



LINARES - MARTINEZ - GARCIA

# CONCRETO DE ALTA RESISTENCIA

ELABORACIÓN Y EVALUACIÓN DE DISEÑOS DE MEZCLA DE CONCRETO DE ALTA RESISTENCIA, IMPLEMENTANDO CEMENTO ASTM C1157 TIPO HE, BASADOS EN EL MÉTODO DE DISEÑOS DE MEZCLA ACI 211.4R-08

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR**  
**FACULTAD MULTIDISCIPLINARIA DE OCCIDENTE**  
**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA**



***“ELABORACIÓN Y EVALUACIÓN DE DISEÑOS DE MEZCLA DE CONCRETO DE ALTA RESISTENCIA, IMPLEMENTANDO CEMENTO ASTM C1157 TIPO HE, BASADOS EN EL METODO DE DISEÑOS DE MEZCLA ACI 211.4R-08”***

**PRESENTADO POR:**

FELIPE ALFREDO MARTINEZ INTERIANO  
JONNY EDENILSON LINARES CÁCERES  
RAFAEL FERNANDO GARCÍA GÁLVEZ

**PARA OPTAR AL TÍTULO:  
INGENIERO CIVIL**

*SEPTIEMBRE, 2013.*

# **UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR**

## **RECTOR**

ING. MARIO ROBERTO NIETO LOVO

## **VICE-RECTORA ACADÉMICA**

MAESTRA ANA MARÍA GLOWER DE ALVARADO

## **SECRETARÍA GENERAL**

DRA. ANA LETICIA ZAVALETA DE AMAYA

## **FISCAL GENERAL**

LIC. FRANCISCO CRUZ LETONA

# **FACULTAD MULTIDISCIPLINARIA DE OCCIDENTE**

## **DECANO**

LIC. RAÚL ERNESTO AZCÚNAGA LÓPEZ

## **VICE-DECANO**

ING. WILLIAM VIRGILIO ZAMORA GIRÓN

## **SECRETARIO**

LIC. VICTOR HUGO MERINO QUEZADA

## **JEFE DEL DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA**

ING. MS. SORAYA LISSETTE BARRERA DE GARCÍA

## **DOCENTE DIRECTOR**

ING. EVER OMAR AGUILAR

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR**  
**FACULTAD MULTIDISCIPLINARIA DE OCCIDENTE**  
**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA**

**TÍTULO:**

*“ELABORACIÓN Y EVALUACIÓN DE DISEÑOS DE MEZCLA DE CONCRETO DE ALTA RESISTENCIA, IMPLEMENTANDO CEMENTO ASTM C1157 TIPO HE, BASADOS EN EL METODO DE DISEÑOS DE MEZCLA ACI 211.4R-08”*

**PARA OPTAR AL TÍTULO:**

**INGENIERO CIVIL**

**AUTORES:**

FELIPE ALFREDO MARTINEZ INTERIANO  
JONNY EDENILSON LINARES CÁCERES  
RAFAEL FERNANDO GARCÍA GÁLVEZ

**DOCENTE DIRECTOR:**

ING. EVER OMAR AGUILAR  
UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

**ASESOR EXTERNO:**

ING. RICARDO BURGOS OVIEDO  
INSTITUTO SALVADOREÑO DEL CEMENTO Y CONCRETO

*Trabajo de graduación aprobado por:*

---

**ING. EVER OMAR AGUILAR**  
*Docente Director.*

## AGRADECIMIENTOS

En esta investigación existen una innumerable cantidad de involucrados que han contribuido de manera directa y sin los cuales ninguna página de las presentes se podría haber escrito.

Uno de los principales es el *Instituto Salvadoreño del Cemento y Concreto* a través del Ing. Rafael González, su personal y equipo técnico que a lo largo de cada etapa proporcionaron asesoría y cedieron sus instalaciones con el único fin de impulsar las nuevas tecnologías del Concreto en nuestro país, a quienes se agradece su invaluable aporte. A la empresa *Holcim El Salvador S.A. de C.V.* que brindó la mayor parte de materiales requeridos para desarrollar las pruebas de laboratorio. A nuestro Docente Director Ing. Ever Omar Aguilar, quién aportó sus conocimientos y supervisó las principales etapas de esta investigación. A nuestro Asesor Externo Ing. Ricardo Burgos Oviedo que acompañó con su tiempo, consejos y experiencia el desarrollo de esta investigación.

A nuestros padres, familiares, amigos y patrocinadores que acompañaron nuestro sueño desde el momento en el que decidimos iniciar esta carrera profesional; esta gran aventura, hoy que estamos a punto de pasar la línea de meta están como siempre avanzando junto a nosotros. Y por supuesto a Dios, a quién debemos todo lo que somos y lo que hemos logrado. Gracias.

Los Autores:  
**Rafael García.**  
**Felipe Martínez.**  
**Jonny Linares.**

*Agradecimientos especiales al  
Instituto Salvadoreño del Cemento y Concreto  
por su apoyo técnico y logístico.*



*Los materiales constituyentes implementados  
fueron cortesía de Holcim El Salvador.*



# CONTENIDO

Título	N° Página
AGRADECIMIENTOS	VII
RESUMEN	XVIII

## **CAPITULO 1: GENERALIDADES.** 21

1.1. INTRODUCCIÓN.	21
1.2. ANTECEDENTES.	23
1.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.	26
1.4. OBJETIVOS.	28
1.4.1. GENERAL.	28
1.4.2. ESPECIFICOS.	28
1.5. ALCANCES.	29
1.6. LIMITACIONES.	31
1.7. JUSTIFICACIÓN.	32

## **CAPITULO 2: MARCO TEÓRICO.** 36

2.1. INTRODUCCIÓN.	36
2.2. FUNDAMENTOS DEL CONCRETO DE ALTA RESISTENCIA.	38
2.2.1. DEFINICIÓN DE CONCRETO DE ALTA RESISTENCIA.	38
2.2.2. DEFINICIÓN DE CONCRETO DE RESISTENCIA NORMAL O CONVENCIONAL.	42
2.2.3. CONCRETO DE ALTO DESEMPEÑO (HIGH PERFORMANCE CONCRETE).	44
2.3. ANTECEDENTES HISTÓRICOS.	50
2.3.1. DE REDUCTORES DE AGUA A SUPERPLASTIFICANTES.	55
2.3.2. LA LLEGADA DEL HUMO DE SILICE (SILICA FUME, MICROSÍLICE).	59
2.3.3. SITUACIÓN ACTUAL.	61
2.4. TOMA DE DECISIONES PARA LA APLICACIÓN DEL CONCRETO DE ALTA RESISTENCIA.	65
2.4.1. CONSIDERACIONES PARA LOS PROPIETARIOS.	66
2.4.2. CONSIDERACIONES PARA EL DISEÑADOR.	68
2.4.3. CONSIDERACIONES PARA EL CONSTRUCTOR.	70
2.4.4. CONSIDERACIONES PARA EL PRODUCTOR DE CONCRETO.	70

2.4.5.	CONSIDERACIONES DE AFECTACIÓN MEDIOAMBIENTAL.	72
2.5.	BENEFICIOS DEL CONCRETO DE ALTA RESISTENCIA.	73
2.6.	VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL USO DE CONCRETOS DE ALTA RESISTENCIA.	75
2.7.	APLICACIONES.	76
2.7.1.	APLICACIONES COMUNES.	76
2.7.2.	APLICACIONES EN EL MUNDO.	77
2.7.3.	APLICACIONES EN EL SALVADOR.	83
2.7.3.1.	EDIFICIO TORRE FUTURA.	83
2.8.	MATERIALES CONSTITUTIVOS.	91
2.8.1.	INTRODUCCIÓN.	91
2.7.2.	MATERIALES CEMENTANTES.	93
2.7.2.1.	CEMENTO PORTLAND.	93
2.7.2.1.1.	CARACTERÍSTICAS DEL CEMENTO PORTLAND FABRICADO BAJO LA NORMA ASTM C150 DEL TIPO I.	95
2.7.2.1.2.	CARACTERÍSTICAS DEL CEMENTO PORTLAND FABRICADO BAJO LA NORMA ASTM C1157 DEL TIPO HE.	97
2.7.2.1.3.	ELECCIÓN DEL TIPO DE CEMENTO A UTILIZAR EN LA ELABORACIÓN DE CONCRETO DE ALTA RESISTENCIA.	99
2.7.3.	MICROSILICE COMO ADICIÓN MINERAL.	101
2.7.3.1.	PROPIEDADES FÍSICAS Y COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL MICROSILICE.	103
2.7.3.2.	EFFECTOS DEL MICROSILICE EN LAS PROPIEDADES DEL CONCRETO.	105
2.7.4.	AGREGADOS.	108
2.7.4.1.	AGREGADO GRUESO.	108
2.7.4.2.	AGREGADO FINO.	110
2.7.5.	AGUA.	111
2.7.6.	ADITIVOS.	112
2.7.6.1.	CLASIFICACIÓN DE LOS ADITIVOS.	113
2.7.6.2.	ADITIVOS SUPERPLASTIFICANTES ASTM C494.	115
2.7.6.3.	EFFECTOS EN LAS PROPIEDADES DEL CONCRETO.	117
2.7.6.4.	REACCIÓN MICROSILICE-ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE.	118
2.8.	PROPIEDADES DEL CONCRETO DE ALTA RESISTENCIA.	120
2.8.1.	INTRODUCCIÓN.	120
2.8.2.	PROPIEDADES GENERALES DEL CONCRETO DE ALTA RESISTENCIA.	122
2.8.2.1.	RELACIÓN AGUA/CEMENTO, RELACIÓN AGUA/MATERIALES CEMENTANTES O RELACIÓN AGUA/CONGLOMERANTE.	122
2.8.2.2.	MATERIALES CEMENTANTES SUPLEMENTARIOS (ADICIONES MINERALES).	125

2.8.2.3.	RESISTENCIA.	126
2.8.2.4.	RESISTENCIA ESPECIFICA ( $f'_c$ ).	127
2.8.2.5.	RESISTENCIA PROMEDIO REQUERIDA ( $f'_{cr}$ ).	128
2.8.3.	PROPIEDADES DEL CONCRETO EN ESTADO FRESCO.	130
2.8.3.1.	INTRODUCCIÓN.	130
2.8.3.2.	INDICADORES DE CALIDAD DEL CONCRETO EMPLEADOS COMUNMENTE.	134
2.8.3.2.1.	PESO VOLUMÉTRICO (MASA UNITARIA).	134
2.8.3.2.2.	REVENIMIENTO, ASENTAMIENTO O CAIDA.	135
2.8.3.2.3.	CONTENIDO DE AIRE.	140
2.8.3.2.4.	RETRASO DEL FRAGUADO.	143
2.8.3.2.5.	OBSERVACIONES FINALES.	144
2.8.4.	PROPIEDADES DEL CONCRETO EN ESTADO ENDURECIDO.	147
2.8.4.1.	PROPIEDADES MECÁNICAS.	148
2.8.4.1.1.	TENSIÓN AXIAL VERSUS DEFORMACIÓN.	149
2.8.4.1.2.	MÓDULO DE ELASTICIDAD.	150
2.8.4.1.2.1.	MÓDULO DE ELASTICIDAD ESTÁTICO.	150
2.8.4.1.2.2.	MÓDULO DE ELASTICIDAD DINÁMICO.	156
2.8.4.1.3.	EL COEFICIENTE DE POISSON.	156
2.8.4.1.4.	RESISTENCIA.	157
2.8.4.1.4.1.	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN.	157
2.8.4.1.4.2.	RESISTENCIA A LA TRACCIÓN.	159
2.8.4.1.5.	REGRESIÓN DE RESISTENCIA.	160
2.8.4.1.6.	CONTRACCIÓN Y FLUENCIA.	161
2.8.4.1.6.1.	CONTRACCIÓN PLÁSTICA.	163
2.8.4.1.6.2.	CONTRACCIÓN A EDAD TEMPRANA.	164
2.8.4.1.6.3.	CONTRACCIÓN A EDADES AVANZADAS.	168
2.8.4.1.6.4.	FLUENCIA.	169
2.8.4.2.	PROPIEDADES DE DURABILIDAD.	172
2.8.4.2.1.	PERMEABILIDAD.	174
2.8.4.2.2.	RESISTENCIA A LA CONGELACIÓN Y DESCONGELACIÓN.	175
2.8.4.2.3.	RESISTENCIA A LA DESCAMACIÓN.	178
2.8.4.2.4.	RESISTENCIA A LAS REACCIONES SÍLICE-ALCALINOS.	178
2.8.4.2.5.	RESISTENCIA A LOS SULFATOS.	180
2.8.4.2.6.	RESISTENCIA A LA CORROSIÓN.	181
2.8.4.2.7.	RESISTENCIA A LA ABRASIÓN.	182

2.8.4.3.	<i>PROPIEDADES TÉRMICAS.</i>	185
2.8.4.3.1.	<i>RESISTENCIA AL FUEGO.</i>	185
2.8.5.	<i>ENSAYOS REALIZADOS AL CONCRETO DE ALTA RESISTENCIA Y A LOS MATERIALES CONSTITUYENTES.</i>	188
2.8.5.1.	<i>CLASES DE ENSAYOS.</i>	189
2.8.5.2.	<i>FRECUENCIA DE LOS ENSAYOS.</i>	190
2.8.5.3.	<i>ENSAYOS A LOS AGREGADOS.*</i>	194
2.8.5.3.1.	<i>MUESTREO DE AGREGADOS.</i>	194
2.8.5.3.2.	<i>IMPUREZAS ORGÁNICAS.</i>	195
2.8.5.3.3.	<i>MATERIAL FINO OBJETABLE.</i>	196
2.8.5.3.4.	<i>GRANULOMETRÍA.</i>	196
2.8.5.3.5.	<i>CONTENIDO DE HUMEDAD EN LOS AGREGADOS.*</i>	198
2.8.5.4.	<i>ENSAYOS AL CONCRETO EN ESTADO FRESCO.</i>	201
2.8.5.4.1.	<i>MUESTREO DEL CONCRETO FRESCO.</i>	201
2.8.5.4.2.	<i>CONSISTENCIA.</i>	201
2.8.5.4.3.	<i>MEDICIÓN DE LA TEMPERATURA.</i>	204
2.8.5.4.4.	<i>DENSIDAD Y RENDIMIENTO.</i>	205
2.8.5.4.5.	<i>CONTENIDO DE AIRE.</i>	206
2.8.5.4.6.	<i>ESPECÍMENES PARA PRUEBAS DE RESISTENCIA.</i>	207
2.8.5.4.7.	<i>TIEMPO DE FRAGUADO.</i>	213
2.8.5.4.8.	<i>ENSAYOS DE COMPRESIÓN ACELERADOS PARA LA PROYECCIÓN DE LA RESISTENCIA A EDADES MÁS AVANZADAS.</i>	214
2.8.5.4.9.	<i>CONTENIDO DE CLORUROS.</i>	215
2.8.5.4.10.	<i>CONTENIDO DE CEMENTO PORTLAND, CONTENIDO DE AGUA, RELACIÓN AGUA-CEMENTO.</i>	215
2.8.5.4.11.	<i>CONTENIDO DE MATERIAL CEMENTANTE SUPLEMENTARIO.</i>	216
2.8.5.4.12.	<i>SANGRADO (EXUDACIÓN) DEL CONCRETO.</i>	217
2.8.5.5.	<i>ENSAYOS AL CONCRETO EN ESTADO ENDURECIDO.</i>	218
2.8.5.5.1.	<i>INTRODUCCIÓN.</i>	218
2.8.5.5.2.	<i>MEDICIÓN DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN.</i>	221
2.8.5.5.2.1.	<i>ASPECTOS PRINCIPALES QUE INFLUYEN EN LAS PRUEBAS DE COMPRESIÓN DEL CONCRETO DE ALTA RESISTENCIA.</i>	223
2.8.5.5.2.2.	<i>CABECEO DE ESPECÍMENES DE CONCRETO.</i>	224
2.8.5.5.3.	<i>MEDICIÓN DE RESISTENCIA A LA FLEXIÓN.</i>	226
2.8.5.5.4.	<i>MEDICIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD.</i>	227

<b>CAPITULO 3: DISEÑO DE MEZCLA.</b>	230
3.1. INTRODUCCION.	230
3.2. MÉTODO DE DISEÑO DE MEZCLAS DE CONCRETOS DE ALTA RESISTENCIA DEL COMITÉ ACI 211.4R-08.	231
3.2.1. DOSIFICACIÓN DE MEZCLAS DE CONCRETO DE ALTA RESISTENCIA USANDO HUMO DE SÍLICE.	232
3.2.1.1. PROCEDIMIENTO DE DOSIFICACIÓN DE LA MEZCLA.	233
3.3. ELECCIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LA MEZCLA.	240
3.3.1. RESULTADOS DE PRUEBAS DE LABORATORIO A LOS COMPONENTES DE LA MEZCLA.	241
3.3.2. CALCULO DE DOSIFICACION DE MEZCLA DE CONCRETO DE ALTA RESISTENCIA.	242
3.3.2.1. REQUISITOS DE DISEÑO.	242
3.3.2.2. PROCEDIMIENTO.	243
3.3.2.2.1. DISEÑO DEFINITIVO: MEZCLA "A".	252
3.3.2.2.2. DISEÑO DEFINITIVO: MEZCLA "B".	253
3.3.2.2.3. DISEÑO DEFINITIVO: MEZCLA "C".	254
3.4. PROCEDIMIENTO DE MEZCLADO DEL CONCRETO DE ALTA RESISTENCIA USANDO HUMO DE SILICE EN LABORATORIO.	255
<b>CAPITULO 4: ANÁLISIS DE RESULTADOS.</b>	258
4.1. INTRODUCCIÓN.	258
4.2. DESCRIPCIÓN DE ESPECÍMENES PARA RESISTENCIA.	259
4.3. PRUEBAS AL CONCRETO EN ESTADO FRESCO.	262
4.3.1. ELABORACIÓN Y CURADO EN EL LABORATORIO DE ESPECÍMENES DE CONCRETO (ASTM C192).	263
4.3.1.1. CURADO DE ESPECÍMENES.	265
4.4. PRUEBAS AL CONCRETO EN ESTADO ENDURECIDO.	265
4.4.1. CABECEADO DE ESPECÍMENES.	265
4.4.2. ENSAYOS DE RESISTENCIA A LA COMPRESION.	267

<b>CAPITULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.</b>	279
5.1. CONCLUSIONES.	279
5.2. RECOMENDACIONES.	281
GLOSARIO	284
BIBLIOGRAFÍA	300
CÓDIGOS INTERNACIONALES UTILIZADOS	309
NORMAS ASTM IMPLEMENTADAS	310
ANEXOS	

## INDICE DE FIGURAS

<b>Título</b>	<b>N° Página</b>
Figura 2.2.2.....	43
Figura 2.2.3.....	49
Figura 2.3.1.....	53
Figura 2.3.2.....	54
Figura 2.3.3.....	62
Figura 2.3.4.....	63
Figura 2.3.5.....	64
Figura 2.4.1.....	67
Figura 2.6.1.....	80
Figura 2.6.2.....	81
Figura 2.6.3.....	87
Figura 2.7.1.....	94
Figura 2.7.2.....	97
Figura 2.7.3.....	99
Figura 2.7.4.....	102
Figura 2.7.5.....	109
Figura 2.7.6.....	111
Figura 2.8.1.....	125
Figura 2.8.2.....	146
Figura 2.8.3.....	150
Figura 2.8.4.....	151
Figura 2.8.5.....	162
Figura 2.8.6.....	163
Figura 2.8.7.....	184
Figura 2.8.8.....	194
Figura 2.8.9.....	202
Figura 2.8.10.....	204
Figura 2.8.11.....	205
Figura 2.8.12.....	206
Figura 2.8.13.....	208
Figura 2.8.14.....	209
Figura 2.8.15.....	212
Figura 2.8.16.....	213
Figura 2.8.17.....	217
Figura 4.1.....	263
Figura 4.2.....	264
Figura 4.3.....	266
Figura 4.4.....	267
Figura 4.5.....	276
Figura 4.6.....	277

## INDICE DE TABLAS

<b>Título</b>	<b>N° Página</b>
Tabla 2.5.....	75
Tabla 2.7.1.....	104
Tabla 2.7.2.....	105
Tabla 2.7.3.....	114
Tabla 3.1.....	233
Tabla 3.2.....	234
Tabla 3.3.....	235
Tabla 3.4.....	236
Tabla 3.5.....	237
Tabla 3.6.....	241
Tabla 3.7.....	251
Tabla 4.1.....	261
Tabla 4.2.....	262
Tabla 4.3.....	268
Tabla 4.4.....	272
Tabla 4.5.....	274

## RESUMEN

La presente investigación denominada “*ELABORACIÓN Y EVALUACIÓN DE DISEÑOS DE MEZCLA DE CONCRETO DE ALTA RESISTENCIA, IMPLEMENTANDO CEMENTO ASTM C1157 TIPO HE, BASADOS EN EL METODO DE DISEÑOS DE MEZCLA ACI 211.4R-08*”, es del género de la tecnología del concreto. El material definido como *Concreto u Hormigón de Alta Resistencia*<sup>1</sup> ofrece beneficios en las estructuras y se basa en el criterio de la optimización de recursos lo que ha potenciado su estudio y aplicación en países desarrollados.

Como meta se pretende establecer un diseño de mezcla de concreto óptimo, utilizando los recursos disponibles en El Salvador y cumpliendo con los requisitos necesarios para denominarlo “*Concreto de Alta Resistencia*” (según el Comité ACI 363 y ACI 211.4) basados en los métodos propuestos por el Comité ACI 211.4 en su revisión del año 2008 a través de la implementación de un tipo de cemento catalogado por los autores de éste documento como “no típico” para elaborar concretos de alta resistencia. *Éste es el Cemento ASTM C1157 del Tipo HE.* Comúnmente en países norteamericanos se utilizan los cementos bajo la norma ASTM C150 para elaborar concretos de este tipo, por tanto el cemento propuesto a investigar carece de información técnica que garantice que su utilización para tal fin es adecuada, algo poco conveniente para El Salvador pues los recursos naturales disponibles y las políticas medioambientales presentan una mejor apertura para la fabricación de cementos bajo la norma ASTM C1157. Para establecer dicho diseño se estudió el efecto que produce el cemento en evaluación y la aplicación de *Humo de Sílice* como adición en las propiedades del concreto en estado fresco y endurecido, comparándose con otras dos clases de mezclas donde no se incluyen adicciones minerales.

---

<sup>1</sup> Se define así al concreto que supera los 422 kg/cm<sup>2</sup> o 6,000 psi de resistencia a la compresión especificada a las edades de aceptación de 28 días o más. Comúnmente se adopta la definición cuando el material está en el intervalo de 6,000 a 8,000 psi (40 a 55 MPa). Para una ampliación sobre el tema dirijase a la sección: 2.1.1. *DEFINICIÓN DE CONCRETO DE ALTA RESISTENCIA.*

*El informe se divide en 5 capítulos, detallados brevemente a continuación:*

El Capítulo 1 titulado “*GENERALIDADES*”, se detallan los antecedentes, de como a lo largo de la historia se ha ido desarrollado e implementando este tipo de concreto, el planteamiento del problema, los objetivos, la justificación, alcances, limitaciones y el rumbo de la investigación.

El Capítulo 2 titulado “*MARCO TEORICO*”, expone un resumen general del concreto de alta resistencia, se dan a conocer los diferentes materiales que constituyen la mezcla de concreto de alta resistencia y algunos parámetros que se deben de cumplir. Beneficios, Ventajas y Desventajas, y sus propiedades en estado fresco y endurecido, se proporciona la terminología relacionada a la investigación y un vistazo de la aplicación de esta tecnología en El Salvador y el mundo. Este capítulo tiene como objetivo guiar al lector hacia los conceptos desde lo básico hasta lo más técnico del concreto de alta resistencia.

El Capítulo 3 “*DISEÑO Y PROPORCIONAMIENTO DE LA MEZCLA*” tiene como finalidad, presentar los procedimientos requeridos en el diseño de mezclas de concreto de alta resistencia, tomando como base el ACI 211.4R-08 que proporciona una guía paso a paso para el inicio del diseño, obteniendo finalmente el diseño definitivo de mezclas de concreto de alta resistencia utilizando cemento ASTM C1157 Tipo HE.

El Capítulo 4 “*ANALISIS DE RESULTADOS*” presenta los resultados de las pruebas del concreto en estado fresco, así como los resultados de resistencia a los esfuerzos de compresión del concreto en estado endurecido.

Finalmente se presenta el Capítulo 5 “*CONCLUSIONES Y RECOMEDACIONES*” donde se establece un análisis integral de la experiencia de los investigadores.



# CAPITULO 1: *GENERALIDADES*

## **CAPITULO 1: GENERALIDADES.**

### **1.1.INTRODUCCIÓN.**

El concreto de alta resistencia ha tenido una serie de avances a partir de sus primeras apariciones registradas cerca de 1960<sup>2</sup>; sus aplicaciones se han incrementado en el transcurso de los años gracias a la enorme cantidad de estudios que han confirmado que es un material idóneo si es bien implementado. En la mayoría de países en los que se tiene acceso al concreto en general, debido a su comportamiento físico, a sus respuestas químicas; y comparado económicamente con otros materiales utilizados en elementos estructurales en edificaciones, su uso aun mantiene preferencia. Algo que se demuestra con las grandes cantidades de aplicación mundial de este material y la permanencia de crecimiento en la industria del concreto.

La definición de *Concreto de Alta Resistencia* toma como base su resistencia a la compresión en rangos que han cambiado en varias ocasiones debido al alcance de estas resistencias y a su familiarización en el mercado<sup>3</sup>, pasando de ser de alta resistencia a concretos convencionales o normales. Y como ya ha sucedido estas definiciones únicamente cuantitativas pueden aun variar si nuevos estudios y aplicaciones superan los rangos conocidos actualmente, por lo que en esta investigación se ha tomado como base las definiciones propuestas en el *ACI 211.4R-08*.

La alta resistencia a la compresión es el parámetro principal exigido a este tipo de concretos; pero en realidad, existen una serie de características que mejoran el desempeño del material únicamente controlando este parámetro. Su elaboración requiere de un estricto control de calidad desde sus materiales constituyentes hasta su fabricación en la obra; para su aplicación es totalmente necesario basarse en pruebas de laboratorio y diseños de mezcla que aseguren las

---

<sup>2</sup> "A historical perspective", High-Performance Concrete, Pierre-Claude Aïtcin, *Université de Sherbrooke, Québec, Canada*.

<sup>3</sup> High-Performance Concrete, Pierre-Claude Aïtcin, 1998.

propiedades que ofrecerá el concreto. Algo que no debería ser únicamente en el caso de fabricación de este tipo de material sino en todo tipo de concretos, pues lo que se debe buscar siempre es la optimización de recursos.

En búsqueda de esta optimización, se descubre que las principales aplicaciones y normativas de concretos de alta resistencia hacen uso casi exclusivo de cementos fabricados bajo la norma ASTM C150; algo que técnicamente no está mal, de hecho podría definirse como “técnicamente ideal” pues las propiedades que ofrece este cemento si es bien utilizado son excelentes. Pero, existen inconvenientes económicos que dificultan el uso de este tipo de cementos en algunos países debido a las cantidades de clinker puro (materia prima del cemento) que requiere su fabricación. Por ello, se identifica la necesidad de conocer el comportamiento mecánico de concretos de alta resistencia fabricados con cementos que poseen algunas adiciones en sus componentes como los cementos ASTM C1157, específicamente del tipo HE. Para lograr este objetivo esta investigación se basa en el método de diseños de mezcla ACI 211.4R-08 para ceniza volante adaptándolo a aplicaciones con el uso exclusivo de humo de sílice como adición. En tal normativa ya se hace referencia a la posibilidad de adaptar los diseños a otros tipos de cementos portland.

Por tanto en el presente documento se describen los resultados de la investigación y cada una de las etapas en el desarrollo de la misma; con fines claros de facilitar al lector las bases científicas para tomar decisiones de aplicación de Concretos de Alta Resistencia bajo condiciones de diseño similares o simplemente informar acerca de nuevas tecnologías ahora disponibles en nuestro país.

## **1.2. ANTECEDENTES.**

Las demandas tecnológicas en la construcción siempre han existido y para bien del ser humano, de las sociedades y del equilibrio ambiental dichas demandas y la constante búsqueda de su satisfacción se mantendrá a lo largo del tiempo. El concreto como materia prima básica en la industria de la construcción ofrece hasta la actualidad las ventajas idóneas tanto económicas como estructurales; a demás de las bondades agregadas debido a su producción a lo largo del planeta a causa de sus materiales constituyentes comúnmente disponibles.

La familiarización con el producto y la satisfacción completa bajo su correcto uso ha potenciado su aplicación a una innumerable cantidad de proyectos pues basta establecer estándares de calidad a los materiales y a la fabricación del concreto y sin ningún problema, su aplicación se adapta a las exigencias particulares haciendo cambios técnicos minuciosos hasta encontrar las adecuadas proporciones.

Pero ¿Cuáles son estas exigencias? Como algo intrínseco los ingenieros vuelcan sus capacidades a la búsqueda de satisfacción de los requisitos de cada proyecto; generalmente identificando las condiciones a las que será sometido el concreto, para luego satisfacer de alguna correcta manera las exigencias que se presentan. Dichas exigencias se resumen en dos grandes rasgos: *Sus Propiedades Mecánicas (resistencia, modulo de elasticidad) y su Desempeño (también conocido como Durabilidad).*

La *Resistencia* específicamente llamada *Resistencia a la Compresión del Concreto*, suele ser generalmente el parámetro más común de referencia en los proyectos. Con el estudio de esta propiedad se ha logrado que muchas otras sollicitaciones de desempeño también sean cubiertas. La *Resistencia a la Compresión del Concreto* se estudia en dos tipos de concreto: *Concretos*

*Convencionales o Normales y Concretos de Alta Resistencia.*<sup>4</sup> Estas últimas definiciones han variado dependiendo de la época, la ubicación geográfica y las características de la industria donde quiere ser aplicado el material.

En los años cincuenta, un concreto con resistencia a los esfuerzos de compresión de 5,000 psi (34 MPa) era considerado de alta resistencia; hoy día, este valor es considerado normal. En la siguiente década, valores de resistencia a la compresión de 6,000 psi (41 MPa) a 7,500 psi (52 MPa) eran usados comercialmente en algunos sitios (principalmente en países del primer mundo), y para los setenta ya se producían concretos con valores que llegaban a los 9,000 psi (62 MPa).<sup>5</sup>

Una de las más altas resistencias del concreto utilizado en cualquier aplicación comercial a gran escala hasta el momento ha sido la ocurrida cerca de 1980 con un orden de 130 MPa (19,000 psi) alcanzada en 58 días, algo histórico, en Two Union Square en Seattle, Washington, Estados Unidos. En la actualidad, en muchas aplicaciones los valores de las resistencias a la compresión han podido alcanzar los 20,000 psi (138 MPa).<sup>6</sup>

Los concretos de Alta Resistencia no son algo nuevo, su disponibilidad en el mercado viene desde finales de la década de 1950. Aun así y a pesar de la enorme cantidad de investigaciones realizadas el porcentaje de aplicación respecto a los volúmenes totales de concreto mundial es mínimo e incluso existen lugares donde su uso sigue siendo un mito, un misterio, algo aun experimental.

Sin embargo, en los últimos años, las aplicaciones del concreto de alta resistencia se han incrementado, su uso se ha esparcido a muchas partes del mundo. La optimización de recursos y los cambios conceptuales de los ahora

---

<sup>4</sup> High-Performance Concrete, Pierre-Claude Aitcin, 1998.

<sup>5</sup> High-strength concrete: A practical guide, Michael A. Caldarone, 2009.

<sup>6</sup> High-strength concrete: A practical guide, Michael A. Caldarone, 2009.

implementadores han motivado a definir parámetros de elaboración y han potenciado sus rangos de aplicación motivando su desarrollo.

Durante los últimos 40 años la resistencia a la compresión del concreto producido comercialmente se ha triplicado. Todo esto ha sido causado por la gran cantidad de estudios, por las bases teóricas ampliamente fundamentadas de los investigadores; y por qué no, por la mayor disponibilidad de adiciones minerales y aditivos apropiados para las mezclas.

Muchas edificaciones importantes que ahora son conocidas no hubieran sido posibles de fabricar con el uso arraigado de concretos convencionales; incluso en El Salvador, donde su aplicación y demostración de efectividad no pasa de unos pocos proyectos; proyectos en los que se agradece a los intrépidos aventureros que con bases científicas buscan ya erradicar esos paradigmas en cuanto al uso de concretos de alta resistencia.

Hoy en día se cuenta con una buena cantidad de información, de estudios realizados y de ejemplos reales que incentivan la implementación de este tipo de concreto y demuestran su factible aplicabilidad, algo que ningún constructor en cualquier parte del mundo puede ocultar.

### **1.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.**

Durante décadas se ha analizado a nivel mundial el comportamiento del concreto de alta resistencia. Desde las primeras apariciones de este material los investigadores y los productores de materias primas han desarrollado una serie de avances que han potenciado su aplicación en la mayor parte de países desarrollados; y hoy en día su uso se está volviendo algo común en algunos países latinoamericanos. En El Salvador este tipo de tecnología no pasa de unos pocos estudios y aplicaciones, generalmente haciendo uso de cemento *ASTM C150 Tipo I* en donde los resultados han alcanzado resistencias que superan los parámetros establecidos por *ACI 211.4*<sup>7</sup> y *ACI 363*<sup>8</sup>.

A pesar de estos pocos estudios en El Salvador actualmente las normativas vigentes permiten generar nuevas conformaciones de concreto de alta resistencia con una diversidad de materiales cementantes modernos, un ejemplo de ello es la elaboración de concreto de alta resistencia implementando cementos bajo la norma *ASTM C1157*, cementos de los que se desconoce en la actualidad su comportamiento mecánico y desempeño al utilizarlos en dicho fin. La norma *ASTM C1157* se basa en el desempeño del cemento lo que amplía las posibilidades de los productores de cemento a utilizar adiciones en su fabricación, dando como resultado ciertas ventajas en comparación con cementos fabricados bajo la típica norma *ASTM C150*. Si bien es cierto los cementos según *ASTM C150* han tenido resultados satisfactorios en la elaboración de concreto de alta resistencia, en muchos países puede resultar costosa su utilización por las cantidades de clinker puro que requiere su composición.

