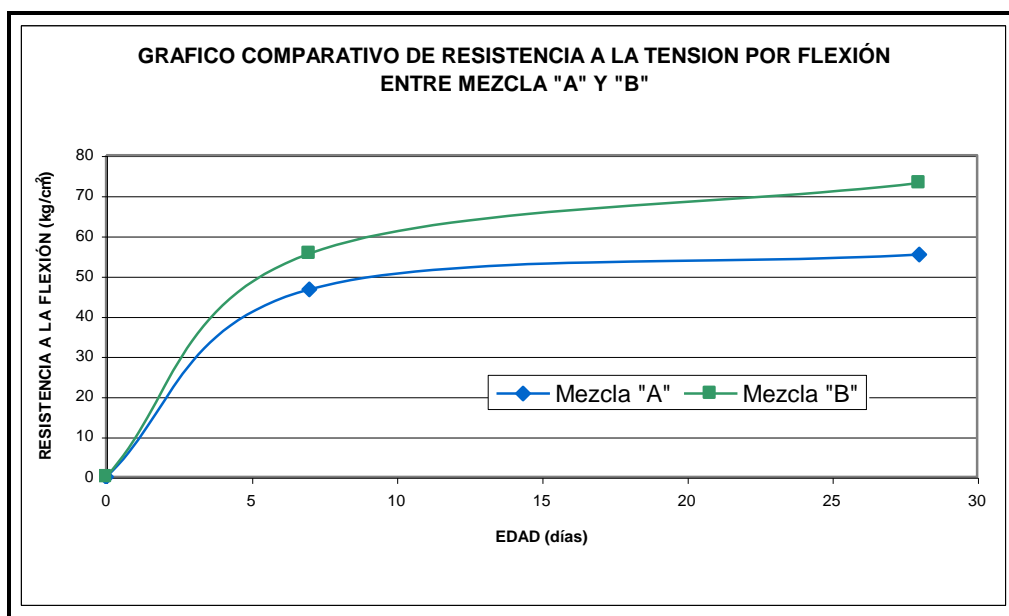


FIGURA 116: Curva de edad - resistencia a la tensión por flexión, mezcla A y B.

CONCLUSIONES

1. Los materiales constituyentes de una mezcla de Concreto Autocompactable (CAC), deben ser evaluados aplicando las normas de calidad tradicionalmente utilizadas en El Salvador; los agregados deben cumplir los requisitos de calidad especificados en la norma ASTM C 33 y el cemento debe estar conforme a la norma ASTM C 150 ó ASTM C 595, en el caso del cemento puro ó mezclado respectivamente.
2. La grava de origen basáltico utilizada en el presente trabajo, cumple con las solicitudes de la teoría sobre CAC, los resultados de los ensayos para determinar sus propiedades muestran que es un material adecuado para producir concreto de peso normal y obtener una correcta durabilidad en estado endurecido, además su distribución granulométrica con Tamaño Máximo Nominal de 3/8", define características beneficiosas para obtener las propiedades de autocompactabilidad.
3. La arena utilizada en la investigación, es lavada previo al procedimiento de acopio, cumple con los parámetros sugeridos para una arena de origen natural ^[5] y posee un Módulo de Finura de 2.63 que la clasifica como Arena Media Fina, característica que favorece la autocompactabilidad de la mezcla.
4. El contenido de partículas pasantes la malla N° 100 son importantes, para obtener las características autocompactables de la mezcla, la puzolana presente en el cemento en cantidades aproximadas al 15%, mejoró en esta investigación la capacidad de fluir del concreto.
5. El aditivo superplastificante es fundamental en la obtención de fluidez y reducción de agua en mezclas de CAC; está compuesto de policarboxilatos modificados, que por sus características químicas, producen un efecto estérico con un perímetro de influencia mayor, que los aditivos superplastificantes normales.

6. La estabilidad de una mezcla de CAC puede ser mejorada utilizando agregados de naturaleza semejante, para el caso del presente estudio la gravedad específica de la grava y la arena es de 2.457 y 2.476 respectivamente, donde la analogía resulta satisfactoria para evitar segregación por diferencia de densidad.
7. El diseño de mezcla de CAC utilizado es calculado por volúmenes y no por masa de material, procedimiento que permite determinar las proporciones basándose en el desempeño de cada uno de los componentes según sus características para obtener la autocompactación de la mezcla.
8. La propuesta para el diseño de mezcla de CAC, comprende la determinación de forma individual de las proporciones de grava y arena en un diseño de esqueleto granular, cemento y agua en la composición de la pasta y aditivo en una mezcla de mortero, procedimiento que permite realizar el ajuste de las proporciones dependiendo del comportamiento de los materiales en cada situación, para finalmente observar su desempeño en una mezcla de concreto hasta obtener características autocompactables.
9. El procedimiento de inclusión de aire no es considerado como alternativa para obtener la autocompactabilidad de la mezcla de concreto, el contenido del mismo representa el que naturalmente queda atrapado por el acomodo de las partículas considerado por las investigaciones realizadas por el EFNARC, como un 2% del volumen total de la mezcla.
10. En el diseño del esqueleto granular se utiliza el peso unitario suelto de la mezcla de agregados, debido a la similitud que se logra con las condiciones de campo aplicadas al concreto, donde no debe considerarse ningún procedimiento de compactación.
11. En el diseño de la composición de la pasta, se define el desempeño del cemento y se analiza a través de la observación, aspectos como la textura de la mezcla y la velocidad para alcanzar la extensión, con el objeto de fundamentar la elección del tipo de cemento a utilizar.

12. La investigación en el diseño de pasta con el cemento puro ASTM C 150, demostró que las características de extensión eran aceptables, pero el cambio a cemento mezclado ASTM C 595, para moderar el factor de resistencia (350 kg/cm^2), mostró que este tipo de cemento puzolánico es más efectivo, ya que la demanda de volumen de finos para un CAC (aproximadamente 500 kg por m^3 de concreto) es alta y en este caso el cemento puro sería excesivo para la resistencia esperada; además las partículas de puzolana son adecuadas para dar propiedades de cohesión, fluidez y estabilidad a la mezcla.

13. La dosificación del aditivo en una mezcla de mortero es un primer acercamiento a su comportamiento como material fluidificante; la capacidad del mismo es medida inicialmente bajo la influencia únicamente de la arena, debido a que se encuentra en mayor presencia en el esqueleto granular de una mezcla de CAC y a la importante influencia que ejerce el mortero en el concreto, debido a la presión de transferencia resultante al combinarse con el agregado grueso.

14. El procedimiento obligado antes de la realización de una mezcla de CAC, es el cálculo preciso de las humedades de los agregados para el ajuste del agua de mezclado en el diseño, debido a que los aditivos superplastificantes evidencian una deficiencia para actuar en presencia de cantidades de agua mayores a las demandadas.

15. En términos generales los ajustes en esqueleto granular, pasta, mortero y concreto deben orientarse a modificar las proporciones de grava/arena para evitar mezclas granulares que dificulten la fluidez; a la relación agua/finos para encontrar el punto límite en que la mezcla fluya sin presentar segregación; y a las dosificaciones de aditivo para encontrar el punto óptimo que definan una mezcla con características autocompactables.

16. En el trabajo experimental los volúmenes de grava y arena variaron de 45% y 55% a 30% y 70% respectivamente, en términos de esqueleto granular, diferencia que se atribuye al comportamiento preliminar de la mezcla que demandó mayores cantidades de arena para lograr una mayor fluidez y estabilidad.
17. En la proporción preliminar de la investigación se determinó una relación agua/finos de 1.0 ajustándose hasta obtener valores de 1.25 y 1.15 para la mezcla A y B respectivamente, situación descrita como satisfactoria en términos de racionalidad, ya que la estabilidad de la mezcla permitió incrementar la fluidez a base de un ajuste proporcional de agua/finos y no de volumen de cemento.
18. El diseño de mezcla del CAC demanda un alto contenido de finos necesarios para obtener las características de autocompactabilidad en estado fresco, pero utilizando únicamente los finos del cemento no es posible moderar el factor resistencia, por lo que se obtendrían valores elevados que destinarían su aplicación a estructuras que demanden esta condición.
19. Para determinar el comportamiento de la mezcla de CAC en estado fresco se consideró el análisis de la capacidad de relleno, capacidad de paso y resistencia a la segregación utilizando únicamente un ensayo de laboratorio para evaluar cada propiedad, calificando como los mas adaptables a nuestro medio, el ensayo de cono Abrams invertido, Caja en L y Tamiz GTM.
20. El ensayo de extensión utilizando el equipo de Cono Abrams invertido, es una práctica conocida internacionalmente que permite establecer comparaciones confiables de los resultados con otras investigaciones, debido al estándar de las dimensiones del equipo y sencillo procedimiento de aplicación, condiciones que lo clasifican como el ensayo de laboratorio y campo de mayor expectativa para ser implementado.

21. Los resultados obtenidos es el ensayo de Caja en L, deben ser analizados bajo el entendido que el equipo no posee una especificación normada por ninguna institución y tampoco posee un distribuidor local, viéndose en la obligación para realizar esta investigación de reproducirlo con los recursos disponibles en el medio.

22. El ensayo de Tamiz G_TM demanda la utilización de una malla N° 4 de 12" de diámetro, los resultados presentados en esta investigación están sometidos a la influencia de usar dos mallas N° 4 de 8" de diámetro, en lugar de la sugerida por el procedimiento original, por lo que se debe considerar esta alteración al analizar los resultados.

23. En estado endurecido se efectuó un análisis de la resistencia a compresión simple y flexión, debido a que son los ensayos mas comúnmente utilizados en el país y permiten definir el comportamiento mecánico del concreto en un elemento estructural, se debe destacar, que en ambos procedimientos se excluyó la compactación al concreto que establece la norma ASTM C 192 para la elaboración de especímenes de prueba.

24. Durante el presente trabajo experimental los factores mas importantes a controlar están enfocados en la temperatura y los tiempos de mezclado, ya que debido a la utilización de aditivos viscosos a base de policarboxilatos, es necesario implementar tiempos de mezclado de 6 min y tiempos adicionales de reposo y remezclado entre 5 min y 15 min para obtener las características esperadas. Además debe considerarse que la asimilación del aditivo es mas rápida en condiciones de temperatura cálida.

25. En los resultados del presente estudio, se observó que en términos de trabajabilidad, las características de autocompactabilidad fueron cumplidas en las dos mezclas diseñadas; ya que los parámetros obtenidos fueron de 70.91 cm y 71.31 cm de fluidez, una resistencia a la segregación de 13.23 % y 16.51 % y una relación de bloqueo de 0.98, para la mezcla A y B respectivamente. La mezcla B presentó un mayor riesgo de segregación por encontrarse fuera del porcentaje de seguridad de acuerdo a los parámetros sugeridos por el EFNARC en la prueba del tamiz GTM.

26. En el presente estudio, los resultados del ensayo para evaluar el tiempo en el que aun se mantiene autocompactable a temperatura ambiente, no fueron aceptables, ya que en 30 min, ambas mezclas diseñadas perdieron fluidez de 76 cm a 62 cm en la mezcla A, y de 78 cm a 61 cm en la mezcla B; lo que indica que en términos de autocompactabilidad su colocación puede verse afectada negativamente y sugiere incorporar un aditivo retardante para mejorar su comportamiento.

27. Se evaluaron en fresco otras propiedades del concreto como los tiempos de fraguado inicial y final, temperatura, peso unitario y contenido de aire, utilizando como guía los procedimientos especificados por las normas ASTM sin realizar el proceso de compactación indicado, de esta forma los resultados obtenidos evalúan la influencia únicamente de la gravedad para el acomodo de las partículas de concreto.

28. El tiempo de fraguado inicial y final de las mezclas estudiadas a una temperatura de 25 ° C mostraron valores satisfactorios en el comportamiento de ambas mezclas, ya que se obtuvieron valores en promedio de 4 h 33 min a 7 h 18 min para la mezcla A; y 5 h 8 min a 7 h 0 min para la mezcla B. Donde podemos observar que en ambas el tiempo de rigidización inicia con lapsos de tiempo bastante amplios que disminuyen el riesgo de posibles juntas frías en las estructuras.

29. Las temperaturas registradas en las mezclas de CAC fueron en promedio de 25.27 °C y 27.2 °C para A y B respectivamente; donde puede observarse que ambas mezclas son favorables en condiciones de ambiente, ya que cumplen con la norma técnica para el control de calidad de los materiales estructurales de El Salvador, que recomienda un máximo de 32 °C.

30. El peso unitario obtenido para cada una de las mezclas fue de 2282 kg/cm³ y 2232.69 kg/cm³ en la mezcla A y B respectivamente. Ambos valores corresponden al rango establecido de peso unitario para un concreto de peso normal.

31. El contenido de aire registrado para la mezcla A fue de 3.8 % el cual se considera alto con respecto al contenido de aire de diseño; comportamiento que puede adjudicarse a la composición química del aditivo que no está totalmente definida y podría tener alguna influencia en el concreto. En tanto que, para la mezcla B se obtuvo 1.93 % lo que representa que el contenido de aire de diseño es un valor muy cercano al real.

32. El volumen de aire considerado en el diseño de mezcla de CAC es del 2%, sugerido por el EFNARC para cualquier diseño de mezcla; el ACI 211 sugiere un rango de 3% a 2% para un Tamaño Máximo Nominal entre 3/8" y 3/4" respectivamente, por lo que los valores obtenidos en el ensayo de contenido de aire realizado en esta investigación, podrían también verse afectados por el TMN de 3/8" utilizado.

33. Las resistencias a la compresión a los 28 días registradas en promedio fueron de 420.19 kg/cm² y 531.89 kg/cm², para la mezcla A y B respectivamente; superando los 350 kg/cm² para el cual fueron diseñadas; esto es debido al alto contenido de finos de cemento utilizado para alcanzar las características de autocompactabilidad deseadas.

34. En la mezcla A el resultado promedio del módulo de ruptura a los 28 días fue de 55.29 kg/cm², en tanto que en la mezcla B fue 73.125 kg/cm². Valores que se encuentran en el intervalo comprendido entre $1.99 \sqrt{f'_c}$ y $3.18 \sqrt{f'_c}$, establecido por el ACI, en relación a la resistencia a la compresión para concreto de peso normal.

35. En la investigación realizada se consideró una evaluación adicional a la mezcla de CAC, a través de la observación del acabado superficial de los especímenes en estado endurecido y la distribución interna de los agregados en la matriz de concreto, obteniendo superficies lisas con pocas o ninguna oquedad y una distribución homogénea de los agregados que evidencia una buena resistencia a la segregación.