El cemento *ASTM C1157* del Tipo HE es uno de los más populares y de venta común en nuestro país y conocer su comportamiento mecánico no solo es importante, es también una necesidad pues si pudiera utilizarse para este fin se

---

<sup>7</sup> Guía para la Selección de Proporciones para Concreto de Alta Resistencia con Cemento Portland y otros Materiales Cementantes.

<sup>8</sup> Informe sobre el Concreto de Alta Resistencia.

lograría contribuir en la economía de los proyectos y en la optimización de los recursos naturales explotados para fabricar cemento.

Los lineamientos para dosificar concretos de alta resistencia los establece ACI 211.4 y se desconoce el efecto que causa el cemento ASTM C1157 del Tipo HE en la elaboración de este tipo de concreto. De aquí la importancia de conocer si es posible su adaptación.

## **1.4. OBJETIVOS.**

### **1.4.1. GENERAL.**

- I.** Desarrollar una mezcla de concreto de alta resistencia implementando cemento ASTM C1157 Tipo HE, tomando como base el método de diseño de mezclas ACI 211.4R-08, para potenciar el desarrollo tecnológico del concreto en El Salvador.

### **1.4.2. ESPECIFICOS.**

- I.** Elaborar concreto de alta resistencia con una relación A/C ó A/MC<sup>9</sup> inicial de 0.28; considerando una mezcla patrón de concreto con aditivo superplastificante y humo de sílice, una segunda mezcla de comparación de concreto con aditivo superplastificante y una tercera mezcla de comparación de concreto utilizando únicamente cemento como conglomerante.
- II.** Verificar el comportamiento de las mezclas de concreto en estado fresco a través de los ensayos: revenimiento, temperatura, contenido de aire y densidad.
- III.** Alcanzar una resistencia a los esfuerzos de compresión en la mezcla de concreto patrón en estado endurecido a la edad de 28 días mayor a 422 Kg/cm<sup>2</sup> (6,000 psi) con un porcentaje de humo de sílice del quince por ciento como adición respecto al peso del cemento.
- IV.** Comparar el comportamiento mecánico del concreto en estado endurecido del diseño de mezcla patrón con las demás mezclas.
- V.** Establecer recomendaciones sobre elaboración y manejo adecuado de concreto de alta resistencia en laboratorio.

---

<sup>9</sup> Se entiende por A/C, A/MC o en sus traducciones comúnmente al idioma inglés: A una proporción de agua respecto a una proporción de cemento o materiales cementantes en peso, utilizados en la elaboración de concreto con el fin de establecer propiedades específicas en el desempeño del concreto. *De aquí en adelante en el documento se expresaran indistintamente estos términos haciendo referencia al conglomerante utilizado para elaborar concreto.*

## **1.5. ALCANCES.**

- I.** Proporcionar información técnica que sirva de base para futuras investigaciones sobre la utilización de cemento ASTM C1157 Tipo HE en la elaboración de concretos de alta resistencia.
- II.** Aplicar el procedimiento de diseño mezclas de concreto de alta resistencia del comité ACI 211.4R-08 utilizando cemento ASTM C1157 Tipo HE, para obtener un concreto de alta resistencia mayor a  $422 \text{ kg/cm}^2$  (6,000 psi) a la edad de 28 días.
- III.** Utilizar agregados locales para establecer el diseño de mezcla de concreto de alta resistencia en base a las materias primas del medio, los agregados deben cumplir las respectivas normas ASTM<sup>10</sup> con el fin de controlar su impacto en el concreto.
- IV.** Establecer el procedimiento de volúmenes absolutos para el diseño de mezclas de concreto de alta resistencia según ACI 211.4R-08.
- V.** Adaptar el diseño de mezclas de concreto ACI 211.4R-08 siguiendo el método especificado para cenizas volantes utilizando cemento ASTM C1157 Tipo HE y humo de sílice como adición.
- VI.** Garantizar la hidratación del cemento, para ello se generará un revenimiento inicial sin aditivos en todas las mezclas de 1" a 2".
- VII.** Mediante el procedimiento de mezclas de pruebas se establecerán los diseños de mezcla finales.

---

<sup>10</sup> Normas ASTM para caracterización de los agregados: ASTM C33, ASTM C127, ASTM C128, ASTM C29, ASTM D75.

- VIII.** Se elaborarán un mínimo de 250 especímenes cilíndricos con cantidades máximas para la mezcla patrón y menores para las mezclas comparativas. Las dimensiones de los especímenes son de 4 pulgadas en su diámetro y 8 pulgadas de altura tomando como base la norma ASTM C192 / C192M-02 para definir las resistencias a esfuerzos de compresión de los diferentes diseños de mezcla de concreto establecidos.
- IX.** Evaluar la resistencia a la compresión de los diseños de mezcla de concreto a las edades de 7, 28 y 56 días. Teniendo como principal la edad de los 28 días.

## **1.6. LIMITACIONES.**

- I.** Las pruebas de desempeño (durabilidad) no se incluyen en esta investigación, lo que implica no conocer las respuestas a los cambios químicos producidas en el concreto en estado endurecido.
- II.** El módulo de elasticidad no se determinará, debido a la inexistencia en laboratorio del equipo necesario para medir esta propiedad en cilindros de 4 pulgadas de diámetro por 8 pulgadas de altura.
- III.** La máquina Universal con la que dispone el instituto que apoya ésta investigación no tiene la capacidad para realizar pruebas de esfuerzo a compresión de concreto de alta resistencia en especímenes de 6 pulgadas de diámetro por 12 pulgadas de altura. Esto obliga implementar especímenes de 4 pulgadas de diámetro por 8 pulgadas de altura lo que incrementa el número de especímenes a probar en las diferentes edades de estudio e impacta el tiempo invertido en laboratorio durante la investigación.
- IV.** Los agregados a utilizar en el diseño de la mezcla de concreto de alta resistencia son de origen local; sus propiedades químicas, composición y por lo tanto su desempeño no es igual al de materiales norteamericanos bajo los cuales se definen comúnmente las normativas (tomados como referencia por ACI, ASTM, etc.) esto dificulta predecir un adecuado comportamiento y una adecuada compatibilidad entre los materiales.
- V.** Para la realización de una investigación más profunda se requiere una mayor disposición e inversión de recursos, por lo que únicamente se determina una de las propiedades más importantes del concreto en estado endurecido; la resistencia a los esfuerzos de compresión.

## **1.7. JUSTIFICACIÓN.**

Durante algunas décadas el estudio del *Concreto de Alta Resistencia* ha intrigado a una numerosa cantidad de investigadores a fin de conocer profundamente su comportamiento físico y químico; y romper de una vez por todas las barreras culturales o costumbres en los constructores que han impedido su uso.

Estas barreras se trasladan al ambiente económico de la construcción pues los lineamientos internacionales generalmente basan sus diseños de mezcla adaptados a Cementos Portland que cumplen la norma ASTM C150; en algunos países como en el caso de El Salvador, estos tipos de cemento son producidos en menor escala y tienen un precio relativamente mayor por comportamientos de demanda del mercado, la pureza y los requisitos químicos que deben cumplir sus componentes. Aunque la decisión de realizar concretos de alta resistencia con estos materiales para unos países nos es ventajosa, toma como referencia principalmente los impactos económicos y ambientales, pues se puede asegurar que la correcta selección de cualquier tipo de cemento bajo la norma ASTM C150 resulta técnicamente satisfactoria.

Los estrictos controles de calidad en la obtención de los materiales constituyentes, en la dosificación, elaboración del concreto y especímenes, en el manejo adecuado durante el curado y aún durante las mismas pruebas de resistencia influyen grandemente en la resistencia esperada, también es importante aclarar que las materias primas deben ser las apropiadas y se debe garantizar su correcta compatibilidad.

En vista de que se conocen los principales influyentes en la obtención de alta resistencia, se indaga a cerca de otros tipos de Cemento Portland también normados; que tengan propiedades idóneas y cuya implementación aun no tenga bases fundamentadas que recomienden su uso en la industria.

Durante el año 2008 en la última revisión al código ACI 211.4 que define los lineamientos del método de diseño de mezclas se decidió generalizar su implementación a otros tipos de Cemento Portland, una decisión moderna que elimina los paradigmas del uso absoluto del cemento ASTM C150. Esta decisión abre una gran cantidad de nuevas posibilidades de investigación a cerca de la fabricación de concretos de alta resistencia con cementos bajo requisitos de desempeño y que intrínsecamente llevan incluidas adiciones puzolánicas como los cementos ASTM C1157.

Es conocido que los cementos con adiciones puzolánicas tienen resistencias a la compresión inferiores a los cementos puros; aunque esto no debe considerarse en ningún momento una deficiencia pues las principales influencias en las decisiones de aplicación de algún tipo de cemento son las exigencias propias de los proyectos donde intervienen no únicamente requisitos físicos y químicos, también económicos y ambientales y estos pueden dirigir al mismo tiempo las preferencias de los constructores.

La razón de ser de esta investigación es proporcionar una nueva alternativa de desarrollo de Concretos de Alta Resistencia implementando Cemento Portland ASTM C1157 Tipo HE; un cemento del cual aun no se tienen fuertes referencias de estudio y aplicación en el ámbito de la alta resistencia. Esto generará más fuentes de información confiables que acompañen los avances tecnológicos actuales en el concreto aprovechando recursos naturales muchas veces no explotados y motivará a implementar su uso en industrias nacientes como en el caso de El Salvador.

Se conocen las ventajas que ofrece el Concreto de Alta Resistencia<sup>11</sup> y la versatilidad que puede tener en cualquier aplicación; ahora queda optimizar su

---

<sup>11</sup> Presenta las siguientes Ventajas debido al control de su comportamiento: Facilidad de colocación, Compactación sin segregación, Resistencia a la edad temprana, Mantenimiento de las propiedades mecánicas a lo largo del tiempo, Permeabilidad, Densidad, El calor de hidratación, Dureza, Estabilidad volumétrica, Larga vida en ambientes severos, etc.

implementación mediante el uso de otros tipos de cementos hidráulicos y definir los efectos en el concreto buscando que su adaptación genere mayor desarrollo a la industria de la construcción y al final beneficie a las sociedades, que indudablemente son el objeto indirecto de investigaciones como ésta.



# CAPITULO 2: *MARCO TEÓRICO*

## **CAPITULO 2: MARCO TEÓRICO.**

### **2.1. INTRODUCCIÓN.**

Antes de continuar con la lectura de este documento se vuelve necesario definir una serie de elementos muy relacionados con el concreto de alta resistencia. Se empezará abordando lo que es y lo que no es concreto de alta resistencia a fin de que los lectores comprendan que muchas veces no basta restringir este material con requisitos únicamente numéricos, que si bien los rangos de resistencia a la compresión son sumamente importantes igual o mucho mayor es de importante cumplir con requisitos de durabilidad que garantizan la funcionabilidad de las estructuras y no solo eso, existen países en donde el solo hecho de elaborar concretos convencionales es toda una hazaña importante de admirar.

El concreto de alta resistencia en muchas ocasiones va acompañado de otras bondades como la baja permeabilidad, la resistencia al desgaste, al aumento de la rigidez, a una serie de beneficios en estado fresco, y muchos otros. Por eso hasta la fecha la resistencia a los esfuerzos de compresión se toma como el parámetro principal para cumplimiento de la calidad de este material.

Existen innumerables proyectos en donde se ha utilizado este material desde la década de los 60's. Y hoy en día se encuentra en el "Trending Topic", en la cúspide de preferencia en las principales construcciones de rascacielos a nivel mundial al ser un material idóneo, sencillo y económico.

Se puede elaborar de manera simple si se siguen programas de control de calidad desde en la elaboración de los materiales constituyentes hasta en la elaboración del concreto como tal. No sin antes seguir buenas prácticas de diseño de mezcla y selección de materiales.

En Latinoamérica muchas veces se le da el concepto de “material nuevo” y en muchas ocasiones hasta se ha llegado a pensar que es algo aun experimental. Pero todo lo contrario, se tienen décadas de estudio y la misma evolución de los aditivos y las adiciones ha potenciado el incremento en las resistencias a compresión. El problema muchas veces es que existen países en donde aun no se adaptan los diseños a las propiedades de los materiales locales, esto genera una importante variación en los resultados y por ende cierta “aceptable” desconfianza en los proyectistas a optar por el concreto de alta resistencia. Un material bondadoso por el cual vale la pena invertir en estudios como el aquí presente.

Edificios cada vez más altos con un área efectiva de arrendamiento mayor, ese es un gran objetivo solventado con el concreto de alta resistencia. Y no solo en edificios, existen enormes cantidades de construcciones en donde se puede utilizar y lo único que se debe hacer es atreverse y saber que si es bien implementado los beneficios en los proyectos son innumerables.

A continuación se presentan muchas de las bases importantes en la comprensión de este material para que en los siguientes capítulos el lector pueda interpretar la parte experimental de esta investigación.

## **2.2. FUNDAMENTOS DEL CONCRETO DE ALTA RESISTENCIA.**

### **2.2.1. DEFINICIÓN DE CONCRETO DE ALTA RESISTENCIA.**

La definición de "alta resistencia" en términos de un valor numérico de aplicación universal no es posible, al menos no con algún alto grado de justificación. "Alta resistencia" es un término relativo que depende de muchos factores, tales como la calidad de los materiales de concreto disponibles a nivel local y las prácticas de construcción. Los autores de esta investigación y muchos otros investigadores no creen necesario que la alta resistencia del concreto se define en términos de un valor numérico, sin embargo, en este documento se sugieren rangos en los que la mayoría de las autoridades están de acuerdo; este es un umbral razonable para lo que se considera "concreto de alta resistencia ", al menos en el momento en que fue hecha esta investigación y con base a las definiciones adoptadas en ACI 363R-92 (Reaprobado en 1997).

La resistencia no es una propiedad intrínseca del concreto. Es una propiedad familiar que depende de numerosos factores. *Los Factores principales que influyen en la resistencia medida del concreto incluyen geometría de la probeta, el tamaño, edad y la historia de curado; parámetros de los equipos de prueba, tales como capacidad de carga, la rigidez lateral y longitudinal, la tasa de carga y la uniformidad de la distribución de la carga.*

Hay consideraciones geográficas también. En las regiones donde se producen comercialmente en una forma rutinaria concretos con resistencia a la compresión de 60 MPa (9,000 psi) el concreto no puede ser considerado de "alta resistencia" hasta que se alcance una resistencia medida en el rango de 70 o 80 MPa (10,000 o 12,000 psi).

Por el contrario, en las regiones donde el límite superior de concreto disponibles en el mercado ha sido de 30 MPa (4,000 psi), el concreto que cumple con éxito un

requisito de diseño de 40 MPa (6,000 psi) podría ser considerado de alta resistencia, y por una buena razón.

*La razón de esta diversidad es doble: la necesidad y la capacidad, aunque hay que tener en cuenta que ambos son relativos, el tipo de construcción necesitará la iniciativa del diseñador, la capacidad y el compromiso del productor de concreto y la calidad disponible a nivel local de los materiales.<sup>12</sup>*

*La definición de concreto de alta resistencia con un valor de resistencia especificado en esencia establece una línea seleccionada arbitrariamente de demarcación la cual no es ni práctica ni justificada. La principal preocupación de muchos autores en los valores elegidos arbitrariamente que definen la alta resistencia es que el concreto en general es habitualmente producido en mercados donde el solo hecho de elaborarlo puede ser considerado un gran logro en sí.*

Michael A. Caldarone en su libro “High-strength concrete: A practical guide” da un ejemplo de casos como este:

“Durante una reunión de trabajo para discutir varias pruebas del concreto que se utilizaría en la construcción de una nueva biblioteca en una pequeña comunidad marginal, se habían producido concretos con resistencias de 40 MPa (6,000 psi) a los 28 días, y me referí erróneamente a la mezcla elaborada (el concreto de mayor resistencia jamás intentada por el proveedor) como “concreto de alta resistencia”. La segunda vez que se utilizó el término, el ingeniero del proyecto interrumpió para explicar a los asistentes que el ACI había cambiado recientemente la definición de concreto de alta resistencia de 41 a 55 MPa (6,000 a 8,000 psi), y, por lo tanto se discutió que la mezcla no fuese llamada “concreto de alta resistencia”. Reconociendo que el ingeniero del proyecto era del todo

---

<sup>12</sup> Albinger, 1988.

correcto, procedí a referirme a la mezcla como “concreto de mayor resistencia”. El término “mayor resistencia” se acordó sin protestas y se procedió.”

Este ejemplo se presenta únicamente para demostrar la facilidad con la que la terminología que en ese momento no era lo primordial, puede desviar la atención de *lo que en realidad es verdaderamente importante*.

La definición de concreto de alta resistencia no es de ninguna manera estática. Cuando el concreto de alta resistencia se ha definido en términos de un valor numérico preciso, su definición ha cambiado con los años.

En la versión de 1984 del Informe del Comité ACI 363, 41 MPa (6,000 psi) fue seleccionado como un límite inferior para el hormigón de alta resistencia. Según ese informe, aunque este valor fue seleccionado como el límite inferior, no era la intención de implicar cualquier cambio drástico en las propiedades del material o técnicas de producción que se producía a este nivel de resistencia a la compresión.

En realidad, todos los cambios graduales que se producen representan un proceso que se inicia con niveles de resistencia muy modestos y continúa así hasta donde gobierna el concreto de muy alta resistencia.

*En la revisión de la versión de 1992 del Informe del Estado de Arte del Concreto de Alta Resistencia, el Comité 363 define como concreto de alta resistencia al que tiene una resistencia a la compresión especificada para el diseño de 55 MPa (8,000 psi), o mayor. El Comité 363 también reconoció que la definición de concreto de alta resistencia varía sobre una base geográfica. El Comité reconoció que la selección de materiales, el proceso de diseño de la mezcla de concreto, la dosificación, mezcla, transporte, colocación, curado, y los procedimientos de control de calidad son aplicables a una amplia gama de resistencias del concreto. Sin embargo, el Comité 363 también acordó que las*

*propiedades de los materiales y las consideraciones de diseño estructural que se abordan en el informe deben estar enfocados en concretos que tengan la más alta resistencia a la compresión.*

A pesar de la firme creencia de muchos autores de que el concreto de alta resistencia no se define por un valor numérico fijo, teniendo en cuenta el título de esta investigación y mucha bibliografía actual es razonable definir al menos un rango de resistencia a la compresión y aceptación designada a edades que son considerados por la mayoría de las autoridades dentro del umbral de "alta resistencia".

***Por lo tanto, dicho esto, en la mayoría de los países industrializados, los productores y los usuarios consideran "concreto de alta resistencia" cuando la resistencia a la compresión especificada del material está en el intervalo de 422 a 562 kg/cm<sup>2</sup> (40 a 55 MPa ó 6,000 a 8,000 psi) a las edades de aceptación de 28 días o más. Algo acorde con las definiciones del Informe del Estado de Arte del Concreto de Alta Resistencia del Comité ACI 363 y en cumplimiento del rango mínimo que establece el ACI 211.4R-08 de 422 kg/cm<sup>2</sup> (40 MPa ó 6,000 psi) que también sirve como base para esta investigación.***

Por supuesto, si la tasa de la industria de los avances en la tecnología de materiales continúa, tal vez no sea mucho antes de que los valores de esta magnitud se vuelvan obsoletos.

### **2.2.2. DEFINICIÓN DE CONCRETO DE RESISTENCIA NORMAL O CONVENCIONAL.**

La mayoría de los autores que escriben sobre el concreto de alta resistencia suelen gastar una cantidad excesiva de tiempo dándole vueltas a la pregunta "¿cuál es el mejor término para describir lo que no es concreto de alta resistencia?" Esta parece ser una de esas preguntas que realmente no tiene ninguna respuesta "mejor", y como resultado se presenta constantemente con cada nueva investigación. Por lo general, la primera y más lógica elección que viene a la mente, el antónimo de "alta" es "el que descartó al más bajo", "el más rápido". Refiriéndose al concreto no son de alta resistencia los *concretos de baja resistencia*, aunque técnicamente correcto es gramaticalmente atroz. *Baja resistencia* es un término reservado con frecuencia en la industria para referirse a fracaso, una deficiencia.

Después de esto, en un tiempo relativamente corto vienen las otras opciones: *Resistencia inferior*, *la resistencia normal* y *la resistencia convencional*. Otro término considerado ha sido la *fuerza tradicional*, sin embargo, no hace falta decir que este fue descartado casi tan rápido como *baja resistencia*.

Tal vez la razón principal por la que los investigadores dedican mucho tiempo a deliberar este término en particular es con la esperanza de que los lectores de los informes no crean que el concreto de alta resistencia es algún tipo de material exótico u oscuro, que términos como "normal" podrían tender a transmitir.

La disponibilidad en el mercado del concreto de alta resistencia no es nueva, y no es algo ni exótico ni oscuro. La tecnología del concreto de alta resistencia ha sido constante en evolución desde hace décadas, y tiene un amplio historial de logros en lo que respecta tanto a sus propiedades mecánicas y la mejora de durabilidad.



**Figura 2.2.2:** Producción de Concreto en planta.

A pesar de esto el concreto de alta resistencia no puede acercarse al volumen de concreto de resistencia convencional producido, significativamente más estructuras se beneficiarían, tanto económica como técnicamente, si no se percibe como algo de naturaleza exótica y oscura.

*Después de un examen cuidadoso y prolongado, el término Concreto de Resistencia Convencional ha sido adoptado para describir el tipo de concreto más comúnmente especificado para aplicaciones civiles y estructurales que no alcanzan los rangos definidos en ACI 363 de “concretos de alta resistencia”.*

### **2.2.3. CONCRETO DE ALTO DESEMPEÑO (HIGH PERFORMANCE CONCRETE).**

Una vez que todos los requisitos de desempeño se han identificado y resuelto satisfactoriamente, el concreto de alta resistencia (HSC) puede clasificarse bajo el *concreto de alto desempeño* (HPC). Ya sea identificado como HSC o HPC, hay dos requisitos que ambos deben satisfacer. Ambos deben ser elaborables y duraderos. El hecho de que el concreto sea resistente, no es garantía de que también sea durable. Por esta razón, el concreto de alta resistencia no debería sumariamente ser considerado como concreto de alto desempeño.

*Muy a menudo, los términos de alta resistencia y alto desempeño se utilizan indistintamente, lo que puede hacer la diferenciación de HSC y HPC un poco confuso. ¿Cuáles son las diferencias? ¿Por qué son estos términos frecuentemente utilizados indistintamente? Tal vez la fuente de la confusión es que, en principio, la alta resistencia no es un requisito previo para un alto desempeño, sin embargo, en la práctica, es común que la resistencia aumente cuando se toman medidas para mejorar la mayoría de las propiedades relacionadas con la durabilidad.*

Cuando se toman medidas para inhibir la penetración de sustancias perjudiciales a través de permeabilidad reducida, aumenta la resistencia del concreto, sin embargo, la reducción de la permeabilidad por sí sola no asegura la durabilidad favorable. Es importante identificar y abordar todas las propiedades necesarias antes de seleccionar los materiales y proporciones de mezcla. *Es muy importante que las declaraciones anteriores sean comprendidas y puestas en práctica completamente.* Los concretos que tienen alta resistencia, sin embargo, no están diseñados para satisfacer todos los requisitos de durabilidad necesarios, pero son dignos de llevar el título de "concretos de alto desempeño".

Han existido numerosas definiciones desarrollados para HPC en todo el mundo. Cada una tiene validez, pero ligeramente diferente significado.<sup>13</sup> Normas europeas y del Reino Unido para el concreto definen HPC como concreto que cumple con el rendimiento especial y los requisitos de homogeneidad que no siempre pueden ser alcanzados de forma rutinaria mediante el uso de sólo materiales convencionales y normales de mezclado, colocación, y prácticas de curado. Los requisitos pueden implicar mejoras de características tales como la colocación y compactación sin segregación, propiedades mecánicas a largo plazo, resistencia a edad temprana, la durabilidad, estabilidad volumétrica, o la larga vida de servicio en ambientes severos.

El término *alto desempeño* se podría unir a cualquier tipo de concreto que exhibe propiedades en estado fresco o endurecido superiores a las del concreto convencional. Además del concreto de alta resistencia, otros ejemplos de concreto de alto desempeño podrían incluir:

- *Concreto fluido;*
- *Concreto auto compactable (SCC);*
- *Concreto ligero;*
- *Concreto pesado;*
- *Concreto permeable (concreto sin agregados finos);*
- *Concreto de baja permeabilidad y*
- *Concreto resistente a la contracción.*

---

<sup>13</sup> (Russell, 1999).

El American Concrete Institute ofrece la siguiente definición y comentario:

**DEFINICIÓN:**

El **Concreto de alto desempeño** es un producto de combinaciones especiales, de reunión de requisitos de rendimiento y uniformidad que no siempre pueden ser alcanzados de forma rutinaria usando componentes convencionales, mezclas, métodos de colocación y curado según las prácticas normales.

**COMENTARIO:**

Un **Concreto de alto desempeño** es un material en el que se desarrollan determinadas características para una aplicación y entorno particular.

Los ejemplos de características que pueden ser consideradas críticas para una aplicación son:

- *La facilidad de colocación.*
- *Compactación sin segregación.*
- *Resistencia a edad temprana.*
- *Propiedades mecánicas a largo plazo.*
- *Permeabilidad.*
- *Densidad.*
- *El calor de hidratación.*
- *Dureza.*
- *Estabilidad volumétrica.*
- *Larga duración en entornos severos.*

Debido a que muchas características del concreto de alto desempeño están relacionadas entre sí, un cambio en una por lo general resulta en cambios en una o más de las otras características. En consecuencia, si varias características

tienen que ser tomadas en cuenta en la producción de un concreto para la aplicación deseada, cada una de estas características deben ser claramente especificados en el pliego de condiciones que se deben cumplir.<sup>14</sup>

Paul Zia, Profesor Emérito y ex Presidente del Comité ACI 363, hace la siguiente distinción:

*“El concreto de alta resistencia y el concreto de alto desempeño no son términos intercambiables. El concreto de alto desempeño incorpora muchos más atributos que los de alta resistencia. Se reúne el rendimiento especial y los requisitos de homogeneidad que no siempre se pueden lograr de forma rutinaria mediante el uso de sólo materiales convencionales y la mezcla, la colocación, y el curado en prácticas normales. Los requisitos pueden implicar mejoras de colocación y compactación sin segregación, propiedades mecánicas a largo plazo, resistencia a edad temprana, la durabilidad, estabilidad volumétrica, o la larga vida de servicio en ambientes severos. Por lo tanto, es posible que un concreto de alto desempeño podría tener una resistencia relativamente baja al tiempo que satisface otros requisitos.”*

### ***Ejemplo de Aplicación de Concreto de Alto Desempeño:***

Un ejemplo de una aplicación de HPC donde la alta resistencia no era necesaria, ni influía en la selección y dosificación de materiales, era en un concreto de muy baja densidad estructural utilizado para la rehabilitación de un edificio histórico en Chicago.<sup>15</sup> Un concreto estructural de baja densidad era especificado para el nuevo techo de una de las pocas estructuras que sobrevivieron el gran incendio de Chicago en 1871. Construido en 1869, el concreto del techo original consistió en concreto altamente poroso, de baja densidad producido utilizando escoria de cemento y agregado natural. El concreto de reemplazo se especificó para alcanzar

---

<sup>14</sup> Russell, 1999.

<sup>15</sup> Caldarone y Burg. 2004.

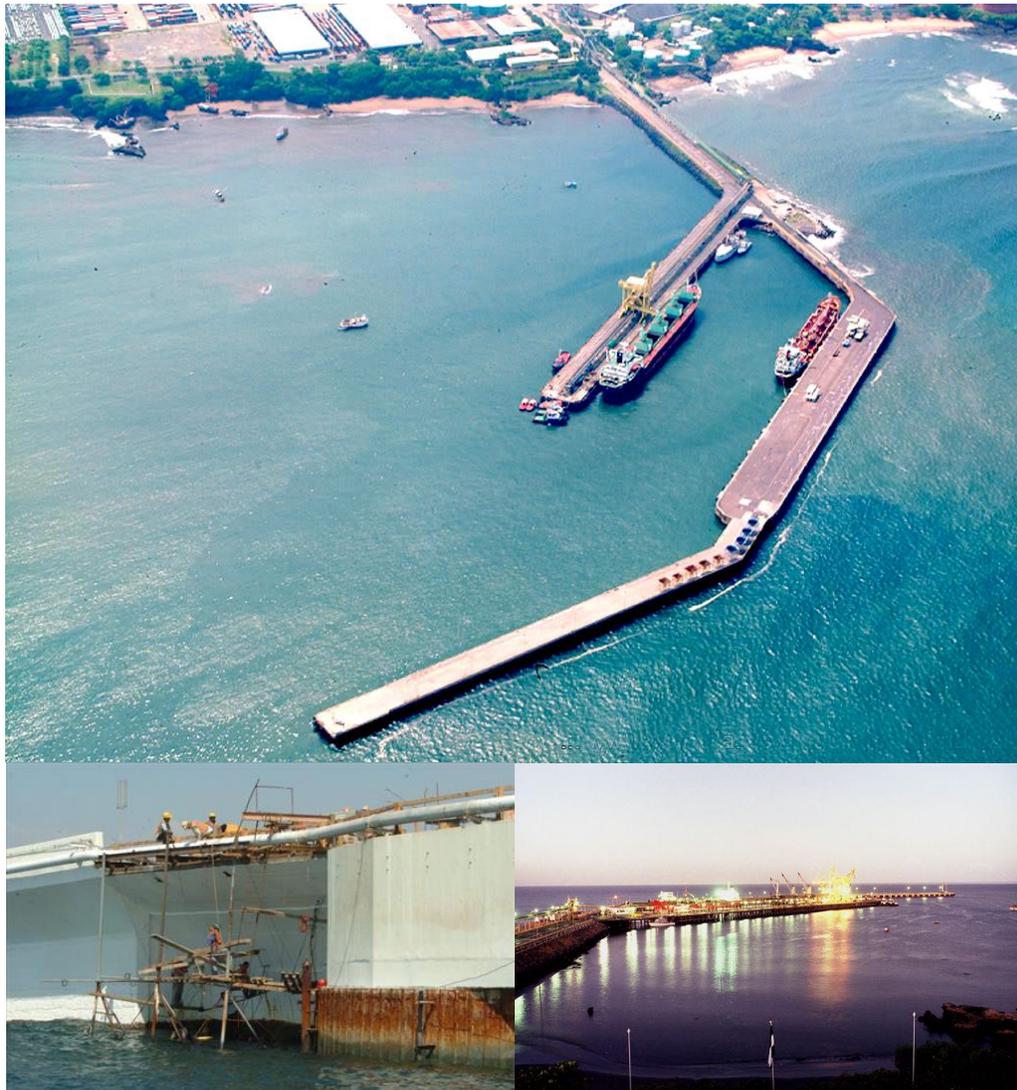
una densidad de equilibrio de  $1,120 \text{ kg/m}^3$  (70 pcf) y satisfacer un determinado requisito de resistencia a la compresión de 20.7 MPa (3,000 psi) a los 28 días.

Quizás la razón más importante por la cual las condiciones de *alta resistencia y alto desempeño* se suelen utilizar indistintamente es que la permeabilidad, generalmente es considerada la propiedad más importante influir en la durabilidad, y va mano a mano con la resistencia. Tanto el coeficiente de permeabilidad y la resistencia a la compresión se relacionan proporcionalmente a la relación Agua / Material Cementante. La disminución de la permeabilidad consecuentemente resulta en incrementos en la resistencia.

**NOTA IMPORTANTE:** *Tener en cuenta que en esta investigación el nombre “relación Agua/Cemento” es utilizada al igual que la “relación Agua/Materiales Cementantes”. Será común utilizar diversos calificativos para referirse a una proporción que identifica la relación entre el agua y el conglomerante implementado (mismos términos en el idioma Inglés W/B = Water/Binder Ratio ó Relación Agua/Conglomerante), si se requiere una mayor ampliación se sugiere visitar antes de continuar la lectura el apartado 2.8.2.1. RELACIÓN AGUA/CEMENTO, RELACIÓN AGUA/MATERIALES CEMENTANTES O RELACIÓN AGUA/CONGLOMERANTE.*

En la industria del concreto se ha utilizado tradicionalmente la resistencia como un sustituto para una mayor durabilidad pero no debe ser considerado conceptualmente como una total aseveración si la aplicación donde se llevará a cabo no es la correcta y no se han considerado todos los medios que pueden afectar al concreto. En comparación con la durabilidad, la resistencia es una propiedad mucho más fácil de medir. Es cierto que en algunos casos la durabilidad se correlaciona bien con la resistencia, en particular en los casos en que la propiedad durabilidad bajo consideración es proporcional al coeficiente de permeabilidad. En tales casos, las medidas necesarias para mejorar la durabilidad también dan como resultado una mayor resistencia. Sin embargo, en otros casos, sucede lo contrario; las medidas adoptadas para producir alta resistencia pueden ser perjudiciales para la durabilidad. Por ejemplo, la durabilidad del concreto sometido a ciclos de congelación y descongelación mientras está saturado o en presencia de agentes de deshielo es mucho más dependiente de la calidad de un sistema incluso de aire que de la resistencia. En este ejemplo, las medidas

adoptadas para mejorar la calidad del sistema incluso de aire puede causar disminución en la resistencia.<sup>16</sup> En lugar de continuar asociando la resistencia como una propiedad mecánica pura, con la durabilidad, sería mucho más significativo y beneficioso para la industria reconocer que la permeabilidad, no la resistencia, es la verdadera propiedad, vinculando directamente las propiedades mecánicas y la durabilidad del concreto. Por lo que el concreto de alta resistencia no es necesariamente durable.



**Figura 2.2.3.** Reparación del Puerto de Acajutla, El Salvador; con Concreto de Alta Resistencia y resistencia al ataque de sulfatos. Mejorado con Microsilice como adición.

---

<sup>16</sup> Detwiler y Taylor, 2005.

### **2.3. ANTECEDENTES HISTÓRICOS.**

Como es inherente la necesidad de innovación y crecimiento en la construcción ha desarrollado continuamente nuevas maneras eficientes de resolver las demandas de los proyectos; las constantes exigencias de las sociedades modernas buscan la optimización de recursos y procesos en la mayor parte de los casos; mas aun en áreas tan importantes como la industria del concreto, compuesto por algunos de sus materiales de carácter no renovables.

Esta optimización ha permitido potenciar el estudio de la correcta interrelación entre los materiales constituyentes del concreto y conocer su comportamiento mecánico y desempeño. Pero esta lucha no ha sido fácil, como es común en la investigación, han existido barreras tecnológicas y el “temor a lo desconocido” o la permanencia dentro del círculo del confort de los constructores que en muchas de las veces han retardado el desarrollo de la aplicación de materiales como el concreto de alta resistencia.

Debe haber sido debido a un exceso del "espíritu pionero" para un pequeño grupo de diseñadores y productores de concreto el tener la voluntad para poner en marcha la elaboración de concreto de alta resistencia en la década de 1960. ¿Por qué innovar en tecnología del concreto, aumentando la resistencia a compresión? En ese momento, la mayoría de los diseñadores se encontraban satisfechos con las estructuras diseñadas con resistencias que iban de 15 a 20 MPa; concretos que tenían un adecuado comportamiento, eran económicos y seguros. Del mismo modo, los productores de concreto estaban haciendo suficiente dinero con la venta de su concreto en las estructuras de tipo horizontal. No era obvio para la mayoría de los ingenieros que el concreto podría un día desplazar al acero en la construcción de edificios de gran altura.<sup>17</sup>

---

<sup>17</sup> "A historical perspective", High-Performance Concrete, P.-C.Aitcin.

La apreciación común en ese momento era que el concreto sólo era bueno para su uso en fundaciones de edificios de gran altura, en las plantas bajas de los edificios o para proteger los elementos estructurales de acero contra incendios. Sin embargo, como en todos los campos del quehacer humano, siempre hay algunas personas que no tienen miedo de los tabúes tradicionales y están dispuestos a innovar. Esto es lo que ocurrió en la década de 1960 en el área de Chicago, Illinois, Estados Unidos donde el concreto de alta resistencia comenzó a ser utilizado en cantidades significativas en las principales estructuras.<sup>18</sup>

Este desarrollo fue posible en Chicago, ya que, en ese momento, un diseñador valiente y un productor de concreto innovador acababan de comenzar a trabajar juntos.<sup>19</sup> A pesar de que la resistencia de los primeros concretos de alta resistencia que se utilizaron parece bastante modesta para los estándares actuales, se debe recordar que en ese momento, el concreto habitual utilizado por la industria de la construcción tenía una resistencia a la compresión de sólo 15 a 30 MPa. La propuesta de duplicar esta resistencia a la compresión fue un verdadero reto. También debe recordarse que los cementos y aditivos que estaban disponibles en ese momento no eran adecuados para la fabricación de concreto de alta resistencia como algunos de los que están disponibles hoy en día.<sup>20</sup>

Los cementos más comerciales que se fabricaban eran mucho más gruesos que en la actualidad, y los reductores de agua comerciales utilizados en ese momento eran en su mayoría basados en lignosulfonato. Estos lignosulfonatos variaron considerablemente en su composición y "pureza", lo que también dio lugar a una gran variabilidad en las características de rendimiento. Por otra parte, los reductores de agua a base de lignosulfonato tenían una fuerte tendencia a atrapar o arrastrar aire, así como para retardar el fraguado del concreto cuando se usaban en dosis altas.

---

<sup>18</sup> Freedman, 1971.

<sup>19</sup> Moreno, 1987.

<sup>20</sup> Perenchio, 1973.

Por otra parte, también debe tenerse en cuenta que en la década de 1960, la industria del concreto premezclado en Norte América sólo acababa de empezar a utilizar cenizas volantes en cantidades significativas. Los productores de ceniza volante sólo habían empezado a garantizar la calidad y consistencia de sus productos, y los productores de concreto todavía no se habían dado cuenta de todo el potencial económico de la buena calidad de las cenizas volantes.

Es en este contexto que el primer concreto de alta resistencia se desarrolla. Con el fin de dar al concreto de alta resistencia la oportunidad de demostrar su valor, los diseñadores y productores de concreto tenían que encontrar una manera de convencer a los propietarios para dejarles usar un nuevo material del cual no tenían experiencia previa y muy pocos datos. El enfoque que decidieron seguir era inteligente.<sup>21</sup> Siempre que se estaba planeando un edificio de gran altura, el productor de concreto pidió el permiso del propietario para incluir (sin costo extra, por supuesto) una o dos columnas hechas de concretos experimentales que tienen resistencias a la compresión de 10 a 15 MPa por encima de los que el diseñador tenía ya seleccionado para las columnas principales. ¿Cuál era el riesgo de aceptar una o dos columnas fuertes entre tantas otras? Una vez que se había demostrado que era posible hacer, entregar y colocar un concreto que tiene una resistencia a la compresión de 10 a 15 MPa sobre lo que se entregan generalmente sin ninguna queja del contratista y su equipo de colocación y sin ningún tipo de catástrofe estructural, fue fácil dar este paso adelante, ya que el aumento de la resistencia a la compresión del concreto se tradujo en un ahorro de costos, en términos de un mayor espacio en los pisos de oficinas y estacionamientos disponibles en alquiler, debido a la reducción del tamaño de las columnas, sobre todo en las plantas inferiores que suelen ser los lugares más rentables.

Mediante el uso de tal estratagema, la resistencia máxima a la compresión del concreto utilizado en edificios de gran altura en el área de Chicago se multiplicó

---

<sup>21</sup> Albinger y Moreno, 1991.

por tres, paso a paso, lenta y progresivamente, durante un período de alrededor de 10 años, el aumento de resistencia a la compresión de entre 15 a 20 MPa pasó a de entre 45 a 60 MPa.

Sin embargo, las resistencias a la compresión del concreto dejaron de aumentar a aproximadamente al alcanzar los 60 MPa porque se enfrentó una barrera tecnológica que no podía ser superada con las materias primas disponibles.



**Figura 2.3.1. Lake Point Tower con un  $f'_c = 53$  MPa. Es un ejemplo de edificios altos construido en 1965 en el área de Chicago, Illinois, Estados Unidos.**

En la década de 1970 fue imposible hacer concreto con una resistencia a la compresión superior a 60 MPa debido a que los reductores de agua normalmente disponibles en ese momento no eran capaces de reducir la relación agua/materiales cementantes (A/MC)<sup>22</sup>.

<sup>22</sup> Blick, Petersen y Winter, 1974.



**Figura 2.3.2. River Plaza elaborado con un  $f'_c = 77$  MPa. Es un ejemplo de edificios altos construido en 1976 en el área de Chicago, Illinois, Estados Unidos.**

Con el fin de disminuir la relación  $A/MC$ , la dosis de reductor de agua se incrementó, a pesar de que era sólo ligeramente más alta que la normalmente recomendada para concreto que tenía una resistencia a la compresión de 20 a 30 MPa. La dosis no se podría aumentar mucho más, ya que causaba retraso en la mezcla y una cantidad excesiva de burbujas de aire atrapadas, lo que se traducía en fuertes bajas en la resistencia.

No era ventajoso retardar demasiado el fraguado del concreto, de hecho, una tasa razonable de ganancia de resistencia a la compresión a edades tempranas es requerida la mayor parte de veces por el contratista, para que la construcción en las edificaciones pueda progresar rápidamente. Si se utilizan concretos de alto desempeño a largo plazo en bajas resistencias a la compresión a corto plazo, es

probable que sean rechazados por el contratista, debido a su preferencia comprensible para un concreto que puede ser más débil a los 28 días, pero que puede permitir el retiro del encofrado antes.

De la misma manera, el arrastre de demasiado aire debe evitarse ya que la presencia de burbujas de aire en el concreto reduce su resistencia a la compresión final. La inclusión de aire no era necesaria en estas primeras aplicaciones de concreto de alta resistencia, debido a que la resistencia a la congelación y descongelación de estos concretos no tenía ninguna preocupación. Tales concretos sólo se utilizaban para aplicaciones en interiores, en el que el riesgo de congelación en un estado saturado fue insignificante.

Por último, la toma de muestras de concreto de alto rendimiento se llevó a cabo con especial cuidado (por ejemplo con el uso de moldes de acero), con el fin de evitar la pérdida de incluso un solo MPa de potencial de resistencia a la compresión como resultado de la técnica de muestreo.<sup>23</sup>

Este era el estado de desarrollo de la tecnología del concreto de alto rendimiento a principios de 1970, cuando superplastificantes se introdujeron por primera vez al mercado de concreto.<sup>24</sup>

### ***2.3.1. DE REDUCTORES DE AGUA A SUPERPLASTIFICANTES.***

Fue a finales de la década de 1960 que los superplastificantes se utilizaron por primera vez en el concreto, su introducción se producen casi simultáneamente en Japón y Alemania.<sup>25</sup> Es sorprendente que la industria del concreto comenzó a utilizar superplastificantes tan tarde, ya que se obtuvo la primera patente de los EE.UU. que cubre la fabricación y utilización de los reductores de agua basado en

---

<sup>23</sup> Freedman, 1971; Blick, Petersen y Winter, 1974.

<sup>24</sup> Comité de Chicago en Edificios de Gran Altura, 1977; Ronneberg y Sandvik, 1990.

<sup>25</sup> Hattori, 1981; Meyer, 1981.

policondensados de naftaleno sulfonato en 1938.<sup>26</sup> Sin embargo, en ese momento los lignosulfonatos eran tan baratos, y su nivel de rendimiento fue considerado tan satisfactorio para el concreto entre 15 y 25 MPa, que no era necesario buscar reductores de agua con una mayor eficiencia y un costo mucho mayor.

Cabe mencionar que las primeras aplicaciones de superplastificantes eran como fluidificantes, en lugar de como reductores de agua. Fueron utilizados en el sitio de construcción para fluidificar concretos que muy a menudo ya contenían un reductor de agua basado en lignosulfonato introducido durante la mezcla inicial en la planta de concreto premezclado. La razón original para el uso de superplastificantes de esta manera era para facilitar la colocación del concreto sin el riesgo de segregación y la pérdida de resistencia que se produce cuando el concreto se retempla (remezcla) con agua.

Desde un punto de vista práctico, también hay que mencionar que puede ser peligroso el transporte de un concreto muy fluido en un camión, no sólo debido a la posibilidad de segregación, sino también por consideraciones de seguridad. Puede ser difícil de controlar cuando se conduce un camión con una masa líquida de varias toneladas en el mezclador, y hay un alto riesgo de que el concreto se derrame fuera durante el frenado. A fin de reducir estos peligros, los camiones tienen que llevar a un volumen reducido si el concreto es muy fluido.

Durante la década de 1980, mediante el aumento de dosis en el intervalo recomendado por los fabricantes los superplastificantes comenzaron a utilizarse como reductores de agua de alto rango. Al respecto, se identificó que eran mucho más potentes que los lignosulfonatos y podían utilizarse en dosis mucho más altas antes de que pudiera ocurrir cualquier retraso significativo y antes de que demasiado aire fuera arrastrado a la mezcla de concreto.<sup>27</sup>

---

<sup>26</sup> Tucker, 1932.

<sup>27</sup> Ronneberg y Sandvik, 1990.

Mediante el uso de grandes dosis de superplastificante se hizo posible reducir la relación A/MC hasta 0.30 y aún así obtener un revenimiento de 200 mm. Esto fue un gran avance en comparación con lo que era posible con los reductores de agua a base de lignosulfonato. Sin embargo, los problemas de pérdida de asentamiento fueron exacerbados por el uso de tales proporciones bajas de A/MC.

Es interesante observar que cuando los superplastificantes comenzaron a ser utilizados como reductores de agua de alto rango, la relación A/MC nunca se redujo por debajo de la “barrera psicológica” de alrededor de 0.30. Este valor se pensaba que era la relación mínima A/MC para una adecuada hidratación del cemento Portland utilizado en la mezcla.

La reducción de la relación A/MC por debajo de este valor era tabú hasta que *H. H. Bache* informó que mediante la reducción de la relación A/MC hasta 0.16 de un micro concreto particular, utilizando una dosis muy elevada de superplastificante y un nuevo sustituto, un cemento ultrafino (humo de sílice), había sido capaz de alcanzar una *resistencia a la compresión de 280 MPa*.<sup>28</sup>

Por supuesto, se obtuvieron resultados de Bache en un laboratorio y procedimientos especiales de curado requeridos, pero sin embargo estos resultados sorprendieron la comunidad del concreto, que todavía tenía problemas en la consecución regularmente de concretos de 25 a 30 MPa de resistencia en el campo.

El Micro concreto de Bache tenía esencialmente ningún potencial para su uso por la industria de concreto, ya que implicaba el uso de bauxita calcinada como agregado (la bauxita calcinada podía llegar a costar más de US \$ 1000 por tonelada valorada en Canadá en 1998), también requiere vibración externa muy pesada para la compactación y técnica de curado muy especial. Sin embargo, el desarrollo exitoso de un material tal demostró que la relación A/MC de barrera

---

<sup>28</sup> Bache, 1981.

psicológica podía ser superada. De hecho, el trabajo de Bache mostró que la resistencia final a la compresión del concreto depende no sólo de la calidad, cantidad y la eficiencia de los materiales de cemento utilizados, sino también en el grado de compactación y la última porosidad de la matriz sólida formada después de que el proceso de endurecimiento se completa.

Después de esto, los investigadores y los productores de concreto empezaron a bajar las relaciones A/MC por debajo de 0.30 en el intervalo en el que no había suficiente agua introducida durante la mezcla para hidratar totalmente el cemento.<sup>29</sup> Esto significaba que el cemento en estos concretos nunca podría hidratar completamente.

Sólo los granos de cemento más finos se hidrataron completamente, el interior de los granos gruesos y los granos más ricos en  $C_2S$ , jugaron principalmente el papel de un agente de relleno.<sup>30</sup>

A través de la selección cuidadosa del cemento y los superplastificantes, era posible disminuir la relación A/MC a 0.30, luego a 0.27, luego a 0.25 y, por último, a 0.23 para obtener una resistencia a la compresión de 130 MPa.<sup>31</sup>

Mediante el uso de una combinación cuidadosamente elegida de cemento Portland y superplastificante, ha sido posible en la Universidad de Sherbrooke hacer un concreto con una relación A/MC de 0.17 con un asentamiento de 230 mm 1 hora después de su mezcla. Tal concreto dio una resistencia a la compresión de 73.1 MPa a 24 horas, pero no aumentó su resistencia a más de 125 MPa después del curado en húmedo a largo plazo.<sup>32</sup> Esta relativamente baja resistencia a la rotura (teniendo en cuenta la baja proporción A/MC) puede ser

---

<sup>29</sup> Aitcin, Laplante y Bédard, 1985; Moreno, 1987, 1990.

<sup>30</sup> Aitcin, Regourd y Bédard, 1983.

<sup>31</sup> Godfrey, 1987.

<sup>32</sup> Aitcin, 1991.

atribuida a un contenido de agua inadecuado en términos de hidratación, pero el motivo real es probablemente más complejo que esto.

### ***2.3.2. LA LLEGADA DEL HUMO DE SILICE (SILICA FUME, MICROSÍLICE).***

Se mencionó anteriormente que Bache había utilizado humos de sílice con el fin de ser capaz de elaborar concretos con relaciones A/MC muy bajas. La industria del concreto premezclado pronto tomó ventaja de la llegada de este nuevo material cementante, una vez que comenzó a ser suministrado de una forma utilizable y a un precio aceptable.

Aunque se informó de la primera utilización concreta de este subproducto de la fabricación de silicio o ferrosilicio en 1952 por el investigador noruego Bernhardt, no fue sino hasta la década de 1970 que el humo de sílice se empezó a utilizar como material cementicio suplementario en concreto en los países escandinavos. No fue sino hasta la década de 1980 que comenzó a ser utilizado de esta manera, en Norte América.<sup>33</sup>

Durante mucho tiempo, los productores de silicio y ferrosilicio habían permitido que el subproducto denominado humo de sílice escapara a la atmósfera. Ellos sólo empezaron a captarlo después de ser sometidos a fuertes regulaciones ambientales por parte de sus gobiernos. Luego tuvieron que encontrar maneras de minimizar o eliminar la emisión de estas partículas de polvo muy finas. Así, en una serie de países industriales, los productores de silicio y ferrosilicio se vieron obligados a invertir una gran cantidad de dinero en sistemas de recolección de polvo de los gases de combustión sofisticados con el fin de recuperar este subproducto para el cual aparentemente no había mercado.

---

<sup>33</sup> Aitcin, 1983; Malhotra, 1987.

Por otra parte, el problema de la manipulación de un polvo tan fino era tan difícil que incluso el productor de silicio más optimista no podía en ese momento haber concebido la idea de que un día se pudiera obtener ganancias de un polvo tan molesto.

Los primeros resultados interesantes obtenidos por los escandinavos en el concreto de costumbre, los impresionantes descubrimientos de Bache y compañeros de trabajo en Dinamarca y un esfuerzo de investigación considerable en la década de 1980 en varios países, dieron como resultado la rápida aceptación del humo de sílice como material complementario del cemento para el concreto en casi todo el mundo *en menos de 5 años*. La ventaja particular de la utilización de humo de sílice como una puzolana muy fina y reactiva para su uso en concreto de alto desempeño fue rápidamente reconocida.<sup>34</sup>

De hecho, este reconocimiento se produjo hasta el punto de que muchas personas creen ahora que el uso de humo de sílice es la *condición sine qua non (sin la cual no) se puede obtener concreto* de alta resistencia. Esto sólo es cierto en parte, pero en realidad el humo de sílice es realmente un material cementicio suplementario muy ventajoso desde el cual se desarrolla una serie de acciones beneficiosas en varios periodos diferentes en la vida del concreto. Mediante el uso del humo de sílice, se ha demostrado que es posible hacer concretos viables con resistencias a la compresión en el intervalo de 100 a 150 MPa.<sup>35</sup>

---

<sup>34</sup> Aitcin, 1986.

<sup>35</sup> Detwiler, 1991.

### **2.3.3. SITUACIÓN ACTUAL.**

En los últimos 40 años, la resistencia a la compresión del concreto producido comercialmente se ha triplicado aproximadamente, de 35 MPa (5,000 psi) a 95 MPa (14,000 psi).<sup>36</sup> Esta escalada sin precedentes de la resistencia fue en gran parte posible gracias a los siguientes factores:

- *Los avances en la tecnología de aditivos químicos;*
- *Mayor disponibilidad de adiciones minerales (materiales cementantes suplementarios), y*
- *Un mayor conocimiento de los principios que rigen los concretos de mayor resistencia.*

La aceptación del concreto de alta resistencia y su uso está creciendo lentamente en muchos países, y de hecho, su aplicación todavía representa un porcentaje muy bajo del mercado total del concreto. Sin embargo, varios países pusieron en marcha importantes programas de investigación específicos sobre concreto de alto desempeño a finales de 1980.<sup>37</sup> Con la información disponible de seminarios, conferencias, cursos cortos y artículos publicados en diversas revistas, ya no es un verdadero reto hacer y utilizar concreto de alto desempeño. “Lo que es difícil es cambiar las actitudes”.<sup>38</sup>

Hoy en día, el concreto de alta resistencia es cada vez más un componente clave en los proyectos de construcción a gran escala, desde edificios comerciales y residenciales y para puentes y túneles. En muchas de las áreas metropolitanas más importantes de todo el mundo, ya están disponibles rutinariamente concretos con resistencias de 95 MPa (14,000 psi) a los 56 días. Aunque el potencial ciertamente existe para lograr niveles similares de resistencias a 28 días o menos.

---

<sup>36</sup> High-strength concrete: A practical guide, Michael A. Caldarone, 2009.

<sup>37</sup> Entre las que destacan los EE.UU. (Hoff, 1993), Noruega (Holanda, 1993), Canadá (Aitcin y Baalbaki, 1996), Francia (Malier, 1992; de Larrard, 1993) Suiza (Alou, Charif y Jaccoud, 1988), Australia (Burnett, 1989; Potter y Guirguis, 1993), Alemania (Konig, 1993), Japón (Aoyama *et al*, 1990), Corea (. Sung-Woo Shin, 1990), China (Zhu Jinquan Qingchang y Hu, 1993) y Taiwán (Chern, Hwang y Tsai, 1995).

<sup>38</sup> Aitcin.

Con el paso de los años se espera concientizar a los involucrados que la aplicación de materiales como éste contribuye en la optimización de los recursos y causa una disminución importante en el impacto ambiental causado por la industria del concreto. Y en fin, investigaciones como estas harán del concreto de alta resistencia un material menos misterioso, podrán demostrar a los productores que es fácil de hacer, seguro de usar y puede dar lugar a estructuras más duraderas y atractivas.



**Figura 2.3.3.** *Burj Khalifa, Dubai, Emiratos Árabes Unidos. El edificio más alto del mundo con una altura de 828 m y finalizado en 2009. Construido con concreto de Alta Resistencia y con muy baja permeabilidad en su fundación. Y con un sistema de protección catódico utilizado para minimizar los efectos perjudiciales de los productos químicos corrosivos en el agua subterránea local.*

El concreto de alta resistencia no es un "super material", sin ningún tipo de debilidades y desventajas. Pero a medida que se aprende más a través de su creciente uso, investigación, descubrimientos, experiencias exitosas, y por supuesto, las fallas, será más eficaz el utilizarlo en beneficio de todos.

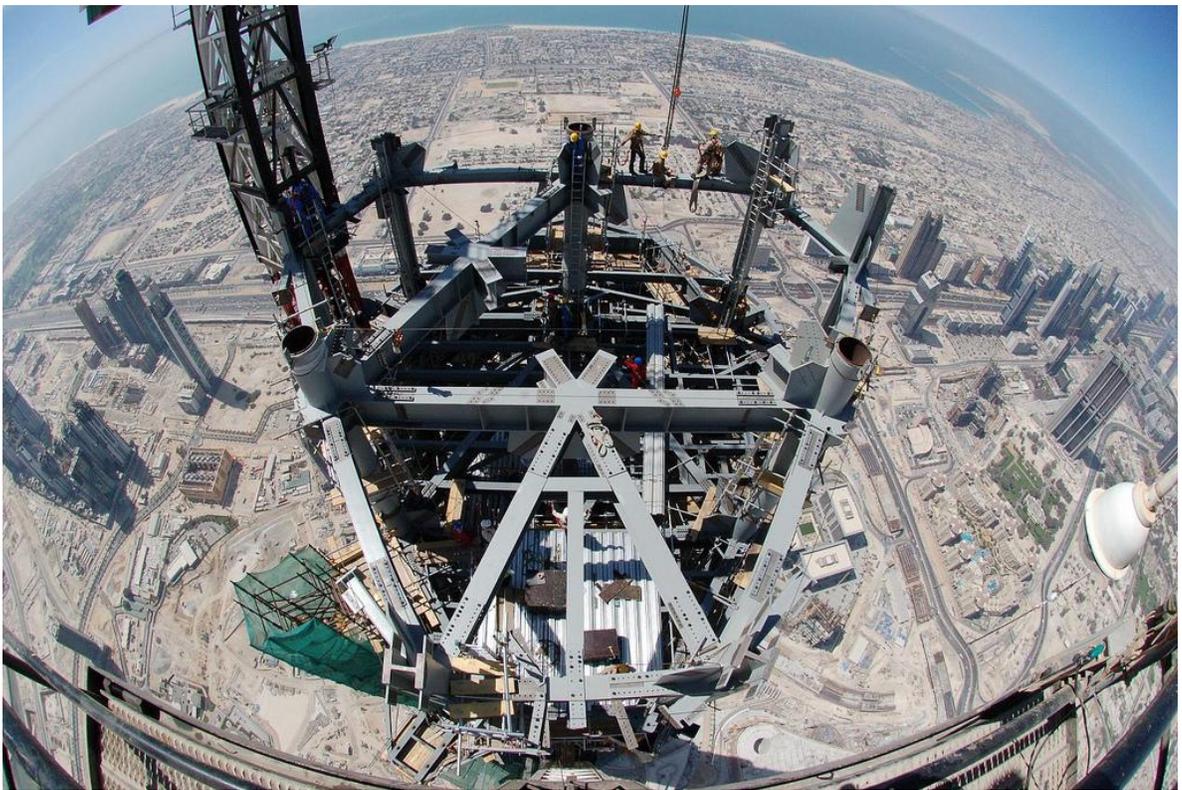
El concreto de alta resistencia es un material de mejor rendimiento, permitiendo a los diseñadores que lo utilizan de manera eficiente realizar estructuras cada vez más delgadas (de secciones transversales menores comparadas con las secciones típicas elaboradas con concretos convencionales).



**Figura 2.3.4.** *Burj Khalifa, Dubai, Emiratos Árabes Unidos. El edificio más alto del mundo con una altura de 828 m y finalizado en 2009.*

Los Arquitectos actualmente prefieren utilizar concreto de alta resistencia en la construcción de gran altura con el fin de diseñar losas delgadas y columnas aun más delgadas, además de que sea estéticamente más atractivo. Columnas de concreto de diámetro pequeño en la construcción de gran altura se traduce en más espacio de alquiler, y por lo tanto, en mayores ingresos para el propietario.

Algunos contratistas prefieren el uso de concreto de alta resistencia, ya que pueden quitar el encofrado antes. Además de reducir la fluencia y retracción, aumenta la rigidez de la estructura con el uso de concreto de alta resistencia en la construcción de gran altura. Como resultado, se reducen las desviaciones de los elementos de concreto. Siempre que se utiliza concreto de alta resistencia para las columnas en edificios de gran altura, la rigidez lateral del edificio se incrementa, lo que reduce la deriva lateral causada por la carga del viento y aumenta el nivel de confort de los ocupantes. Además de producir estructuras más delgadas, el uso de concreto de alta resistencia en la construcción de gran altura también puede disminuir la cantidad de acero, y por lo tanto la carga muerta. Claros beneficios que hoy en día potencian la aplicación de este material.



**Figura 2.3.5.** Vista aérea del Burj Khalifa, Dubai, Emiratos Árabes Unidos. El edificio más alto del mundo en su etapa de construcción.

#### **2.4. TOMA DE DECISIONES PARA LA APLICACIÓN DEL CONCRETO DE ALTA RESISTENCIA.**

Después de que se han tenido en cuenta las restricciones de diseño y construcción, la selección final de un material estructural particular, por lo general gira en torno a los factores económicos. En algunos casos raros, una sola característica tecnológica puede regir la decisión; pero más a menudo, hay varias ventajas técnicas específicas que están involucradas en las decisiones. Mientras que uno puede probablemente sopesar los pros y los contras en última instancia decide a veces según el tipo de estructura, función, ubicación, consideraciones económicas locales, y así sucesivamente, la decisión no siempre se basa en los mismos criterios.

En esta parte de la investigación se exponen algunos de los proyectos más importantes a nivel mundial y nacional en donde se ha utilizado Concretos de Alta Resistencia. Estos proyectos se utilizan para ilustrar los diferentes factores que han influido en la utilización de concretos de alto desempeño por razones económicas, incluyendo desde esta perspectiva a los concretos de alta resistencia. Es evidente que una selección de proyectos subjetiva no puede brindar adecuadamente las herramientas necesarias para influir en la decisión de seleccionar este material como material principal para los elementos estructurales que lo demanden; pero, estos casos seleccionados dan una idea de por qué los propietarios, diseñadores, contratistas y productores de concreto han encontrado sus propias razones particulares para utilizar concretos de alta resistencia en sus proyectos.

Con el fin de usar un material estructural dada su mejor ventaja económica, es importante entender sus propiedades completamente. Según el profesor Jorg Schlaich (1987): *"No se puede diseñar y trabajar con un material que no se sabe y entiende completamente. Por lo tanto, la calidad del diseño comienza con la educación"*.

Esta investigación contribuirá en aportar a los productores de concreto, contratistas, diseñadores y propietarios nuevos conocimientos de las propiedades del concreto de alta resistencia con cementos de tipo nunca antes aplicado en nuestro país. La familiarización y el manejo de estas propiedades pueden permitir aprovechar las ventajas del uso de este nuevo material, así como educar a los productores locales de sus limitaciones.

A pesar de que las diversas características del concreto de alta resistencia pueden ofrecer varias ventajas sobre el concreto convencional, todavía hay espacio para nuevos estudios y mejoras; incluyendo investigaciones como la presente. El concreto de alta resistencia, al igual que todos los demás materiales, tiene defectos. Por lo tanto, seguirá existiendo una enorme cantidad de usos para el concreto convencional con resistencias a la compresión de 20 a 30 MPa, para una variedad de aplicaciones. El desarrollo del concreto de alta resistencia y de los concretos de alto desempeño no hará en ningún momento cercano que el uso del concreto convencional sea obsoleto.

#### **2.4.1. CONSIDERACIONES PARA LOS PROPIETARIOS.**

El objetivo final del propietario es conseguir la mayor rentabilidad posible de la inversión durante la vida útil de la construcción. En la mayoría de los casos, los materiales estructurales son de poco interés para el propietario, siempre y cuando cumplan los requisitos funcionales a un precio aceptable. No obstante, los requisitos de los propietarios pueden influir fuertemente en la elección final del material estructural.

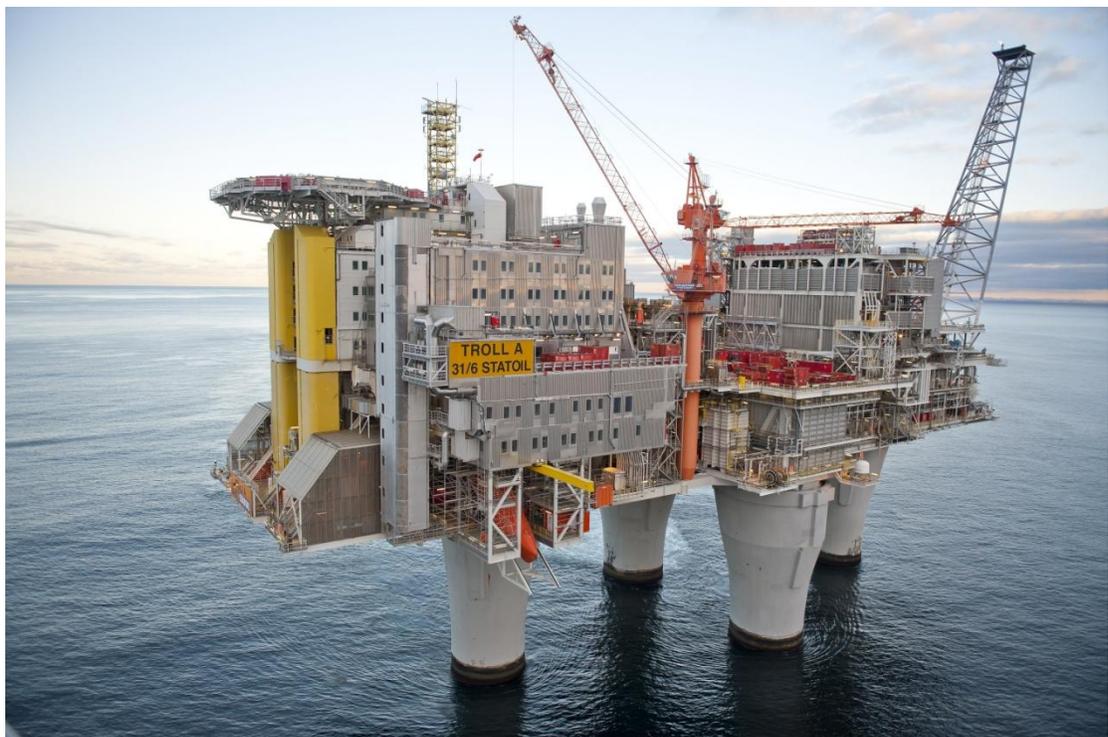
Como un ejemplo: El aumento de la resistencia a la compresión del concreto de 60MPa a 75 MPa en la plataforma marítima TROLL A<sup>39</sup>, que está diseñada para

---

<sup>39</sup> Troll A es la mayor plataforma noruega de producción de gas. Es la estructura móvil más alta que se ha construido: mide 472 metros de alto, aunque la mayor parte está sumergida bajo el mar. La base está más de 300 metros por debajo del nivel del mar y 36 metros enterrada bajo el lecho marino. Para mayor información visite: [http://en.wikipedia.org/wiki/Troll\\_A\\_platform](http://en.wikipedia.org/wiki/Troll_A_platform)

una profundidad de agua de 300 m, se traducirá en una reducción de unos 50,000 m<sup>3</sup> de concreto y un ahorro de EE.UU. \$ 77 millones (valorado en los Estados Unidos en los años 1990).

Al estipular que todos los inquilinos deben disfrutar del mismo confort, independientemente de la velocidad del viento, los propietarios de Two Union Square de Seattle, en el Estado de Washington, en el noroeste de los Estados Unidos de América inclinaron indirectamente la balanza hacia un material rígido como el concreto de alta resistencia, en lugar de acero. Los rascacielos con estructura de acero se balancean demasiado con los fuertes vientos y las soluciones técnicas propuestas para contrarrestar esta influencia tienden a ser costosos y sólo parcialmente eficaces. Dada la competencia constante en la industria de la construcción entre el acero, el concreto convencional y el concreto de alto desempeño; los concretos de alto desempeño dentro de los que se encuentra el concreto de alta resistencia han ofrecido a su titular el mejor retorno de la inversión al ser comparados económica y funcionalmente.



**Figura 2.4.1.** Plataforma TROLL A, una de las maravillas de la ingeniería.

## **2.4.2. CONSIDERACIONES PARA EL DISEÑADOR.**

A primera vista, el diseñador parece tener la última palabra en la selección de los materiales de construcción. Cuando se piensa en ello, sin embargo, esta decisión debe adaptarse a una variedad de insumos. Por ejemplo, el diseñador tiene que satisfacer los requisitos funcionales de los propietarios y los requisitos estéticos del arquitecto, teniendo en cuenta las restricciones tecnológicas impuestas por los códigos de construcción. A veces puede haber otras opciones en absoluto como la disponibilidad y accesibilidad de los materiales o como las aplicaciones en zonas propensas a los terremotos donde pueden favorecer las opciones de un material dúctil como acero en lugar de concreto.