36. La metodología propuesta en el presente trabajo de investigación para el diseño de CAC puede ser implementada en El Salvador, bajo el entendido que es un estudio preliminar y que las investigaciones deben ser mas específicas. Los materiales componentes utilizados que contribuye a la autocompactabilidad de la mezcla, están disponibles en el mercado nacional, el procedimiento de diseño empleado justifica cada proporcionamiento utilizando ensayos de laboratorio que proyectan resultados específicos para cada combinación de materiales, garantizando la funcionalidad adecuada de las características en estado fresco y endurecido.

RECOMENDACIONES

1. Actualmente en El Salvador se inician las investigaciones sobre Concreto Autocompactable (CAC), por lo que el contenido del presente trabajo de graduación debe analizarse desde una perspectiva introductoria para motivar la realización de otras investigaciones que puntualicen en parámetros más específicos.
2. Para utilizar el CAC como material de construcción, es necesario realizar previamente un estudio técnico y económico en base a las solicitudes del proyecto, tomando en cuenta los resultados de esta investigación y los antecedentes que tiene este tipo de concreto en la efectividad para solucionar problemas de colocación en países extranjeros.
3. En este estudio la propuesta para la mezcla de CAC corresponde a un determinado tipo de agregados, cemento y aditivos; es por ello que para elaborar este tipo de concreto con otros materiales, se debe considerar un diseño diferente que corresponda a los recursos a utilizar, tomando como referencia la metodología aplicada en este estudio.
4. En investigaciones de naturaleza semejante a la presentada en este trabajo, se debe implementar un proceso de acopio total de los materiales principalmente los granulares para garantizar la calidad de los mismos y que durante los procedimientos de ajuste de las proporciones en la mezcla no se obligue a considerar correcciones en las propiedades de los materiales utilizadas inicialmente en el diseño.
5. En la determinación de las propiedades de los materiales es necesario utilizar procedimientos estandarizados para garantizar la correcta elección de los materiales requeridos que cumplan con las solicitudes del proyecto y que contribuyan a la autocompactabilidad de la mezcla.

6. El Tamaño Máximo Nominal del agregado grueso para un CAC, debe preferentemente oscilar entre $3/4''$ y $3/8''$, y en la aplicación de diseños de mezcla con Tamaño Máximo Nominal de $1''$ los estudios de laboratorio deben ser más exhaustivos debido a la dificultad para obtener una correcta estabilidad de la mezcla, garantizando así el cumplimiento de sus propiedades autocompactables.
7. La finura de los materiales garantiza buena estabilidad en las mezclas de CAC, por lo que es necesario utilizar en el cálculo de las proporciones, arena clasificada por su módulo de finura, como fina o media fina, esta condición motiva a realizar investigaciones con mezclas de agregados que se complementen entre si utilizando dos o más tipos de arenas entre medias finas y muy finas.
8. Es importante para lograr estabilidad en la mezcla de CAC que la grava y arena utilizadas posean gravedades específicas semejantes para lograr la suspensión de las partículas y evitar que la diferencia de densidad sea evidente provocando la segregación de la mezcla.
9. No se ha determinado ninguna restricción para la elección del tipo de cemento en mezclas de CAC, pero la relación del cemento con las adiciones activas que definen las cantidades de finos disponibles en el diseño, permite sugerir la investigación de otros tipos de cemento que incluyan mayores porcentajes de puzolanas que el estudiado en este trabajo de investigación.
10. Los aditivos superplastificantes reductores de agua de última generación permiten la autocompactabilidad de las mezclas de CAC, es necesario que las investigaciones enfocadas al desarrollo de esta tecnología determinen el efecto de estos con otro tipo de aditivos como acelerantes, retardantes e incluso de aire, destinados a satisfacer solicitudes especiales en los proyectos.
11. El diseño de mezcla de CAC debe basarse en el volumen y no en la masa de los componentes, de esta manera es posible destacar el verdadero desempeño de cada material durante los ensayos de laboratorio utilizados en el proporcionamiento.

12. El volumen de aire considerado en el diseño de mezcla de CAC es del 2%, sugerido por el EFNARC para cualquier diseño de mezcla, es importante realizar investigaciones para determinar si es posible mejorar la fluidez de la mezcla a través del procedimiento de inclusión de aire.
13. La mezcla de grava y arena en el diseño del esqueleto granular, debe producir una compacidad que demande una cantidad de pasta en valores mayores o iguales al 40%, para evitar mezclas granulares que dificulten la fluidez de la mezcla.
14. La cantidad de cemento debe ser determinada tomando en cuenta no solo la resistencia de diseño esperada, sino también el aporte como material fino pasante la malla N° 100 necesario para obtener la autocompactabilidad de la mezcla. En la presente investigación el cemento Pórtlan IP ASTM C 595 con 15% de puzolana, posee mayores beneficios en la mezcla de CAC.
15. En el caso de la arena utilizada en esta investigación, el porcentaje de material fino pasante la malla N° 100, no fue tomado en consideración para el diseño de mezcla, por ser un valor relativamente bajo de aproximadamente un 5%; para arenas finas con una contribución mayor (pero abajo del 10%, según la ASTM C 33), debe incluirse este porcentaje, como un aporte de material fino en el diseño.
16. En el diseño de la composición de la pasta se debe verificar el comportamiento del cemento y sus beneficios para obtener la autocompactación de la mezcla, es posible en este procedimiento determinar el tipo de cemento mas conveniente a utilizar.
17. Entre los procedimientos de ajuste en el diseño de mezcla de CAC, debe considerarse que las variaciones en la cantidad de cemento obligan a un rediseño desde la composición de la pasta y produce efectos secundarios como la alteración de la resistencia, por lo que se debe aplicar como última alternativa de ajuste.

18. El procedimiento de dosificación del aditivo superplastificante en una mezcla de mortero obliga someter la mezcla a dos ensayos de fluidez, es preciso cumplir inicialmente los parámetros exigidos por el ensayo de extensión del mini slump para realizar gradualmente los ajustes pertinentes y posteriormente utilizar el ensayo de escurrimiento del embudo V, por considerarlo de mayor exigencia.
19. La dosificación del aditivo superplastificante para obtener mezclas de CAC debe partir de las mas altas recomendadas por las hojas técnicas, ajustándola hasta obtener las características de autocompactabilidad solicitadas.
20. Para obtener mezclas de concreto óptimas que cumplan con los requisitos de autocompactación se deben realizar varias dosificaciones en las que se ajusten relaciones de proporción para alcanzar las características deseadas, siguiendo los lineamientos del procedimiento sugerido en esta investigación.
21. El ajuste en la cantidad de agua de mezclado, a través del calculo de las humedades de los agregados antes de la dosificación de la mezcla de CAC, debe ser un proceso constante y preciso para evitar alteraciones en el comportamiento del aditivo superplastificante utilizado.
22. Debe considerarse durante la producción de mezclas de CAC que la utilización de aditivos superplastificantes a base de policarboxilatos, demanda mayores tiempos de mezclado para obtener la asimilación del aditivo y lograr el desempeño total del mismo.
23. En la presente investigación fueron utilizados tres ensayos de laboratorio (Cono Abrams invertido, Caja en L, Tamiz GTM) para determinar las propiedades de autocompactabilidad de la mezcla de concreto, es necesario evaluar los ensayos restantes (Anillo J, Embudo V para concreto, Caja en U, Caja de Relleno y Orimet), con el objeto de definir su capacidad para ser implementarlos en El Salvador.

24. Las propiedades de capacidad de relleno, capacidad de paso y resistencia a la segregación, pueden ser evaluadas utilizando un ensayo de laboratorio para cada una de ellas; pero es importante tomar en cuenta las inspecciones visuales al término de cada procedimiento ya que el comportamiento de segregación, exudación y acomodo de las partículas son propiedades que pueden ser determinadas cualitativamente por observación en todos los ensayos.

25. Los procedimientos de ensayo en mezclas de CAC para determinar características como el fraguado inicial y final, peso volumétrico y contenido de aire, son realizados bajo las normativas estándar de la ASTM utilizando únicamente la influencia de la gravedad para el acomodo de la mezcla, es importante cuantificar la influencia de la compactación realizando un estudio comparativo de resultados.

26. Debido a que una mezcla de CAC demanda un aditivo superplastificante de última generación, cantidades de cemento altas, volumen de agua bajo y exclusión de los procesos de compactación, es necesario ahondar en investigaciones que respalden el comportamiento del CAC en estado endurecido frente a la influencia de condiciones ambientales agresivas, permeabilidad, contracción y desgaste, a través del estudio del CAC de alto desempeño.

27. Es recomendable aumentar la apertura en las investigaciones del CAC en El Salvador por parte de entidades e instituciones que colaboren para estandarizar los procedimientos y normativas con parámetros adecuados a nuestro ambiente.

BIBLIOGRAFÍA GENERAL

- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI): “Practica Recomendable para la Evaluación de los Resultados de las Pruebas de Resistencia del Concreto”; Informe del Comité ACI 214.

- INSTITUTO DE INGENIERÍA, (UNAM) (1994): Manual de Tecnología del Concreto, Volumen 1, 2 y 3; Comisión Federal de Electricidad, Limusa Noriega Editores.

- KOSMATKA, Steven H. y PANARECE, William C. (1992): Diseño y Control de Mezclas de Concreto; Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A. C.

- FEDERACIÓN EUROPEA DEDICADA A SISTEMAS ESPECÍFICOS DE HORMIGÓN Y PRODUCTOS QUÍMICOS ESPECIALIZADOS PARA LA CONSTRUCCIÓN (EFNARC) (2002): “Especificaciones y directrices para el Hormigón autocompactable - HAC”; EFNARC Secretary-General.
www.efnarc.org/efnarc/SandGforSCC.PDF

- OUCHI, Masahiro y OKAMURA, Hajime (2003): “Self Compacting Concrete”; Revista Journal of Advanced Concrete Technology Vol.1 (Abril) pp 5-15.
www.j-act.org/headers/5-15.pdf

- SURLAKER, Samir (2002): “Self Compacting Concrete”; Revista ACI Journal (Enero - Marzo).

- GÓMEZ, Paulo C. (2002): “Diseño de Hormigones Autocompactables de Alta Resistencia. Procedimiento para su dosificación y métodos de caracterización”; Revista Cemento Hormigón, N° 832 (Enero).

- RODRÍGUEZ, Arturo (2003): “Concreto Autocompactable”; Revista Construcción y Tecnología N° 177 (Febrero).
- CONSTAIN, Cesar (2000): “Concreto Autocompactado, Una Revolución Tecnológica”; Revista Construcción y Tecnología N° 150 (Noviembre).
- OKAMURA, Hajime (1998): “Concreto Autocompactado de Alto Comportamiento”; Revista Construcción y Tecnología N° 127 (Diciembre).
- PEÑA, Bernardo de la (2000): “Hormigón Autocompactante. Consideraciones para el diseño y colocación”; Revista Bit, (Diciembre).
- PEÑA, Bernardo de la (2001): “Hormigón Autocompactante”; Revista Bit, (Junio).
- SEMIOLI, William (2001): “Self Placing Concrete”; Revista Concrete International, Vol. 23, N°12 (Diciembre).
- ROMERO, Isidro y MERCADO, Emigdio (2001): El Concreto Autocompactado en la Vivienda; Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto (IMCYC) (27 de Agosto).
- SHINODO, Takefumi y MATSUOKA, Yasunori (2003): “Development Of Combination - Type Self Compacting concrete And Evaluation Test Methods”; Revista Journal of Advanced Concrete Technology Vol.1 (Abril) pp 26-36.
www.j-act.org/headers/26-36.pdf
- DEHN, Frank, HOLSCEMACHER, Klaus y WEIBE, Dirk (2000): “Self Compacting Concrete (SCC) Time Development of the Material Properties and the Bond Behaviour”; Revista LACER Vol. 5.
www.uni-leipzig.de/~massivb/institut/lacer/lacer05/105_15.pdf

- FERRARIS, Chiara F., BROWDER, Lynn, OZYLDIRIM, Celik y DACZKO, Joseph : “Workability of Self Compacting Concrete”; National Institute of Standards and Technology.
www.fire.nist.gov/bfrlpubs/build00/PDF/b00068.pdf
- DIETZ, Jörg y MA, Jiaxin (2000) : “Preliminary Examinations for the Production of Self Compacting Concrete Using Lignite Fly Ash”; Revista LACER Vol. 5.
www.uni-leipzig.de/massivb/institut/lacer/lacer05/l05_16.pdf
- JOHANSEN, Kare y HAMMER, Tor Arne: Drying Shrinkage of “Norwegian” Self Compacting Concrete.
www.itn.is/ncr/publications/doc-27-4.pdf
- COLLEPARDI, Mario : A Very Close Precursor of Self Compacting Concrete.
www.encosrl.it/encosrlTA/servizi/pdf/additivi/89.pdf
- LI, Victor C., KONG, H. J. y WEN CHAN, Yin: Development of Self Compacting Engineered Cementitious Composites.
www.engineeredcomposites.com/publications/iwscc_self-c_ecc_98.pdf
- OZYILDIRIM, Celik y LANE, D. Stephen (2003): Final Report Evaluation of Self Consolidating Concrete; Virginia Transportation Research Council (VTRC), (Junio).
www.viriniadot.org/vtrc/main/online_reports/pdf/03-r13.pdf
- JIN, J. y DOMONE, P. L. (2002): Relationships Between the Fresh Properties of SCC and Its Mortar Component; Proceedings of the First North American Conference on the Design and Use of Self Consolidating Concrete. Centre for Advanced Cement Based Materials, Northwestern University, Chicago, pp 33 - 38, (Noviembre).
www.acbm.northwestern.edu/techxferday.html

- DIETZ, Jörg y MA, Jiaxin (2002): “Ultra High Performance Self compacting Concrete”; Revista LACER Vol. 7.
www.iii.is/scc/contents3.pdf

- RAMSBURG, Paul, BARENO, John, LUDIRJA, Darmawan y MASEK, Ondrej (2003): Durability of Self consolidating concrete in Precast Applications; ISHPC
www.oldcastle-precast.com/Oldcastle_Admin/UploadFiles/durability.doc

- JIN, J. y DOMONE, P. L. (1999): Propierties of Mortar for Self Compacting Concrete; Proceedings of RILEM International Syposium on Self Compacting Concrete, RILEM Procedeings PRO 7, Paris (Septiembre) pp 109 - 120, Estocolmo.
www.wauu.de/Science/Technology/Materials/Concrete_and_Mortar/

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] OKAMURA, Hajime: "Diseño de Hormigones Autocompactables de Alta Resistencia"; Revista Cemento Hormigón; Pág. 32-33. 1997.
- [2] OKAMURA, Hajime y MASAHIRO, Ouchi, (2003): "Self Compacting Concrete" Journal of Advanced Concrete Technology, vol.1 Pág. 5-15, Abril.
- [3] TECNOLOGÍA SIKA VISCOCRETE: "Sika Viscocrete Concreto Autocompactable"; Referencias Internacionales Serie Sika Concreto; Pág. 8-9.
- [4] FEDERACIÓN EUROPEA DEDICADA A SISTEMAS ESPECÍFICOS DE HORMIGÓN Y PRODUCTOS QUÍMICOS ESPECIALIZADOS PARA LA CONSTRUCCIÓN (EFNARC) (2002): "Especificaciones y directrices para el Hormigón autocompactable - HAC"; EFNARC Secretary-General.
www.efnarc.org/efnarc/SandGforSCC.PDF
- [5] KOSMATKA, Stiven H. y PANARESE, William C. (1992): Diseño y control de mezclas de concreto, Cámara Nacional de la Industria Editorial México. Pag.20.
- [6] COMISIÓN FEDERAL DE ELECTRICIDAD (1994): Manual de Tecnología del Concreto, Instituto de Ingeniería UNAM, México Sección 1.
- [7] AMAYA DE LEON, Rolando (1996): "Tecnología del Concreto - Fabricación del Concreto y su Control de Calidad", Concretera Migueleña- CESSA-ISCYC.
- [8] ACI Committee 116 (1990): "Cement and Concrete Terminology", American Concrete Institute, Detroit, Mich.