Estos son casos especiales pero la determinación definitiva del diseñador se basa por lo general en la percepción técnica y económica del mercado de la construcción en la que la estructura se va a llevar a cabo.<sup>40</sup> En cierto sentido, también la preferencia personal de un material estructural en particular puede hacer una diferencia, ya que el diseño puede ser más eficiente si el diseñador utiliza un material que a él o ella le gusta y conoce muy bien.

En casos como los que se muestran más adelante, el concreto de alto desempeño no siempre se selecciona por razones de resistencia a la compresión. Excepcionalmente se toma consideraciones de su módulo de elasticidad, alta durabilidad, baja permeabilidad, o una combinación de estos y otros factores; incluso la alta resistencia a la abrasión.<sup>41</sup>

En 1960, se optó por concreto de alta resistencia en Water Tower Place de Chicago, Illinois, Estados Unidos. Esto dio lugar a una disminución de la sección transversal de las columnas de los pisos inferiores. Esto a su vez disminuyó significativamente la carga muerta del edificio y aumentó el espacio de alquiler. A

---

<sup>40</sup> Smith y Rad, 1989.

<sup>41</sup> En Noruega, se hace uso común de los Concretos de Alto Desempeño en pavimentos porque los neumáticos de los vehículos son cubiertos con clavos para facilitar el desplazamiento en invierno.

medida que se elevaba el nivel del edificio la resistencia a la compresión de las columnas de concreto en las plantas superiores disminuía, permitiendo mantener las mismas formaletas de las columnas prefabricadas que se podrían utilizar en todo el edificio, reduciendo así los costos de construcción.<sup>42</sup>

La resistencia a la compresión del concreto se redujo gradualmente de 60 MPa en la planta baja a 30 MPa en la parte superior del edificio.

La elección de concreto de alta resistencia en Two Union Square en Seattle, Washington se basa más en el módulo de elasticidad que en la alta resistencia, a pesar de que estas dos propiedades están relacionadas. Fue necesario aumentar el modulo de elasticidad para aumentar la rigidez del edificio, para restringir balancearse con los fuertes vientos.

Según Gordon (1991): *“La parte superior del Edificio Empire State se balancea alrededor de dos pies (600 mm) durante una tormenta.”*

El concreto de alta resistencia no sólo reduce la carga muerta también resiste exposiciones severas de las estructuras en plataformas marítimas donde puede satisfacer requisitos de desempeño, este concreto asegura una durabilidad excepcional, especialmente en zonas críticas propensas a corrosión, donde se somete a una exposición muy grave (este fue el caso para la plataforma marítima Hibernia en Canadá).

La decisión de optar por este material puede conllevar una serie de estudios pero ya se ha demostrado mediante importantes aplicaciones la versatilidad y adaptación que tiene el concreto de alta resistencia a los requisitos de los diseñadores

---

<sup>42</sup> Johnson, 1984.

### **2.4.3. CONSIDERACIONES PARA EL CONSTRUCTOR.**

Mientras que los contratistas rara vez juegan un papel importante en la selección de los materiales estructurales de una edificación en particular, a veces se les permite proponer diseños alternativos más económicos sobre la base de su propia experiencia. Por ejemplo, un contratista podría convencer a un propietario a utilizar una mayor resistencia en el concreto o la utilización parcial de cierta cantidad ya que su uso podría reducir los costos totales de la estructura.

### **2.4.4. CONSIDERACIONES PARA EL PRODUCTOR DE CONCRETO.**

Los productores de concreto se han enfocado en la venta de concreto para estructuras de tipo horizontal, dejando en su mayoría el mercado vertical a los productores de acero. Dado que la producción y la entrega de concretos convencionales de 30 MPa no requiere habilidades especiales o tomar medidas de control de calidad de alta tecnología la industria del concreto premezclado está llena de productores en las principales zonas urbanas en las que se utiliza ampliamente concreto. Por otra parte, el concreto normal es un material estructural tradicional bien establecido de tal manera que no requiere invertir en agresivas e innovadoras técnicas de marketing. Sus cualidades son altamente conocidas y sus propiedades están bien establecidas. Su uso está estrictamente reglamentado en varios códigos de construcción, complementado por una abundante literatura sobre cómo y cuándo usarlo. *En consecuencia, la competencia en el mercado del concreto convencional se basa casi exclusivamente en el precio unitario, y no en la calidad.* Esto sigue siendo cierto a pesar de los esfuerzos relativamente exitosos de algunos comités ACI y agencias públicas hacia la implementación de programas de control de calidad. Por supuesto, en un mercado tan competitivo, es difícil hacer dinero con un material que es tan omnipresente.

Ante esta situación, los productores de concreto pueden enfocarse en promover la aplicación del concreto de alta resistencia, en controlar la relativamente difícil producción, en crear programas de entrega en la obra y en la siempre necesaria comercialización. *El concreto de alta resistencia es un material de alta tecnología, no perdona que las operaciones se realicen “a la voluntad de Dios”.*

El concreto de alta resistencia exige investigación para determinar los componentes más adecuados disponibles en un área geográfica determinada. También se vuelve necesario el control de calidad, tanto en términos de materias primas como en el proceso de obtención del concreto como producto terminado. Para todo esto imprescindible estar respaldado por la promoción dirigida a propietarios, arquitectos y diseñadores para educarlos en el uso efectivo de este tipo de concreto con el fin de crear estructuras más elegantes y económicas.

Desde un punto de vista práctico, por ejemplo, se asume generalmente que un promedio del 10 al 20% del volumen total del concreto utilizado en un edificio de gran altura, debe ser de concreto de alto desempeño. Esto representa sólo una fracción del volumen de concreto utilizado en la construcción del edificio y aunque existan productores que son capaces de suministrar concreto de alto desempeño esto pone a los productores de concreto convencional en una posición envidiable para conseguir el contrato para el restante 80 o 90% de concreto convencional necesario para completar el edificio. Algo que muchas veces disminuye el surgimiento de nuevos productores.

Algunos productores de concreto que participan en la elaboración de concreto de alto desempeño y en su promoción han indicado que los nuevos conocimientos y los programas de control de calidad desarrollados en la búsqueda de una mayor resistencia suele influir positivamente en la productividad y la rentabilidad de la industria.

Curiosamente, al cuadruplicarse la resistencia a la compresión durante estas décadas, la industria del concreto premezclado logró golpear en pocos años la industria del acero que se encontraba en la cima del mercado de gran altura. Eso no era posible hacerlo con concretos de 25 MPa.

La fabricación del concreto de alto desempeño requiere un enfoque de alta tecnología, los productores de concreto interesados en este mercado tienen que tener en cuenta que su éxito final se inicia con el desarrollo de un buen equipo de control de calidad, un departamento técnico fuerte y unas bien definidas y centradas estrategias de marketing. Esto, por supuesto, se suma a las inversiones en materiales, equipo y personal. Este tipo de apuesta ya ha dado sus frutos para un número importante de productores de concreto.<sup>43</sup>

#### ***2.4.5. CONSIDERACIONES DE AFECTACIÓN MEDIOAMBIENTAL.***

Cada vez que se utiliza bajo métodos adecuados el concreto de alta resistencia en lugar del concreto convencional se garantiza que el poder conglomerante del cemento Portland se ha aprovechado con mayor eficacia. El mayor contenido de agua (mucho más de lo estrictamente necesario para hidratar el cemento en su totalidad) habitualmente da como resultados concretos porosos, con una microestructura débil. Dado que la producción de cemento Portland es de alto consumo energético, la elaboración de concretos convencionales se puede considerar prácticamente como un “desperdicio de materiales”. Para demostrar esto, simplemente se necesita comparar el costo de todos los materiales necesarios para soportar una determinada carga en un elemento estructural particular (columnas, vigas, etc.) de concreto de alta resistencia y concreto convencional: el concreto de alta resistencia utiliza menos cemento y menos agua total porque optimiza sus componentes.

---

<sup>43</sup> Malier, 1991.

## **2.5. BENEFICIOS DEL CONCRETO DE ALTA RESISTENCIA.**

**Es un beneficio integral porque se basa en la optimización de recursos.** Pero se pueden mencionar algunos rubros impactados:

- **Económico:** *Si aplico adecuadamente el concreto de alta resistencia puedo reducir las dimensiones de los elementos estructurales y reducir el volumen total de concreto. A demás de utilizar únicamente las cantidades óptimas de material.*
- **Estructural:** *Se mejoran las propiedades mecánicas. Se pueden reducir las secciones de los elementos y arquitectónicamente aumentar el área de arrendamiento.*
- **Potencia la Construcción Efectiva:** *Porque requiere un diseño propio para cada aplicación, todas las propiedades de comportamiento del concreto en estado fresco y endurecido son conocidas previamente (trabajabilidad, tiempo de fraguado, tiempo de curado, endurecimiento y retiro de formaletas, etc.)*
- **Ambientales:** *El tipo de cemento a utilizar puede influir en la conservación de recursos, el cemento ASTM C1157 utiliza menos energía para su fabricación. El humo de sílice proviene de reciclaje.*
- **Posee Aplicabilidad:** *Es aplicable en la mayor parte de países del mundo, un ejemplo: Malasia, un país de renta mediana, se transformó desde los años 1970 de un simple productor de materias primas en una economía multi sectorial emergente con materias primas para concreto de disponibilidad y acceso similares a nuestro país, construyó las Torres Petronas. Es Aplicado en El Salvador, Perú, Costa Rica, Chile y otros. No requiere sofisticados equipos para fabricación (aprovechamiento de los productos existentes).*

- **Es versátil:** Se puede usar tanto en edificios como en carreteras, en climas extremos, en zonas marinas.

### **MEJORAS TÉCNICAS:**

- ♦ **Estado fresco:** Consistencia, Contenido de Aire, Peso Volumétrico, control de temperatura.
- ♦ **Estado endurecido:** Resistencia a compresión, modulo de elasticidad, resistencia a la flexión (MR).
- ♦ **Mejora la Durabilidad:** Permeabilidad, Reacción Alcalí Agregado, Contracción y Fluencia, Descamación, Resistencia a los sulfatos, Corrosión.
- ♦ **Resistente al Fuego:** Una de los beneficios del concreto sobre el acero y madera estructural.

## 2.6. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL USO DE CONCRETOS DE ALTA RESISTENCIA.

VENTAJAS	DESVENTAJAS
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Posibilidad de disminuir secciones transversales de los elementos estructurales.</li> <li>▪ Uso eficiente del cemento.</li> <li>▪ Uso eficiente de la mano de obra.</li> <li>▪ Disminuye el porcentaje de aire en la mezcla de concreto.</li> <li>▪ Aumenta la vida útil de la estructura.</li> <li>▪ Mejora la protección contra la corrosión.</li> <li>▪ Permite optimizar costos en las estructuras.</li> <li>▪ Presenta una mayor resistencia a la erosión.</li> <li>▪ Incremento del área rentable.</li> <li>▪ Permite bombearlo a grandes alturas.</li> <li>▪ Posee alta fluidez.</li> <li>▪ Posible reducción de la cantidad de acero de refuerzo.</li> <li>▪ Alto módulo de elasticidad.</li> <li>▪ Su módulo de deformación es más elevado y, por tanto, tienen un menor acortamiento debido a esfuerzos axiales.</li> <li>▪ Permite una remoción temprana del encofrado</li> <li>▪ Permite incrementar el espaciamiento del apuntalamiento.</li> <li>▪ Mayor durabilidad.</li> <li>▪ Peso propio global de la estructura inferior con la consiguiente reducción de la cimentación.</li> <li>▪ Mejor acabado.</li> <li>▪ Mayor rendimiento.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Se requiere personal capacitado para su manejo.</li> <li>▪ Sensible a las variaciones de las materias primas.</li> <li>▪ Mayor precio unitario de material.</li> <li>▪ Requiere excelentes condiciones de curado.</li> <li>▪ Cualquier adición de agua, cemento o aditivo en obra alterará su diseño, perjudicando la calidad del concreto.</li> <li>▪ Se deben cumplir estrictamente todas las normas referentes a manejo, protección y control del concreto.</li> </ul>

**Tabla 2.5.** Algunas Ventajas y desventajas de la aplicación de Concretos de Alta Resistencia.<sup>44</sup>

<sup>44</sup> Conjunto de ventajas y desventajas expresadas por National Ready Mixed Concrete Association, CEMEX, CESSA ahora Holcim El Salvador.

## **2.7. APLICACIONES.**

### **2.7.1. APLICACIONES COMUNES.**

El concreto de alta resistencia es un material versátil y puede adaptarse fácilmente a los requisitos de cada proyecto, aunque comúnmente se utiliza en este tipo de elementos:

- ◆ *Pilotes y pilas de cimentación.*
- ◆ *Elementos pre-esforzados; vigas y losas pre o post-tensadas.*
- ◆ *Columnas en edificios de mediana y gran altura.*
- ◆ *Bóvedas de seguridad.*
- ◆ *Columnas (pilas) y vigas en puentes.*
- ◆ *Tableros de puentes de gran esbeltez.*
- ◆ *Muros de cortante “shear walls”.*
- ◆ *Concretos sometidos a ambientes agresivos.*
- ◆ *Pisos Industriales de tráfico pesado.*
- ◆ *Pistas en Aeropuertos.*
- ◆ *Cubiertas marinas.*
- ◆ *Estructuras singulares, y otras.*

### **2.7.2. APLICACIONES EN EL MUNDO.**

Beneficios excepcionales, tanto técnicos como económicos, se han obtenido utilizando concreto de alta resistencia. Debido a estas ventajas, el concreto de alta resistencia está siendo utilizado regularmente en muchas aplicaciones, incluyendo edificios, estructuras marítimas, elementos de puentes, revestimientos y pavimentos.

El concreto de alta resistencia se utiliza a menudo en las estructuras no por su resistencia, sino por otras propiedades de ingeniería que vienen añadidas con mayor resistencia, como el aumento de módulo de elasticidad estático (rigidez), reducción de la permeabilidad de materiales perjudiciales, o de alta resistencia a la abrasión.

En las estructuras de puentes, el concreto de alta resistencia se utiliza para lograr uno o una combinación de los siguientes atributos mecánicos:

- *Aumentar la longitud del claro;*
- *Aumentar el espaciamiento entre vigas y*
- *Reducir la profundidad de la sección.*

La reducción de la permeabilidad del concreto de alta resistencia presenta oportunidades para mejorar la durabilidad y aumentar la vida útil de servicio de las estructuras. Desde 1989, se han construido más puentes de concreto y estructuras de las carreteras en Noruega con concretos que tienen una relación A/MC por debajo de 0.40 con el uso de humo de sílice para producir muy baja permeabilidad al concreto con una mejor resistencia a la corrosión.<sup>45</sup> El Puente Sandhornoya en Noruega fue construido en 1989 con concreto de alta resistencia de peso ligero de 55 MPa (8,000 psi). El uso de concreto de alta resistencia ligero proporciona las ventajas de reducción de peso y aumento de la resistencia.<sup>46</sup>

---

<sup>45</sup> Euro-International Committee for Concrete (CEB) - International Federation for Prestressing (FIP), 1994.

<sup>46</sup> Paul Zia, 1997.

El puente Deutzer que cruza el Río Rhine cerca de Cologne, fue construido en 1978. El puente es una construcción en voladizo libre con tres vanos de 132 m, 185 m, y 121 m (435 pies, 610 pies, y 399 pies). Una mitad de luz, medición de 61 m (200 pies) se coló con un concreto ligero y el resto del puente con un concreto de peso normal. La resistencia a la especificada para los dos concretos fue de 55 MPa (8,000 psi). Sin embargo, la resistencia media a la obtenida en el campo fue de 69 MPa (10,000 psi) para el concreto de peso normal y 73 MPa (10,600 psi) para el concreto ligero.<sup>47</sup>

El puente de Portneuf en Quebec, construido en 1992. Utiliza vigas prefabricadas post-tensadas de 24.8 m (81.5 pies) de claro. La resistencia media del concreto era 75 MPa (10,900 psi) con una relación A/MC de 0.29 y un contenido de aire de 5.0 a 7.5 por ciento. Mediante el uso de concreto de alta resistencia, hubo menor pérdida de tensión previa y por lo tanto mayor tensión admisible y se lograron secciones transversales más pequeña. Además, una durabilidad mejorada permite una vida útil prolongada de la estructura.<sup>48</sup>

En los EE.UU., el paso elevado de carretera Louetta, que incluye dos puentes adyacentes en la carretera estatal 249 en Houston, Texas, es un proyecto modelo que demuestra el uso de concreto de alta resistencia en aplicaciones en puentes. Las estructuras son los primeros puentes en los EE.UU. donde se utilizó concreto de alta resistencia en exclusiva, es decir en toda la estructura. Las resistencias a la compresión especificados oscilaron desde 69 hasta 90 MPa (10,000 a 13,000 psi) a los 56 días.<sup>49</sup>

---

<sup>47</sup> Euro-International Committee for Concrete (CEB) - International Federation for Prestressing (FIP), 1990.

<sup>48</sup> Paul Zia, 1997.

<sup>49</sup> Ralls, 1993; Ralls y Carrasquillo, 1994.

Hay muchos casos documentados de concreto de alta resistencia se utiliza para pavimentos de carreteras en Noruega y Suecia, y no por sus propiedades de resistencia, sino para mejorar la resistencia a la abrasión.<sup>50</sup>

*En los edificios, el concreto de alta resistencia presenta oportunidades para la reducción de tamaño de las columnas, lo que resulta en menores volúmenes de concreto y grandes reducciones en las cargas muertas.*<sup>51</sup>

En estructuras de estacionamientos, el concreto de alta resistencia se utiliza, además, para reducir al mínimo la penetración de cloruros.

***Aunque el costo por unidad de volumen del concreto de alta resistencia es probablemente mayor que el del concreto de resistencia convencional, dadas las ventajas mecánicas del concreto de alta resistencia, el costo total de la construcción de una estructura elaborada incorporando concreto de alta resistencia puede ser inferior.***

En edificios altos, el módulo de elasticidad de los elementos de soporte de carga verticales, tales como columnas y muros de corte aumentan y los períodos de rotación disminuyen. Los períodos de rotación y vibración pueden ser reducidos en columnas rígidas y muros de corte y pueden ser beneficiosos cuando se considera el factor de la comodidad de ocupación de edificios esbeltos. Puentes y estructuras de estacionamiento se benefician excepcionalmente de la alta resistencia con el concreto de baja permeabilidad.

Los marcos de construcción de concreto, en particular incorporan concreto de alta resistencia en lugar de acero estructural, un material de un costo prohibitivo, mejora significativamente la viabilidad económica para la construcción de edificios altos. La *Figura 2.6.2* ilustra la altura de penetración del Burj Dubai en relación

---

<sup>50</sup> Gjørsv, 1990; CEB-FIP, 1994.

<sup>51</sup> Perenchio, 1973.

con otros edificios que han celebrado el título de "más alto del mundo." Arquitectónicamente, no habría sido práctico para la construcción de este edificio hacerlo totalmente de concreto sin la incorporación del concreto de alta resistencia.

En más de 150 casos, se ha utilizado concreto con una resistencia a la compresión especificada de hasta 80 MPa (11,600 psi)<sup>52</sup>, el "super rascacielos" *Burj Khalifa* (*Burj Dubai*) en Dubai es el edificio más alto del mundo.

La construcción del Burj Dubai se completó el 1 de octubre de 2009.<sup>53</sup>

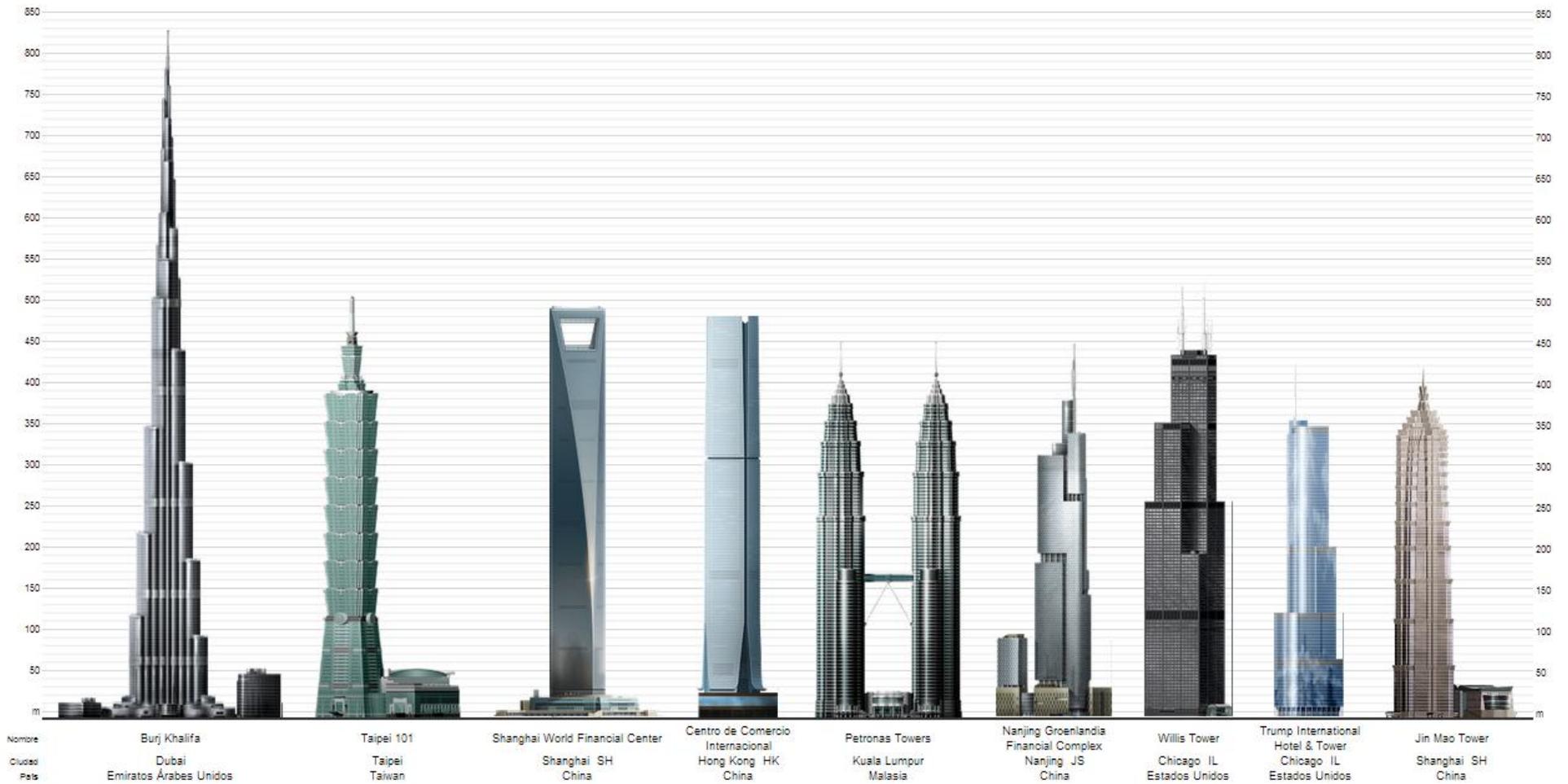


**Figura 2.6.1.** *Burj Khalifa, Dubai, Emiratos Árabes Unidos. El edificio más alto del mundo con una altura de 828 m y finalizado en 2009.*

---

<sup>52</sup> Michael A, Caldarone, 2009.

<sup>53</sup> Para más información visite: [http://es.wikiarquitectura.com/index.php/Burj\\_Khalifa](http://es.wikiarquitectura.com/index.php/Burj_Khalifa)



**Figura 2.6.2.** Con la ayuda de concreto de alta resistencia el Burj Khalifa, Dubai, Emiratos Árabes Unidos representa un aumento extraordinario en la altura alcanzable de edificios. Al determinar la altura solo se incluyen las torres y las antenas no son tomadas en

A continuación se mencionan otras aplicaciones que representan una pequeña fracción de los proyectos que han hecho uso directo del concreto de alto desempeño a través del concreto de alta resistencia.

Pero para una mayor profundización específica de la toma de decisiones para la selección de este material en cada proyecto se recomienda la lectura de los informes del Euro-International Committee for Concrete (CEB) - International Federation for Prestressing (FIP), CEB-FIP de 1994. De donde se han extraído estos casos.

Algunos casos importantes:

1. *Water Tower Place, construido en 1970 en Chicago, Illinois, Estados Unidos.*
2. *Plataforma marina Gullfaks de Noruega, construida en 1981.*
3. *Sylans y Glacières viaducto, construido en Francia en 1986.*
4. *Scotia Plaza, construido en 1988 en Toronto, Canadá.*
5. *Puente Île de Ré, construido en 1988 en Francia.*
6. *Two Union Square, construido en 1988 en Seattle, Washington, Estados Unidos.*
7. *Puente Joigny, construido en 1989 en Francia.*
8. *Puente Montée St-Rémi construido cerca de Montreal, Canadá, en 1993.*
9. *El puente "Pont de Normandie", terminado en 1993.*
10. *Plataforma marina Hibernia, terminado en Newfoundland, Canadá, en 1996.*
11. *Puente Confederación que se completó entre la Isla del Príncipe Eduardo y Nuevo Brunswick en Canadá en 1997.*

## **2.7.3. APLICACIONES EN EL SALVADOR.**

### **2.7.3.1. EDIFICIO TORRE FUTURA.**

*Tomado de la Revista N° 63, Año 17 ISCYC.*

*Por: Ing. Fredy Herrera Coello.*

La “Torre Futura” ubicada sobre la 87 Avenida Norte y Calle El Mirador en la Colonia Escalón de San Salvador, es uno de los proyectos más importantes que se construyó en El Salvador a finales del año 2009. Su moderno diseño arquitectónico fue galardonado por la Revista Architectural Digest. El uso de tecnologías eficientes para su funcionamiento y la incorporación de amplias terrazas permiten al visitante disfrutar, no solo de un lugar seguro, agradable e innovador, ya que además sus instalaciones ofrecen una variedad de restaurantes y lindas vistas de la ciudad capital, San Salvador.

Las obras de construcción se iniciaron en noviembre del 2007 y finalizaron en octubre del año 2009 por el Grupo Agrisal. Para el 23 de octubre del año 2008, toda la construcción de la estructura de la torre se había finalizado junto con el colado de la losa de la azotea, quedando pendiente solo parte de la estructura de estacionamientos independientes.

El edificio posee un área total de construcción de 67,000 m<sup>2</sup> y se compone de 20 niveles, de los cuales, 5 son para el estacionamiento vehicular. Asimismo, posee doce elevadores, una plaza comercial y azoteas en diferentes niveles que fueron arborizadas con plantas tropicales brindando un lugar de esparcimiento agradable.

En relación al equipamiento, la Torre Futura cuenta con los sistemas más modernos en aire acondicionado, contra incendio, planta eléctrica de emergencia, iluminación y acabados. Por ejemplo, solo en la fachada se instaló un vidrio de tipo refractivo cubriendo un área de más de 13,000 m<sup>2</sup>.



*La figura representa la etapa constructiva del Edificio Torre Futura*

## **ANOTACIONES SOBRE LA ESTRUCTURA Y EL SISTEMA CONSTRUCTIVO.**

Debido a la alta incidencia de sismos en el territorio nacional, el sistema estructural elegido, fue el sistema sismo resistente tipo DUAL, este sistema consiste en estructuras de marcos de concreto reforzado (vigas-columnas) y paredes de cortante elaboradas con concreto hidráulico que se ubicaron en la parte central, conformando los huecos de los elevadores.

El Concreto utilizado en la estructura fue un Concreto premezclado de Alta Resistencia de  $450 \text{ kg/cm}^2$  en columnas y paredes; también se tuvieron resistencias de  $350 \text{ kg/cm}^2$  en vigas y  $280 \text{ kg/cm}^2$  en losas de entrepiso. Se decidió optar por Concreto de Alta Resistencia con el objetivo de disminuir las secciones de los elementos y lograr mayores espacios útiles. La fundación consta de un sistema de placa de concreto, con un espesor 1 a 1.50 metros y desplantada en un suelo de tipo material rocoso-resistente a catorce metros bajo el nivel de calle.

Es de hacer notar que durante la construcción de Torre Futura, uno de los procesos constructivos con mayor dificultad fue la construcción de los cinco sótanos, debido a que los sistemas Soil Nail y otros similares no se pudieron aplicar por el tipo de material y su alto costo.

Para solventar esta situación en particular, fue necesario diseñar un nuevo sistema que se denominó "apuntalamiento gigante"

El apuntalamiento gigante, consistió en construir parcialmente el edificio primeramente con cuatro losas de entrepiso dejando de colar un eje de columnas contiguo al muro

Una vez se tuvo la estructura parcial de los cuatro niveles, se apuntaló el talud cortando de arriba hacia abajo y luego se vino colando las fundaciones y losas pendientes de abajo hacia arriba.



*La figura representa la etapa constructiva del Edificio Torre Futura*



Al final, este proceso resultó todo un éxito, ya que permitió una construcción segura, sin accidentes y económica, comparada con Soil Nail y otras similares. En cuanto al sistema de encofrado utilizado, se usaron moldes metálicos cilíndricos para el colado de las columnas en el sitio; andamios estructurales con vigas de acero y plyform HDO para losas y vigas; y formaletas de plyform con vigas de acero y pernos para las paredes de concreto. Fue necesaria la utilización de 2 sets de formaletas, para lograr un eficiente rendimiento de obra con tiempos de colados por cada entrepiso de 10 a 12 días.

Otro de los procesos constructivos importantes e innovadores que vale la pena mencionar, fue el colado de las columnas "gigantes" ubicadas en el lobby.



**Figura 2.6.3.** Construcción del Edificio Torre Futura, San Salvador, El Salvador.

Estas columnas de 1.30 metros de diámetro y de 14 metros de altura fueron coladas monolíticamente y para lograrlo, fue necesario equipar a los obreros encargados de depositar y vibrar el concreto desde la base, con tanques de oxígeno, como medida de seguridad y para facilitarles ésta labor, crucial para el adecuado desempeño estructural de la edificación.

Para la construcción de éste edificio, también fue importante y necesaria la utilización de una grúa torre con un brazo de 45 metros y con una capacidad máxima de 1.5 toneladas en su extremo. Asimismo, se contó con una segunda torre de menor capacidad para la elevación de los encofrados de acero, el acero de refuerzo y otros materiales. También se utilizaron juntas mecánicas (couplers) de 1" y 1 ¼" para el ensamblaje de las varillas del acero de refuerzo, logrando descongestionar el acero en columnas y vigas y el cumplimiento de los códigos de diseño y construcción vigentes.

El personal que se necesitó para la construcción de Torre Futura, se compuso de un equipo de más de 600 obreros, 25 del personal administrativo y 30 correspondiente al personal técnico entre los que se encontraban técnicos, ingenieros y arquitectos, para los fines de supervisión, construcción y administración del proyecto.

Finalmente, cabe mencionar que la seguridad laboral fue un factor muy importante durante toda la ejecución del proyecto, todas las actividades realizadas se desarrollaron sin riesgo alguno para bien de todos los obreros, ingenieros y visitantes del proyecto.



**CRÉDITOS DE CONSTRUCCIÓN DE LA ESTRUCTURA:**

**Directores del Proyecto:**  
Arq. Raúl Jiménez AGRISAL,  
Ing. Cesar Rodríguez AGRISAL.

**Diseño Arquitectónico:**  
KMD (México-US).

**Diseño Estructural:**  
EC Estructuras Consultores (El Salvador).

**Construcción:**  
Simán S.A. de C.V.;  
Ing. Marco Tulio Alas (Gerente),  
Ing. Luis Herrera (Residente), Arq. Regina de Soto  
(Administración),  
Ing. Elena de Pineda (Coordinación).

**Supervisor:**  
MR Meléndez - JM Stubig.

**Ingeniería:**  
Ing. Fredy Herrera Coello.

---

**Las Fotografías de Ilustración son Cortesía de:**

**Durante La Construcción.**  
FHC Ingenieros S.A. de C.V.

**Fotografías Artísticas de Exteriores de Edificio.**

Ing. Roberto López Meyer  
Arq. Karla B. de Escamilla





*Edificio Torre Futura,  
El Salvador.*

## **2.8. MATERIALES CONSTITUTIVOS.**

### **2.8.1. INTRODUCCIÓN.**

En ésta como en todas las investigaciones en el área de tecnología del concreto conocer las propiedades de los materiales con los que se espera trabajar y su debida compatibilidad facilita prever posibles deficiencias en el concreto que a la larga afectarían la durabilidad de las estructuras y resultarían en daños muchas veces irreversibles.

Es importante mencionar que no solo se ven afectadas las propiedades de durabilidad en el concreto sino a demás deficiencias en los componentes generan deficiencias en las propiedades mecánicas del material. Por ejemplo, deficiencias por uniformidad de tamaños en la granulometría de los agregados genera un acomodo deficiente entre las partículas que debe ser solventado con una mayor cantidad de pasta entre las partículas de los agregados; esta uniformidad de tamaños de las partículas impacta propiedades del concreto como la trabajabilidad comparándolo con concretos elaborados con agregados de granulometrías adecuadas, si bien la resistencia se ve afectada muchas veces de manera leve, la falta de economía del concreto se vuelve un problema serio.

Ahora bien, no solo es importante que cada material tenga una buena calidad, sino a demás es necesario que exista una correcta compatibilidad entre ellos; es decir, que las propiedades de uno no afecten el comportamiento de otro, a fin de lograr una matriz sólida y bien constituida, con cantidades de material óptimas. Todo esto se logra cumpliendo las normas de calidad en los materiales que ya se encuentran definidas por instituciones internacionales. Pero no es necesario únicamente aferrarse en cumplir los requisitos de estas normativas, es importante también tomar en cuenta los factores locales que pueden afectar el valor del concreto e incrementar innecesariamente su costo. Se debe evaluar que cada región posee sus propios materiales con características específicas, muchas veces estas características pueden causar comportamientos distintos a los

requeridos por organismos como ASTM, ACI, etc. Como ejemplo, los diseñadores de las mezclas deben tener el criterio suficiente para evaluar si es necesario mantener los requisitos de resistencia o ceder un poco bajando la resistencia en rangos coordinados y permitidos por los estructuristas para proteger la economía de los proyectos.

En esta investigación se hace uso de los siguientes materiales locales: Cemento Portland ASTM C1157 Tipo HE, Agregado Grueso Triturado de 3/8", Agregado Fino Triturado y Agua Potable. Y se usa a demás Microsilice como adición y Aditivo Superplastificante del tipo F provenientes de importación. Por experiencias previas en el país en muchos proyectos estos materiales son de uso común y son compatibles. En este apartado se da una descripción general de cada uno de ellos y de su papel en la elaboración de concreto de alta resistencia.

## **2.7.2. MATERIALES CEMENTANTES.**

### **2.7.2.1. CEMENTO PORTLAND.**

A lo largo de la historia el hombre ha buscado la manera de dar solución a sus necesidades, desde la alimentación hasta la necesidad de protegerse de la intemperie, la necesidad de construir ellos mismos sus espacios habitacionales y desarrollar la infraestructura necesaria para satisfacer el crecimiento como sociedad. A raíz de esto se inicia una búsqueda de materiales adecuados que cumplan los requerimientos constructivos para la realización de sus obras en constante evolución.

Uno de los primeros problemas que se presentaron tal vez fue la manera de mantener ligados dos materiales sólidos, lo que llevo a desarrollar técnicas que los condujeran al uso de materiales con propiedades cementantes. Esta búsqueda hizo posible la creación de morteros o cementantes, por ejemplo, los egipcios utilizaron mortero a base de yeso calcinado para la creación de algunas pirámides, los griegos y romanos caliza calcinada, posteriormente mezclaron cal con agua, arena y piedra triturada con tejas quebradas siendo este el primer concreto de la historia.<sup>54</sup>

A partir de esto se desarrollaron otros cementos hidráulicos<sup>55</sup> que vinieron a culminar en el “Cemento Portland”, patente que obtuvo el fabricante de cemento, el británico Joseph Aspdin el 21 de octubre de 1824. El nombre de Cemento Portland se concibió originalmente debido a la semejanza de color entre este material y una roca caliza obtenida en una cantera en la isla de Portland (Inglaterra).

---

<sup>54</sup> Villaseñor Gandara, José Alberto: Diseño de mezclas de concreto, Cap. 1, Pág. 3

<sup>55</sup> Los cementos hidráulicos son aquellos que fraguan y endurecen por la reacción química con el agua. Durante la reacción, llamada hidratación, el cemento se combina con el agua para formar una masa similar a una piedra, llamada pasta.

En la actualidad el Cemento Portland es un material utilizado de manera global, este recibe una serie de clasificaciones de acuerdo a su fabricación y propósito de aplicación, pero no pierde el principio básico que se ha buscado a lo largo de la historia, es decir, producir un material que posea propiedades tanto adhesivas como cohesivas, las cuales le den la capacidad de ligar, unir, pegar fragmentos o componentes minerales para formar una masa compacta.

El Cemento Portland se produce por la pulverización del clínker, el cual consiste principalmente en silicatos de calcio hidráulicos. El clínker también contiene algunos aluminatos de calcio y ferroaluminatos de calcio y una o más formas de sulfato de calcio (yeso) que se muele conjuntamente con el clínker para la fabricación del producto final. Los materiales usados para la producción del cemento Portland deben contener cantidades apropiadas de los compuestos de calcio, sílice, alúmina e hierro.<sup>56</sup>



**Figura 2.7.1.** *Clinker, utilizado junto con otros ingredientes en la fabricación del Cemento Portland.*

---

<sup>56</sup>Kosmatka, Steven H.; Kerkhoff, Beatrix; Panarese, William C.; y Tanesi, Jussara: Diseño y Control de Mezclas de Concreto, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, EE.UU. 2004. Pág. 28.

El Cemento Portland es un producto comercial de fácil adquisición el cual cuando se mezcla con el agua, ya sea sólo o junto con arena, agregados u otro material similar, tiene la propiedad de combinarse lentamente con el agua hasta formar una pasta que actúa como un adhesivo y une los agregados (arena, grava, roca triturada u otro mineral similar) para formar el concreto, una masa endurecida, el material de construcción más versátil y más usado en el mundo.

El proceso para definir y especificar el cemento potencialmente idóneo para una aplicación en particular es de trascendental importancia, ya que de esto dependerán significativamente las características y propiedades de la matriz cementante y por consiguiente las del concreto a utilizar. Para ello es necesario hacer un recuento de las clases y tipos de cemento utilizados para elaborar concretos con el fin de obtener un alto rendimiento o resistencia a la compresión en la estructura a conformar, tema abordado profundamente en esta investigación.

#### **2.7.2.1.1. CARACTERÍSTICAS DEL CEMENTO PORTLAND FABRICADO BAJO LA NORMA ASTM C150 DEL TIPO I.**

Los diferentes tipos de cemento Portland se fabrican para satisfacer ciertas propiedades físicas y químicas, para objetivos específicos, es decir para cada aplicación en particular, se tiene el cemento apropiado.

La norma ASTM C 150, Especificaciones Estándar para el Cemento Portland (*Standard Specification for Portland Cement*), designa ocho tipos de cementos, usando los números romanos, el cemento Tipo I es un cemento para uso general, apropiado para todos los usos donde las propiedades especiales de otros cementos no sean necesarias. Sus empleos en concreto incluyen pavimentos, pisos, edificios de concreto armado, puentes, tanques, embalses, tubería,

unidades de mampostería y productos de concreto prefabricado y precolado<sup>57</sup>, construcciones de concreto en general que no están expuestas al ataque de sulfatos o al nivel freático.

Hasta donde se sabe el Cemento Portland Tipo I es el cemento de uso más común, cerca del 90% del cemento utilizado en E.E.U.U. y un porcentaje semejante en Gran Bretaña es Cemento Tipo I.<sup>58</sup>

En nuestro medio el cemento elaborado bajo esta norma es conocido comercialmente como “*Holcim CESSA 5,000 Tipo I*” es un cemento hidráulico sin adiciones, es decir que está compuesto únicamente de clinker y yeso. El yeso permite que el fraguado (endurecimiento) de las mezclas permita la manipulación y colocación de las mezclas de cemento, ya que sin él, los concretos y morteros fraguarían excesivamente rápido y no podrían trabajarse.

Este cemento desarrolla resistencias a los 28 días arriba de 5,000 psi (350 kg/cm<sup>2</sup> aproximadamente), lo cual lo hace ideal cuando se requiere de estructuras con altas resistencias que serán sometidas a grandes cargas.

### ***CARACTERÍSTICAS.***

Debido a las altas resistencias del cemento Holcim CESSA 5,000 TIPO I, éste es ideal para ser utilizado en concretos estructurales para la construcción de grandes obras, tales como: puentes, pasos a desnivel, edificios, elementos de concreto pre y postensado, etc.

---

<sup>57</sup> Kosmatka, Steven H.; Kerkhoff, Beatrix; Panarese, William C.; y Tanesi, Jussara: Diseño y Control de Mezclas de Concreto, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, EE.UU. 2004. Pág. 30.

<sup>58</sup> Villaseñor Gandara, José Alberto: Diseño de mezclas de concreto, Cap. 1, Pág. 10.

De igual forma, debido al desarrollo de altas resistencias a la compresión a edades tempranas, es utilizado para la fabricación de productos de concreto, tales como: bloques, tubos, pilas, adoquines y otros prefabricados.<sup>59</sup>



**Figura 2.7.2.** Presentación actual del Cemento Holcim CESSA 5,000 TIPO I, comúnmente vendido únicamente en grandes volúmenes o a granel. Fuente: Holcim El Salvador.

#### **2.7.2.1.2. CARACTERÍSTICAS DEL CEMENTO PORTLAND FABRICADO BAJO LA NORMA ASTM C1157 DEL TIPO HE.**

La Norma ASTM C 1157, *Especificaciones por Desempeño para los Cementos Hidráulicos (Performance Specification for Hydraulic Cements)*, designa seis tipos de cementos, uno de ellos, el cemento tipo HE que proporciona alta resistencia en edades tempranas, usualmente menos de una semana. Este cemento se usa de la misma manera que el cemento portland tipo III.

Esta especificación está basada en los atributos del cemento hidráulico relacionados con el desempeño del concreto incluyendo el desarrollo de la

---

<sup>59</sup> Hoja Técnica de Cemento Holcim CESSA 5000 TIPO I, fabricado por Holcim El Salvador.

resistencia, la resistencia a sulfatos, el calor de hidratación y la resistencia a la reactividad álcali-sílice. El desempeño del concreto depende de muchos factores tales como las características de otros materiales del concreto, el diseño mezclas, la producción, el manejo y las condiciones ambientales. Para las propiedades de desempeño del concreto, incluyendo la permeabilidad, la resistencia a ciclos de congelamiento y deshielo y el descascaramiento o exfoliación por sales deshielantes, se puede obtener información adicional a través de ensayos comparativos de concretos.

En El Salvador se distribuye por productores locales bajo el nombre “*Holcim CESSA PAV Tipo HE y Holcim CESSA Block Tipo HE*” (HE= Alta Resistencia a Edades Tempranas), es un cemento hidráulico por desempeño, el cual posee la misma composición química del cemento Tipo I, pero con la adición de puzolana y filler<sup>60</sup> en proporciones específicas en la molienda final.

Este cemento alcanza resistencias mayores a los 4,200 psi a los 28 días (300 kg/cm<sup>2</sup> aproximadamente), por lo que es recomendado para la fabricación de concretos estructurales para pavimentos, elementos prefabricados o elementos que requieren retiro temprano de encofrados.

### ***CARACTERÍSTICAS.***

Debido a sus características de alta resistencia inicial, este cemento es principalmente adecuado para la construcción de pavimentos de concreto, estabilización de suelos y bases granulares, elementos prefabricados o elementos que requieren retiro temprano de encofrados.<sup>61</sup>

---

<sup>60</sup> El filler es un producto utilizado para la estabilización de suelos, es una mezcla de materiales los cuales homogenizados con el agua funcionan como un aglomerante, los cuales tienen propiedades mecánicas, permitiendo ser usado como carpeta de rodado.

<sup>61</sup> Hoja Técnica de Cemento Holcim CESSA PAV Tipo HE, fabricado por Holcim El Salvador.



*Figura 2.7.3. Presentación actual del Cemento Holcim CESSA PAV Tipo HE y Holcim CESSA Block Tipo HE. Fuente: Holcim El Salvador.*

### **2.7.2.1.3. ELECCIÓN DEL TIPO DE CEMENTO A UTILIZAR EN LA ELABORACIÓN DE CONCRETO DE ALTA RESISTENCIA.**

La fabricación de un concreto de alta resistencia es un proceso que implica una rigurosa selección de los mejores materiales disponibles en una determinada región y el establecimiento de programas óptimos de control de calidad para la selección de materiales.

Al especificarse el cemento para un proyecto, se debe estar seguro de la disponibilidad de los tipos de cemento, además, la especificación debe permitir flexibilidad en la selección del cemento. La limitación de un proyecto a un sólo tipo de cemento, una marca o una norma de cemento puede resultar en retrasos del proyecto y puede impedir el mejor uso de materiales locales. No se deben requerir los cementos con propiedades especiales, a menos que características especiales sean necesarias. Las especificaciones del proyecto deben enfocarse en la necesidad de la estructura de concreto a conformar y permitir la utilización de una variedad de materiales para que se alcancen estas necesidades.

Hablando específicamente de la selección del cemento para el concreto de alta resistencia, esta no se debe basarse sólo en pruebas de cubos de mortero, sino que también debe incluir resistencias comparativas del concreto a los 28, 56 y 91 días (recomendable). Para el concreto de alta resistencia, el cemento debe producir cubos de mortero con resistencia mínima a los 7 días de  $310 \text{ kg/cm}^2$  o  $30 \text{ MPa}$  ( $4,350 \text{ lb/cm}^2$ ).

Para cada cemento considerado en el proyecto, se deben producir mezclas de prueba con contenidos de cemento entre  $400$  y  $550 \text{ kg/m}^3$  ( $675$  a  $930 \text{ lb/yd}^3$ ). La cantidad va a variar dependiendo de la resistencia deseada. Además de la disminución de la cantidad de arena, con el aumento del contenido de cemento, las mezclas de prueba deben ser lo más parecidas posibles.<sup>62</sup>

En base a estas especificaciones se escoge el cemento, que cumpla con dichos requerimientos, que sea producido en nuestro medio y que provea con fines investigativos o constructivos una solución adecuada a la elaboración de este tipo de concretos con características de alto rendimiento a precios razonables y competitivos, siempre velando el cumplimiento de estándares o normativas de calidad. Para nuestra investigación de evaluación de diseños de mezcla de concretos de alta resistencia se seleccionó el Cemento Holcim CESSA PAV Tipo HE, fabricado por Holcim El Salvador.

---

<sup>62</sup> Kosmatka, Steven H.; Kerkhoff, Beatrix; Panarese, William C.; y Tanesi, Jussara: Diseño y Control de Mezclas de Concreto, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, EE.UU. 2004. Cap. 17, Pág. 360, 361.

### **2.7.3. MICROSILICE COMO ADICIÓN MINERAL.**

La industria del concreto premezclado pronto tomó ventaja con la llegada de este nuevo material de cemento, una vez que comenzó a ser suministrada en una forma utilizable y en un precio aceptable.

Aunque se informó de la primera utilización en el concreto de este subproducto de la fabricación de silicio o ferrosilicio en 1952 por un investigador noruego (Bernhardt, 1952), no fue sino hasta la década de 1970 que el humo de sílice se empezó a utilizar como material cementicio suplementario en el concreto en los países escandinavos. No fue sino hasta la década de 1980 que comenzó a ser utilizado de esta manera, en América del Norte.

El uso de materiales cementantes suplementarios, tales como escoria de alto horno, humo de sílice, cenizas volantes y puzolanas naturales, no sólo reduce el costo de producción de cemento, sino que también proporciona respuestas para el problema de la pérdida de asentamiento o revenimiento. Mientras el humo de sílice no es por lo general realmente necesario para resistencias a la compresión bajo los 75 MPa (765 kg/cm<sup>2</sup>), la mayoría de los cementos lo requieren con el fin de alcanzar 100 MPa (1,020 kg/cm<sup>2</sup>). Teniendo en cuenta los materiales disponibles hasta la fecha, es casi imposible de superar el umbral de 100 MPa sin el uso de humo de sílice, aunque este hecho no implica que no pueda utilizarse en proporciones menores en concretos con resistencia a la compresión bajo los 75 MPa.<sup>63</sup>

El Instituto Americano del Concreto (ACI) define el humo de sílice como "un subproducto de la industria del ferrosilicio, es un material altamente puzolánico que se utiliza para mejorar las propiedades mecánicas y la durabilidad del concreto. Se puede añadir directamente al concreto como un ingrediente individual o en una mezcla de cemento Portland y humo de sílice." (ACI 234R).

---

<sup>63</sup> P.-C.Aitcin: High-Performance Concrete, 2004, Cap. 2, "Introduction".

La Norma ASTM C 1240 “Especificaciones de Humo de sílice para uso en mezclas cementicias” define al humo de sílice como “Material puzolánico muy fino, compuesto mayormente de sílice amorfa producida por hornos de arco eléctrico como un subproducto de la producción de silicio elemental o aleaciones de hierro-silicio (se le conoce como humo de sílice densificados o micro sílice)”.

Por lo general, es un polvo de color gris, algo similar al cemento portland o algunas cenizas volantes. Se trata de un material extremadamente fino, con partículas con menos de 1 mm de diámetro y con diámetro promedio de cerca de 0.1  $\mu\text{m}$ , aproximadamente cien veces menor que el promedio de las partículas de cemento. El humo de sílice es un material altamente reactivo que se utiliza en cantidades relativamente pequeñas para mejorar las propiedades del concreto.<sup>64</sup>



**Figura 2.7.4.** *Presentación del Humo de Sílice densificado, con un tamaño de partículas 100 veces menor que una partícula de cemento en promedio.*

---

<sup>64</sup> Asociación de Humo de Sílice : Manual del usuario de Humo de Sílice, Edición 2005, Cap. 1

### **2.7.3.1. PROPIEDADES FÍSICAS Y COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL MICROSÍLICE.**

#### **PROPIEDADES FÍSICAS.<sup>65</sup>**

**Tamaño de las partículas.** Las partículas de humo de sílice son extremadamente pequeñas, con más del 95% de las partículas menores que 1  $\mu\text{m}$  (un micrómetro). El tamaño de las partículas es extremadamente importante tanto para las contribuciones físicas y químicas de humo de sílice en el concreto.

**Color.** El microsíllice varía de color gris claro a oscuro, dando una lechada de color casi negro. Debido a que el  $\text{SiO}_2$  es incoloro, el color es determinado por los componentes no silicios, los cuales incluyen el carbón y óxido de hierro. En general al igual que en otros productos derivados de la calcinación por carbón, cuanto más alto es el contenido de carbón, más oscuro es el color.

**Densidad aparente.** La densidad aparente del humo de sílice tal como se produce, depende del metal que se está elaborando en el horno y de cómo se opera el horno. Ver *Tabla 2.7.1* Propiedades Físicas del Humo de Sílice.

**Peso específico.** La gravedad específica es un número relativo que indica cómo el humo de sílice se compara con agua, que tiene una gravedad específica de 1,00. El humo de sílice tiene una gravedad específica de aproximadamente 2.2, que es algo más ligero que el cemento portland, que tiene una gravedad específica de 3.15. Por lo tanto, la adición de humo de sílice a una mezcla de concreto no "densifica" el concreto en términos de aumento de la densidad del concreto.

**Superficie Específica.** Superficie específica es el área de superficie total de una masa dada de un material. Debido a que las partículas de humo de sílice son muy

---

<sup>65</sup> Asociación de Humo de Sílice: Manual del usuario de Humo de Sílice, Edición 2005, Cap. 2

pequeñas, el área de la superficie es muy grande; sabemos que para la arena se producen aumentos en la demanda de agua ya que las partículas se hacen más pequeñas, lo mismo sucede para el humo de sílice. Este hecho demuestra por qué es necesario el uso de humo de sílice en combinación con un aditivo reductor de agua o un superplastificante.

<b>PROPIEDADES FÍSICAS DEL HUMO DE SILICE</b>		
<b>Tamaño de las partículas (típico):</b>		<1 µm
<b>Densidad aparente</b>	<b>Tal como se produce:</b>	130 a 430 kg / m <sup>3</sup>
	<b>Densificada:</b>	480 a 720 kg / m <sup>3</sup>
<b>Peso específico:</b>		2.2
<b>Superficie específica:</b>		15.000 y 30.000 m <sup>2</sup> / kg

**Tabla 2.7.1.** *Propiedades Físicas del Humo de Sílice. Fuente: Manual del Usuario de Humo de Sílice. Edición 2005.*

### **PROPIEDADES QUÍMICAS.**<sup>66</sup>

**Amorfo.** Este término significa simplemente que el humo de sílice no es un material cristalino. Un material cristalino no se disolverá en el concreto, que debe ocurrir antes de que el material pueda reaccionar.

**Dióxido de silicio (SiO<sub>2</sub>).** Este es el material reactivo en el humo de sílice.

<sup>66</sup> Asociación de Humo de Sílice: Manual del usuario de Humo de Sílice, Cap. 2

**Los oligoelementos.** Puede haber materiales adicionales en el humo de sílice basado en el metal que está siendo producido en la fundición de la que se recuperó el humo. Por lo general, estos materiales no tienen ningún impacto en el rendimiento del humo de sílice en el concreto.

**Composición Química.** El humo de sílice debe cumplir con los requisitos de composición química prescritos en la *Tabla 2.7.2*.

<b>REQUISITOS QUÍMICOS (HUMO DE SÍLICE DENSIFICADO)</b>	
<b>SIO<sub>2</sub>, mín. (%)</b>	85.0
<b>Contenido de Humedad, máx. (%)</b>	3.0
<b>Pérdida por ignición, máx. (%)</b>	6.0

**Tabla 2.7.2.** Requisitos Químicos (Humo de sílice densificado). Fuente: ASTM C 1240 - 10

### **2.7.3.2. EFECTOS DEL MICROSÍLICE EN LAS PROPIEDADES DEL CONCRETO.**

La ventaja particular de la utilización de humo de sílice, como una puzolana muy fina y reactiva para su uso en el concreto de alto desempeño, fue reconocida rápidamente. De hecho, este reconocimiento se produjo hasta el punto de que muchas personas creen ahora que el uso del humo de sílice es la condición indispensable del concreto de alta resistencia. El humo de sílice es realmente un material cementicio suplementario muy ventajoso desde el cual se desarrolla la acción beneficiosa en varios periodos diferentes en la vida del concreto. Mediante

el uso de humo de sílice, se ha demostrado que es posible hacer viables concretos con resistencias a la compresión en el intervalo de 100 a 150 MPa.<sup>67</sup>

Los beneficios observados, en la adición de humo de sílice a la mezcla de concreto, son cambios en la microestructura del concreto. Estos cambios son el resultado de dos procesos diferentes pero igualmente importantes. El primero de ellos es el aspecto físico del humo de sílice y el segundo es su contribución química.

### ***CONTRIBUCIONES FÍSICAS.***

La adición de humo de sílice lleva a millones y millones de partículas muy pequeñas dentro de una mezcla de concreto. Al ser tan pequeñas las partículas, estas actúan como un filler llenando los espacios vacíos en la pasta haciendo que el concreto tenga mayores propiedades adherentes, creando mayor compacidad a la vez que brinda más fluidez a la mezcla.

Al igual que el agregado fino rellena los espacios entre las partículas de agregado grueso, el humo de sílice rellena los espacios entre los granos de cemento. Este fenómeno se conoce con frecuencia como empaquetamiento de las partículas o micro-relleno. Incluso si el humo de sílice no reacciona químicamente, el efecto de micro-relleno sería lograr mejoras significativas en la naturaleza del concreto. Además ayuda a reducir la exudación de agua en la superficie y proporciona reducciones significativas en la permeabilidad del concreto y, al ser menos permeable, incrementa también la durabilidad del mismo.

En cuanto a la resistencia del concreto, se han determinado aumentos significativos desde 20 a 50%, obteniendo mayores beneficios con el uso de súper plastificantes. Al hacer uso de éstos los contenidos normales de microsílíce varían

---

<sup>67</sup> P.-C.Aitcin: High-Performance Concrete, 2004, Cap. 2, "Introduction".

entre el 5% y el 15% del peso del cemento. Si bien es cierto se necesita de aditivos superplastificantes para que la microsílíce reaccione mejor con el cemento, el uso de éstos puede aumentar la tendencia de fisuras por contracción plástica, siendo necesario cubrir la superficie expuesta del concreto evitar pérdida de agua por evaporación.<sup>68</sup>

### **CONTRIBUCIONES QUÍMICAS.**

Debido a su alto contenido de dióxido de silicio amorfo, el humo de sílice es un material puzolánico muy reactivo en el concreto. A medida que el cemento Portland en el concreto comienza a reaccionar químicamente, libera hidróxido de calcio, el humo de sílice reacciona con este hidróxido de calcio para formar un material aglutinante adicional llamados silicato de calcio hidratado, que es muy similar a la del hidrato de silicato de calcio formado a partir del cemento portland. Es en gran parte esta carpeta de aglutinante adicional, que aporta el humo de sílice al concreto, la que contribuye al mejoramiento de las propiedades del concreto en estado endurecido, como por ejemplo, el incremento de la resistencia al ataque de sulfatos y cloruros, se reduce casi hasta eliminar una probable reacción álcali-sílice. Todo esto se traduce en mayor durabilidad en los elementos en los cuales se emplee este material y que estén sometidos a climas extremos tales como hielo-deshielo, etc.<sup>69</sup>

---

<sup>68</sup> Trabajo de Grado: Laínez, Pedro; Martínez, Mauricio; Velásquez, German: "Influencia Del Uso De Microsílíce En Las Propiedades En Estado Fresco Y Endurecido En Concreto De Alta Resistencia". UES 2012.

<sup>69</sup> Asociación de Humo de Sílice: Manual del usuario de Humo de Sílice, Cap. 2

#### **2.7.4. AGREGADOS.**

Si bien los agregados son los componentes inertes del concreto, su influencia en las características del concreto es notable; sin embargo durante varios años su estudio fue descuidado, debido principalmente, al bajo costo comparativo con el costo del cemento, además de los bajos requerimientos de resistencia, en los cuales los agregados no tienen gran influencia, hoy en día se conoce la influencia del agregado en las propiedades del concreto tanto en estado fresco y endurecido. En los concretos de alto desempeño los agregados deben cumplir las normas como la ASTM C 33 “Especificaciones para Agregados de Concreto”, caso contrario se deberá comprobar su eficiencia en el concreto.<sup>70</sup>

##### **2.7.4.1. AGREGADO GRUESO.**

El agregado grueso posee un tamaño de partícula mayor a 4.75mm (malla N° 4), debido a que hay una gran gama de tamaños para los agregados gruesos, cabe recalcar que para la elaboración de concretos de alta resistencia es necesario utilizar solamente un rango de esos valores ya que con ello obtendremos resistencias adecuadas.

Cuanto mayor sea la resistencia a la compresión requerida, el tamaño máximo del agregado grueso debe ser el más pequeño. Mientras que concretos de resistencia a la compresión de 75 MPa (765 kg/cm<sup>2</sup>) se pueden producir fácilmente con un buen agregado grueso de un tamaño máximo de entre 20 y 28 mm, agregados con un tamaño máximo de 10 a 20 mm pueden ser utilizados para producir concretos de resistencia a la compresión de 100 MPa (1,020 kg/cm<sup>2</sup>). Concretos con resistencias a la compresión de más de 125 MPa (1,275 kg/cm<sup>2</sup>) se han

---

<sup>70</sup> Pablo Portugal Barriga: Tecnología del concreto de alto desempeño, Cap. 2.

producido hasta la fecha, con el agregado grueso que tiene un tamaño máximo de entre 10 y 14 mm.<sup>71</sup>

Muchos estudios han demostrado que el tamaño máximo nominal de 9.5 mm a 12.5 mm (3/8 a 1/2 pulg.) resulta en resistencias más elevadas. La forma de agregado grueso también es muy importante desde el punto de vista reológico, durante el proceso de trituración es primordial generar partículas de forma cúbica, en vez de planas y alargadas, ya que estas son débiles y tienden a producir mezclas duras que requieren más agua o aditivo para lograr la trabajabilidad requerida. Por eso cabe recalcar que para concretos de alta resistencia, se considera que el agregado ideal debe ser 100% triturado, de perfil angular y textura rugosa, limpio, duro, resistente, poco absorbente, de preferencia con el menor porcentaje de partículas planas y alargadas.<sup>72</sup>



**Figura 2.7.5.** Partículas de agregado grueso.

<sup>71</sup> Asociación de Humo de Sílice: Manual del usuario de Humo de Sílice, Cap. 2

<sup>72</sup> Trabajo de Grado: Laínez, Pedro; Martínez, Mauricio; Velásquez, German: "Influencia Del Uso De Microsílice En Las Propiedades En Estado Fresco Y Endurecido En Concreto De Alta Resistencia". UES 2012.

#### **2.7.4.2. AGREGADO FINO.**

Los agregados finos comúnmente consisten en arena natural o piedra triturada siendo la mayoría de sus partículas menores que 4.75 mm, generalmente la distribución del tamaño de las partículas de agregado fino ha permanecido dentro de los límites recomendados para concreto normal por ASTM C-33, sin embargo el agregado fino elegido debe de tener módulo de finura en el rango de 2.7 a 3.0.

Debido a que la calidad del agregado fino para elaborar concretos de alta resistencia es muy importante, a continuación se presentan algunas recomendaciones para escoger este tipo de agregado:

- Un agregado fino con un perfil redondeado y una textura suavizada requiere menos agua de mezclado en el concreto, por esta razón es más recomendable el uso de este tipo de agregado cuando se requiere concretos con bajas relaciones agua/cementantes.
- Las arenas con módulos de finura por debajo de 2.5 dan concretos con consistencias densas, que los hace difíciles de compactar, por el contrario las arenas con módulos de finura igual o mayor a 3.0 dan los mejores resultados en cuanto a trabajabilidad y resistencias a la compresión; para concretos de alta resistencia se recomienda usar arenas con un módulo de finura cercano a 3.0.
- Para concretos con relaciones agua/cementantes bajas las cantidades de materiales cementantes son generalmente altas, por lo que, la granulometría del agregado fino no tiene mucha importancia.<sup>73</sup>

---

<sup>73</sup> Trabajo de Grado: Laínez, Pedro; Martínez, Mauricio; Velásquez, German: "Influencia Del Uso De Microsilice En Las Propiedades En Estado Fresco Y Endurecido En Concreto De Alta Resistencia". UES 2012.



*Figura 2.7.6. Partículas de agregado fino proveniente de trituración.*

### **2.7.5. AGUA.**

Prácticamente cualquier agua natural que sea potable y no presente fuerte sabor u olor se la puede usar como agua de mezcla la elaboración del concreto.

El exceso de impurezas en el agua de mezcla no sólo puede afectar el tiempo de fraguado y las resistencia del concreto, sino también puede causar eflorescencias<sup>74</sup>, manchado, corrosión del refuerzo, inestabilidad del volumen y reducción de la durabilidad. Por lo tanto, se pueden establecer ciertos límites opcionales para cloruros, sulfatos, álcalis y sólidos en el agua de mezcla o se

---

<sup>74</sup> Eflorescencia: es la propiedad que poseen algunos minerales y sustancias químicas (hidratos) de reducirse a polvo por si mismos por pérdida de agua de cristalización al ser expuestos al aire.

pueden realizar ensayos adecuados para la determinación del efecto de las impurezas sobre varias propiedades. Algunas impurezas pueden tener un pequeño efecto sobre la resistencia y el tiempo de fraguado y aun afectar la durabilidad y otras propiedades.<sup>75</sup>

En el caso de adicionar humo de sílice a la mezcla, se debe tener presente que cuanto mayor es la cantidad de humo de sílice mayor será la demanda de agua en el concreto, a menos que se use un reductor de agua o un plastificante. En algunas mezclas pobres puede no ocurrir un aumento de la demanda de agua, cuando se empleen pequeñas cantidades (menos del 5%) de humo de sílice.<sup>76</sup>

#### **2.7.6. ADITIVOS.**

Los aditivos son aquellos ingredientes del concreto que, además del cemento portland, del agua y de los agregados, se adicionan a la mezcla inmediatamente antes o durante el mezclado.

Las razones principales para el uso de aditivos son:<sup>77</sup>

- 1. Reducción del costo de la elaboración del concreto.*
- 2. Obtención de ciertas propiedades en el concreto de manera más efectiva que otras.*
- 3. Mantener la calidad del concreto durante las etapas de mezclado, transporte, colado (colocación) y curado en condiciones de clima adverso.*

---

<sup>75</sup> Kosmatka, Steven H.; Kerkhoff, Beatrix; Panarese, William C.; y Tanesi, Jussara: Diseño y Control de Mezclas de Concreto, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, EE.UU. 2004. Cap. 4, Pág. 96

<sup>76</sup> Kosmatka, Steven H.; Kerkhoff, Beatrix; Panarese, William C.; y Tanesi, Jussara: Diseño y Control de Mezclas de Concreto, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, EE.UU. 2004. Cap. 3, Pág. 82

<sup>77</sup> Kosmatka, Steven H.; Kerkhoff, Beatrix; Panarese, William C.; y Tanesi, Jussara: Diseño y Control de Mezclas de Concreto, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, EE.UU. 2004. Cap. 6, Pág.135.

La eficiencia de un aditivo depende de factores como: tipo, marca y cantidad del material cementante; contenido de agua; forma, granulometría y proporción de los agregados; tiempo de mezclado y temperatura del concreto.

#### **2.7.6.1. CLASIFICACIÓN DE LOS ADITIVOS.**

Los aditivos se pueden clasificar según sus funciones, de la siguiente manera:<sup>78</sup>

1. *Aditivos incorporadores de aire (inclusores de aire).*
2. *Aditivos reductores de agua.*
3. *Plastificantes (fluidificantes).*
4. *Aditivos aceleradores de fraguado (acelerantes).*
5. *Aditivos retardadores de fraguado (retardantes).*
6. *Aditivos de control de la hidratación.*
7. *Inhibidores de corrosión.*
8. *Reductores de retracción.*
9. *Inhibidores de reacción álcali-agregado.*
10. *Aditivos colorantes.*
11. *Aditivos diversos, tales como aditivos para mejorar la trabajabilidad (manejabilidad), para mejorar la adherencia, a prueba de humedad, impermeabilizantes, para lechadas, formadores de gas, anti-deslave, espumante y auxiliares de bombeo.*

Según la norma ASTM C-494 “Especificación normalizada para los aditivos químicos para concreto” los aditivos se clasifican según como se muestra en la *Tabla 2.7.3.*

---

<sup>78</sup> Kosmatka, Steven H.; Kerkhoff, Beatrix; Panarese, William C.; y Tanesi, Jussara: Diseño y Control de Mezclas de Concreto, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, EE.UU. 2004. Cap. 6, Pag.135.

<b>CLASIFICACIÓN DE ADITIVOS QUÍMICOS, SEGÚN ASTM C-494</b>	
<b>TIPO DE ADITIVO</b>	<b>CARACTERÍSTICA</b>
<b>Tipo A</b>	Reductor de Agua
<b>Tipo B</b>	Retardante
<b>Tipo C</b>	Acelerante
<b>Tipo D</b>	Reductor de Agua y Retardante
<b>Tipo E</b>	Reductor de Agua y Acelerante
<b>Tipo F</b>	Reductor de Agua de Alto Rango
<b>Tipo G</b>	Reductor de Agua de Alto Rango y Retardante
<b>Tipo S</b>	Aditivos de desempeño específico

**Tabla 2.7.3.** Clasificación de aditivos químicos, según ASTM C-494. Fuente: ASTM C 494

### **2.7.6.2. ADITIVOS SUPERPLASTIFICANTES ASTM C494.**

Según la Norma ASTM C 494 “Especificación normalizada para los aditivos químicos para concreto” un Aditivo reductor de agua de alto rango (Tipo F) es aquel que reduce la cantidad de agua de mezclado requerida para producir un concreto de una consistencia dada en un 12 % o más, para reducir la relación Agua / Cemento, para disminuir el contenido de cemento y para aumentar el revenimiento.