- [9] POWERS, T.C. (1968): "The Properties of Fresh Concrete". John Wiley and Sons, INC. New York, N.Y.
- [10] ACI Committee 309 (1987): "Guide for Consolidation of Concrete", American Concrete Institute, Detroit, Mich.
- [11] ASTM Designation C1017 (1990): "Standard Specification for Chemical Admixtures for Use in Producing Flowing Concrete", American Society for Testing and Materials, Philadelphia, Pa.
- [12] ACI Committee 211. Report 211.1 (1991): "Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight and Mass Concrete", American Concrete Institute, Detroit, Mich.
- [13] ACI Committee 211. Report 211.3 (1987): "Standard Practice for Selecting Proportions for No-Slump Concrete", American Concrete Institute, Detroit, Mich.
- [14] U.S. Bureau of Reclamation (1975): "Temperature of Concrete", Concrete Manual Designación 35, Octava Edición. Department of the Interior Washington, D.C.
- [15] KLIEGER, P. (1958): "Effect of Mixing and curing Temperature on Concrete Strength". ACI Journal Proceedings V. 54 Detroit, Mich.
- [16] FREEDMAN, S. (1974): "Properties of materials for reinforced concrete", Hand book of concrete engineering, Chapter 6. Van Nostrand Reinhold Co. New York.
- [17] BURGESS, A. J., RYELL, J. y BUNTING, J. (1987): "High strength concrete for the willows bridge", ACI Journal Vol. 67. N° 8.

- [18] NEVILLE, A. M. y BROOKS, J. J. (1987): "Concrete Technology", Longman Scientific and Technical, Longman Group. Essex, Eng.
- [19] U.S. Bureau of Reclamation (1975): Concrete Manual, Removal of forms and Finishing. U.S. Department of the Interior, Chapter VI, seccion D. Washington, D.C.
- [20] LUTZ, L. A. (1978): "Bond with reinforcing steel", American Society for Testing and materials (ASTM STP 169 B) , Chapter 21, Philadelphia, Pa.
- [21] GOMES C. C. Paulo, GETTU Ravindra, AGULLO Luis y BERNARD Camilo (2002): "Diseño de hormigones autocompactables de alta resistencia, procedimiento para su dosificación y métodos de caracterización". Revista Hormigón.
- [22] AGUILAR, Carlos: "Hormigón Autocompactante: De la Investigación a la práctica", Universidad de Santiago de Chile.
- [23] COLLEPARDI, M. (1975): Rheoplastic Concrete, II Cemento, pag. 195-204.
- [24] COLLEPARDI, M. (1976): Assessment of the Rheoplasticity of Concretes, Cement and Concrete Research, pag 401-408.
- [25] ACI (1973): "Manual of Concrete Practice, Recommended Practice for Selecting Proportions for Normal Weight Concrete", American Concrete Institute (ACI 211.1-70), Part 1 Pág. 211-214.
- [26] SIKA VISCOCRETE (2000): "Concreto Autocompactante", Sika Guatemala.
- [27] RODRIGUEZ, Arturo: "Concreto Autocompactable", Revista Tecnología.

- [28] DR. DAVID Ho W. S. y DR. TAM CHAT Tim (2001): "Some Major of Self Compacting Concrete", Materials Technology.
- [29] DOMONE P. Mix design (2000): "Self-compacting Concrete "; State-of-the-art Report of RILEM Technical Committee Report, RILEM report 23, RILEM S.A.R.L. 174-SCC, Pág. 49 - 65.
- [30] FERRARIS C. F. (1999): "Measurement of the Rheological Propietis of High Performance Concrete: State of the Art Report", Journal of Research of NIST, vol. 104 #5, pp. 461 - 478.
- [31] PUNKKI, J., GOLASZEWSKI, J. y GJORV, O.E. (1996): "Workability loss of high-strength concrete", ACI Materials Journal, 93 - 5, Septiembre-Octubre.
- [32] BONEN, D. y SARKAR, S.L. (1995): "The superplasticizer adsorption capacity of cement pastes, pore solution composition and parameters affecting flow loss", Cement and Concrete, 25, 7, 1423-1434.
- [33] MAEKAWA, K., y OZAWA, K. (1999): "Development of SCC's prototype", Social System Institute, Self Compacting High Performance Concrete, 20-32.
- [34] HIBINO, M., OKUMA, M. y OZAWA, K. (1998): "Role of Viscosity agent in self-compactability of fresh concrete", Proceedings of the Sixth East-Asia Conference on Structural Engineering and Construction, 2, 1313-1318.
- [35] DOMONE J. y JIN J. (1999): "Properties of Mortar for Self-Compacting Concrete", Proceedings of RILEM International Symposium on Self-Compacting Concrete, Stockholm, RILEM Proceedings, University College London, UK PRO 7, Paris pp 109-120. Septiembre.

- [36] OUCHI, M., HIBINO, M., OZAWA, K. y OKAMURA, H. (1998): “A rational Mix Design method for mortar in Self-Compacting Concrete”, Proceedings of the Sixth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction, 2, 1307-1312.
- [37] NAGAMOTO, N., y OZAWA, K. (1997): “Mixture proportions of Self-Compacting High Performance Concrete”. ACI International, SP-172, 623-636.
- [38] FUJIWARA, H., NAGATAKI, S., OTSUKI, N. y ENDO, E. (1996): “Study on reducing unit powder content of high-fluidity concrete by controlling powder particle size distribution”. Conc. Lib. of Japan Soc. of Civil Engineering, 117-128, Diciembre.
- [39] NAWA, T., IZUMI, T. y EDAMATSU, Y. (1998): State-of-the-art report on materials and design of self-compacting concrete, Proc of Int. Workshop on Self-compacting Concrete, ed Ozawa K. and Ouchi, K., Kochi University of Technology, Japan, Agosto, pág. 160-190.
- [40] CHAI, H-W (1998): “Design and testing of self-compacting concrete” Ph. D thesis, University of London. Abril.
- [41] PEÑA, Bernardo de la (2000): “Consideraciones para el diseño y colocación de hormigón autocompactante”, Revista Bit, Departamento Técnico-Sika S.A. Chile, Pág. 14-16, Diciembre.
- [42] OUCHI, M.H., OZAWA, M., y OKAMURA, H., (1997): “Effect of superplasticizer on selfcompactability of fresh concrete”, TRB annual meeting, NO. 1574, pág. 37-40.

- [43] PETERSSON Ü., BILLBERG P. y VAN B. K. (1996): "A model for self-compacting concrete", Proc. from International RILEM Conference on Production Methods and Workability of Concrete, Paisley, Ed by P.J.M. Bartos, EUN Spon, Londres, pág.483-492.
- [44] OKAMURA H, MAEKAWA K y OZAWA K (1993): High performance concrete, Ghodo Shuppan, Tokyo, Japan.
- [45] TAKADA K., PELOVA G. I. y WALRAVEN J. C. (1998): "Influence of mixing efficiency on the mixture proportion of general purpose self-compacting concrete", Int. symposium on High Performance Concrete and Reactive Powder Concrete, Sherbrooke, Canada, Agosto, pág. 16-20.
- [46] KAYAT K H., TREMBLAY S. y PAULTRE P. (1999): "Structural response of self-consolidating concrete columns", Rilem symposium, Skarendahl Å, Peterson Ö, pág. 292 - 308.
- [47] EDAMATSU, NISHIDA N., y OUCI M. (1999): "A rational mix design method for self compacting concrete considering interactions between coarse aggregate and mortar particles", Rilem symposium, Skarendahl Å, Peterson Ö (1999), pág. 309 - 320.
- [48] BILLBERG P. (1999): "Self-compacting concrete for civil engineering structures - the Swedish experience", Swedish Cement and Concrete Research Institute, Research 99, pág. 2 - 80.
- [49] MATABEE K., MAEDA K. Y., KAZUIE Y. y AKIRA U. (1999): "Evaluation on the practicability of SCC", Rilem symposium, Skarendahl Å, Peterson Ö, pág. 617 - 628.

- [50] NISHIZAKI T., KAMADA F., CHIKAMATSU R. y KAWASHIMA H. (1999): "Application of high-strength self compacting concrete to prestressed concrete outer tank for LNG storage". Rilem symposium, Skarendahl Å, Peterson Ö, pág 629 - 638.
- [51] CHIKAMATSU R., SHINKAI C., KUSHIGEMASHI H. (1999): "Application of low shrinkage type selfcompacting concrete to an advanced large water purification plant", Rilem symposium, Skarendahl Å, Peterson Ö, pág 659 - 668.
- [52] JOHANSSON A, y SIMONSSON P, (2000): "Självkompakterande betong - utveckling och uppföljning vid tunnelling i Stäket (Self compacting concrete - development and follow-up at tunnel lining, Stäket. In Swedish with English summary)", Luleå University of Technology, Division of Structural Engineering, Diploma work 2000:180 CIV. Pág 130.
- [53] KITAMURA H., NISHIZAKI T., HIDEYOSHY I., CHIKAMATU R., KAMADA F. y OKUDATE M. (1998): "Construction of Prestressed Outer Tank for LNG Storage Using High-Strength Self-Compacting Concrete", Proceedings of the International Workshop on Self-Compacting Concrete, Kochi, (23 - 26 Agosto), Japan Society of Civil Engineering, Concrete Engineering Series No 30, pág 262 - 291.
- [54] IZUMI I. y INOUE K. (1998): "State of the art Report on Construction of Building Structures", Proceedings of the International Workshop on Self-Compacting Concrete, Kochi, (23 - 26 Agosto), Japan Society of Civil Engineering, Concrete Engineering Series No 30, pág 292 - 309.
- [55] TRÄGÅRDH, J. (1999): "Microstructural features and related properties of self-compacting concrete", Rilem symposium, Skarendahl Å, Peterson Ö, pág. 175-186.

- [56] RAMSBURG, P. y NEAL R.E. (2002): "The use of a Natural Pozzolan to Enhance the Properties of Self-Consolidating Concrete". Presented at First North American Conference of the Design and Use of Self-Consolidating Concrete, Organizado por ACBM, (Noviembre 12-13).
- [57] JIANXIN Ma y JÖRG Dietz, Dipl.-Ing. (2002): "Ultra High Performance Self Compacting Concrete", Institut für Massivbau und Baustofftechnologie, Universität Leipzig; Revista LACER N°7, pág. 33-42.
- [58] DDF (1996): "Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto 1996". Gaceta Oficial del Distrito Federal, México, D.F.
- [59] RILEM (1970): Technical Recommendations for the Testing and Use of Construction Materials. RC 6, Bond Test for Reinforcement Steel. 2. Pull-out test".
- [60] KASZYNSKA María (2003): "Aplicación del CAC en la reparación de estructuras de concreto", Departamento de Ingeniería Civil. Universidad Técnica de Szczecin, (Polonia), pág. 70-311.

GLOSARIO

ADICIÓN: Material inorgánico finamente dividido utilizado en el concreto para mejorar ciertas propiedades o para lograr propiedades especiales. Existen dos tipos de adiciones inorgánicas: adiciones inertes (Tipo I) y adiciones hidráulicas latentes o puzolánicas (Tipo II).

ADITIVO: Material añadido en pequeñas cantidades durante el proceso de mezclado del concreto en relación con la masa de cemento para modificar las propiedades del concreto fresco o endurecido.

AGENTES MODIFICADORES DE LA VISCOSIDAD: Son materiales que permite producir CAC con un volumen reducido de materiales finos, se caracterizan por mejorar químicamente la cohesión de las mezclas, basados en celulosa modificada y polímeros; estos últimos producen un aumento significativo en el concreto en la fase líquida, lo cual resulta beneficioso en la autocompactabilidad de las mezclas.

AGREGADO FINO: Son arenas naturales o manufacturadas, con tamaños de partícula pasantes de la malla N° 4 (4.75 mm) y retenidas en la malla N° 100 (150 μ m).

AGREGADO GRUESO: Son materiales, cuyas partículas se retienen en la malla No. 16 (1.18 mm) y pueden variar hasta 152 mm.

AGRIETAMIENTO: Es una fisura que atraviesa de lado a lado el espesor de una estructura, es producto de cambios en el concreto provocados, por la existencia de tensiones superiores a su capacidad de resistencia, a esfuerzos debidos a la contracción por secado o a cambios de temperatura en condiciones de restricción.

BLOQUEO: Se produce un "bloqueo" cuando un material no puede fluir a través de una apertura específica (u orificio) debido al interbloqueo de las partículas del árido.

BOMBEO: Es la actividad que se realiza para transportar directamente concreto desde un punto central de descarga hasta la cimbra o hasta el punto de descarga secundario.

CAPACIDAD DE PASO (FLUIDEZ LIMITADA): La capacidad del concreto autocompactable para fluir a través de las armaduras sin segregación ni bloqueos.

CAPACIDAD DE RELLENO (FLUIDEZ NO LIMITADA): La capacidad del concreto autocompactable para fluir y rellenar completamente todos los espacios dentro del encofrado, por su propio peso.

COHESIÓN: Identificada con el esfuerzo de cedencia, representa la resistencia que la mezcla opone para deformarse e iniciar el flujo del concreto.

COLADO: Es la actividad de colocar el concreto en las cimbras o encofrados.

COMPACTACIÓN: Actividad que consiste en someter el concreto fresco, recién colocado, a la acción de fuerzas capaces de deformarlo con el doble propósito de que se adapte a la forma del espacio confinado por las cimbras y expulse el aire atrapado, de manera que resulte un material que sea lo más compacto posible.

COMPONENTES DEL CONCRETO: Son aquellos materiales que en conjunto constituyen el concreto, los cuales básicamente son agregados (arena y grava) y pasta (cemento Pórtland y agua); los aditivos y adiciones son incluidos en la mezcla como componentes especiales.

CONCRETO AUTOCOMPACTABLE (CAC): Concreto que puede fluir por su propio peso y llenar completamente el encofrado, incluso en presencia de un armado denso, sin necesidad de ninguna vibración, al tiempo que mantiene la homogeneidad.

CONCRETO CONVENCIONAL: Es aquel concreto de uso común en las obras que se construyen con equipos y procedimientos ordinarios, suele elaborarse mediante mezclas de consistencia semifluida, plástica y semiplástica en las que resulta aplicable la prueba de revenimiento.

CONCRETO ENDURECIDO: El concreto se encuentra en este estado cuando propiamente comienza la formación del tejido filamentosos producto de la hidratación, o gel de cemento, que endurece la pasta y que a su vez la capacita para aglutinar las partículas de los agregados, dándole resistencia mecánica a la masa del concreto.

CONCRETO FRESCO: Mezcla de concreto recién elaborada, la cual es una masa plástica que puede ser moldeada con relativa facilidad, y que a temperatura normal de prueba permanece en ese estado durante pocas horas. Inicia desde que el concreto está recién mezclado, hasta el principio de la rigidez del concreto.

CONSISTENCIA: Es una medida de la trabajabilidad referida a la movilidad y la compactación del concreto, en términos de la apariencia del concreto que exhibe al ser manipulada y expresada en base a resultados de alguna prueba específica.

CONTRACCIÓN: Aumento o disminución del volumen de concreto, provocando cambios en la forma y tamaño del elemento, por efecto de variaciones térmicas, cambios de humedad o por el efecto del agregado o aditivos utilizados.

CURADO: Procedimiento para mantener en el concreto, los contenidos de humedad y temperatura en condiciones satisfactorias, durante un período definido inmediatamente después de la colocación y acabado, con el propósito que se desarrollen las propiedades deseadas.

ENCOFRADO: Son las cimbras que se utilizan para moldear el concreto y darle la forma especificada en el diseño de la estructura.

ESTABILIDAD: Es la medida que el concreto opone a perder su homogeneidad original en el lapso comprendido desde que abandona la mezcladora hasta que adquiere el fraguado en su posición final.

EXUDACIÓN: Forma particular de segregación, el agua tiende a migrar a la superficie y crea una capa delgada, débil y porosa sin resistencia y deficiente durabilidad. Si el volumen evaporado es mayor que el volumen que migró a la superficie, se generan fisuras de retracción plástica.

FINOS: Material con un tamaño de partícula inferior a 0.125 mm, incluyendo el cemento, la adición y la aportación de las arenas.

FLUJO RELATIVO: Es la variación entre la fluidez, calculada a través de la extensión diametral inicial y final de la mezcla, contenida en un cono trucado con una base de 10 cm de diámetro, que posteriormente se libera para que fluya libremente.

FRAGUADO: El concreto recién fraguado es un material rígido pero frágil, con una incipiente resistencia mecánica que medida a compresión no suele exceder a 7 kg/cm².

GRANULOMETRÍA: Es la distribución de los tamaños de las partículas de un agregado tal como se determina por el análisis de tamices (ASTM C 136). El tamaño de partícula del agregado se determina por medio de tamices de malla de alambre de aberturas cuadradas.

JUNTAS FRÍAS: Son por lo general producto de la suspensión de labores de colocación del concreto, sea por la finalización de la jornada laboral, alguna interrupción en el suministro del material o por averías en el equipo empleado para su producción o transporte; esta interrupción debe ser tan larga para que el concreto colocado alcance su fraguado final antes de seguir el procedimiento de colado.

LIGANTE: Combinación entre el cemento y la adición activa en una masa de concreto autocompactable.

MEZCLADO: Es la incorporación de los componentes del concreto hasta el grado en que las reacciones entre sí se completen; esta puede llevarse a cabo mediante medios manuales o mecánicos.

MORTERO: La fracción de concreto consistente en la pasta junto con los agregados de tamaño inferior a 4.75 mm (malla N° 4).

OBSTÁCULO: Son las barras de refuerzo que pueden obstruir el paso libre del concreto dentro de un encofrado; el concreto autocompactable debe ser diseñado para que estas no representen problemas de segregación y bloqueo.

OQUEDADES: Son huecos vistos en el acabado superficial del concreto, el cual puede dar signo de una posible segregación.

PASTA: La fracción de concreto consistente en los finos junto con el agua y el aire.

PERMEABILIDAD: Se refiere a la cantidad de migración de agua a través del concreto cuando esta se encuentra a presión, o a la capacidad del concreto de resistir la penetración de agua u otras sustancias.

RELACIÓN AGUA/FINOS: Se establece como la relación entre el contenido de agua y el contenido de finos menores que la malla N° 100 (0.150 mm).

RESISTENCIA A LA SEGREGACIÓN (ESTABILIDAD): La capacidad del concreto autocompactable para mantener homogénea su composición durante el transporte y la puesta en obra.

REOLOGÍA: Examina el comportamiento del concreto y en general de los cuerpos sólidos, líquidos e intermedios entre ambos estados, que se deforman y fluyen por efecto de las fuerzas que actúan en ellos, es decir cuerpos que tienen cierta plasticidad.

REÓMETRO: Aparato para medir los coeficientes reológicos.

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN: Se puede definir como la máxima resistencia medida de un espécimen de concreto o de mortero a carga axial. Generalmente se expresa en kilogramos por centímetro cuadrado (kg/cm^2) a una edad de 28 días, se le designa con el símbolo $f'c$.

SEGREGACIÓN: Concentración diferencial de los componentes del concreto que da como resultado proporciones no uniformes en la masa, es decir, representa el estado opuesto de la homogeneidad.

SANGRADO: Es la migración del agua hacia la superficie superior del concreto recién mezclado provocada por el asentamiento de los materiales sólidos.

TIEMPO ABIERTO: El período en el que el concreto autocompactable mantiene las propiedades reológicas deseadas.

TIXOTROPÍA: Se define como el fenómeno consistente en la pérdida de resistencia de un coloide, al amasarlo, y su posterior recuperación con el tiempo. El CAC, se asemeja a un fluido newtoniano, que en reposo, recuperan la cohesión y el comportamiento sólido.

TRABAJABILIDAD (DOCILIDAD): Una medida de la facilidad con la que el concreto fresco puede colocarse y autocompactarse: se trata de una compleja combinación de aspectos de fluidez, cohesividad, compactabilidad y viscosidad.

VIBRADO: Es el método comúnmente utilizado para consolidar el concreto, el cual crea con la vibración una destrucción temporal de la fricción interna entre las partículas de agregado, y el concreto se comporta como líquido, se asienta en las cimbras por acción de la gravedad y los vacíos grandes de aire suben más fácilmente a la superficie.

VISCOSIDAD: Es una medida de la resistencia de un material para fluir debido a la fricción interna (y es la relación de esfuerzo aplicado respecto a la tasa de corte).

VISCOSÍMETRO: Aparato utilizado para medir la viscosidad.

ANEXO A
ANÁLISIS DE CALIDAD DE LA GRAVA 3/8"

4.1 YACIMIENTO LA CANTERA

4.1.1 Localización Geográfica

Este yacimiento está localizado en San Diego, a orillas de la Carretera de el Litoral, aproximadamente a 2 km de la carretera San Salvador – La Libertad. Se le ubica en el cuadrante topográfico 1: 50 000 denominado La Libertad, hoja 2356 IV, en jurisdicción de la ciudad de La Libertad, según las coordenadas: latitud 263.0 a 263.5 hacia el norte y longitud 467.7 a 468.5 hacia el este.

Con coordenadas Lambert $x. 4\ 68\ 720$ y $y. 2\ 63\ 920$ y $x. 4\ 68\ 440$ y $y. 2\ 63\ 300$, es decir a una distancia de unos 35 km de San Salvador. Es propiedad de CONCRETERA SALVADOREÑA S.A. de C.V. Limita al norte con la hacienda Tepeagua, al sur con la Carretera del Litoral, al este con la Montaña El Zancudo y al oeste con el río El Jute.

La parte inferior se encuentra a 20 m.s.n.m. y la más alta a 100 m.s.n.m. y en su parte media es atravesada por el río San Antonio, ver figura 4.



Figura 4: Ubicación del yacimiento La Canteras

4.1.2 Geología del yacimiento

Este yacimiento está constituido por dos derrames de lavas de composición básica (basalto a andesita basáltica). La colada inferior contiene basaltos columnares, mientras que la superior es muy variable desde vertical progresando a subhorizontal y a veces hasta formando rosetas. En ambos casos forman prismas hexagonales.

Basaltos columnares

La colada lávica basal está compuesta por basaltos de color gris oscuro en fractura fresca, y café amarillento en la superficie. Poseen textura afanítica con fenocristales de plagioclasas. Dureza muy alta y densidad alta. Los hexágonos tienen lado mayor de 1,00 m hasta 1,25 m y contienen fisuras con manchas de óxidos de hierro, óxidos de manganeso que sirven de planos de debilidad por donde se rompen los bloques (Véase figuras 5 y 6).



Figura 5: Columnas hexagonales con lado mayor de 1,00 m a 1,25 m



Figura 6: Discontinuidades rellenas con óxido

Colada Superior

Está constituida por lavas basálticas a andesitas basálticas, de color gris muy oscuro en fractura fresca y café amarillenta en la superficie. Textura afanítica con matriz hialina y fenocristales de plagioclasas. Dureza y densidad altas. Debido a que en estas lavas más vítreas (matriz vítrea), los fragmentos se rompen dejando aristas muy agudas. Estas lavas presentan discontinuidades semicirculares, convexas, hasta llegar a formar rosetas, ver figura 7. Esta fuerte formación ofrece una variación geométrica de las juntas y un fuerte impacto al observador.



Figura 7: Discontinuidades en forma de roseta.

Estas lavas se depositaron en una superficie irregular de acumulación y por eso tienen un espesor desigual, consecuentemente dispusieron de condiciones de enfriamientos desigual generando corrientes de convección durante el proceso de enfriamiento. Esta condición particular genera formas de las juntas parcialmente verticales a subverticales progresando a horizontales y cóncavas hasta dar formas de rosetas.

De las dos capas de lavas, la superior tiene debido a la presencia de las complejas discontinuidades y al tamaño de las secciones pequeñas de sus hexágonos, es la que más facilidad presenta para el proceso de explotación y de trituración. Estos factores hacen más económicos el proceso de reducción del tamaño de las partículas para el mercado. Los bloques de basalto inferiores debido a que sus secciones son muy grandes los bloques resultantes del proceso de explotación, ver figura 8, deben ser sometidos a fragmentación usando pólvora y fulminante, para reducirlos a los tamaños adecuados para la trituración.



Figura 8: Grandes bloques de basalto de la parte inferior.

4.1.3 CARACTERÍSTICAS DE LOS ÁRIDOS DEL YACIMIENTO LA CANTERA

Ensayo	ASTM	Requisito a Cumplir	Resultado Obtenido	Evaluación	Importancia
Petrografía	C-295	Identificación de Sílice reactiva ⁽¹⁾	No	Satisfactoria según ACI 201, ref. 24	Reacción Alkali-Sílice.
Abrasión Los Ángeles	C-131	Desgaste inferior al 50 % ^(A)	19,05	Satisfactoria	Indicador de Calidad
Granulometría	C-136	Quedar dentro de uno de los rangos de ASTM C-33 ^(A)	3/3	Satisfactoria	Manejabilidad del homigón fresco, economía
Sanidad (SO ₄ Na)	C-88	Pérdida inferior al 12 % ^(A)	1,20	Satisfactoria	Indicador de Calidad
Gravedad Específica y Absorción	C-127	$2,4 \leq G_s \leq 2,9$ ○	2,56	Satisfactoria	Control de Calidad Diseño de Mezcla de Homigón
		$0,2 \leq Abs. \leq 4$ ○	0,92	Satisfactoria	
Peso Unitario	C-29	$1\ 260\ kg/m^3 \leq W \leq 1\ 760\ kg/m^3$ ○	1 432,5	Satisfactoria	Control de Calidad y Diseño de mezcla de Homigón
Partículas Ligeras	C-123	No aplica este requisito ⁽¹⁾	0,00	Satisfactoria	Indicador de Calidad
Partículas Friables	C-142	5 % ^(A)	0,78	Satisfactoria	Indicador de Calidad
Partículas Planas y Alargadas	D-4791	Σ planas +	1,02	Satisfactoria	Manejabilidad
		Alargadas = 15 % ^(*)	0,17	satisfactoria	

(A) ASTM C 33

(*) Diseño y control de Mezclas de Concreto

(1) Cuadro sinóptico ACI 201 México Capital

4.1.3.1 Ensaye Petrográfico ASTM C-295

La muestra se preparó a partir de los dos tamaños de árido para hormigón que produce el yacimiento, en un tamaño de muestra reducido mediante cuarteo.

Este ensaye, realizado tanto para este como para el del resto de yacimientos, fue realizado por personal calificado de la empresa antes denominada Geotérmica Salvadoreña GESAL, hoy LAGEO, que es una empresa gubernamental fundada por CEL (Compañía HidroEléctrica del río Lempa), ahora con inversión extranjera.

Nombre de la roca **Andesita basáltica**

El análisis Petrográfico realizado con el empleo de lámina delgada, indicó que la matriz está vitrificada, con microlitos de feldespatos en una dirección de flujo constituyen el 79 %, mientras que el contenido de minerales es el que se detalla a continuación:

Composición Mineralógica

Plagioclasas (silicato de sodio y calcio),
Composición andesina a labradorita 10 %
Clinopiroxeno (silicato de hierro) - 7 %
Minerales Opacos - 3 %
Olivino - 1 %
Matriz - 79 %

La roca del macizo rocoso esta constituida por una andesita basáltica, es bien masiva y no contiene poros u oquedades ni vetillas. Los minerales de alteración se encuentran generalmente en las fracturas de las plagioclasas y Piroxenos en cantidad mínima. La matriz vítrica se encuentra con microlitos de feldespatos.

ANEXO B
ANÁLISIS DE CALIDAD DE LA ARENA



CONCRETERA SALVADOREÑA S.A.
CONTROL DE CALIDAD PLANTEL CENTRAL

**HOJA TÉCNICA DEL AGREGADO FINO UTILIZADO EN LA ELABORACIÓN
DE CONCRETO HIDRÁULICO.**

Descripción:

Arena de banco natural de color gris con baja absorción, alta densidad y bajo contenido de pómez, material que por sus características físicas lo hace ideal para la elaboración de concreto premezclado.