Los aditivos reductores de agua de alto rango se pueden usar para conferir al concreto las mismas propiedades obtenidas por los aditivos reductores de agua normales, pero con mayor eficiencia. Cuando los productos químicos usados como reductores de agua de alto rango se usan para producir un concreto fluido (plástico), normalmente se llaman plastificantes (fluidificantes) o superplastificantes (superfluidificantes, superfluidizantes).

El concreto fluido se define por la ASTM C 1017 como un concreto que tiene un revenimiento mayor que 190 mm (7 1/2 pulg.), pero todavía mantiene sus propiedades cohesivas.

Estos aditivos se adicionan al concreto de revenimiento y relación agua-cemento de bajo a normal, para producir un concreto fluido con alto revenimiento (asentamiento), por ejemplo, en concretos con revenimiento de 75 mm (3 pulg.) el uso de este aditivo permite que se produzca un concreto con revenimiento de 230 mm (9 pulg.). El concreto fluido o plástico es un concreto con consistencia bien fluida, pero trabajable, y que se puede colocar con poca o ninguna vibración o compactación mientras que se lo mantiene prácticamente libre de sangrado (exudación) o segregación excesivas.<sup>79</sup>

---

<sup>79</sup> Kosmatka, Steven H.; Kerkhoff, Beatrix; Panarese, William C.; y Tanesi, Jussara: Diseño y Control de Mezclas de Concreto, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, EE.UU. 2004. Cap. 6, Pag.141.

Los aditivos superplastificantes pueden ser usados para tres funciones principales:<sup>80</sup>

**1. Incrementar la trabajabilidad (Función superplastificante).**

Dada una mezcla de concreto con un asentamiento, relación agua/cemento, y cantidad de cemento definidos, el aditivo se utiliza para incrementar la trabajabilidad de la mezcla, sin cambiar otra característica del diseño de mezcla, dependiendo de la dosis y tipo de aditivo en la prueba de cono de Abrams, el revenimiento puede ser incrementado de manera considerable.

**2. Incrementar la resistencia (Función reductor de agua).**

Dada una mezcla de concreto con un asentamiento y cantidad de cemento definidos, el aditivo se utiliza para encontrar la cantidad de agua + aditivo que producirá el slump deseado; según la dosis y tipo de aditivo, la reducción de agua puede llegar hasta el orden del 40%, con el consiguiente incremento de resistencia, dada la menor relación agua/cemento; esta función es empleada para producir concretos de alta resistencia.

**3. Reducir la cantidad de cemento.**

Dada una mezcla de concreto con una relación agua/cemento, asentamiento y cantidad de cemento definidos, el aditivo se usa para reducir la cantidad de agua, manteniendo constante la relación agua/cemento, con la consiguiente reducción de la cantidad de cemento; esta función ha sido muy empleada, sin embargo no es muy recomendada usarla para reducir al máximo la cantidad de cemento, dada la reducción en la durabilidad del concreto; si bien puede conseguirse ahorros de hasta el 30% del contenido del cemento, en un análisis de los costos puede ser anti-económico por el mayor uso de aditivo.

---

<sup>80</sup> Pablo Portugal Barriga: Tecnología del concreto de alto desempeño, Cap. 2.

Algunas aplicaciones para el concreto fluido son:

1. *colado de concreto en secciones muy delgadas,*
2. *áreas con poco espaciamiento del acero de refuerzo,*
3. *colado bajo el agua,*
4. *concreto bombeado, para reducir la presión de bombeo,*
5. *áreas donde no se pueden usar los métodos convencionales de consolidación*
6. *para la reducción de los costos de manejo.*

### **2.7.6.3. EFECTOS EN LAS PROPIEDADES DEL CONCRETO.**

El aditivo superplastificante funciona de forma electro-química con las partículas del cemento. Al tener contacto con el cemento, el aditivo hace que las partículas de cemento se carguen negativamente, causando que se repelan entre sí, produciendo un movimiento de plasticidad al tratar de polarizarse con una cantidad mínima de agua presente en la mezcla. Este fenómeno causa que se reduzca el agua de mezclado substancialmente. Como resultado se produce un aumento de la resistencia a temprana y última edad. Se puede obtener resistencias muy altas a temprana edad. Esta alta resistencia puede reducir o eliminar en algunos casos el uso de curado a vapor o por calor en operaciones de prefabricado o pre-esforzado.<sup>81</sup>

Es por ello que según la norma ASTM C494 “Especificación normalizada para los aditivos químicos para concreto”, los aditivos químicos que son del tipo A al tipo G, debido a sus características propias de reducción en el agua de mezclado o de fraguado inicial, según el tipo de aditivo aplicado, se debe comparar una mezcla con dicho aditivo con las de un mezcla de concreto de control (mezcla de prueba) que no contenga el aditivo, para observar los resultados de aplicarlo.

---

<sup>81</sup> Hoja Técnica de Aditivo Reductor de Agua de Alto Alcance, MEGAFLOW.

Otras propiedades de los concretos con reductores de agua de alto rango como la contracción por secado, permeabilidad a cloruros, retención de aire y desarrollo de resistencia, son comparables con aquéllas de los concretos sin los aditivos plastificantes de alto rango, pero con la misma relación agua-cemento (reducción del contenido de cemento y de agua). Los concretos con reductores de agua de alto rango pueden tener mayores vacíos de aire incorporado y mayor factor de separación entre los vacíos si son comparados con los concretos normales con aire incluido. Esto generalmente podría indicar una resistencia a congelación-deshielo menor.

#### ***2.7.6.4. REACCIÓN MICROSÍLICE-ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE.***

La microsílíce interactúa con aditivos químicos de varias maneras. El ACI-234R aconseja que sí se utiliza algunos de estos aditivos se debe consultar con el fabricante para obtener información específica sobre las posibles interacciones y realizar mezclas de pruebas para determinar la dosificación apropiada y verificar el rendimiento.

Debido a que la microsílíce tiene un área superficial muy alta, se deberá incrementar la demanda de agua cuando es empleada en el concreto. Los superplastificantes son usualmente recomendados para disminuir la demanda de agua a un nivel apropiado y permitir una adecuada dispersión y apropiado acomodo de las partículas de microsílíce.

La microsílíce se ha utilizado con éxito con la mayoría de los superplastificantes comúnmente disponibles: Policondensado de formaldehído y melanina sulfonatado, Policondensado de formaldehído y naftaleno sulfonatado y Policarboxilatos.

Debido al tamaño pequeño de las partículas de microsilíce, las interacciones entre los superplastificantes y la microsilíce son similares a las interacciones entre el aditivo químico y las partículas de cemento.

El empleo de superplastificante en los concretos con microsilíce expone más área superficial de las partículas para la reacción puzolánica entre el ion calcio y el dióxido de silicio con un gran potencial para incrementar la producción del gel C-S-H (silicato de calcio hidratado), posiblemente debido a la dispersión de partículas de microsilíce aglomeradas.

Rosenberg y Gaidis en 1989 mostraron evidencia física y química de la microsilíce densificada con superplastificante el concreto en el sentido usual del término; si la adherencia pasta-agregado se adhiere para producir un determinado incremento de resistencia y que dicho incremento no aparece tener efecto sobre la reducción de porosidad. La porosidad es principalmente controlada por la relación agua-material cementante, la cual puede ser disminuida por el empleo de superplastificante. Esto permite entender mejor el mecanismo por el cual se mejora las propiedades mecánicas del concreto que contiene tanto microsilíce como superplastificante sean de naturaleza física o puzolánica.<sup>82</sup>

---

<sup>82</sup> Trabajo de Grado: Laínez, Pedro; Martínez, Mauricio; Velásquez, German: "Influencia Del Uso De Microsilíce En Las Propiedades En Estado Fresco Y Endurecido En Concreto De Alta Resistencia". UES 2012.

## **2.8. PROPIEDADES DEL CONCRETO DE ALTA RESISTENCIA.**

### **2.8.1. INTRODUCCIÓN.**

Una forma adecuada de continuar con la redacción de esta investigación no es para hablar del concreto de alta resistencia, sino más bien, aclarar lo que no está dentro de los alcances de este material. Tener la palabra "resistencia" como tal indica sin lugar a dudas un sesgo hacia una propiedad única; sin embargo, el concreto de alta resistencia puede ser un material ventajoso incluyendo algunas otras propiedades, tanto mecánicas como de durabilidad. *Sin embargo, es de vital importancia reconocer que el logro de una alta resistencia por sí sola nunca debería servir como un parámetro absoluto del logro y la satisfacción de otras propiedades importantes en el concreto.*

Parecería lógico que el concreto de alta resistencia fuera más duradero, y por muchos aspectos esto no es tan cierto, la menor permeabilidad que viene junto con una mayor resistencia a menudo no mejora la resistencia del concreto a ciertas exigencias de durabilidad, pero a diferencia de la resistencia, los requisitos de durabilidad no se definen tan fácilmente. De hecho, dependiendo de la manera en la que se consigue mayor resistencia, la durabilidad del hormigón de alta resistencia en realidad podría disminuir. Por ejemplo, si los materiales cementicios no se eligen cuidadosamente, mezclas de mayor resistencia posiblemente también podrían contener una inconveniente alta cantidad de álcalis solubles que podrían promover la formación de grietas si se utilizan agregados que son potencialmente susceptibles a la reactividad alcalina. En los concretos de alta resistencia es importante la identificación de propiedades que no son relevantes que pueden impedir la capacidad de lograr las propiedades verdaderamente importantes.

Es natural que el concreto de cemento hidráulico sería visto como un único material, pero en realidad, el concreto es mucho mejor comprendido cuando se ve como un material compuesto formado por dos materiales fundamentalmente

diferentes: materiales de relleno (es decir, agregados) y el aglutinante (es decir, pasta). El factor más influyente que afecta la resistencia y que a la vez influye en gran medida en la durabilidad del concreto es la relación A/MC.

Los principios aplicables a la dosificación del concreto estructural se deben principalmente a las propiedades mecánicas relativas de pasta y agregados. Por esta razón, las pautas de dosificación que puedan ser consideradas como "mejores prácticas" para un nivel de resistencia podrían ser bastante inapropiadas para concretos de una clase de resistencia diferente. Las propiedades requeridas de los componentes y las proporciones de material podrán variar sutilmente de una relación A/MC a otra. Este principio fundamental se aplica a todo el espectro de la resistencia alcanzable con concreto de cemento hidráulico con el uso de materiales constituyentes no exóticos. Durante esta investigación se hace uso de agregados de peso normal para elaboración de concreto de alta resistencia y prácticas de construcción adecuadas para la producción de resistencias a la compresión con límites descritos en el Capítulo III utilizando materiales convencionales y normas de ensayo en laboratorio apropiadas. Esta investigación no se ocupa del concreto de alta resistencia fabricado con materiales exóticos o métodos de fabricación y desarrollo particulares en la obra.

## **2.8.2. PROPIEDADES GENERALES DEL CONCRETO DE ALTA RESISTENCIA.**

### **2.8.2.1. RELACIÓN AGUA/CEMENTO, RELACIÓN AGUA/MATERIALES CEMENTANTES O RELACIÓN AGUA/CONGLOMERANTE.**

Cuando se presentó por primera vez por Duff Abrams, el significado de la expresión "*relación agua/cemento*" era indiscutible. En el momento, el cemento Portland era esencialmente el único aglutinante utilizado para la fabricación de concreto de cemento hidráulico. A principios del siglo XX, las cenizas volantes todavía eran lanzadas por las chimeneas de plantas de energía, y otros materiales, como el humo de sílice todavía "no existían". La escoria granulada de alto horno y las puzolanas naturales, aunque existían en la práctica no eran la "corriente principal" (mainstream) de la industria.

La distancia que las partículas cementantes están separadas durante el tiempo de endurecimiento establece la porosidad capilar, o "relación gel-espacio vacío" de la pasta de cemento endurecido, y es el único factor importante que influye en la resistencia, y que también influye en gran medida en la durabilidad del concreto. Al grado de que este principio se encuentra en el centro de la relación agua-cemento (A/C) "teóricamente", y rara vez se había manifestado de esta manera, hasta hace unas décadas. Por supuesto, la mayoría de los cursos y estudios en fundamentos del concreto no estarían completos sin la mención de la relación inversa entre la relación A/C y la resistencia, sin embargo, muy a menudo sólo la relación misma se presenta sin una explicación de por qué la relación A/C está tan íntimamente ligada a la resistencia y otras propiedades importantes, como la permeabilidad.

En los últimos años, con el aumento del uso de aglutinantes adicionales, términos tales como *relación agua-cemento más puzolana* (A/(C+P)) y *agua-cemento mas proporción de materiales cementantes* (A/MC) entraron en uso.

La correlación de la resistencia a la compresión y la relación A/C fue descrita por primera vez por Duff Abrams en diciembre de 1918 en una reunión anual de la Asociación del Cemento Portland (PCA). Después de realizar numerosas pruebas en diferentes concretos y morteros en un período de cuatro años en el Instituto de Lewis en Chicago, Abrams publicó sus hallazgos en 1919 en *Diseño de Mezclas de Concreto*. Siempre y cuando el concreto sea de consistencia trabajable (manejable o plástico) Abrams supuso que para determinados materiales la resistencia depende de un solo factor: *la relación agua/cemento*.

Matemáticamente, esta relación se expresa con la siguiente fórmula (Abrams, 1919):

$$S = \frac{A}{B^x}$$

*Donde:*

*S = Es la resistencia a la compresión del concreto.*

*x = Es la relación entre el volumen de agua para el volumen de cemento.*

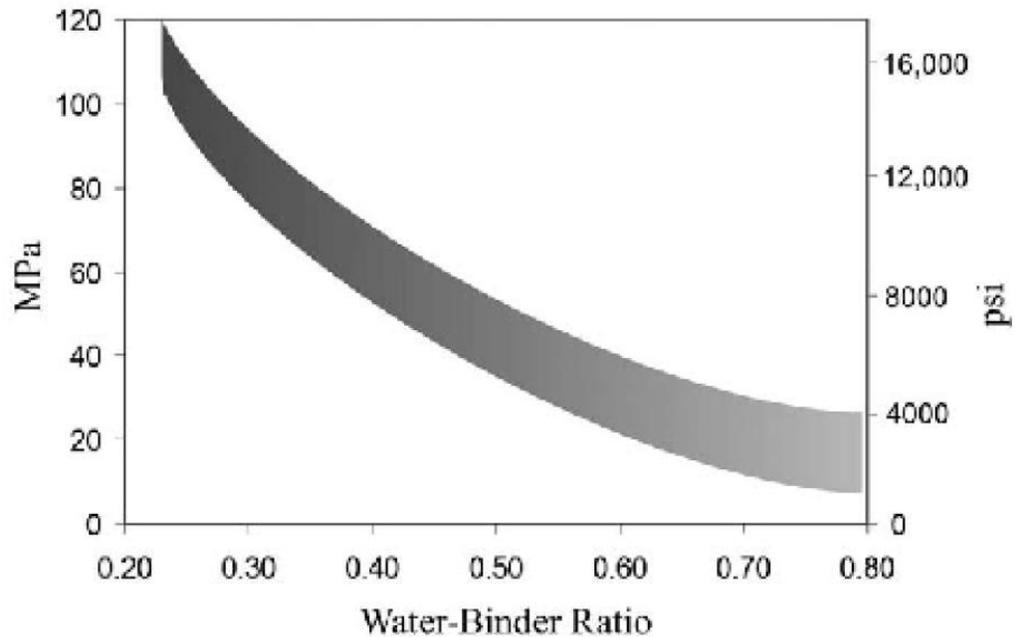
*A y B = Son constantes cuyos valores dependen de la calidad del cemento utilizado, la edad del concreto, las condiciones de curado, etc.*

Las constantes A y B de la correlación entre la relación A/C y la resistencia a la compresión dependen de la calidad del cemento y de varios otros factores indicados. Abrams reconoció que la correlación entre la relación A/C y la resistencia a la compresión era dependiente del tipo de cemento elegido para las aplicaciones en particular. A diferencia de la única curva en la relación A/C versus resistencia a la compresión que se presenta con frecuencia en las guías de dosificación de concreto de los diseñadores de mezclas, en realidad, diferentes cementos producen diferentes resultados curvas. Es evidente que este principio depende de los materiales de fabricación del concreto y de sus componentes principales y por lo general los cementos son muy a menudo vistos únicamente como mercancías. Independientemente de la clase de resistencia del concreto, los componentes no deben ser vistos como simples mercancías, se debe conocer sus

efectos en la matriz de concreto. Cuando se piensa elaborar concreto de alta resistencia, la selección de un cemento apropiado es inicialmente importante.

Dado que la correlación entre la relación A/C y la resistencia a la compresión del concreto de cemento portland no puede ser descrita por una curva única, por lo antes mencionado, parecería apropiado establecer un término armonizado en relación con la masa total de agua y todos los materiales cementantes. En lugar de términos como la relación Agua/Cemento (A/C, W/C), y relación Agua/Cemento más puzolana (A/C+P, W/C+P), y la relación entre Agua/Materiales Cementantes (A/MC, W/CM), en muchas investigaciones actuales se hace un mayor énfasis en el término relación Agua/Conglomerante (W/B). La práctica de incluir puzolanas y otros materiales hidráulicos en el cálculo de la relación agua cemento es una práctica aceptada desde hace mucho tiempo en la industria. El hecho de que existe una correlación entre la relación Agua/Conglomerante y la resistencia a la compresión para un determinado tipo de sistema de unión es lo que importa, no la magnitud de la resistencia correlacionada con cualquier sistema de unión independiente. *Por facilidad de interpretación durante esta investigación se seguirá utilizando la relación A/MC como término genérico al conjunto de los cementantes implementados en las mezclas.*

Como lo demuestra la *Figura 2.8.1*, dado los muchos tipos diferentes y combinaciones factibles de materiales cementantes para su uso en la producción de concreto de cemento hidráulico, lo que parece más apropiado para visualizar la correlación entre la relación Agua/Conglomerante y la Resistencia es en función de la resistencia alcanzada en lugar de una sola curva comúnmente. Una relación similar se sugirió por Aitcin en 1998. Si un material se clasifica como hidráulico o puzolánico cuando se combina primero es irrelevante en comparación con la forma en que los materiales interactúan, y en lo que en última instancia se convierten, y por supuesto la forma en que lo hacen. Es por esta razón que la expresión A/MC se puede utilizar en lugar de las expresiones tradicionales.



**Figura 2.8.1.** Propuesta de Michael A. Caldarone para representar el efecto de resistencia alcanzada con la combinación independiente del tipo de materiales cementantes utilizados para lograrla.

### **2.8.2.2. MATERIALES CEMENTANTES SUPLEMENTARIOS (ADICIONES MINERALES).**

Materiales puzolánicos y materiales hidráulicos distintos del cemento Portland tradicionalmente han sido referidos como *adiciones minerales*. Recientemente, ha habido un cambio en la terminología para referirse a materiales tales como cenizas volantes, humo de sílice, escoria granulada de alto horno de tierra, y puzolanas naturales como "complementario de cemento" o materiales cementantes "complementarios". El origen de la adición mineral probablemente se remonta a los días en que la mayoría de los concretos esencialmente se componían de agregados, cemento Portland y agua. Cualquier otro material introducido en la mezcla se consideraba un "aditivo" o "adición". El término *adición mineral* ha sido de gran utilidad para su clasificación, ya que diferencia a los aditivos que son de naturaleza química con las adiciones que son de naturaleza

mineral. A diferencia de los aditivos químicos, que alteran los minerales presentes en un sistema de unión a través de interacción química, las adiciones minerales contribuyen con óxidos minerales adicionales a la pasta.

### **2.8.2.3. RESISTENCIA.**

En los términos más amplios, la resistencia se refiere a la máxima cantidad de esfuerzos que un material es capaz de resistir hasta que ocurra algún modo predefinido de falla. En la ingeniería, este flujo se puede resolver en cinco categorías fundamentales: compresión uniaxial, tensión uniaxial, flexión, cortante y torsión. En el caso del concreto de cemento hidráulico, las tensiones se resisten más eficientemente bajo compresión uniaxial, por lo tanto, la atención es casi invariable dada la caracterización de las propiedades mecánicas del concreto en términos de resistencia a la compresión. Al ser un material inherentemente frágil, la falla en compresión es relativamente sencilla de definir en la mayor parte de los casos, en especial en laboratorio. Una consecuencia de la fractura interna que se produce cuando un material frágil se carga en compresión es que la falla por lo general se produce de repente en forma de estallido. A medida que la resistencia del concreto aumenta, el módulo de elasticidad estático generalmente aumenta proporcionalmente con la resistencia a la compresión. El concreto de cemento hidráulico se considera que ha "fallado" en compresión cuando ya no es capaz de resistir el esfuerzo debido a la fracturación interna que se ha producido.

La resistencia es una propiedad del material no absoluta, es relativa. La resistencia de un material depende de algo más que la forma en que se distribuyen las tensiones. La resistencia medida del concreto depende de numerosos factores, varios de los cuales son la edad en el momento de la prueba, el curado, tamaño de la muestra, la forma y la tasa de aplicación de carga.

Normalmente, la resistencia a la compresión se expresa en kilogramos por centímetros cuadrados ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ ), megapascales (MPa) o en libras por pulgadas cuadradas ( $\text{lb}/\text{pulg}^2$  o psi) a una edad de 28 días.<sup>83</sup>

Para el diseño de mezclas de concreto, es importante tener claro los conceptos de resistencia que se utilizan en un estudio, las definiciones son:

- ♦ *Resistencia específica.*
- ♦ *Resistencia promedio requerida.*

#### **2.8.2.4. RESISTENCIA ESPECIFICA ( $f'_c$ ).**

La resistencia específica se refiere a un determinado nivel de resistencia a la compresión de concreto elegido por un código de reconocida autoridad en el diseño de estructuras, en las pruebas a una edad con aceptación designada, en condiciones de prueba estándar, y se evalúa de acuerdo con los criterios de aceptación de una ley adoptada como código de diseño, tales como ACI 318-05. Por ejemplo, la resistencia a la compresión especificada ( $f'_c$ ) para una serie de columnas en un edificio alto podría ser 70 MPa (10,000 psi) a los 56 días.

Los términos "resistencia de diseño a la compresión" y "resistencia a la compresión especificada" se utilizan indistintamente. Cuando no se designa la edad de aceptación de resultados en el concreto, esta se adopta como de 28 días.

---

<sup>83</sup> PCA Diseño y Control de Mezclas de Concreto.

### **2.8.2.5. RESISTENCIA PROMEDIO REQUERIDA ( $f'_{cr}$ ).**

La resistencia promedio requerida es la resistencia media a la compresión utilizada como la base para la selección de las proporciones en el concreto necesarias para cumplir con los criterios de aceptación de resistencia de un código de diseño adoptado legalmente, tal como ACI 318-05.

Normalmente, el concreto se ha proporcionado de tal manera que, la media aritmética de los resultados de las pruebas de resistencia a la compresión, ha superado la resistencia especificada  $f'_c$  por una cantidad suficientemente alta para minimizar la frecuencia relativa de los resultados de la prueba por debajo del valor de resistencia específica.

Un valor medio se puede calcular para cualquier conjunto de datos de medición. La cantidad que los valores de las pruebas individuales se desvían de la media se cuantifica normalmente mediante el cálculo de la desviación estándar.

Hay muchos factores que pueden influir en la variabilidad de los resultados de las pruebas, incluidos los materiales individuales, las plantas, los contratistas, los organismos de inspección, y las condiciones ambientales. Todos los factores que afectan a la variabilidad de los puntos fuertes y mediciones de la resistencia se deben considerar al seleccionar proporciones de la mezcla y cuando se establece la desviación estándar aceptable para los resultados de resistencia.

ACI 318 reconoce que algunos resultados de las pruebas probablemente sean menores que la resistencia específica. El enfoque de diseño más común ha sido el de limitar la frecuencia de las pruebas de caer por debajo de la resistencia específica. Si la resistencia medida del concreto es igual o superior a  $f'_{cr}$ , existe una baja probabilidad estadística de que los resultados en el concreto no cumplan con lo especificado si se cumplen los siguientes criterios de aceptación de resistencia:

- a) *El promedio de tres resultados consecutivos de de resistencia debe ser igual o superior a la resistencia especifica ( $f'_c$ ).*
- b) *Ningún ensayo de resistencia individual (promedio de dos cilindros) caerá por debajo de  $f'_c$  por más de 500 psi (3,4 MPa).*

Sin embargo el ACI 318 Sección 4.7.4 se estableció para los concretos con resistencias en el intervalo de 3,000 a 5,000 psi (21 a 34 MPa). Los concretos de alta resistencia continúan ganando resistencias considerables por encima y más allá de los requisitos de diseño con el paso del tiempo, más que los concretos convencionales de menor resistencia.

Mientras que el porcentaje de ganancia de resistencia a la compresión de los concretos de alta resistencia a partir de 7 días a 90 días puede ser igual o inferior a concretos en rangos de menor resistencia, el orden de magnitud de ganancia de resistencia es mucho más alto. Por ejemplo, una mezcla que tiene un promedio 2,500 psi (17.2 MPa) en 7 días puede promediar 4,200 psi (29 MPa) en 90 días. Habría ganado resistencia igual a 68 por ciento de la resistencia de 7 días, o 1,700 psi (11.7 MPa) a la edad de 90 días. Una mezcla promedio de 7300 psi (50.3 MPa) en 7 días podrían rondar los 10,000 psi (69 MPa) en 90 días. Eso sería un aumento de sólo el 37 por ciento, pero habría ganado 2,700 psi (18.6 MPa).

### **2.8.3. PROPIEDADES DEL CONCRETO EN ESTADO FRESCO.**

#### **2.8.3.1. INTRODUCCIÓN.**

El concreto en estado fresco es realmente una suspensión concentrada de partículas sólidas (agregados) en un líquido viscoso (pasta de cemento), la pasta de cemento a su vez no es un fluido homogéneo y está compuesta de partículas (granos de cemento) en un líquido (agua). Por lo tanto el concreto en estado fresco en una escala macroscópica fluye como un líquido.

Siguiendo esta filosofía, se debe lograr un concreto que en estado fresco posea un bajo grado de fricción entre sus partículas, adecuado para darle una fluidez elevada. Sin embargo, también debe estar dotado de la viscosidad necesaria para asegurar la cohesión y evitar la segregación. Por tanto, es la reología del concreto en el estado fresco la que determina sus cualidades. La fluidez elevada y la viscosidad adecuada se alcanzan utilizando aditivos superfluidificantes, adiciones de elevada finura y en algunos casos agentes que aumentan la viscosidad.<sup>84</sup>

Es importante controlar las propiedades del concreto de alta resistencia en estado fresco por dos razones principales. En primer lugar concreto de alta resistencia debe ser colocado con la misma facilidad que el concreto normal, en segundo lugar el concreto de alta resistencia cuyas propiedades frescas se encuentran bajo el control total probablemente produzcan concretos endurecido cuyas propiedades también sean bien controladas. Este segundo punto es cierto para el concreto normal, pero como el margen de error es mucho menor cuando se elabora concreto de alta resistencia debe ser prestada una mayor atención a las propiedades del concreto fresco. Las propiedades del concreto de alta resistencia fresco tienen que ser controladas, tanto en laboratorio como en elaboración en la

---

<sup>84</sup> Referencia: Gallo, E. (Instituto de Tecnología, San Martín, Buenos Aires; Revuelta, D. (Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja, Madrid, España), "Verificación de las propiedades reológicas del hormigón sin vibrado", en Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio, vol. 43 (2)-2004.

planta de concreto justo después del mezclado y en el lugar de trabajo antes de la colocación. En la planta deben ser controlados: su peso volumétrico, el revenimiento, contenido de aire y la temperatura. Mientras que en la obra únicamente se deben verificar su revenimiento y contenido de aire (cuando es concreto con aire incorporado) periódicamente.

El control de las propiedades del concreto fresco en la planta de procesamiento por lotes evita problemas durante la entrega y la colocación. La reología de las mezclas de baja relación A/MC es muy sensible a cualquier cambio en la calidad de los materiales, la elaboración del concreto y la temperatura. En esta etapa, los principales problemas que se enfrentan son:

- *Una pérdida dramática e irreversible de caída (poco revenimiento).*
- *Un grave retraso de la mezcla que demora gravemente desarrollo de la resistencia.*
- *Una segregación dramática en mezclas muy fluidas.*

El problema de la pérdida de revenimiento se debe evitar cuando se adopta un programa riguroso de control de calidad para los diferentes materiales utilizados para hacer concreto de alta resistencia, cuando se recibe en las obras y cuando el proceso de dosificación en planta es controlado. Sin embargo, la pérdida de asentamiento puede surgir y cuando lo hace, es muy importante tener en cuenta que se debe proceder lo más rápido posible, para identificar las causas del problema y tomar las medidas adecuadas para corregirlo.

Un extenso retraso de la mezcla puede tener lugar cuando la dosis de superplastificante empleado es muy alta o cuando se utiliza un agente que retarda el fraguado para resolver el problema de la pérdida de revenimiento. Un amplio retraso en la mezcla puede ser costoso, especialmente en una fábrica de elementos prefabricados cuando se retrasa el desencofrado o el corte de los tendones (cables) pretensados. Retardar el fraguado normal y el posterior

endurecimiento del concreto también puede tener consecuencias dramáticas cuando se utilizan métodos comunes de encofrados deslizantes ya que en estos casos, cualquier retraso en el endurecimiento del concreto sin duda se traduce en una desaceleración de la velocidad de construcción.

Cuando, por cualquier razón, ocurra un error en la dosificación del superplastificante o en la cantidad de agua de mezclado se puede producir segregación en el concreto. La pasta de cemento se vuelve demasiado fluida y ya no puede sostener los agregados en suspensión. Desafortunadamente, a veces es demasiado difícil evitar que algunas mezclas puedan segregarse. En casos comunes, por algún error el conductor de los camiones de entrega en la obra agrega agua de lavado en el mezclador, algo que causa una severa segregación.

Es muy importante medir sistemáticamente las propiedades del concreto de alta resistencia en estado fresco justo después del mezclado. Esta es la forma más fácil de averiguar si algo está mal durante el proceso de elaboración y permite tomar una acción correctiva rápida. Si las propiedades del concreto fresco cambian, no siempre es fácil determinar si el problema viene de los materiales (cambios en su calidad, en el contenido de agua de los agregados, etc), de la dosificación (formulación inadecuada, errores en la cantidad de cemento, agregados equivocadas, secuencia equivocada), de los equipos utilizados o de la forma de dispersión de las adiciones y aditivos, etc. Pero lo cierto es que algo ha ido mal en alguna parte. Como el concreto de alta resistencia es más sensible a las variaciones en la mezcla debido a que los materiales están trabajando cerca de, o en, su máximo potencial, cualquier desviación de las características optimizadas de los materiales y de su mezcla puede modificar fuertemente las propiedades del concreto tanto en estado fresco como endurecido.

Es fácil, económico y no requiere mucho tiempo controlar las propiedades del concreto en estado fresco; y en el caso del concreto de alta resistencia es igual, ya que las propiedades se miden en la misma forma que en el concreto

convencional. Estas propiedades se miden utilizando las pruebas sencillas que ya se emplean en la industria de la construcción. No requieren ningún equipo sofisticado o caro, y ya que son fáciles rápidas de efectuar. ¿Por qué no tomar ventaja de la situación? Por otra parte, si estos resultados se tratan estadísticamente proporcionan información útil acerca de la eficacia de los materiales y de la operación de mezclado. Sin embargo, con demasiada frecuencia, estas pruebas no se realizan de forma sistemática, ya que parecen ser tan simples que muchas personas creen que no pueden proporcionar información útil. Esta actitud es lamentable, porque los productores de concreto a menudo no se aprovechan de estas herramientas de bajo costo que les dan una alerta temprana de problemas, o una especial satisfacción al ver que su concreto de alta resistencia se produce de manera uniforme.

A continuación se examinarán las ventajas del control del peso volumétrico, el revenimiento y el contenido de aire. También se discute el retraso del concreto que puede ocurrir durante el endurecimiento de algunos concretos de alta resistencia.

### **2.8.3.2. INDICADORES DE CALIDAD DEL CONCRETO EMPLEADOS COMUNMENTE.**

#### **2.8.3.2.1. PESO VOLUMÉTRICO (MASA UNITARIA).**

La medición de la masa unitaria o peso volumétrico no presenta ningún problema. Esta sencilla prueba debe llevarse a cabo en el laboratorio o en la planta de mezcla, porque generalmente es poco importante evaluarlo en el sitio de ejecución de las obras, donde es más importante medir el contenido de aire en el caso de los concretos de alta resistencia con aire incorporado.

Cabe señalar que el peso volumétrico del concreto de alta resistencia en estado fresco es relativamente mayor que el del concreto convencional hecho de los mismos materiales. El concreto de alta resistencia contiene más cemento y menos agua. La unidad de masa de un concreto de alta resistencia sin aire incorporado es a menudo cercano a los  $2,500 \text{ kg/m}^3$  y es cerca de  $2,400 \text{ kg/m}^3$  para una mezcla con aire incorporado, lo que representa aproximadamente un incremento de 50 a  $100 \text{ kg/m}^3$  en peso para el mismo volumen a partir de los valores habituales obtenidos para el concreto convencional.

La realización sistemática de esta prueba evita realizar mediciones innecesarias frecuentes del contenido de aire. Si el peso volumétrico es constante, el contenido de aire debe ser constante: una variación del 1% en los resultados de contenido de aire causa una diferencia de  $25 \text{ kg/m}^3$  en el peso volumétrico, lo que se nota en la medición peso volumétrico. Si de repente ocurren cambios importantes en la unidad de masa, es importante comprobar el contenido de aire con el fin de ver si es la cantidad de aire atrapado o arrastrado que ha variado. Si el contenido de aire sigue siendo el mismo, la disminución del peso volumétrico es debido a un cambio en las proporciones de la mezcla o a un error en la medición del peso volumétrico.