Procedencia:

La Cantera S.A. de C.V.

Ubicación:

Km. 40 Aguilares.

Usos:

Elaboración de concretos convencionales, estructurales, MR (tipo directo y tipo bomba), concretos especiales (de resistencias a edades tempranas 18 a 24 horas, Aligerados, lanzados, autonivelantes, autocompactables)

Información Técnica:

- Cumple con las normativas ASTM C-33, C-136, C-128, C-29, C-40, D-2419

Ventajas:

- Mezclas manejables, facilita la Bombeabilidad, facilidad en los acabados.

FINAL 23 A.V. SUR # 408. SAN SALVADOR, EL SALVADOR.
TEL. (503) 221-2299 FAX. (503) 222-9742

ANEXO C
CONTROL DE GRANULOMETRÍA Y PROPIEDADES
FÍSICAS DE LA GRAVA 3/8"

CONCRETERA SALVADOREÑA S. A. DE C. V.

LABORATORIO PLANTEL CENTRAL

REPORTE DE ANÁLISIS DE GRAVA - T.M.A. 2.36 - 9.5 mm (No. 8 - 3/8")

Fecha : 24/04/04
 Planta No. : PLANTEL CENTRAL
 Análisis No. : _____
 Proveedor : PEDRERA SAN DIEGO

Mina : CERRO
 Tipo de grava : TRITURADA
 Clasificación Petrográfica : BASALTO
 Color : NEGRO

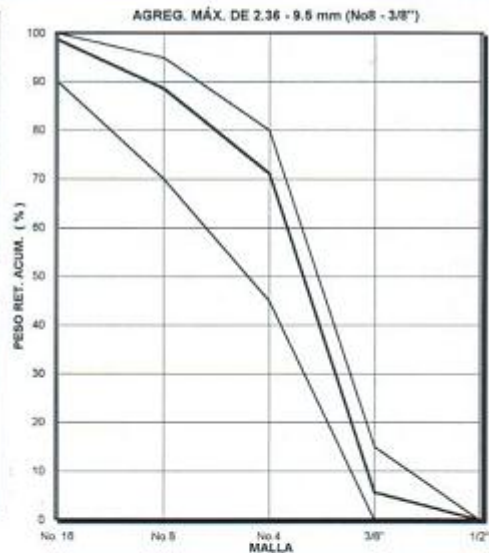
DENSIDAD =	Msss	2,000		x 1,000 =	2,451	kg/m ³
	Volumen	816				
	ABSORCIÓN					
Msss - Ms	2,000	-	1,955			
	x 100 =			x 100 =	2.30	%
	Ms	1,955				
	HUMEDAD TOTAL					
Mh - Ms	2,000	-	1,865			
	x 100 =			x 100 =	7.24	%
	Ms	1,865				

MASA VOLUMÉTRICA SUELTO	
M. Suelta x Factor Recip.	= 13.2 x 105.620 = 1,394 kg/m ³
MASA VOLUMÉTRICA COMPACTADA	
M. Comp. x Factor Recip.	= 14.0 x 105.620 = 1,479 kg/m ³
CONTAMINACIÓN DE ARENA EN GRAVA	
Pasa No. 4	676
	x 100 = _____ x 100 = 28.85 %
Masa Total	2,343

PROPIEDADES FÍSICAS		
DENSIDAD	kg/m ³	2,451
ABSORCIÓN	%	2.30
HUMEDAD TOTAL	%	7.24
MASA VOLUMÉTRICA SUELTA	kg/m ³	1,394
MASA VOLUMÉTRICA COMPACTADA	kg/m ³	1,479
COEFICIENTE DE FORMA	adm	N/D
PÉRDIDA POR LAVADO	%	N/D
CONTAMINACIÓN DE ARENA EN GRAVA	%	28.85
MÓDULO DE FINURA	adm	6.65

Malla	Peso Ret. (g)	Peso Ret. (%)	Peso Ret. Acum. (%)	Módulo Finura
1/2"	0	0.00	0.00	0.00
3/8"	132	5.63	5.63	5.63
No. 4	1,535	65.51	71.15	76.78
No. 8	410	17.50	88.65	165.43
No. 16	235	10.03	98.68	
Charola	31	1.32	100.00	
Total	2,343			

MÉTODOS DE PRUEBA EMPLEADOS: ASTM C 136, C 29, C 566, C 127 y C 117.



Observaciones : _____

Realizó : SAJAS VILLANUEVA

Supervisó : TEC. MIGUEL RODRIGUEZ

CONCRETERA SALVADOREÑA S. A. DE C. V.

LABORATORIO PLANTEL CENTRAL

REPORTE DE ANÁLISIS DE GRAVA - T.M.A. 2.36 - 9.5 mm (No. 8 - 3/8")

Fecha : 28/05/04
 Planta No. PLANTEL CENTRAL
 Análisis No. :
 Proveedor : PEDRERA SAN DIEGO

Mina : CERRO
 Tipo de grava : TRITURADA
 Clasificación Petrográfica : BASALTO
 Color : NEGRO

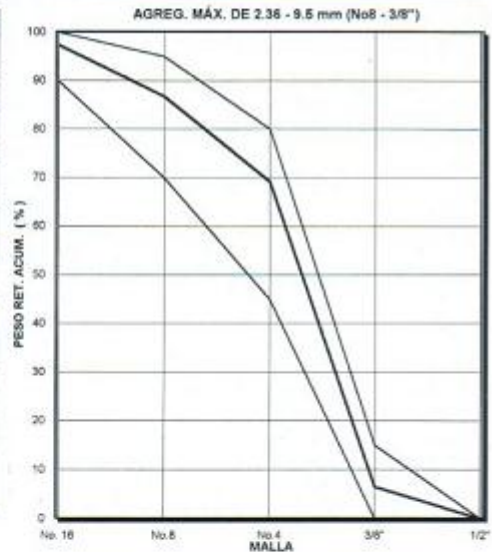
Msss	2,500			
DENSIDAD	=	$\frac{2,500}{1,020} \times 1,000$	=	2,451 kg/m ³
		Volumen	1020	
ABSORCIÓN				
Msss - Ms	2,500 - 2,443			
	x 100 =	$\frac{57}{2,443}$	x 100 =	2.33 %
Ms	2,443			
HUMEDAD TOTAL				
Mh - Ms	2,500 - 2,320			
	x 100 =	$\frac{180}{2,320}$	x 100 =	7.76 %
Ms	2,320			

MASA VOLUMÉTRICA SUELTO	
M. Suelta x Factor Recip.	= 13.2 x 105.620 = 1,394 kg/m ³
MASA VOLUMÉTRICA COMPACTADA	
M. Comp. x Factor Recip.	= 14.1 x 105.620 = 1,489 kg/m ³
CONTAMINACIÓN DE ARENA EN GRAVA	
Pasa No. 4	770
	x 100 = $\frac{770}{2,496} \times 100 = 30.85$ %
Masa Total	2,496

PROPIEDADES FÍSICAS	
DENSIDAD	kg/m ³ 2,451
ABSORCIÓN	% 2.33
HUMEDAD TOTAL	% 7.76
MASA VOLUMÉTRICA SUELTA	kg/m ³ 1,394
MASA VOLUMÉTRICA COMPACTADA	kg/m ³ 1,489
COEFICIENTE DE FORMA	adim N/D
PÉRDIDA POR LAVADO	% N/D
CONTAMINACIÓN DE ARENA EN GRAVA	% 30.85
MÓDULO DE FINURA	adim 6.62

Malla	Peso Ret. (g)	Peso Ret. (%)	Peso Ret. Acum. (%)	Módulo Finura
1/2"	0	0.00	0.00	0.00
3/8"	161	6.45	6.45	6.45
No. 4	1,565	62.70	69.15	75.60
No. 8	439	17.59	86.74	162.34
No. 16	266	10.66	97.40	
Charola	65	2.60	100.00	
Total	2,496			

MÉTODOS DE PRUEBA EMPLEADOS: ASTM D 75, C 136, C 29, C 566, C 127 Y C 117.



Observaciones : _____

Realizó : SAHIEL VILLALBA

Supervisó : TEC. MIGUEL RODRIGUEZ

CONCRETERA SALVADOREÑA S. A. DE C. V.

LABORATORIO PLANTEL CENTRAL

REPORTE DE ANÁLISIS DE GRAVA - T.M.A. 2.36 - 9.5 mm (No. 8 - 3/8")

Fecha : 24/06/04
 Planta No. PLANTEL CENTRAL
 Análisis No. :
 Proveedor : PEDRERA SAN DIEGO

Mina : CERRO
 Tipo de grava : TRITURADA
 Clasificación Petrográfica : BASALTO
 Color : NEGRO

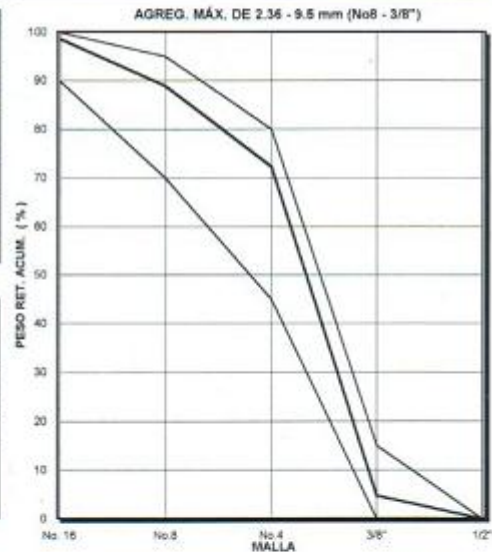
DENSIDAD =	$\frac{M_{ss}}{Volumen} \times 1,000 = \frac{2,500}{1015} \times 1,000 = 2,463 \text{ kg/m}^3$
ABSORCIÓN	
$\frac{M_{ss} - M_s}{M_s} \times 100 = \frac{2,000 - 1,950}{1,950} \times 100 = 2.56 \%$	
HUMEDAD TOTAL	
$\frac{M_h - M_s}{M_s} \times 100 = \frac{2,000 - 1,862}{1,862} \times 100 = 7.41 \%$	

MASA VOLUMÉTRICA SUELTO	
M. Suelta x Factor Recip. =	13.1 x 105.620 = 1,384 kg/m ³
MASA VOLUMÉTRICA COMPACTADA	
M. Comp. x Factor Recip. =	14.0 x 105.620 = 1,481 kg/m ³
CONTAMINACIÓN DE ARENA EN GRAVA	
Pasa No. 4 x 100 =	$\frac{552}{1,995} \times 100 = 27.67 \%$

PROPIEDADES FÍSICAS		
DENSIDAD	kg/m ³	2,463
ABSORCIÓN	%	2.56
HUMEDAD TOTAL	%	7.41
MASA VOLUMÉTRICA SUELTA	kg/m ³	1,384
MASA VOLUMÉTRICA COMPACTADA	kg/m ³	1,481
COEFICIENTE DE FORMA	adim	N/D
PÉRDIDA POR LAVADO	%	N/D
CONTAMINACIÓN DE ARENA EN GRAVA	%	27.67
MÓDULO DE FINURA	adim	6.66

Malla	Peso Ret. (g)	Peso Ret. (%)	Peso Ret. Acum. (%)	Módulo Finura
1/2"	0	0.00	0.00	0.00
3/8"	94	4.71	4.71	4.71
No. 4	1,349	67.62	72.33	77.04
No. 8	331	16.59	88.92	165.96
No. 16	196	9.82	98.75	
Charola	25	1.25	100.00	
Total	1,995			

MÉTODOS DE PRUEBA EMPLEADOS : ASTM D 75, C 136, C 29, C 94, C 127 Y C 117



Observaciones : _____

Realizó : ISAÍAS VILLANUEVA

Supervisó : TEC. MIGUEL RODRIGUEZ

CONCRETERA SALVADOREÑA S. A. DE C. V.

LABORATORIO PLANTEL CENTRAL

REPORTE DE ANÁLISIS DE GRAVA - T.M.A. 2.36 - 9.5 mm (No. 8 - 3/8")

Fecha : 2007/04
 Planta No. PLANTEL CENTRAL
 Análisis No. :
 Proveedor : PEDRERA SAN DIEGO

Mina : CERRO
 Tipo de grava : TRITURADA
 Clasificación Petrográfica : BASALTO
 Color : NEGRO

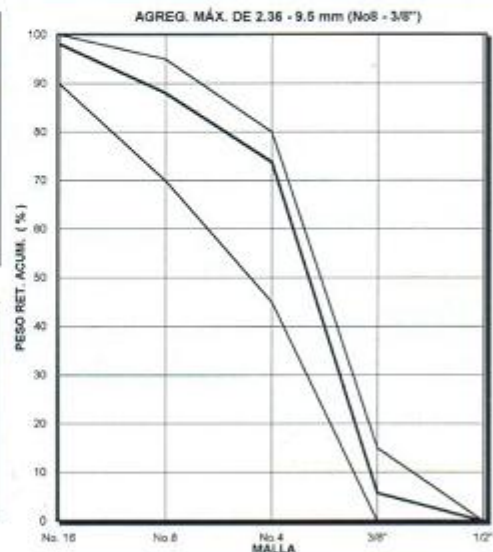
DENSIDAD =	$\frac{M_{ss} - M_s}{Volumen} \times 1,000$	=	$\frac{2,000 - 816}{816} \times 1,000$	=	2,451 kg/m ³
ABSORCIÓN					
$\frac{M_{ss} - M_s}{M_s} \times 100$	=	$\frac{2,000 - 1,953}{1,953} \times 100$	=	2.41	%
HUMEDAD TOTAL					
$\frac{M_h - M_s}{M_s} \times 100$	=	$\frac{2,000 - 1,860}{1,860} \times 100$	=	7.53	%

MASA VOLUMÉTRICA SUELTO	
M. Suelta x Factor Recip.	= 13.0 x 105.620 = 1,372 kg/m ³
MASA VOLUMÉTRICA COMPACTADA	
M. Comp. x Factor Recip.	= 14.0 x 105.620 = 1,479 kg/m ³
CONTAMINACIÓN DE ARENA EN GRAVA	
Pasa No. 4	561
Masa Total	2,143
$\frac{561}{2,143} \times 100$	= 26.18 %

PROPIEDADES FÍSICAS		
DENSIDAD	kg/m ³	2,451
ABSORCIÓN	%	2.41
HUMEDAD TOTAL	%	7.53
MASA VOLUMÉTRICA SUELTA	kg/m ³	1,372
MASA VOLUMÉTRICA COMPACTADA	kg/m ³	1,479
COEFICIENTE DE FORMA	adm	N/D
PERDIDA POR LAVADO	%	N/D
CONTAMINACIÓN DE ARENA EN GRAVA	%	26.18
MÓDULO DE FINURA	adm	6.68

Malla	Peso Ret. (g)	Peso Ret. (%)	Peso Ret. Acum. (%)	Módulo Finura
1/2"	0	0.00	0.00	0.00
3/8"	124	5.79	5.79	5.79
No. 4	1,458	68.04	73.82	79.61
No. 8	305	14.23	88.05	167.66
No. 16	216	10.08	98.13	
Charola	40	1.87	100.00	
Total	2,143			

MÉTODOS DE PRUEBA EMPLEADOS: ASTM D 75, D 136, D 29, D 565, D 127 Y C 117



Observaciones : _____

Realizó : GAIBS YELANUEVA

Supervisó : TEC. MIGUEL RODRIGUEZ

ANEXO D
CONTROL DE GRANULOMETRÍA Y PROPIEDADES
FÍSICAS DE LA ARENA



CONCRETERA SALVADOREÑA, S.A. DE C.V.

LABORATORIO PLANTEL CENTRAL

REPORTE DE ANÁLISIS DE ARENA

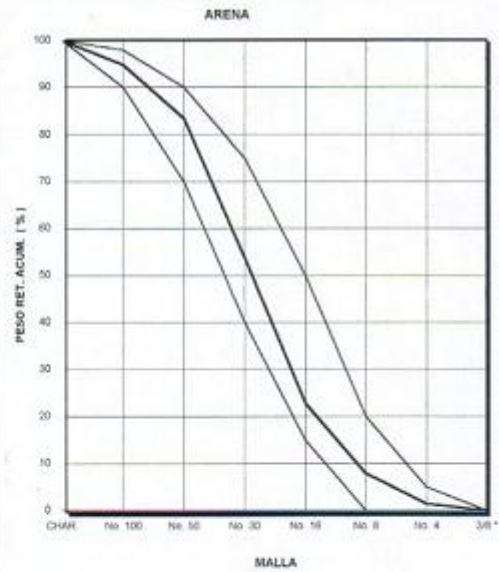
Fecha : 14 DE ABRIL DE 2004.
 Planta : PLANTEL CENTRAL SAN SALVADOR
 Análisis No. :
 Proveedor : AGUILARES

Mina : AGUILARES
 Tipo de Arena : BANCO NATURAL
 Clasificación Petrográfica: N/D
 Color : BEIGE CLARO

DENSIDAD =	$\frac{M_{ss}}{Volumen} \times 1,000$	$\frac{500}{202} \times 1,000$	2,476	kg/m ³
ABSORCIÓN	$\frac{M_{ss} - M_s}{M_s} \times 100$	$\frac{500 - 478}{478} \times 100$	4.71	%
HUMEDAD TOTAL	$\frac{M_h - M_s}{M_s} \times 100$	$\frac{1,000 - 844}{844} \times 100$	18.48	%

MASA VOLUMÉTRICA SUELTA	$M_{suelta} \times \text{Factor Recip.}$	3.98×353.181	1,405	kg/m ³
MASA VOLUMÉTRICA COMPACTADA	$M_{comp} \times \text{Factor Recip.}$	5×353.18	1,589	kg/m ³
PÉRDIDA POR LAVADO	$\frac{M_{s1} - M_{s2}}{M_{s1}} \times 100$	$\frac{800 - 766}{800} \times 100$	4.25	%

PROPIEDADES FÍSICAS		
DENSIDAD	kg/m ³	2,476
ABSORCIÓN	%	4.71
HUMEDAD TOTAL	%	18.48
MASA VOLUMÉTRICA SUELTA	kg/m ³	1,405
MASA VOLUMÉTRICA COMPACTADA	kg/m ³	1,589
PÉRDIDA POR LAVADO	%	4.25
CONTRACCIÓN LINEAL	%	N/D
CONTAMINACIÓN DE GRAVA EN ARENA	%	1.47
MATERIA ORGÁNICA	adim	N/D
EQUIVALENTE DE ARENA	%	N/D
MÓDULO DE FINURA	adim	2.64



Malla	Peso Ret. (g)	Peso Ret. (%)	Peso Ret. Acum. (%)	Módulo Finura
3/8"	0.0	0.00	0.00	0.00
No. 4	6.9	1.47	1.47	1.47
No. 8	30.1	6.41	7.88	9.35
No. 16	70.2	14.95	22.82	32.17
No. 30	145.2	30.91	53.74	85.61
No. 50	139.4	29.88	83.41	169.32
No. 100	53.4	11.37	94.78	264.10
No. 200	0.0	0.00	94.78	
Charola	24.5	5.22	100.0	
Total	489.7			

MÉTODOS DE PRUEBA EMPLEADOS: ASTM D 75, C 136, C 28, C 395, C 111, y C 40

Observaciones: N/D = No Determinado.

Realizó: ISABEL VILLANUEVA
LABORATORISTA

Supervisó: TEC. MIGUEL RODRIGUEZ
JEFE DE CONTROL DE CALIDAD

SACPS-0878-12-01



CONCRETERA SALVADOREÑA, S.A. DE C.V.

LABORATORIO PLANTEL CENTRAL

REPORTE DE ANÁLISIS DE ARENA

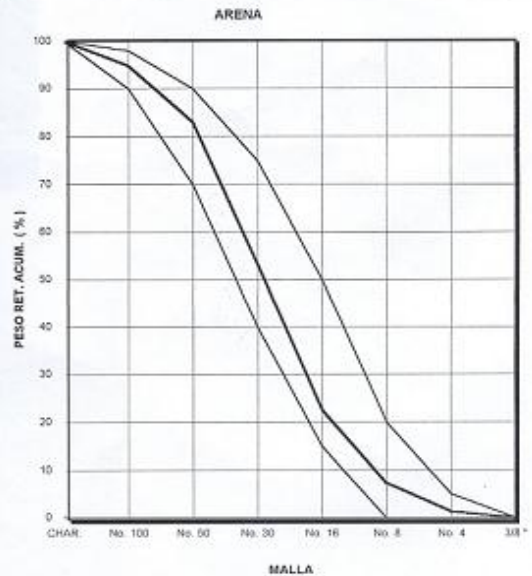
Fecha : 09 DE MAYO DE 2004.
 Planta : PLANTEL CENTRAL SAN SALVADOR
 Análisis No. :
 Proveedor : AGUILARES

Mina : AGUILARES
 Tipo de Arena : BANCO NATURAL
 Clasificación Petrográfica: N/D.
 Color : BEIGE CLARO

DENSIDAD =	$\frac{M_{ss}}{\text{Volumen}}$	=	$\frac{500}{202}$	x 1,000	=	2,474	kg/m ³
ABSORCIÓN							
$\frac{M_{ss} - M_s}{M_s}$	x 100 =	$\frac{500 - 478}{478}$	x 100	=	4.60	%	
HUMEDAD TOTAL							
$\frac{M_h - M_s}{M_s}$	x 100 =	$\frac{996 - 840}{840}$	x 100	=	18.81	%	

MASA VOLUMÉTRICA SUELTA							
M. Suelta x Factor Recip.	=	3.97	x	353.181	=	1,402	kg/m ³
MASA VOLUMÉTRICA COMPACTADA							
M. Comp. x Factor Recip.	=	4	x	353.18	=	1,589	kg/m ³
PÉRDIDA POR LAVADO							
$\frac{M_{s1} - M_{s2}}{M_{s1}}$	x 100 =	$\frac{500 - 479}{500}$	x 100	=	4.20	%	

PROPIEDADES FÍSICAS		
DENSIDAD	kg/m ³	2,474
ABSORCIÓN	%	4.60
HUMEDAD TOTAL	%	18.81
MASA VOLUMÉTRICA SUELTA	kg/m ³	1,402
MASA VOLUMÉTRICA COMPACTADA	kg/m ³	1,589
PÉRDIDA POR LAVADO	%	4.20
CONTRACCIÓN LINEAL	%	N/D
CONTAMINACIÓN DE GRAVA EN ARENA	%	1.38
MATERIA ORGÁNICA	adim	N/D
EQUIVALENTE DE ARENA	%	N/D
MÓDULO DE FINURA	adim	2.62



Malla	Peso Ret. (g)	Peso Ret. (%)	Peso Ret. Acum. (%)	Módulo Finura
3/8"	0.0	0.00	0.00	0.00
No. 4	6.7	1.38	1.38	1.38
No. 8	29.6	5.88	7.26	8.64
No. 16	74.1	15.24	22.50	31.14
No. 30	149.2	30.60	53.19	84.33
No. 60	145.1	29.64	83.03	167.36
No. 100	57.2	11.76	94.80	262.16
No. 200	0.0	0.00	94.80	
Charola	25.3	5.20	100.0	
Total	486.2			

MÉTODOS DE PRUEBA EMPLEADOS: ASTM D 15, C 136, C 29, C 566, C 128, C 117, y C 49.

Observaciones: N/D = No Determinado.

Realizó : ISABEL VILLANUEVA
LABORATORISTA

Supervisó : TEC. MIGUEL RODRIGUEZ
JEFE DE CONTROL DE CALIDAD

SAC-PO-067E-16.01



CONCRETERA SALVADOREÑA, S.A. DE C.V.

LABORATORIO PLANTEL CENTRAL

REPORTE DE ANÁLISIS DE ARENA

Fecha : 14 DE JUNIO DE 2004
 Planta : PLANTEL CENTRAL SAN SALVADOR
 Análisis No. :
 Proveedor : AGUILARES

Mina : AGUILARES
 Tipo de Arena : BANCO NATURAL
 Clasificación Petrográfica: N/D
 Color : BEIGE CLARO

DENSIDAD =	Masa	504	x 1,000	2,475	kg/m ³
	Volumen	204			
ABSORCIÓN					
Masa - Ms		500	-	477	
	x 100 =				4.73 %
Ms		477			
HUMEDAD TOTAL					
Mh - Ms		1,000	-	844	
	x 100 =				18.50 %
Ms		844			

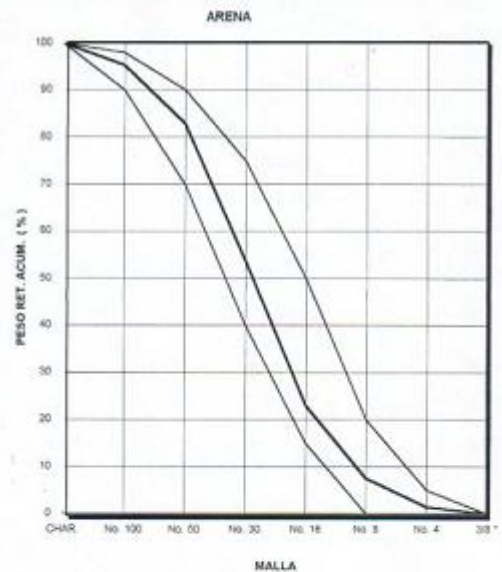
MASA VOLUMÉTRICA SUELTA					
M. Suelta x Factor Recp.	=	3.99	x	353.181	= 1,409 kg/m ³
MASA VOLUMÉTRICA COMPACTADA					
M. Comp. x Factor Recp.	=	5	x	353.18	= 1,589 kg/m ³
PÉRDIDA POR LAVADO					
Ms1 - Ms2		504	-	482	
	x 100 =				4.37 %
Ms1		504			

PROPIEDADES FÍSICAS		
DENSIDAD	kg/m ³	2,475
ABSORCIÓN	%	4.73
HUMEDAD TOTAL	%	18.50
MASA VOLUMÉTRICA SUELTA	kg/m ³	1,409
MASA VOLUMÉTRICA COMPACTADA	kg/m ³	1,589
PÉRDIDA POR LAVADO	%	4.37
CONTRACCIÓN LINEAL	%	N/D
CONTAMINACIÓN DE GRAVA EN ARENA	%	1.43
MATERIA ORGÁNICA	adm	N/D
EQUIVALENTE DE ARENA	%	N/D
MÓDULO DE FINURA	adm	2.64

Malla	Peso Ret. (g)	Peso Ret. (%)	Peso Ret. Acum. (%)	Módulo Finura
3/8"	0.0	0.00	0.00	0.00
No. 4	7.3	1.43	1.43	1.43
No. 8	31.0	6.07	7.50	8.93
No. 16	79.3	15.54	23.04	31.97
No. 30	156.2	30.80	53.84	85.62
No. 50	149.1	29.21	82.86	168.48
No. 100	63.5	12.44	95.30	263.77
No. 200	0.0	0.00	95.30	
Charola	24.0	4.70	100.0	
Total	510.4			

MÉTODOS DE PRUEBA EMPLEADOS: ASTM D 75, C 136, C 29, C 39, C 138, C 117, y C 48

Observaciones: N/D = No Determinado.



Realizó:
 ISABELLA VILLANUEVA
 LABORATORISTA

Supervisó:
 MIGUEL RODRIGUEZ
 JEFE DE CONTROL DE CALIDAD



CONCRETERA SALVADOREÑA, S.A. DE C.V.

LABORATORIO PLANTEL CENTRAL

REPORTE DE ANÁLISIS DE ARENA

Fecha : 15 DE JULIO DE 2004.
 Planta : PLANTEL CENTRAL SAN SALVADOR
 Análisis No. :
 Proveedor : AGUILARES

Mina : AGUILARES
 Tipo de Arena : BANCO NATURAL
 Clasificación Petrográfica: N/D.
 Color : BEIGE CLARO

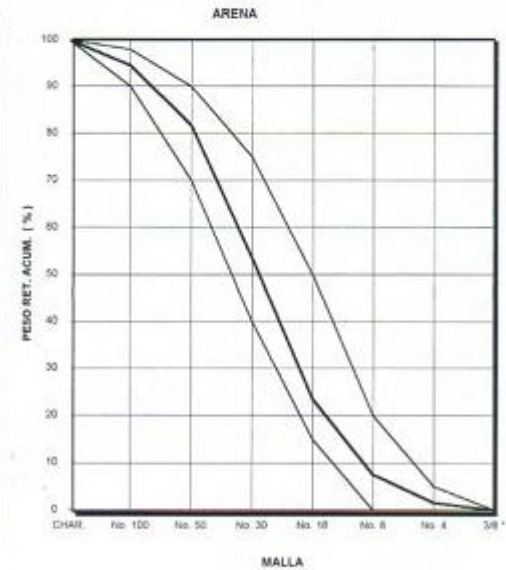
DENSIDAD =	Mass	497			
	=		x 1,000	2,479	kg/m ³
	Volumen	201			
	ABSORCIÓN				
Mass - Ms	=	500	-	478	
	x 100 =				x 100 = 4.69 %
Ms		478			
	HUMEDAD TOTAL				
Mh - Ms	=	800	-	676	
	x 100 =				x 100 = 18.34 %
Ms		676			

MASA VOLUMÉTRICA SUELTA					
M. Suelta x Factor Recip. =	4.00	x	353.181	=	1,411 kg/m ³
MASA VOLUMÉTRICA COMPACTADA					
M. Comp. x Factor Recip. =	5	x	353.18	=	1,589 kg/m ³
PÉRDIDA POR LAVADO					
Ms1 - Ms2	=	498	-	475	
	x 100 =				x 100 = 4.82 %
Ms1		498			

PROPIEDADES FÍSICAS		
DENSIDAD	kg/m ³	2,479
ABSORCIÓN	%	4.69
HUMEDAD TOTAL	%	18.34
MASA VOLUMÉTRICA SUELTA	kg/m ³	1,411
MASA VOLUMÉTRICA COMPACTADA	kg/m ³	1,589
PÉRDIDA POR LAVADO	%	4.82
CONTRACCIÓN LINEAL	%	N/D
CONTAMINACIÓN DE GRAVA EN ARENA	%	1.53
MATERIA ORGÁNICA	adim	N/D
EQUIVALENTE DE ARENA	%	N/D
MÓDULO DE FINURA	adim	2.62

Malla	Peso Ret. (g)	Peso Ret. (%)	Peso Ret. Acum. (%)	Módulo Finura
3/8"	0.0	0.00	0.00	0.00
No. 4	8.4	1.53	1.53	1.53
No. 8	32.7	5.96	7.49	9.03
No. 16	87.9	16.03	23.52	32.56
No. 30	165.1	30.11	53.63	66.18
No. 50	154.0	28.08	81.71	167.89
No. 100	70.3	12.82	94.53	262.42
No. 200	0.0	0.00	94.53	
Charola	30.0	5.47	100.0	
Total	548.4			

MÉTODOS DE PRUEBA EMPLEADOS: ASTM D 75, C 136, C 29, C 94, C 136, C 115, y C 48



Observaciones: N/D = No Determinado.