Usada por sí sola la medición del peso volumétrico no es demasiado instructiva o importante, pero si se utiliza en conjunción con las otras mediciones de las propiedades del concreto fresco se puede confirmar si se han producido cambios en el concreto fresco y se convierte en una herramienta que ayuda a hacer un diagnóstico rápido del problema.

#### **2.8.3.2.2. REVENIMIENTO, ASENTAMIENTO O CAIDA.**

##### ***MEDICIÓN.***

A pesar del hecho de que esta sencilla prueba es criticada regularmente con respecto a su valor científico y tecnológico<sup>85</sup>, no va a ser mañana, cuando ya no se utilice para el control de la trabajabilidad del concreto de alta resistencia.

Hay muchos factores que influyen en la caída del concreto, pero desde un punto de vista reológico el revenimiento depende esencialmente de factores relacionados con la estructura del agregado y de la cantidad y la fluidez de la pasta utilizada durante la mezcla del concreto.

La medición de la caída del concreto normal es fácil, porque después de unos pocos segundos se detiene el colapso del cono de concreto y mantiene una altura estable que es fácil de medir. La medición del revenimiento del concreto de alta resistencia no es tan fácil: el colapso del cono de concreto es progresivo y a veces es difícil decidir cuándo medir la altura del cono de concreto colapsado.

Un enfoque más fundamental ha sido tomado por algunos investigadores para estudiar la complejidad de las propiedades reológicas del concreto de alta resistencia.<sup>86</sup> Estos enfoques científicos ya han producido algunos resultados

---

<sup>85</sup> Punkki, Golaszewski y Gjörv, 1996.

<sup>86</sup> Hu, de Larrard y Gjörv, 1995; Punkki, Golaszewski y Gjörv, 1996.

interesantes para resolver el problema, pero las técnicas que se utilizan son bastante sofisticadas.<sup>87</sup> Funcionan bien en el laboratorio, pero ninguno de ellos ha dado lugar a una prueba simple que se puede utilizar en el campo para reemplazar el ensayo de revenimiento. Como para cualquier sistema viscoso, estos estudios reológicos se basan en la medición de la resistencia al esfuerzo cortante que se desarrolla dentro del concreto fresco. A pesar de que estos estudios probablemente no tendrán un impacto directo en la medición del revenimiento en el sector en un futuro próximo, son muy importantes desde el punto de vista científico y práctico, ya que proporcionan una herramienta poderosa para la comprensión del problema de compatibilidad entre el cemento y el superplastificante y sin duda ayudará a los fabricantes de cemento, adiciones y aditivos para desarrollar materiales con mejores propiedades reológicas a muy bajas relaciones A/MC. Todo esto se puede hacer con la reología de la pasta de cemento. Sin embargo, los efectos de los agregados gruesos y finos son importantes en la evaluación del concreto, y los problemas de la estabilidad en el bombeo y en los encofrados deslizantes son posibles comprenderlos con la reología del concreto.

### ***FACTORES QUE INFLUYEN EN EL REVENIMIENTO.***

Hay muchos factores que afectan la consistencia caída del concreto, pero desde un punto de vista reológico se pueden clasificar en dos grandes categorías: los relacionados con la estructura de los agregados y los relacionados con el comportamiento reológico de la pasta de cemento en sí.

El importe total de los áridos presentes en la mezcla, las proporciones relativas de los agregados gruesos y finos, sus respectivas granulometrías y las formas de las partículas del agregado son los principales factores relacionados con la estructura

---

<sup>87</sup> Hu, 1996.

del agregado que afectan al asentamiento del concreto, ya sean del tipo convencional o de alta resistencia.

El comportamiento reológico de la pasta de cemento en el concreto convencional se relaciona esencialmente con la relación A/MC. Cuanto mayor sea esta relación, las partículas finas son más diluidas en agua, de modo físico que el agua juega un papel clave en la reología de la pasta de cemento hidratado cuando la relación A/MC es alta, por ejemplo por encima de A/MC 0.50. A una proporción tan alta de A/MC, las partículas de materiales cementantes (adiciones cementantes) y cemento están tan separados unos de otros dentro de la pasta que su interacción durante la hidratación no afecta en particular el asentamiento del hormigón. La cantidad de aire incorporado también afecta drásticamente a la caída de un hormigón normal, y esto está bien documentado en diversa literatura.<sup>88</sup>

Incluso cuando se utiliza un reductor de agua en el concreto convencional, su dosis es relativamente baja (alrededor de 1 l/m<sup>3</sup>) y su efecto en la reducción de agua necesaria para obtener determinada caída se limita generalmente entre un 8 a un 10%.

El efecto fluidificante del concreto convencional también está bien documentado en literatura y algunas compañías productoras de aditivos han promovido, de manera optimista, el uso de una regla de oro de sus productos diciendo que la adición de tantos litros de superplastificante en un metro cúbico de concreto de un revenimiento dado puede aumentar la caída en tantos milímetros.

A medida que la relación agua/aglutinante disminuye y que aumenta la dosis de superplastificante, la situación se vuelve más y más compleja desde un punto de vista reológico, porque el agua por sí misma ya no juega un papel clave en la reología de la pasta de cemento. El cemento y las partículas de material cementante interactúan físicamente, y esto se ve afectado por su forma, su

---

<sup>88</sup> ACI 211, 1993; Mehta y Monteiro, 1993; Neville, 1995.

distribución del tamaño del grano y su reactividad química.<sup>89</sup> Por otra parte, el superplastificante usado para desflocular las partículas de cemento interactúa con las partículas de cemento hidratantes de modo que ahora es un conjunto muy complejo de factores que influyen en la reología y la caída del concreto de alta resistencia.

Por supuesto, cuanto menor sea la relación agua/cemento o agua/ligante, se vuelve más compleja la situación, por lo que los términos tales como "pegajoso" y "tixotrópico" se utiliza para describir la consistencia de algunos concretos de alta resistencia.

### ***MEJORA DE LA REOLOGÍA DEL CONCRETO FRESCO.***

A pesar del hecho de que hasta hace poco tiempo la incorporación de aire por lo general se ha evitado en los concretos de alto desempeño y alta resistencia, ya que en la mayoría de sus primeras aplicaciones en los países con climas extremos los fenómenos de congelación y descongelación no eran un problema, es la experiencia la que ha demostrado a muchos investigadores, que como en el concreto convencional, incorporar aire al concreto mejora drásticamente la su reología en estado fresco.<sup>90</sup> Por supuesto, se pierde cierta resistencia a causa de la incorporación de aire, pero, utilizando agentes incorporadores de aire muy eficaces, es posible obtener una gran cantidad de burbujas muy finas que ocupan no más de 4 a 4.5% en volumen del concreto. Estas burbujas no sólo mejoran la resistencia a la congelación y descongelación del concreto de alto desempeño o de alta resistencia según la aplicación, sino que también mejoran en gran medida la trabajabilidad del concreto en estado fresco. En un caso particular, Pierre-Claude Aïtcin, fue capaz de elaborar un concreto con una resistencia a la compresión de 100 MPa a 91 días con un contenido de aire de 4.5%. El factor de

---

<sup>89</sup> Aïtcin, Jolicoeur y MacGregor, 1994; Huynh, 1996.

<sup>90</sup> Lessard, 1994.

separación de burbuja fue de  $200\ \mu\text{m}$ . Es posible según opiniones de investigadores del concreto que la incorporación de una pequeña cantidad de aire será utilizada en el futuro, en algunos casos para mejorar el comportamiento reológico de las mezclas con baja relación A/MC.

Recientemente, algunos investigadores japoneses y canadienses han propuesto el uso de un agente coloidal en concreto de alta resistencia con el fin de desarrollar con éxito un concreto autonivelante o autocompactante que se puede colocar fácilmente en áreas congestionadas con altas cantidades de refuerzo.<sup>91</sup>

### ***PÉRDIDA DE REVENIMIENTO.***

Hay diferentes formas prácticas para resolver el problema de pérdida de asentamiento o revenimiento. Estos en su mayoría consisten en el uso de materiales cementantes complementarios por una sustitución parcial del cemento. Este punto no está bien documentado desde el punto de vista teórico, la mayoría de los autores dicen que las partículas de materiales cementantes complementarios son menos reactivas en la mezcla fresca que las partículas de cemento, su efecto reológico se limita únicamente a su aspecto físico.

Desde un punto de vista práctico, el uso de materiales cementantes complementarios funciona bien para resolver el gran problema de la pérdida de asentamiento, estas adiciones se han utilizado con frecuencia desde las primeras elaboraciones de concreto de alta resistencia en la década de 1970. Ahora bien, las únicas limitaciones para el uso de materiales cementicios complementarios como un reemplazo parcial del cemento en el concreto es por requisitos de desarrollo de resistencia a edades tempranas y de durabilidad en condiciones de congelación y descongelación. No está bien establecido si estas mezclas son duraderas a los efectos de congelación y descongelación, o incluso si las pruebas

---

<sup>91</sup> Khayat, Gerwick y Hester , 1993; Khayat, 1996;. Khayat, Manai y Trudel, 1997. El Profesor K. Khayat en la Université de Sherbrooke desarrollo un concreto autonivelante y reforzado con fibras de 85 MPa que contiene el 0,6% de fibras de acero.

que se utilizan para decidir si estas mezclas son duraderas son las adecuadas. Se espera que estos puntos se aclaren en un futuro próximo. En tales casos, se podría utilizar un poco de aire incorporado para resolver algunos problemas; no afectaría desde un punto de vista reológico, a pesar de que resultaría en la pérdida de un poco de resistencia.

#### **2.8.3.2.3. CONTENIDO DE AIRE.**

##### **CONCRETO DE ALTA RESISTENCIA SIN AIRE INCORPORADO.**

No es imprescindible medir repetidamente el contenido de aire de un concreto de alta resistencia sin aire incorporado, pero se recomienda la medición de vez en cuando como una verificación relacionada a la vez con la medición de su peso volumétrico. Por lo general, los concretos de alta resistencia pueden atrapar de 1 a 3% de aire debido a que las mezclas son por lo general más pegajosas que el concreto convencional. Cuanto menor sea la relación A/MC, el concreto de alta resistencia se vuelve más pegajoso. Sin embargo, con algunas combinaciones de cemento con superplastificante compatibles, es posible hacer concretos con una relación A/MC de 0.30 donde la cantidad de aire atrapado es entre 1 y 1.5% cuando la fluidez de la mezcla se ajusta cuidadosamente. Sin embargo, cuando la relación A/MC disminuye por debajo de 0.30 se hace difícil reducir la cantidad de aire atrapado por debajo de 1.5 a 2%. El estudio de secciones esmeriladas de concreto de alta resistencia endurecido muestra que en tales casos las burbujas de aire son grandes, con un diámetro en el rango de milímetros, lo que los hace absolutamente inadecuados para proporcionar cualquier protección contra requisitos de durabilidad en condiciones de congelación y descongelación.

Durante la mezcla de algunos concretos de alta resistencia se ha observado un extraño fenómeno después de una sobredosis de superplastificante cuando a demás se utiliza una cantidad relativamente alta de agua de mezclado. Los

concretos de alta resistencia se hacen muy fluidos y tienden a atrapar una gran cantidad de burbujas de aire, dando lugar a lo que se ha llamado "concreto burbujeante" o "el efecto champagne".<sup>92</sup> Muchas burbujas de aire grandes tienden a aparecer en el concreto, pero son generadas con la misma facilidad que desaparecen durante la mezcla. Cuando en las obras se coloca este tipo de mezcla en las formaletas el concreto es propenso a una segregación grave y su fraguado es fuertemente retardado. Después del endurecimiento, uno se encuentra con una mezcla que contiene un gran volumen de huecos muy gruesos, que disminuyen drásticamente la resistencia a la compresión. Como es muy difícil de corregir esta situación que generalmente se produce en la planta de concreto justo después del mezclado, es mejor desalojar la carga de concreto y verificar cuidadosamente lo que salió mal con el superplastificante o la dosis de agua. Cuando esto ocurre en el sitio de trabajo, después de una redosificación excesiva de superplastificante para incrementar el revenimiento, la situación es más crítica debido a que no se tiene el tiempo necesario para esperar otra carga de concreto, el decidir utilizar este concreto puede causar graves retrasos en las edades de diseño de las mezclas.

Cuando la resistencia a la compresión es fundamental en el concreto de alta resistencia sin el uso de incorporadores de aire, es importante mantener la cantidad de aire atrapado tan bajo como sea posible con el fin de evitar cualquier pérdida de resistencia. A veces es tan difícil obtener la resistencia última y por ello cualquier método que puede disminuir la cantidad de aire atrapado debe ser considerado y explotado en todo su potencial.

---

<sup>92</sup> Aitcin, Jolicoeur y MacGregor, 1994.

## **CONCRETO DE ALTA RESISTENCIA CON AIRE INCORPORADO.**

A pesar del hecho de que algunos investigadores creen que no es necesario hacer uso de incorporadores de aire para mejorar la durabilidad en el concreto de alta resistencia y alto desempeño para resistir requisitos de congelación y descongelación; el uso de concretos de alto desempeño con aire incorporado se recomienda, especialmente en el caso de concretos que van a ser expuestos a la congelación y descongelación. Sin embargo, en tales casos, el factor de separación de las partículas debe asegurar la durabilidad a la congelación-descongelación de mejor manera que en los concretos convencionales.

A pesar del hecho de que algunos investigadores y productores de concreto aseguran que es difícil incorporar una cantidad exacta de aire para conseguir un sistema de burbuja con el factor de espaciado correcto en el caso del concreto de alta resistencia, se ha demostrado muchas veces que existen y ya están en el mercado incorporadores de aire que se desempeñan bien en las mezclas en ese sentido y en muy bajas proporciones A/MC.<sup>93</sup>

Por lo general, la dosificación de un agente incorporador de aire tiene que ser aumentado de manera significativa, pero es posible incorporar de un 4 a 5% de aire en un concreto de alta resistencia y aún así tener un factor de separación de burbuja más pequeño que  $200 \mu m$ .<sup>94</sup> Como se señaló anteriormente, se debe recordar que el aire incorporado mejora drásticamente la trabajabilidad del concreto de alta resistencia, y en muchos casos que se tiene del 3 al 4% de aire atrapado y arrastrado se facilita la colocación y el acabado del concreto de alta resistencia tanto que merece la pena perder algunos MPa de resistencia. Por lo tanto, si la resistencia no es un tema crítico y complicado, comúnmente en concretos que requieren alcanzar resistencias de 50 a 75 MPa, podría intentarse

---

<sup>93</sup> Hoff y Elimov, 1995; Bickley, 1996.

<sup>94</sup> Bickley, 1996.

la incorporación de una pequeña cantidad de aire si la mezcla a la que se busca colocar aire incorporado tiene características reológicas pobres.

Por encima de 100 MPa, no se recomienda realizar concretos con aire incorporado en absoluto.

#### **2.8.3.2.4. RETRASO DEL FRAGUADO.**

Un efecto secundario de una alta dosis de superplastificante es un definitivo retraso del fraguado del concreto. Cuanto mayor sea la resistencia a la compresión especificada, y cuanto mayor sea la dosis de superplastificante muy a menudo más largo será el retraso del fraguado. Se ha experimentado un retraso de más o menos 24 horas de manera voluntaria en el campo, sin ningún daño en particular en la resistencia a la compresión final del concreto. Sin embargo, se debe reconocer que esta no es una situación cómoda cuando sucede involuntariamente o de forma inesperada.<sup>95</sup>

Hay algunos casos en los que no es posible tolerar tal situación, por ejemplo en el caso de elementos pretensados, encofrados deslizantes o cuando las formaletas trepantes (jump form) tienen que ser elevadas rápidamente. En una planta de elaboración de elementos prefabricados esta situación es menos dramática porque los elementos prefabricados generalmente se calientan para acelerar la remoción de la formaleta y el corte de los tendones.

Se ha demostrado (y existe literatura sobre esto) que es posible disminuir el retraso del concreto de alta resistencia un poco mediante el uso de un superplastificante de melamina en lugar de uno de naftaleno.

---

<sup>95</sup> Aitcin, 1984.

Si la resistencia inicial de un concreto de alta resistencia en particular es de preocupación, primero debe determinarse si el hormigón en particular puede ser calentado después de colado, y segundo, si es posible una disminución de la dosis de superplastificante mediante el aumento simultáneo del contenido de cemento y agua para mantener la misma relación A/MC. Por último, se debe considerar el uso de un acelerador de fraguado.

También hay situaciones en las que es absolutamente necesario retardar el fraguado del concreto de alta resistencia que muestra pérdida rápida de revenimiento. En tal caso, si no es posible utilizar cualquier adición en el cemento que pueda ayudar a resolver el problema, al menos parcialmente, se debe utilizar un aditivo que retarde el fraguado.<sup>96</sup> La dosis de este agente retardante tiene que ser ajustada con cuidado, teniendo en cuenta la reactividad del cemento, su finura, la temperatura externa, el transporte y el tiempo de colado (colocación), etc. En tal caso, uno no debe ser sorprendido si de vez en cuando, el retraso que se obtiene a través del uso de un aditivo que retarda el fraguado se sale de control.

#### **2.8.3.2.5. OBSERVACIONES FINALES.**

Es importante medir regularmente las propiedades del concreto de alta resistencia fresco porque un concreto que tiene propiedades en estado fresco constantes es probable que tenga propiedades en estado endurecido constantes. Cada una de las propiedades medidas no da mucha información en sí, sino el conjunto de valores que se obtienen pueden convertirse en herramientas muy útiles.

El ensayo de revenimiento no es definitivamente la manera más adecuada para evaluar la trabajabilidad del concreto de alta resistencia. En esencia, se utiliza para controlar la uniformidad del suministro de concreto. Como el concreto de alta

---

<sup>96</sup> Lessard, 1993.

resistencia es complicado reológicamente, la medición del revenimiento no es suficiente para evaluar la trabajabilidad en el campo, para esto hay que tomar en cuenta la facilidad con la que los concretos de alta resistencia pueden ser colocados y acabados.

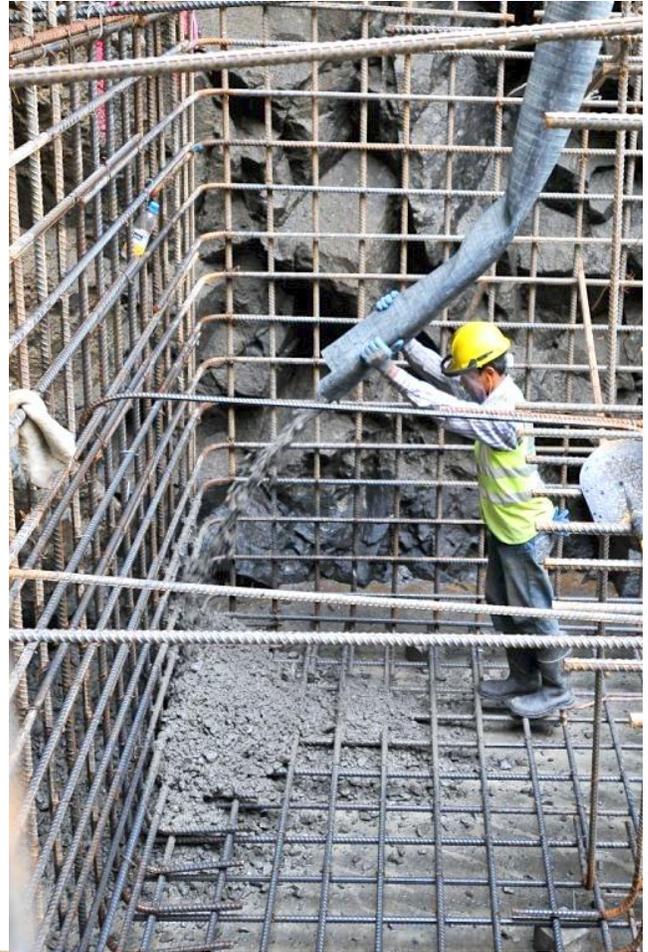
La incorporación controlada de aire mejora significativamente la trabajabilidad y facilita el acabado del concreto de alta resistencia, logra que el concreto de alta resistencia con una baja relación A/MC sea menos pegajoso y más fácil de colocar. La disminución de la resistencia a la compresión que acompaña la incorporación de aire en el concreto se puede recuperar fácilmente mediante la ligera reducción de la relación A/MC. Es posible que en el futuro algunos concretos de alta resistencia van a contener una pequeña cantidad de aire atrapado, no para mejorar la durabilidad en condiciones de congelación-descongelación, sino para mejorar la trabajabilidad en conjunto.

La pérdida de asentamiento no siempre es un problema fácil de resolver, ya que puede ser consecuencia de muchos factores. La adición de un retardador puede ser necesaria. Por otro lado, si hay una sobredosificación accidental del agua y/o superplastificante, la mezcla puede llegar a ser demasiado fluida y la segregación severa puede conseguir que sea difícil recuperar una mezcla de este tipo.

Cuando un concreto de alta resistencia tiene que recibir una dosis adicional de superplastificante en el campo para aumentar su revenimiento, es importante evitar la sobredosificación con el fin de evitar también el efecto de burbujeo del concreto de alta resistencia ya que no será posible de recuperar (sus propiedades normales).

Es recomendable que la temperatura ideal de mezcla fresca del concreto de alta resistencia esté entre 15 y 20 °C. Por debajo de unos 10 °C de temperatura ambiente, el concreto de alta resistencia se puede calentar para acelerar su fraguado, y por encima de unos 25 °C de temperatura ambiente, debe ser

enfriado o fuertemente retardado para evitar problemas de pérdida de asentamiento. En medio de estos 10 y 25 °C de temperatura ambiente, se trata de una cuestión de criterio el decidir si la temperatura del concreto de alta resistencia tiene que ser ligeramente mayor o menor.



**Figura 2.8.2.** Concreto bombeado en espacios confinados donde se requiere unas adecuadas propiedades en estado fresco del concreto, en especial en su consistencia.



#### **2.8.4. PROPIEDADES DEL CONCRETO EN ESTADO ENDURECIDO.**

Hay dos diferencias fundamentales entre el concreto de resistencia convencional y el concreto de alta resistencia en la tecnología del concreto. La primera es el cambio en la resistencia relativa y las propiedades de rigidez entre pasta y los agregados. En el extremo inferior del espectro de resistencia, las partículas de los agregados están unidas por un material más débil, más poroso. En el extremo superior, las partículas de agregado están ligadas por un material denso fuerte. Pasar de la resistencia convencional a la alta resistencia en la tecnología del concreto equivale a convertir una material compuesto desde adentro hacia afuera. La segunda se centra en la distinción de las propiedades de la zona de transición interfacial. La adherencia y el nivel de rigidez y compatibilidad entre el aglutinante y el agregado son de importancia crítica en el concreto de alta resistencia.

Las más importantes propiedades mecánicas de concreto de alta resistencia elaborado con agregados de peso normal por lo general incluyen resistencia a la compresión, módulo de elasticidad, la fluencia y la contracción. Dependiendo del tipo de concreto o estructura, el módulo de ruptura, la resistencia a tracción indirecta y la relación de Poisson también puede ser parámetros de diseño esenciales. En aplicaciones en las que los cambios de volumen y las grietas pueden dañar la vida útil, las propiedades que logren una mayor durabilidad deben ser examinadas. Otras propiedades importantes relacionadas con la durabilidad a menudo incluyen la resistencia a reacciones álcali-agregado, al ataque de sulfatos, a la corrosión de los metales incorporados y a la durabilidad en condiciones de congelación-descongelación.

#### **2.8.4.1. PROPIEDADES MECÁNICAS.**

Al ser compuesto por dos materiales; la pasta y los agregados, es comprensible que las propiedades mecánicas del concreto son altamente dependientes de las propiedades relativas entre estos dos materiales. En general, esto y la manera en la que se unen en la zona de transición interfacial son probablemente los aspectos más importantes, pero aun estamos subestimando las características que influyen en la vida útil de la mayoría de las estructuras del concreto. El investigador Neville (1997) analizó cómo la unión en la zona de transición interfacial y el módulo de elasticidad están relacionados, pero no obstante, se tratan por separado.

La resistencia a la compresión es la base común para el diseño de casi todas las estructuras de concreto excepto para los pavimentos, pero aún así, la resistencia a la compresión es a menudo el método común de las pruebas rutinarias de control de calidad.<sup>97</sup> Las propiedades mecánicas del concreto, tales como la resistencia a la tracción, resistencia al corte, módulo de ruptura, adherencia y las relaciones de tensión-deformación se expresan normalmente en términos de resistencia a la compresión. Dado que las leyes que rigen las diferentes propiedades mecánicas del concreto varían, se debe tener precaución extrema al tratar de extrapolar las relaciones que funcionan bien para el concreto de resistencia convencional con las de concretos de de alta resistencia. La disponibilidad de datos para concretos de mayor resistencia requiere una reevaluación de las ecuaciones de diseño para determinar su aplicabilidad con concretos de mayor resistencia (*ACI 363R-92, 2007*).

---

<sup>97</sup> Zia, 1997.

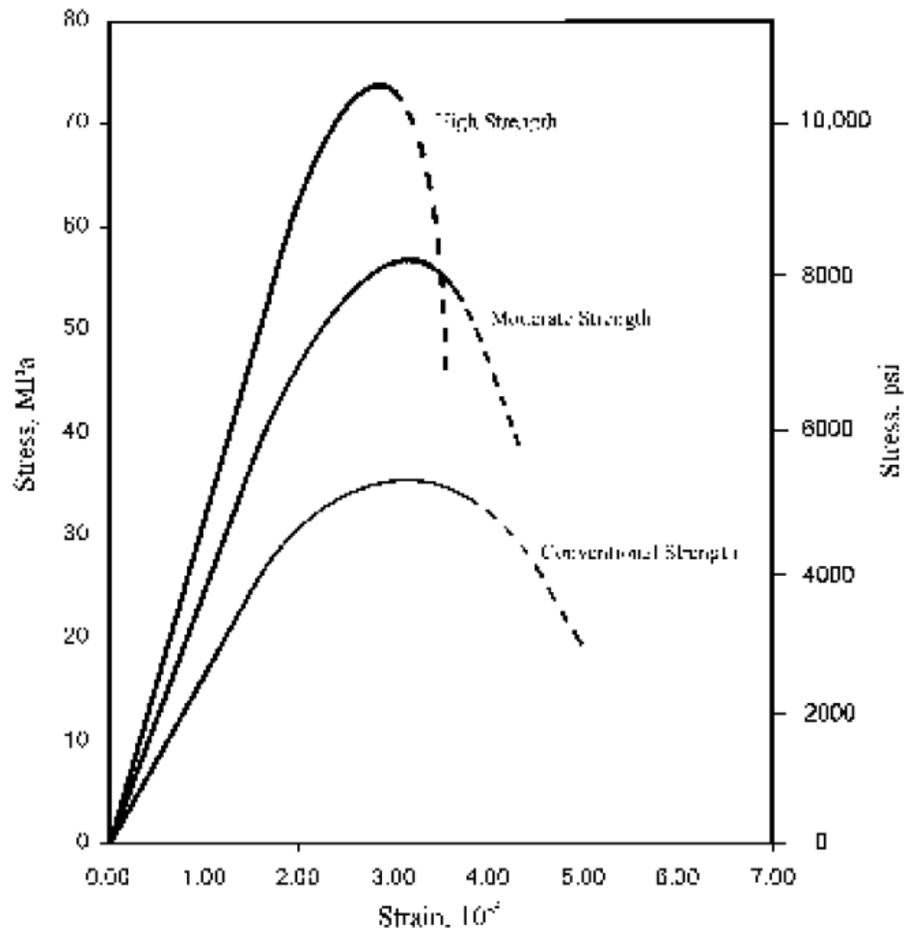
#### **2.8.4.1.1. TENSIÓN AXIAL VERSUS DEFORMACIÓN.**

El comportamiento de tensión-deformación del concreto está influenciado principalmente por la rigidez relativa de la pasta y los agregados, y la resistencia de la unión en la zona de transición interfacial. Todo lo demás es constante, el fuerte enlace en la zona de transición interfacial se consigue utilizando agregados rugosos en lugar de suavizar su textura. Por lo tanto, para dos agregados gruesos del mismo tamaño, forma, mineralogía, rigidez, una mayor resistencia (y la capacidad de deformación correspondiente) se lograría con agregados provenientes de trituración en comparación con las superficies suavizadas de los agregados naturales (grava). Varios investigadores<sup>98</sup> han informado de la alta capacidad de deformación en la tensión máxima de concretos de alta resistencia en comparación con los concretos de resistencia convencional. Las curvas que representan las relaciones típicas de tensión-deformación de alta, moderada y resistencia convencional del concreto se muestran en la *Figura 2.8.3*. A medida que aumenta la fuerza, la pendiente tanto de la parte ascendente como de la descendente de la curva de esfuerzo-deformación se hace más pronunciada y el esfuerzo ultimo de compresión se vuelve cada vez más explosivo (*Figura 2.8.4*). Por lo tanto, para los concretos de alta resistencia, la determinación exacta de la porción descendente de la curva puede ser difícil de obtener<sup>99</sup>, aun no hay normas establecidas para la obtención completa de las curvas de tensión-deformación para este concreto. Desde la parte descendente de la curva depende del método de ensayo empleado; la curva de esfuerzo-deformación se emplea mejor si se utiliza estrictamente sólo para efectos comparativos.

---

<sup>98</sup> Shah, 1981; Jansen, 1995.

<sup>99</sup> Wang, 1978; Holm, 1980; Shah, 1981.

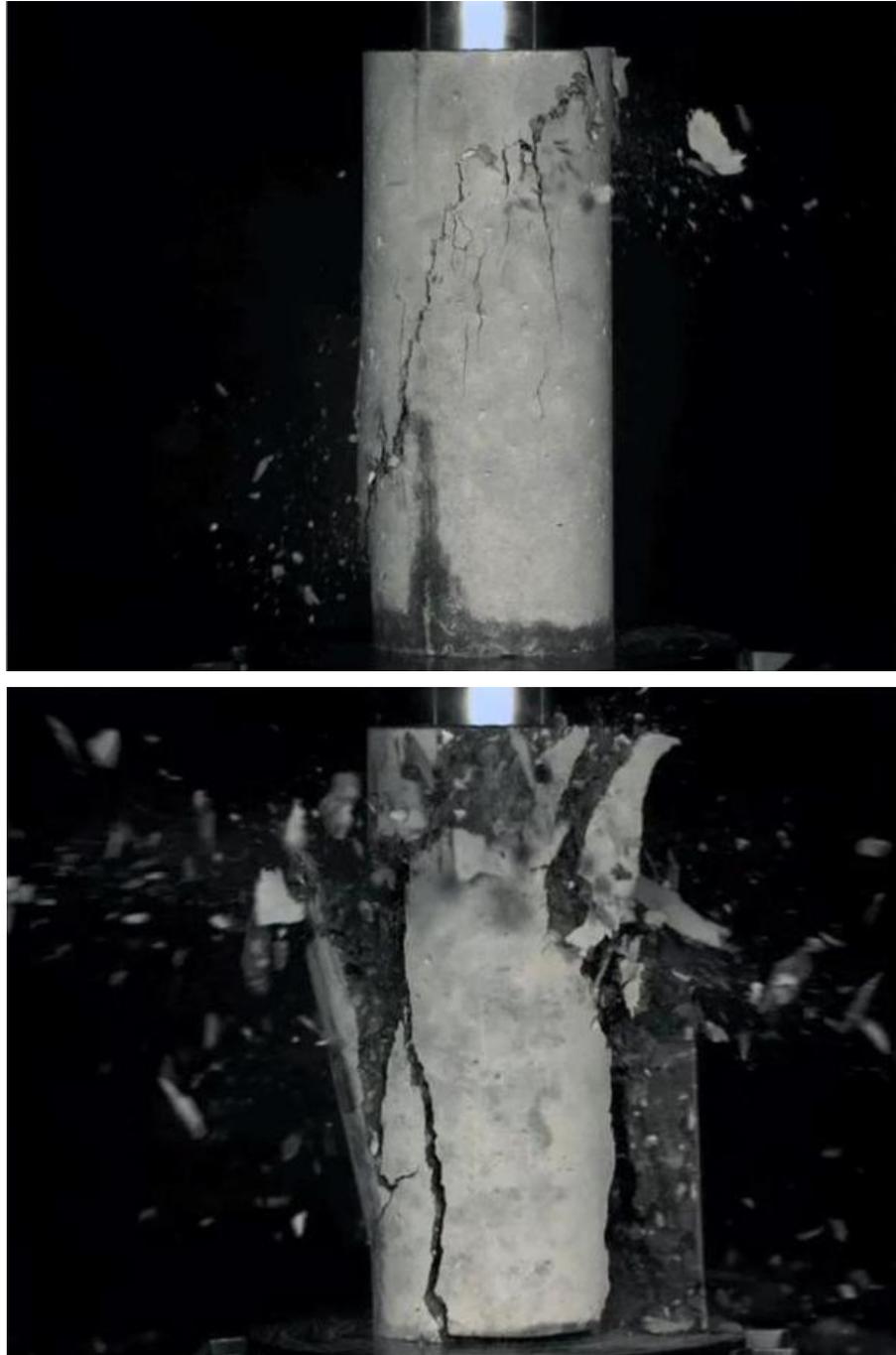


**Figura 2.8.3.** Los gráficos representan la relación entre la deformación y la tensión axial para tres tipos de clasificaciones de concretos.

#### **2.8.4.1.2. MÓDULO DE ELASTICIDAD.**

##### **2.8.4.1.2.1. MÓDULO DE ELASTICIDAD ESTÁTICO.**

Pocos temas son capaces de instigar un mayor debate entre las autoridades del concreto de alta resistencia como el módulo de elasticidad. A pesar de que es común pensar en el módulo de elasticidad del concreto como una sola propiedad concreta, en realidad en la actualidad, *el concreto tiene dos módulos de elasticidad*; el módulo de elasticidad de la pasta y el módulo de elasticidad del agregado.



**Figura 2.8.4.** Las imágenes exponen los tipos comunes de fallas a compresión del concreto de alta resistencia.

En la interfaz entre los dos materiales; la pasta y los agregados, en la zona de transición interfacial es quizás el factor más importante que influye en las propiedades mecánicas del concreto de alta resistencia.