Realizó:
 ISABELLA VELAZQUEZ
 LABORATORISTA

Supervisó:
 TEC. MIGUEL RODRIGUEZ
 JEFE DE CONTROL DE CALIDAD



CONCRETERA SALVADOREÑA, S.A. DE C.V.

LABORATORIO PLANTEL CENTRAL

REPORTE DE ANÁLISIS DE ARENA

Fecha : 18 DE AGOSTO DE 2004.
 Planta : PLANTEL CENTRAL SAN SALVADOR
 Análisis No. :
 Proveedor : AGUILARES

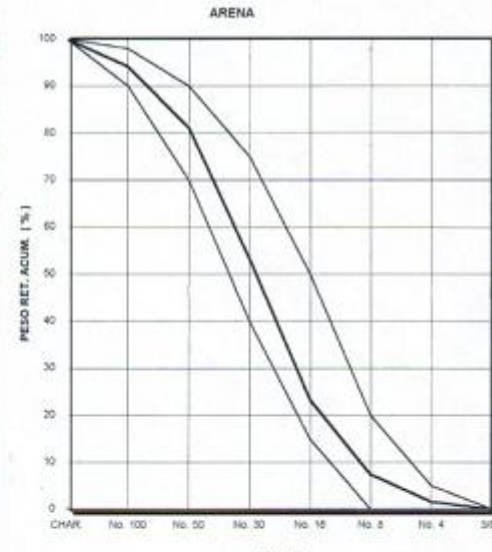
Mina : AGUILARES
 Tipo de Arena : BANCO NATURAL
 Clasificación Petrográfica: N/D.
 Color : BEIGE CLARO

DENSIDAD	=	$\frac{\text{Masa}}{\text{Volumen}} = \frac{500}{202} \times 1,000$	=	2,475	kg/m ³
ABSORCIÓN					
Masa - Ms	x 100 =	$\frac{500 - 478}{500}$	x 100	4.60	%
HUMEDAD TOTAL					
Mh - Ms	x 100 =	$\frac{800 - 508}{508}$	x 100	18.11	%
Ms					

MASA VOLUMÉTRICA SUELTA					
M. Suelta x Factor Recip.	=	3.98 x 353.181	=	1,406	kg/m ³
MASA VOLUMÉTRICA COMPACTADA					
M. Comp. x Factor Recip.	=	5 x 353.18	=	1,682	kg/m ³
PÉRDIDA POR LAVADO					
Ms1 - Ms2	x 100 =	$\frac{500 - 479}{500}$	x 100	4.30	%
Ms1					

PROPIEDADES FÍSICAS		
DENSIDAD	kg/m ³	2,475
ABSORCIÓN	%	4.60
HUMEDAD TOTAL	%	18.11
MASA VOLUMÉTRICA SUELTA	kg/m ³	1,406
MASA VOLUMÉTRICA COMPACTADA	kg/m ³	1,682
PÉRDIDA POR LAVADO	%	4.30
CONTRACCIÓN LINEAL	%	N/D
CONTAMINACIÓN DE GRAVA EN ARENA	%	1.81
MATERIA ORGÁNICA	adm	N/D
EQUIVALENTE DE ARENA	%	N/D
MÓDULO DE FINURA	adm	2.61

Malla	Peso Ret. (g)	Peso Ret. (%)	Peso Ret. Acum. (%)	Módulo Finura
3/8"	0.0	0.00	0.00	0.00
No. 4	9.3	1.51	1.51	1.51
No. 8	38.3	5.91	7.41	8.92
No. 16	97.7	15.91	23.32	32.24
No. 30	183.4	29.87	53.20	65.44
No. 60	171.1	27.88	81.07	166.51
No. 100	80.3	13.08	94.16	260.67
No. 200	0.0	0.00	94.16	
Charola	35.9	5.84	100.0	
Total	613.8			



MÉTODOS DE PRUEBA EMPLEADOS: ASTM D 75, C 136, C 29, C 138, C 139, C 111, y C 40

Observaciones: N/D = No Determinado.

Realizó: ISABEL VALLANUEVA
LABORATORISTA

Supervisó: TEC. MIGUEL RODRIGUEZ
JEFE DE CONTROL DE CALIDAD

MACFO-0878-1531

ANEXO E

CONTROL DE CALIDAD DEL CEMENTO

CEMENTO DE EL SALVADOR

Formato LC-F-129, Revisión 0
Ref. CESSA PORTLAND 10-04

Este documento **CERTIFICA** que el cemento producido por nuestra empresa bajo denominación **CESSA PORTLAND**, vendido en la Planta El Ronco, cumple con los requerimientos de la Normativa Americana ASTM (American Society for Testing and Material) C 595-03, Tipo IP. Este cemento, durante la fecha comprendida del 1 al 31 de octubre de 2004 presentó los siguientes valores promedios de calidad, según los métodos que se detallan:

TABLA I. REQUERIMIENTOS FISICOS Y QUIMICOS


DETERMINACIÓN	ASTM C 595-03 Tipo IP	PROMEDIO DE NUESTRO CEMENTO
Tiempo de Fraguado Vicat Inicial (minutos) (ASTM C 191)	No menor de 45 minutos No mayor de 7 horas	134
Resistencias a la Compresión (ASTM C 109) 3 días (psi) 7 días (psi) 28 días (psi)	1,890 mín. 2,900 mín. 3,620 mín.	2,670 3,580 4,940 (A)
Fineza Blaine (cm ² /g) (ASTM C 204)	(B)	3,790
Requerimiento de Agua (% de cemento) (ASTM C 109)	---	50.1
Retenido en el Tamiz No. 325 45µm (%)	(B)	6.3
Contenido de aire del mortero, (% Vol.) (ASTM C 185)	12 máx.	4.0
Expansión en Autoclave (%) (ASTM C 151)	Expansión máx. 0.8 Contracción máx. 0.2	-0.04
Requerimientos Químicos Óxido de Magnesio, MgO (%) Trióxido de azufre, SO ₃ (%) Pérdida al fuego, (%)	6.0 máx. 4.0 máx. 5.0 máx.	1.1 2.9 4.3

A. Este dato promedio es de 28 días antes de la fecha del resto de valores, pues es el valor más reciente.
B. No se estipula límite de aceptación, sin embargo debe reportarse.

Metapán a los tres días del mes de noviembre del año dos mil cuatro.


Ing. José Guillermo Osorio
Supte. de Control de Calidad




Luis Mariano Herrera, M.A.Sc.
Gerente de Control de Calidad

CEMENTO DE EL SALVADOR, S.A. DE C.V.

Avenida El Espino y Boulevard Sur, Madreselva, Antiguo Cuscatlán
Teléfono: (503)243-7722. Fax: (503)243-7717

e-mail: cessateca@cessa.com.sv, Apartado Postal 05-17 El Salvador, Centro América

CEMENTO DE EL SALVADOR

Formato LC-F-129, Revisión 0
Ref. CESSA PORTLAND 11-04

Este documento CERTIFICA que el cemento producido por nuestra empresa bajo denominación CESSA PORTLAND, vendido en la Planta El Ronco, cumple con los requerimientos de la Normativa Americana ASTM (American Society for Testing and Material) C 595-03, Tipo IP. Este cemento, durante la fecha comprendida del 1 al 30 de noviembre de 2004 presentó los siguientes valores promedios de calidad, según los métodos que se detallan:

TABLA 1. REQUERIMIENTOS FISICOS Y QUIMICOS

DETERMINACIÓN	ASTM C 595-03 Tipo IP	PROMEDIO DE NUESTRO CEMENTO
Tiempo de Fraguado Vicat Inicial (minutos) (ASTM C 191)	No menor de 45 minutos No mayor de 7 horas	134
Resistencias a la Compresión (ASTM C 109)		
3 días (psi)	1,890 mín.	2,630
7 días (psi)	2,900 mín.	3,520
28 días (psi) (A)	3,620 mín.	5,070
Fineza Blaine (cm ² /g) (B) (ASTM C 204)	---	3,910
Requerimiento de Agua (% de cemento) (ASTM C 109)	---	50.0
Retenido en el Tamiz No. 325 45µm (%) (B)	---	6.1
Contenido de aire del mortero, (% Vol.) (ASTM C 185)	12 máx.	4.0
Expansión en Autoclave (%) (ASTM C 151)	Expansión máx. 0.8 Contracción máx. 0.2	-0.03
Requerimientos Químicos		
Oxido de Magnesio, MgO (%)	6.0 máx	1.1
Trióxido de azufre, SO ₃ (%)	4.0 máx	2.8
Pérdida al fuego, (%)	5.0 máx	4.2

A: Este dato promedio es de 28 días antes de la fecha del resto de valores, pues es el valor más reciente.

B: No se estipula límite de aceptación, sin embargo debe reportarse.

Metapán a los siete días del mes de diciembre del año dos mil cuatro.


Ing. José Guillermo Osorio
Supte. de Control de Calidad




Luis Mariano Herrera, M.A.Sc.
Gerente de Control de Calidad

CEMENTO DE EL SALVADOR, S.A. DE C.V.

Avenida El Espino y Boulevard Sur, Madreselva, Antiguo Cuscatlán
Teléfono: (503)243-7722, Fax: (503)243-7717

e-mail: cessa-teca@cessa.com.sv, Apartado Postal 05-17 El Salvador, Centro América

CEMENTO DE EL SALVADOR

Formato LC-F-129, Revisión 0
Ref. CESSA PORTLAND 12-04

Este documento CERTIFICA que el cemento producido por nuestra empresa bajo denominación CESSA PORTLAND, vendido en la Planta El Ronco, cumple con los requerimientos de la Normativa Americana ASTM (American Society for Testing and Material) C 595-03, Tipo IP. Este cemento, durante la fecha comprendida del 1 al 31 de diciembre de 2004 presentó los siguientes valores promedios de calidad, según los métodos que se detallan:

TABLA 1. REQUERIMIENTOS FISICOS Y QUIMICOS

DETERMINACIÓN	ASTM C 595-03 Tipo IP	PROMEDIO DE NUESTRO CEMENTO
Tiempo de Fraguado Vicat Inicial (minutos) (ASTM C 191)	No menor de 45 minutos No mayor de 7 horas	138
Resistencias a la Compresión (ASTM C 109) 3 días (psi) 7 días (psi) 28 días (psi) (A)	1,890 mín. 2,900 mín. 3,620 mín.	2,630 3,450 5,110
Fineza Blaine (cm ² /g) (B) (ASTM C 204)	...	3,760
Requerimiento de Agua (% de cemento) (ASTM C 109)	...	50.0
Retenido en el Tamiz No. 325 45µm (%) (B)	...	6.5
Contenido de aire del mortero, (% Vol.) (ASTM C 185)	12 máx.	5.0
Expansión en Autoclave (%) (ASTM C 151)	Expansión máx. 0.8 Contracción máx. 0.2	-0.02
Requerimientos Químicos Óxido de Magnesio, MgO (%) Tróxido de azufre, SO ₃ (%) Pérdida al fuego, (%)	6.0 máx. 4.0 máx. 5.0 máx.	1.1 2.8 4.2

A: Este dato promedio es de 28 días antes de la fecha del resto de valores, pues es el valor más reciente.

B: No se estipula límite de aceptación, sin embargo debe reportarse.

Metapán a los diez y siete días del mes de enero del año dos mil cinco.



Ing. José Guillermo Osorio
Supte. de Control de Calidad




Ing. Carlos Manuel Hernández
Director de Operaciones

CEMENTO DE EL SALVADOR, S.A. DE C.V.

Avenida El Espino y Boulevard Sur, Macreselva, Antiguo Cuscatlán
Teléfono: (503)243-7722, Fax: (503)243-7717

e-mail: cessa@cesa.com.sv, Apartado Postal 05-17 El Salvador, Centro América

CEMENTO DE EL SALVADOR

Formato LC-F-156, Revisión 0
Ref. CESSA PORTLAND 01-05

Este documento CERTIFICA que el cemento producido por nuestra empresa bajo denominación CESSA PORTLAND, cumple con los requerimientos de la Normativa Americana ASTM (American Society for Testing and Material) C 595-03, Tipo IP. Este cemento, durante la fecha comprendida del 1 al 31 de enero de 2005 presentó los siguientes valores promedios de calidad, según los métodos que se detallan:

TABLA 1. REQUERIMIENTOS FISICOS Y QUIMICOS

DETERMINACIÓN	ASTM C 595-03 Tipo IP	PROMEDIO DE NUESTRO CEMENTO
Tiempo de Fraguado Vicat Inicial (minutos) (ASTM C 191)	No menor de 45 minutos No mayor de 7 horas	155
Resistencias a la Compresión (ASTM C 109) 3 días (psi) 7 días (psi) 28 días (psi) (A)	1,890 mín. 2,900 mín. 3,620 mín.	2,550 3,450 5,040
Fineza Blaine (cm ² /g) (B) (ASTM C 204)	---	3,550
Requerimiento de Agua (% de cemento) (ASTM C 109)	---	49.7
Retenido en el Tamiz No. 325 45µm (%) (B)	---	6.4
Contenido de aire del mortero, (% Vol.) (ASTM C 185)	12 máx.	4.0
Expansión en Autoclave (%) (ASTM C 151)	Expansión máx. 0.8 Contracción máx. 0.2	-0.02
Requerimientos Químicos Óxido de Magnesio, MgO (%) Trióxido de azufre, SO ₃ (%) Pérdida al fuego, (%)	6.0 máx. 4.0 máx. 5.0 máx.	1.1 2.8 2.9

A: Este dato promedio es de 28 días antes de la fecha del resto de valores, pues es el valor más reciente.

B: No se estipula límite de aceptación, sin embargo debe reportarse.

Metapán a los veinte y un días del mes de febrero del año dos mil cinco.


Ing. José Guillermo Osorio
Supte. de Control de Calidad




Luis Mariano Herrera, M.A.Sc.
Gerente de Control de Calidad

CEMENTO DE EL SALVADOR, S.A. DE C.V.

Avenida El Espino y Boulevard Sur, Madresolva, Antiguo Cuscatlán
Teléfono: (503)505-0000, Fax: (503)505-0106
Apartado Postal 05-17 El Salvador, Centro América

CEMENTO DE EL SALVADOR

Formato LC-F-156, Revisión 0
Ref. CESSA PORTLAND 02-05

Este documento CERTIFICA que el cemento producido por nuestra empresa bajo denominación CESSA PORTLAND, cumple con los requerimientos de la Normativa Americana ASTM (American Society for Testing and Material) C 595-03, Tipo IP. Este cemento, durante la fecha comprendida del 1 al 28 de febrero de 2005 presentó los siguientes valores promedios de calidad, según los métodos que se detallan:

TABLA 1. REQUERIMIENTOS FISICOS Y QUIMICOS

DETERMINACIÓN	ASTM C 595-03 Tipo IP	PROMEDIO DE NUESTRO CEMENTO
Tiempo de Fraguado Vicat Inicial (minutos) (ASTM C 191)	No menor de 45 minutos No mayor de 7 horas	116
Resistencias a la Compresión (ASTM C 109)		
3 días (psi)	1,890 mín.	2,530
7 días (psi)	2,900 mín.	3,370
28 días (psi) (A)	3,620 mín.	5,020
Fineza Blaine (cm ² /g) (B) (ASTM C 204)	...	3,810
Requerimiento de Agua (% de cemento) (ASTM C 109)	...	49.6
Retenido en el Tamiz No. 325 45µm (%) (B)	...	6.6
Contenido de aire del mortero, (% Vol.) (ASTM C 185)	12 máx.	5
Expansión en Autoclave (%) (ASTM C 151)	Expansión máx. 0.8 Contracción máx. 0.2	-0.03
Requerimientos Químicos		
Oxido de Magnesio, MgO (%)	6.0 máx	1.1
Trióxido de azufre, SO ₃ (%)	4.0 máx	2.7
Pérdida al fuego, (%)	5.0 máx	4.3

A: Este dato promedio es de 28 días antes de la fecha del resto de valores, pues es el valor más reciente.

B: No se estipula límite de aceptación, sin embargo debe reportarse.

Metapán a los diez y seis días del mes de marzo del año dos mil cinco.


Ing. José Guillermo Osorio
Súpte. de Control de Calidad




Luis Mariano Herrera, M.A.Sc.
Gerente de Control de Calidad

CEMENTO DE EL SALVADOR, S.A. DE C.V.

Avenida El Espino y Boulevard Sur, Madreselva, Antiguo Cuscatlán
Teléfono: (503)505-0000, Fax: (503)505-0108
Apertado Postal 05-17 El Salvador, Centro América

CEMENTO DE EL SALVADOR

Formato LC-F-156, Revisión 0
Ref. CESSA PORTLAND 03-05

Este documento CERTIFICA que el cemento producido por nuestra empresa bajo denominación CESSA PORTLAND, cumple con los requerimientos de la Normativa Americana ASTM (American Society for Testing and Material) C 595-03, Tipo IP. Este cemento, durante la fecha comprendida del 1 al 31 de marzo de 2005 presentó los siguientes valores promedios de calidad, según los métodos que se detallan:

TABLA 1. REQUERIMIENTOS FISICOS Y QUIMICOS

DETERMINACIÓN	ASTM C 595-03 Tipo IP	PROMEDIO DE NUESTRO CEMENTO
Tiempo de Fraguado Vicat Inicial (minutos) (ASTM C 191)	No menor de 45 minutos No mayor de 7 horas	114
Resistencias a la Compresión (ASTM C 109) 3 días (psi) 7 días (psi) 28 días (psi) (A)	1,890 mín. 2,900 mín. 3,620 mín.	2,600 3,440 4,860
Fineza Blaine (cm ² /g) (B) (ASTM C 204)	---	3,810
Requerimiento de Agua (% de cemento) (ASTM C 109)	---	49.6
Retenido en el Tamiz No. 325 45µm (%) (B)	---	6.4
Contenido de aire del mortero, (% Vol.) (ASTM C 185)	12 máx.	4
Expansión en Autoclave (%) (ASTM C 151)	Expansión máx. 0.8 Contracción máx. 0.2	-0.03
Requerimientos Químicos Oxido de Magnesio, MgO (%) Trióxido de azufre, SO ₃ (%) Pérdida al fuego, (%)	6.0 máx 4.0 máx 5.0 máx	1.2 2.8 4.1

A: Este dato promedio es de 28 días antes de la fecha del resto de valores, pues es el valor más reciente.
B: No se estipula límite de aceptación, sin embargo debe reportarse.

Metapán a los catorce días del mes de abril del año dos mil cinco.


Ing. José Guillermo Osorio
Supte. de Control de Calidad


Luis Mariano Herrera, M.A.Sc.
Gerente de Control de Calidad

CEMENTO DE EL SALVADOR, S.A. DE C.V.

Avenida El Espino y Boulevard Sur, Madreselva, Antiguo Cuscatlán
Teléfono: (503)505-0000; Fax: (503)505-0106
Apartado Postal 05-17 El Salvador, Centro América

ANEXO F
CONTROL DE CALIDAD DEL ADITIVO SIKA



Sika ViscoCrete® 5000

Sika ViscoCrete® Technology

High Range Water Reducer (Types A & F)

DESCRIPTION

Sika ViscoCrete 5000 is a next generation high range water reducer and superplasticizer utilizing Sika's 'ViscoCrete' technology. It has been formulated to provide maximum water reduction, increased flexibility, and increased early strength.

This unique formulation is based on polycarboxylate polymer technology. It is a non air-entraining admixture that does not affect the air-void system in the concrete matrix in a negative way.

Sika ViscoCrete 5000 does not contain formaldehyde, calcium chloride or any other intentionally added chlorides and will not initiate or promote the corrosion of steel present in the concrete.

Sika ViscoCrete 5000 meets the requirements for ASTM C-494 Types A and F and AASHTO M-194 Types A and F.

APPLICATIONS

Sika ViscoCrete 5000 may be used in both ready mix and precast applications, as a plant added high range water reducer to provide excellent plasticity. Controlled set times make Sika ViscoCrete 5000 ideal for horizontal and vertical slipform applications.

ADVANTAGES

Water Reduction:

Sika ViscoCrete 5000 can be dosed in small amounts to obtain water reduction from 10-15%, and will achieve water reduction up to 45% at high dosage rates.

Sika ViscoCrete 5000 is suitable for all levels of water reduction.

High Plasticity:

The superplasticizing action of Sika ViscoCrete 5000 provides high-slump, flowing concrete that maintains excellent workability and may be placed with minimal vibration even at very low water cement ratio's as low as 0.25.

Sika ViscoCrete 5000 plasticized concrete is highly fluid while maintaining complete cohesion within the concrete matrix to eliminate excessive bleeding or segregation.

BENEFITS

The combined high range water reduction and superplasticizing action of Sika ViscoCrete 5000 provide the following benefits in hardened concrete:

- ▲ Higher early compressive strengths for earlier removal of forms and structural use of concrete.
- ▲ Higher ultimate strengths allow for greater engineering design flexibility and structural economies.
- ▲ Reduced water cement ratios produce more durable, dense concrete with reduced permeability.
- ▲ Highly effective plasticizer reduces surface defects in concrete elements and improves aesthetic appearance.

Combination with other admixtures:

Sika ViscoCrete 5000 is highly effective as single admixture or in combination with other admixtures in the Sika System.

Combination with microsilica:

Sika ViscoCrete 5000 is particularly well suited for use with microsilica because of its water reduction capability and superior slump control.

HOW TO USE

ADDITION RATES

Dosage rates will vary according to materials used, ambient conditions and the requirements of a specific project. Sika recommends dosage at 3-8 fl. oz. per 100 lbs. (195-520 ml./100 kg.) of cementitious for general concrete applications. If maximum water reduction is required dosage up to 16 fl.oz./100 lbs. of cementitious may be used.

Dosage rates outside the recommended range may be used where specialized materials such as microsilica are specified, extreme ambient conditions are encountered or unusual project conditions require special consideration. Please contact your Sika representative for more information and assistance.

MIXING

For best superplasticizing results, add Sika ViscoCrete 5000 directly to freshly mixed concrete in the concrete mixer at the end of the batching cycle.

Sika ViscoCrete 5000 may also be dispensed as an integral material during the regular admixture batching cycle, or into freshly mixed concrete in a Ready-Mix truck at the concrete plant or at the job site.

To optimize the superplasticizing effect after the addition of Sika ViscoCrete 5000, Sika recommends that the combined materials be mixed for 80-100 revolutions or approximately 6 minutes, either in the concrete mixer or in the Ready-Mix truck.

PACKAGING

Sika ViscoCrete 5000 is available in 55 gallon (208 liter) drums and bulk delivery.

STORAGE AND SHELF-LIFE

Sika ViscoCrete 5000 should be stored at above 35°F (2°C). If frozen, thaw and agitate thoroughly to return to normal state.

Shelf life when stored in dry warehouse conditions between 50°F and 80°F (10°C - 27°C) is one year minimum.

CAUTION

Skin and eye irritant; avoid contact. Wear suitable eye, face and hand protection and other protective apparel. For further information, read the current MSDS for this product. Avoid breathing mists. Use with adequate ventilation. Remove contaminated clothing.

FIRST AID

Wash skin with soap and water, in case of eye contact, flush with water for 15 minutes; contact a physician. Wash clothing before re-use.

CLEAN UP

Contain and collect with absorbent material. Dispose of in accordance with local, state and federal regulations.

ANEXO G

CONTROL DE CALIDAD DEL ADITIVO IMI



Concrete Admixtures and Fiber

ULTRAFLOW

Reductor de Agua de Alto Alcance (Última Generación)

DESCRIPCION

ULTRAFLOW es la última generación de superplastificantes. Es especialmente formulado y modificado para mejorar las propiedades del concreto o mortero. **ULTRAFLOW** es un efectivo dispersante, fluidificador y poderoso reductor de agua que provee excelentes propiedades rehoplásticas al concreto.

USOS

- **ULTRAFLOW** es específicamente intencionado a usarse en concreto prefabricado ya que provee una fluidez excepcional y mejora las propiedades de plasticidad del concreto rompiendo la conglomeración del cemento sin el uso de vibradores.
- **ULTRAFLOW** es muy efectivo usado para nivelar pisos que serán cubiertos por alfombras, losetas u otra terminación. Esto se hace sin mayor esfuerzo en la colocación y terminado de la superficie del concreto.
- **ULTRAFLOW** aparte de los usos mencionados se puede usar para concreto bombeado, colocar concreto bajo agua, concreto lanzado, losas de concreto con formas especiales, concreto usando humo de sílice y concreto liviano.

VENTAJAS

ULTRAFLOW además ofrece las siguientes características para el concreto:

- Fluidez nivelándose solo.
- Resistencia a temprana edad.
- Alta trabajabilidad con bajo contenido de agua.
- Baja relación agua/cemento (Hasta 30%).
- Reducción del cemento.
- Mejora la superficie.

INTERNATIONAL MATERIALS INDUSTRIES, L.L.C.

2131 Peters Road* Harvey, Louisiana 70058 * PHONE: (504) 227-9944 * Fax: (504) 227-9040

GARANTIA: La información que contiene este folleto técnico está basada en pruebas e información de fuentes confiables; sin embargo, no se ofrece garantía ni responsabilidad implícita o explícita por la exactitud de estos datos, de los resultados que se obtienen por el uso de este o que este uso no infrinja cualquier patente. Esta información se suministra con la condición de que los usuarios que la reciben harán sus propios pruebas para determinar lo adecuado para su propósito de uso particular. La responsabilidad por daños por el fabricante será, en ningún caso, mayor que el precio del material entregado.

INFORMACION TECNICA

ULTRAFLOW cumple y excede la especificación ASTM C494, Tipo F y AASHTO M-194

El concreto fluidificado con **ULTRAFLOW** se mantiene trabajable por un espacio de tiempo de 1 a 2 horas a una temperatura ambiental de 20°C (68°F). La duración de la trabajabilidad no solamente depende de la temperatura ambiental, pero tambien del tipo y marca del cemento, la clase de agregados, el método de mezclado y el método de transportarlo. **ULTRAFLOW** se añade en las dosificaciones normales, el calor de hidratación no será afectado significativamente.

APLICACION

ULTRAFLOW se dosifica normalmente a razón de 3 a 10 onzas fluidas por 100 lbs de cemento (195ml a 652ml por 100Kg de cemento). Dosificaciones mas altas pueden ser requeridas dependiendo de las condiciones especificas de la obra, hasta una dosificación de 1.5 L por 100 Kg. de cemento.



Concrete Admixtures and Fiber

**LIMITES DE CONTROL DE CALIDAD EN LA
FABRICACION DE:
ULTRAFLOW
(Polycarboxylated Superplasticizer)**

Certificamos que ULTRAFLOW tiene los siguientes límites de Control de Calidad dentro de los parámetros indicados abajo:

Despachado a: Concretera Salvadoreña S.A. de C.V.
Embarque: 04-1121 (Plantel Central)
Fecha: 10/26/04

Lote Número: UF10504

<u>Parámetros</u>	<u>Resultados de Pruebas</u>	<u>Especificaciones</u>
Gravedad Específica	1.078	1.070 - 1.090
Contenido de Sólidos	39.0	38.0% - 40.0%
Contenido de Cloruro	City Water	<500 ppm

Respectfully Submitted

INTERNATIONAL MATERIALS INDUSTRIES, L.L.C.


Joaquin Torres, P.E.
President



INTERNATIONAL MATERIALS INDUSTRIES, L.L.C.

2131 Peters Road * Harvey, Louisiana 70058 * PHONE: (504) 227-9944 * Fax: (504) 227-9040