Aunque el concreto no se considera un material perfectamente elástico-lineal, la ley de elasticidad de Hooke es aplicable a los concretos estructurales para la gama de tensiones comúnmente utilizadas en los cálculos de diseño. El módulo de elasticidad (módulo de Young) es una de las propiedades mecánicas más importantes del concreto. El módulo de elasticidad se define como la relación de tensión normal que corresponde a una deformación por tensión o esfuerzos de compresión por debajo del límite proporcional de un material. Es un factor clave que influye en el comportamiento estructural de estructuras de concreto armado y es particularmente importante como un parámetro de diseño en la predicción de la deformación de los edificios altos.

El módulo de elasticidad del concreto está gobernado en gran medida por las propiedades del agregado grueso. El aumento del tamaño de los agregados gruesos o el uso de agregados gruesos más rígidos con un mayor módulo de elasticidad aumenta el módulo de elasticidad del concreto. Al ser un material compuesto formado por la pasta y el agregado, el módulo de elasticidad del concreto en compresión está estrechamente relacionado con las propiedades mecánicas de la pasta que une las partículas del agregado. Cabe señalar que aunque los agregados más rígidos o más densos mejoran el módulo de elasticidad del concreto, también son capaces de introducir concentraciones de esfuerzos de tensión en la zona de transición y una posterior microfisuración en las superficies (interfaces) de las uniones entre partículas, reduciendo así la capacidad final de resistencia a la compresión del concreto.

Como los módulos de elasticidad de la pasta y las partículas del agregado se aproximan entre sí, el concreto resultante tiende a exhibir una relación de tensión-deformación más lineal y un aumento de fragilidad.<sup>100</sup> Se discuten dos modelos que representan los dos límites de comportamiento de materiales compuestos (Hansen, 1958). El primer modelo, un material ideal compuesto de materiales duros, tiene partículas de relleno de un módulo de elasticidad bajo unidos por una

---

<sup>100</sup> Neville, 1997.

matriz de fase elástica que tiene un alto módulo de elasticidad. El segundo modelo, un material ideal compuesto de materiales blandos, que tiene partículas de relleno de alto módulo de elasticidad unidas entre sí por una matriz de fase elástica que tiene bajo módulo de elasticidad. De los dos modelos idealizados los concretos de alta resistencia encajarían más estrechamente el primer modelo, mientras que los concretos de resistencia convencional estarían más estrechamente ligados con el segundo.

Existe una diferencia significativa en el comportamiento de la resistencia inicial de los concretos de alta resistencia en relación a otras propiedades mecánicas. Típicamente, la resistencia a la compresión aumenta a un ritmo más rápido que la resistencia de la unión en la zona de transición interfacial. Esto da lugar a diferencias proporcionales en el módulo de elasticidad y la resistencia a la tracción en edades tempranas en comparación con edades avanzadas del concreto. Por lo tanto, la proporcionalidad de las propiedades mecánicas de resistencia a la compresión después de la edad 28 días o más del concreto de alta resistencia no se puede aplicar del mismo modo que se hace en el concreto de resistencia convencional.

Myers (1999) investigó diversas metodologías para aumentar el módulo de elasticidad. Valores más altos de módulo de elasticidad se logran típicamente usando tamaños de agregados gruesos más grandes, lo que a la vez produciría una resistencia a la compresión óptima. Agregado de tamaño más grande permite el uso de mayores volúmenes de agregado grueso, un parámetro clave para el módulo de elasticidad, sin sacrificar los requisitos de trabajabilidad, los que podrían verse afectados si se utilizan volúmenes similares de agregado de tamaño pequeño. En tales casos, las compensaciones en los agregados se vuelven necesarias con el fin de lograr un desempeño mecánico aceptable. Los agregados de tamaño mayor, aunque pueden producir menor resistencia a la compresión, pueden proporcionar un mayor módulo de elasticidad. Concretos con módulos de

elasticidad extremadamente altos se han producido con grandes volúmenes de agregado grueso rígido unido densamente con pastas de bajas relaciones A/MC.

El módulo de elasticidad del concreto de resistencia convencional generalmente aumenta proporcionalmente a la raíz cuadrada de la resistencia a la compresión. Aunque se han propuesto muchas ecuaciones empíricas para predecir el módulo de elasticidad, pocas ecuaciones predicen el módulo de elasticidad del concreto de alta resistencia con la mayor precisión como lo hacen para el concreto de resistencia convencional. Los informes del Comité ACI 363 dicen que la siguiente ecuación en general ha demostrado ser una expresión de confianza para el concreto de alta resistencia de densidad normal sobre la base de la mayoría de los datos de concretos de alta resistencia recolectados a lo largo del tiempo:

$$E_c = 40,000 (f'_c)^{0.5} + 1,000,000 \quad (\text{Para } 3,000 \text{ psi} < f'_c < 12,000 \text{ psi})$$

$$E_c = 3,320 (f'_c)^{0.5} + 6,900 \quad (\text{Para } 21 \text{ MPa} < f'_c < 83 \text{ MPa})$$

Sin embargo, según estudios recientes<sup>101</sup>, el Comité advierte que cuando se utiliza esta expresión, se pueden producir subestimaciones significativas. El módulo de elasticidad medido es muy sensible al contenido de humedad de la muestra de ensayo. Se cree que esto es debido al efecto de secado en la zona de transición interfacial. Para un concreto dado, el módulo de elasticidad de muestras analizadas en una condición húmeda es de aproximadamente 15 por ciento mayor que las probetas ensayadas seco.

Los investigadores de la Comisión de Investigación sobre el concreto de alta resistencia, del Instituto de Arquitectura de Japón (AIJ) realizaron análisis de regresión múltiple en más de 3,000 datos donde la resistencia a la compresión y la densidad se tomaron como variables explicativas y el módulo de elasticidad como

---

<sup>101</sup> Gross y Burns, 1999; Myers y Carrasquillo, 1999.

la variable objetivo.<sup>102</sup> La resistencia a la compresión de concretos de densidad normal investigada varió de 20 a 160 MPa (3,000 a 23,000 psi). Basándose en los resultados se propuso la siguiente ecuación:

$$E = k_1 * k_2 * 3.35 * 10^4 * (\gamma / 2.4)^2 * (\sigma_B / 60)^{1/3}$$

Donde,

$k_1$  = factor de corrección de agregado grueso.

$k_2$  = factor de corrección de adición mineral.

$\gamma$  = unidad de peso (densidad), kg / m<sup>3</sup>.

$\sigma_B$  = medida de resistencia a la compresión, MPa.

*Nota: Para una ampliación de este tema diríjase a los resultados presentados en el libro "High-Strength Concrete. A practical guide." de Michael A. Caldarone en su capítulo 4 página 104.*

En el momento actual hay poco consenso en cuanto a la aplicabilidad de un método universal que podría predecir con exactitud el módulo de elasticidad del concreto de alta resistencia. Para las estructuras que requieren conocer exactamente el módulo de elasticidad, la medición directa usando y aprovechando los materiales locales capaces y adaptando los diseños de mezcla sigue siendo el mejor enfoque. El módulo de elasticidad debe ser determinado tan pronto como sea posible en la fase de diseño, ya sea a través de un programa de evaluación de pruebas de campo o sobre la base de los datos de desempeño en campo previamente documentados.

---

<sup>102</sup> Tomosawa y Noguchi, 1995.

#### **2.8.4.1.2.2. MÓDULO DE ELASTICIDAD DINÁMICO.**

Hay poca información disponible sobre el módulo de elasticidad dinámico del concreto de alta resistencia. Como Zia y otros colaboradores (esto en 1997) lo describen, la medición del módulo dinámico corresponde a una muy pequeña deformación instantánea. La diferencia entre los módulos estático y dinámico se debe en parte al hecho de que la heterogeneidad del concreto afecta a cada uno de manera diferente. Para concretos de baja, media, y alta resistencia, el módulo dinámico es generalmente del 40 por ciento, 30 por ciento, y 20 por ciento, respectivamente, mayor que el módulo estático de elasticidad.<sup>103</sup> Nilsen y Aïtcin (en 1992) utilizaron la prueba de velocidad de pulso o pulso ultrasónico para predecir el módulo estático de elasticidad del hormigón de alta resistencia.

#### **2.8.4.1.3. EL COEFICIENTE DE POISSON.**

La relación de Poisson en condiciones de carga uniaxial se define como la relación de la deformación transversal a la deformación axial correspondiente resultante de la tensión axial distribuida de manera uniforme por debajo del límite proporcional del material. En base a los datos limitados sobre los valores para concreto de alta resistencia, la relación de Poisson para concreto de alta resistencia en el rango elástico de deformación parece similar a los valores para concreto de resistencia convencional. En el rango inelástico el aumento relativo en las deformaciones laterales es menor para el concreto de mayor resistencia que para el concreto de resistencia convencional, generando menor microfisuración interna en los concretos de alta resistencia. Perenchio y Klieger en 1978 informaron de valores para relaciones de Poisson de 0.20 a 0.28 para concretos de alta resistencia de peso normal con resistencias a la compresión de entre 55 y 80 MPa (8,000 a 11,600 psi). Llegaron a la conclusión de que la relación de Poisson tiende a disminuir al aumentar la relación agua-cemento.

---

<sup>103</sup> Mehta, 1986.

#### **2.8.4.1.4. RESISTENCIA.**

La resistencia del concreto depende de un amplio número de factores, incluyendo las propiedades y las proporciones de los materiales constituyentes, el grado de hidratación, la tasa de carga, el método de prueba y la geometría de la probeta. Las propiedades de los materiales constituyentes que afectan la resistencia son la calidad de agregado grueso y fino, la pasta de cemento y el enlace interfacial entre la pasta y el agregado. Estos, a su vez, dependen de las características macro y microscópicas estructurales, incluyendo la porosidad total, tamaño y forma de los poros, distribución de poros y la morfología de los productos de hidratación, además de la unión entre los componentes sólidos individuales. Condiciones de ensayo como la edad, índice de carga, el método de prueba y geometría de la probeta, influyen profundamente en la resistencia medida.

##### **2.8.4.1.4.1. RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN.**

Las características de desarrollo de resistencia del concreto de alta resistencia son diferentes de las del concreto de resistencia convencional. Las pruebas realizadas por Wild (y otros colaboradores en 1995) mostraron que el concreto de alta resistencia con una relación A/MC de 0.35 (sin humo de sílice) tenía una resistencia a la compresión a los 7 días en un promedio del 86 por ciento de la resistencia a los 28 días cuando se curaron los especímenes a 20 °C (68 °F). Esta misma relación A/MC para concretos de resistencia convencional estaba en un rango de 60 a 70 por ciento de la resistencia a los 28 días. Cuando se añadió el humo de sílice al concreto de alta resistencia en el rango del 12 al 28 por ciento de la misma fracción en peso del cemento, la proporción media a los 7 días fue del 76 por ciento de lo requerido a 28 días cuando se curó a 20 °C (68 °F). Cuando la temperatura de curado se aumentó a 50 °C (122 °F), esta misma relación A/MC aumentó significativamente la resistencia al 97 por ciento a los 7 días de lo

requerido a 28 días, lo que indica que las altas temperaturas de curado pueden ser muy beneficiosas para el desarrollo de la resistencia temprana en el concreto de alta resistencia utilizando humo de sílice.<sup>104</sup> Típicamente, el aumento de la resistencia a compresión es mucho más rápido que el aumento de la resistencia en la zona de unión interfacial.

Los cambios en la resistencia del concreto de alta resistencia con el tiempo son impulsados por dos factores opuestos *la hidratación y la auto-desección*. Siempre se debe tener disponible humedad libre para la cementación de partículas no hidratadas, esto asegurará que se continúen formando productos de hidratación y que la resistencia siga aumentando. Por el contrario, el concreto ausente de humedad libre puede causar auto-desección, en cuyo caso, la resistencia medida con el tiempo posiblemente podría disminuir. Concretos de resistencias convencionales, que se producen en relaciones A/MC mayores que los concretos de alta resistencia comúnmente siguen aumentando su resistencia con el tiempo, esto a causa de las condiciones de humedad libre que están presentes, las que permiten el ingreso de agua al interior del concreto y por ello las pérdidas en la resistencia debido a la auto-desección no son un problema. Disminuciones reales en la resistencia medida a largo plazo tampoco son muy comunes en concretos de alta resistencia. La pérdida de la resistencia medida a largo plazo debido a la auto-desección en general se convierte en una preocupación sólo en concretos de muy alta resistencia con requisitos de resistencias a la compresión de 100 MPa (14,500 psi) o superiores. No es la resistencia del concreto como tal, sino más bien las características de la pasta las que influyen en la posibilidad de pérdida de resistencia a largo plazo. En ocasiones críticas se ha observado una disminución en la medida de resistencia a la compresión de alrededor del un 10 por ciento a partir de las edades de 56 días a un año (respecto al incremento esperado en comparación con el incremento común de resistencia con el tiempo bajo adecuadas condiciones de curado) en los

---

<sup>104</sup> Meeks y Carino, 1999.

concretos producidos con relaciones A/MC por debajo de 0.29, y que han sido elaborados con materiales de cementación o cementos extremadamente finos.

La contracción por secado se produce después de que el concreto ya ha alcanzado en su fraguado final y se ha completado una buena parte del proceso de hidratación química en el gel de cemento. La contracción por secado de concretos de alta resistencia, aunque tal vez potencialmente se espera mayor debido a volúmenes más altos de pasta, de hecho, no parece ser sensiblemente más grande que los concretos convencionales. Esto es probablemente debido al aumento en la rigidez de las mezclas más fuertes.

#### **2.8.4.1.4.2. RESISTENCIA A LA TRACCIÓN.**

Además de influir en las propiedades estructurales del concreto, la resistencia a la tracción es un factor importante que afecta la susceptibilidad a la fisuración del concreto, desempeñando así un papel crítico en lo referente a la durabilidad. Hay tres métodos distintos para la determinación de la resistencia a la tracción del concreto, ya sea por la tensión directa o indirectamente por la tracción indirecta o por flexión (módulo de ruptura). La aplicación directa de una fuerza de tensión pura, libre de cualquier excentricidad, es difícil de lograr, y como resultado a menudo hay disponibles datos limitados y contradictorios.<sup>105</sup> No hay pruebas estándar que se hayan adoptado para la determinación directa de la resistencia a la tracción del concreto.

Las pruebas más utilizadas para estimar indirectamente los esfuerzos de tensión del concreto son la tracción indirecta (ASTM C 496) y módulo de ruptura (ASTM C 78). Tanto la resistencia a tracción indirecta ( $f_{ct}$ ) y el módulo de rotura ( $f_r$  o  $MR$ ) están relacionados con la resistencia a la compresión por la siguiente expresión general:

---

<sup>105</sup> Zia y otros, 1997.

$$f_{ct} \text{ o } MR = k\sqrt{f'_c}$$

Para fines de diseño, la resistencia a la tracción del concreto se toma con frecuencia como el 10 por ciento de la resistencia a la compresión, sin embargo, la resistencia a la tracción del concreto de alta resistencia puede no ser tan proporcionalmente alta. Dewar (1964) estudió la relación entre la resistencia a tracción indirecta y la resistencia a la compresión de los concretos habiendo medido resistencias a la compresión de hasta 84 MPa (12,000 psi) a los 28 días. Se llegó a la conclusión de que en concretos de bajas resistencias, la resistencia a tracción indirecta puede ser tan alta como 10 por ciento de la resistencia a la compresión, pero en concretos con resistencias en cantidades más altas, se puede reducir a 5 por ciento. Señaló que las resistencia a los esfuerzos de tensión fueron un 8 por ciento más altas en concretos elaborados con agregados triturados que para concretos elaborados con agregados naturales, especialmente los agregados gruesos. Además, se encontró que la resistencia a la tracción indirecta fue alrededor del 70 por ciento de la resistencia a la flexión a los 28 días (ACI 363R-92, 2007).

#### **2.8.4.1.5. REGRESIÓN DE RESISTENCIA.**

Concretos con diferente composición y microestructura no siguen el mismo patrón de secado cuando se exponen a secado al aire por un mismo período. En algunos casos, como en el caso de un concreto de alta resistencia con humo de sílice, se puede desarrollar un gradiente de humedad superficial significativa que puede resultar en un campo de esfuerzo de tensión dentro de las muestras utilizadas para probar la resistencia a la compresión del concreto, mientras que en otro concreto, este gradiente de humedad ha desaparecido por completo comparándolo a la misma edad. El fenómeno transitorio afecta a cualquier tipo de concreto, sin embargo, para un concreto dado en un momento determinado, la

intensidad del desarrollo de las tensiones depende de la severidad de las condiciones de secado y de la permeabilidad del concreto.

Del informe de De Larrard y A'itcin (1993) se puede demostrar que cuando se encuentra alguna aparente fuerza de regresión, la máxima fuerza de regresión que se pueden estimar a partir de este mecanismo propuesto es igual al doble de la resistencia a la tracción del concreto. Este valor está en buen acuerdo con las pérdidas de resistencia experimentales reportados por algunos autores.

#### **2.8.4.1.6. CONTRACCIÓN Y FLUENCIA.**

Cuando los esfuerzos de tensión desarrollados dentro del concreto superan la resistencia a la tensión se produce agrietamiento. Aparte de la sobrecarga, las estructuras de concreto se pueden romper debido a las condiciones que inducen cambios volumétricos. El concreto elaborado de cemento hidráulico puede cambiar su volumen con o sin la influencia de los factores ambientales. Con excepción de los concretos que contienen cementos o aditivos especiales compensadores de la retracción (contracción), el agrietamiento debido a la expansión volumétrica es menos causante de agrietamiento.

Además de las deformaciones elásticas instantáneas, el concreto sufre deformaciones dependientes del tiempo que deben ser considerados en el diseño. *La fluencia se define como la deformación en función del tiempo como resultado de una carga aplicada. La contracción es la deformación función del tiempo que se produce en ausencia de una carga aplicada.* La deformación total que ocurre en un elemento de concreto es la suma de lo elástico, la fluencia, y la deformación por contracción. El ajuste, de retracción del concreto se realiza en dos etapas distintas a edad temprana y a edades más tardías. Incluso antes de que las medidas normales para evitar la contracción comiencen (tradicionalmente

24 horas después de la fabricación de la muestra), las reducciones de volumen ya se han producido.



**Figura 2.8.5.** La imagen representa un tipo de contracción en el concreto de forma macroscópica.

El Comité ACI 209 respecto a la fluencia y retracción en el concreto sugiere ecuaciones generales para la predicción de la retracción del concreto en cualquier momento. Para ampliar a cerca de esto revisar el informe del comité.

La contracción del concreto puede clasificarse de la siguiente manera:

- *Contracción plástica.*
- *Contracción a edad temprana.*
- *Contracción a edades avanzadas.*



*Figura 2.8.6. Tipos de contracción comunes en el concreto a edades avanzadas.*

#### **2.8.4.1.6.1. CONTRACCIÓN PLÁSTICA.**

Los concretos de alta resistencia realizan su sangrado a una velocidad más lenta y generalmente exhiben un menor sangrado que la mayoría de los concretos convencionales, por lo tanto, son intrínsecamente más susceptibles al agrietamiento por contracción plástica. El American Concrete Institute define agrietamiento plástico como el "agrietamiento que se produce en la superficie del concreto fresco un momento después de ser colocado y mientras todavía se encuentra en estado plástico." Los esfuerzos de contracción en estado plástico se desarrollan debido a la pérdida de agua por evaporación desde la superficie y por succión cuando el concreto fresco está en contacto con los materiales

absorbentes, tales como concreto endurecido seco o una sub-base seca. Las losas son particularmente vulnerables a la contracción plástica dada la alta cantidad de área de superficial expuesta en relación al volumen total. Cuando la humedad se evapora en la superficie a una velocidad más rápida de lo que puede ser reconstituida con agua de exudación, la superficie se contraerá más que el interior de concreto. La susceptibilidad al agrietamiento plástico es una función de dos factores *la velocidad de evaporación y velocidad de sangrado*, y ambos deben ser conocidos para determinar si el concreto está en riesgo de formación de grietas con un grado razonable de precisión.

Las fuerzas que causan tensión por contracción plástica pueden ser mitigadas a través de buenas prácticas de manejo del concreto. Se toman medidas adecuadas para evitar que surjan las tensiones inducidas por la deshidratación que causan que produzca la contracción plástica, el agrietamiento plástico, en principio, no debe ocurrir.

La contracción química, que será discutido en la siguiente sección, comienza mientras el concreto está en una condición todavía en estado plástico. A diferencia de la contracción plástica, los esfuerzos de contracción químicos no son aislados a una ubicación particular en el elemento, y se produce a través de su configuración y mientras el concreto está en un estado endurecido. No es citado como una causa de agrietamiento por contracción plástica, y por lo tanto, se discute más apropiadamente bajo contracción a edad temprana.

#### **2.8.4.1.6.2. CONTRACCIÓN A EDAD TEMPRANA.**

La retracción del concreto está influenciada por un número de factores, tanto internos como externos, incluyendo las condiciones ambientales, las características de la mezcla y las prácticas de curado. El desempeño a largo plazo del concreto es altamente dependiente de las propiedades que se desarrolla a una

edad temprana y de su capacidad para resistir las tensiones que actúan sobre él, por lo tanto, el control de la contracción a edad temprana es esencial para garantizar la durabilidad a largo plazo. Considere contracción a edades tempranas como la reducción o pérdida de volumen producida durante las primeras 24 horas desde el momento en que el agua y los materiales cementicios entran en contacto; el tiempo aproximado entre el colado y el retiro de los moldes de pruebas de contracción por secado cuando se prueba de acuerdo la norma ASTM C 157.

Al desmoldar se toman las lecturas iniciales (como lectura cero) y se monitorea el cambio de longitud desde el comienzo, sin embargo, en ese momento ya pudieron haber ocurrido cantidades apreciables de contracción. Los cambios de volumen a edades tempranas tradicionalmente han sido ignorados por el diseñador, ya que se cree que la magnitud de la contracción a edades tempranas es menor que la contracción a edad más avanzada. Comprender los cambios de volumen a edades tempranas que pueden ocurrir en el concreto de alta resistencia es de suma importancia. La falta de atención y el tratar con tensiones que se pueden desarrollar en las primeras 24 horas en los elementos estructurales de alta resistencia puede afectar negativamente el desempeño estructural a largo plazo. Esto se aplica tanto en etapas de diseño como en prácticas en la construcción, y es una razón fundamental por la que los procedimientos de curado adecuados son sumamente importantes. Además del secado, otros factores como la carbonatación pueden contribuir a la contracción a edad más avanzada, pero están incorporados dentro del término más amplio y un tanto engañoso de *contracción por secado*.

Después del comienzo de la hidratación de la pasta, las reducciones de volumen atribuidos a la reacción de la hidratación, se producen por un fenómeno conocido como contracción química. La contracción química se produce debido a que los productos de hidratación de la pasta ocupan menos espacio que la suma de los constituyentes de la reacción. La mayor parte de la contracción química que se produce en el concreto no es macroscópicamente medible. La porción de

contracción química que es macroscópicamente medible se conoce como *contracción autógena*. La contracción autógena es una consecuencia de la auto-desecación; directamente influenciado por el diámetro del capilar y nanoporos en los que se desarrollan meniscos en el concreto.<sup>106</sup> La contracción autógena debido a la auto desecación es quizá más probable en concretos con relaciones muy bajas, aunque hay pocos datos disponibles de evidencia indirectas de ciertas investigaciones del concreto de alta resistencia.<sup>107</sup> Mather (2001) reconoció que se necesita de agua de curado interno adicional en concretos con relaciones A/MC por debajo de 0.40.

Varios factores relacionados con el diseño, las propiedades del material y las prácticas de construcción influyen en la probabilidad de agrietamiento por contracción en estructuras de concreto. A diferencia de la contracción por secado, contracción autógena puede ocurrir sin evaporación. La contracción autógena se asocia solo con la hidratación y no incluye los efectos ambientales debido a las variaciones en la humedad.

Incluso a edades tempranas, la alta resistencia y la baja permeabilidad del concreto más denso es significativamente mayor que en el concreto convencional. Por lo tanto, sería totalmente impráctico creer que el agua de curado aplicada externamente puede suministrar cantidades necesarias de humedad a un concreto mucho más denso a un ritmo lo suficientemente rápido como para controlar los principios agrietamiento debido a la auto desecación.

Con el creciente interés en el uso de concretos de alta resistencia que pueden estar en mayor riesgo de agrietamiento a edad temprana, el concepto de curado interno está progresando constantemente. El curado interno es un mecanismo donde el agua libre adicional circulante por toda la matriz de la pasta está disponible para que la pasta se hidrate. El curado interno es muy importante en

---

<sup>106</sup> Tazawa, 1999; Saric-Coric y Aïtcin, 2003.

<sup>107</sup> Aïtcin y Laplante, 1990.

concretos de bajas relaciones A/MC, ya que proporciona una fuente de agua disponible en los momentos críticos en los que más se necesita para evitar la auto desecación y la posterior fisuración por contracción autógena. El agua interna se suministra típicamente mediante el uso de cantidades relativamente pequeñas de saturación, de agregados finos peso ligero o polímeros superabsorbentes.<sup>108</sup> Los beneficios del curado interno incluyen el aumento de la hidratación y desarrollo de la resistencia, la reducción de la contracción y el agrietamiento autógeno, la capacidad de reducir la permeabilidad y el aumento de la durabilidad.<sup>109</sup>

La contracción química se produce en ausencia de secado, por lo que no es práctico creer que el agua de curado es un método eficaz para controlar los primeros agrietamientos debido a la contracción autógena. Sería incorrecto esperar que cantidades importantes de agua de curado puedan impregnar con eficacia la matriz del concreto denso en cantidades suficientes para mitigar el agrietamiento que se produce dentro de las primeras horas de la colocación.

El concreto que se mezcla con relaciones A/MC por debajo de 0.40, con altos volúmenes de material cementante, son los principales candidatos para la contracción autógena. En general, para las estructuras diseñadas resistencias a los esfuerzos de compresión de 35 MPa (5,000 psi) o mayores, los efectos de contracción autógena simplemente no pueden ser ignorados. Si es o no es correcto hacer caso omiso de los efectos de contracción autógena en el desempeño de las estructuras diseñadas con concreto de resistencia convencional es un tema apropiado para futuras investigaciones.

La contracción autógena debido a la auto desecación es quizá más probable en concretos con bajas relaciones A/MC, aunque hay pocos datos acerca de esto.

---

<sup>108</sup> Jensen y Hansen, 2002.

<sup>109</sup> Geiker y otros colaboradores, 2004; Lam, 2005.

### **2.8.4.1.6.3. CONTRACCIÓN A EDADES AVANZADAS.**

Por supuesto, la contracción química no termina a las 24 horas. Pasadas las 24 horas la retracción autógena junto con retracción por carbonatación que se produce con la hidratación de los materiales cementantes y la entrada del dióxido de carbono de la atmósfera, se incluyen bajo el término genérico de *contracción por secado*. Por lo tanto, la contracción por secado, en el contexto en el que el término se usa a menudo también incluye otros mecanismos de reducción de volumen. Los factores que afectan fuertemente la contracción por secado son:

- Materiales cementantes.
  - ♦ *aumentar la finura*
  - ♦ *aumentando el contenido de  $C_3A$  y la reactividad*
  - ♦ *aumentar el contenido y la reactividad de  $C_3S$*
  - ♦ *aumentar el alcalino*
  - ♦ *aumentar el contenido de sulfato*
  
- Las propiedades de agregado
  - ♦ *disminución del volumen de agregado grueso*
  - ♦ *disminución del tamaño máximo nominal del agregado grueso*
  - ♦ *disminuir la rigidez del agregado grueso*
  - ♦ *el aumento del porcentaje de piezas delgadas y alargadas*
  - ♦ *aumentar el contenido de arcilla.*

La contracción es sólo uno de los varios factores que pueden influir en la posibilidad de formación de grietas y como en la sección anterior fue discutido, la contracción por secado no es la única forma de contracción que necesita ser tratada. La dosificación de un diseño de mezcla que cumpla con un valor especificado en función de la contracción por secado por si solo evaluado de acuerdo con un método de ensayo tal como ASTM C 157 no va a asegurar que no se produzca una mayor magnitud de la contracción.

Con respecto a la contracción, las partículas de agregado en el concreto sirven para dos propósitos: para diluir la pasta y para reforzarla contra la reducción de volumen. Las propiedades elásticas del agregado determinan el grado de restricción disponible. Aunque la incorporación de agregados de mayor tamaño tiene sus limitaciones con respecto a la resistencia del concreto de alta resistencia, la incorporación de agregados mejor graduados puede ayudar en la consecución de una baja contracción. Feldman (1969) observó que los concretos de baja contracción a menudo contienen cuarzo, roca caliza, granito o feldespato y los concretos que contienen algunas areniscas de grano fino, pizarra, basalto, roca trampa y agregados que contienen arcilla mostraron una gran contracción. Los efectos perjudiciales sobre las estructuras construidas con agregados de alta contracción incluyen agrietamiento excesivo, desprendimientos y anormalmente grandes deflexiones.

Para un mayor análisis puede tomar en cuenta las investigaciones de Mokhtarzadeh y French's (2000) que se basan en datos recogidos en su investigación para proponer dos ecuaciones para la predicción de la deformación por contracción del concreto de alta resistencia citadas en el libro *"High-Strength Concrete. A practical guide."* de Michael A. Caldarone en su capítulo 4 página 114.

#### **2.8.4.1.6.4. FLUENCIA.**

Fluencia es la deformación respecto al tiempo del concreto bajo la aplicación sostenida de carga. La fluencia es particularmente importante en las estructuras donde las deflexiones o el acortamiento de los elementos deben ser limitadas, o cuando la caída de pretensado se debe minimizar. Las limitaciones a la fluencia se pueden imponer para las mezclas de precalificación o prueba, pero generalmente la fluencia es raramente utilizada para control de calidad de rutina en las obras.<sup>110</sup> Las pruebas de fluencia se llevan a cabo en muestras selladas o sin

---

<sup>110</sup> Caldarone y otros, 2005.

sellar. Las muestras selladas con una tensión aplicada tienen cambios volumétricos debido a la deformación elástica, la fluencia básica y la contracción autógena. Especímenes sellados sin una tensión aplicada se deforman debido a la contracción autógena. La fluencia básica es la deformación total de un espécimen sellado cargado menos la deformación elástica y la contracción autógena. Especímenes sin sellar son el método de ensayo más utilizado. Los especímenes sin sellar sin una tensión aplicada tienen cambios volumétricos debido a la retracción autógena y al secado. La deformación total de especímenes sin sellar es el resultado de una tensión aplicada para producir una deformación elástica, la fluencia y la contracción. La fluencia incluye la fluencia básica y el secado. La contracción incluye la contracción autógena y el secado. La fluencia por secado de una muestra cargada es la deformación total menos la deformación elástica, la fluencia básica y la contracción y exige la prueba de ambas muestras selladas y no selladas. Por lo tanto, la fluencia se examina típicamente como el total de la fluencia básica y el secado.<sup>111</sup>

La fluencia está estrechamente relacionada con la contracción y ambos fenómenos están relacionados con la pasta de cemento hidratado. *Como regla general, un concreto que es resistente a la contracción también tiene un potencial de fluencia bajo.* El principal parámetro que influye en la fluencia es la intensidad de la carga como una función del tiempo, sin embargo, la fluencia también se ve influida por la composición del concreto, las condiciones ambientales, y el tamaño de la muestra.<sup>112</sup>

En un estudio de la deflexión a largo plazo de vigas de concreto de alta resistencia, Paulson y sus colaboradores (1991) señalaron que estaba disponible y bien fundamentada con evidencia experimental que el coeficiente de fluencia del concreto de alta resistencia bajo compresión axial sostenida fue significativamente menor que el del concreto convencional. Los estudios realizados por Collins

---

<sup>111</sup> Vincent y otros, 2004.

<sup>112</sup> Zia y otros, 1997.

(1989) en cinco diseños de mezcla que tenían resistencias especificadas a los 28 días que iban de los 60 MPa a los 64 MPa (8,700 psi a 9,300 psi) sugirieron que la fluencia fue menor para las mezclas con menor contenido de pasta y agregados gruesos de mayor tamaño. Carette y sus colaboradores (1993) informaron de un estudio de concretos de alto desempeño con un alto volumen de cenizas volantes proveniente de los Estados Unidos de Norteamérica. Los concretos tenían bajo sangrado, satisfactorios revenimientos y características de ajuste y una baja elevación de la temperatura autógena. Estos concretos también tenían excelentes propiedades mecánicas a edades tempranas y tardías con resistencia a la compresión llegando tan alto como 50 MPa (7,000 psi) a 91 días y la fluencia de los concretos fue relativamente baja.<sup>113</sup> Existen datos de fluencia de un grupo de concretos de alta resistencia producidos comercialmente presentados por Burg y Ost (1992) y una colección de datos de fluencia de 13 años en los concretos utilizados en Water Tower Place en Chicago presentados por Russell y Larson (1989) en donde se puede ampliar sobre este tema.

---

<sup>113</sup> Zia y otros, 1997.

#### **2.8.4.2. PROPIEDADES DE DURABILIDAD.**

La durabilidad es comúnmente la preocupación más importante que enfrenta la industria del concreto, y es precisamente por esta razón que el interés en el concreto de alto desempeño es cada vez mayor. El concreto tradicionalmente se ha especificado y comprado en términos de resistencia a la compresión, y por esta razón, la resistencia se ha tomado como el atributo más importante del desempeño del concreto.<sup>114</sup> Es irónico que, dada toda la atención que se presta a la resistencia, cuando se hace necesario demoler, reparar o reemplazar una estructura de concreto, por lo general es un resultado relacionado con la durabilidad en lugar de una deficiencia relacionada con la resistencia. *Por lo tanto, es falso suponer que un concreto resistente será necesariamente un concreto duradero.*

La mayoría de los problemas de durabilidad son causados por la infiltración de una o más sustancias perjudiciales tales como agua, sales, y compuestos que llevan sulfatos incluidos; con el tiempo causan expansiones internas, grietas, y la posterior desintegración del material. *La reducción de la permeabilidad del concreto a un nivel bajo eficaz y la restricción de la entrada de sustancias nocivas es la forma más influyente para mejorar la durabilidad.* A medida disminuyen las relaciones A/MC del concreto, también lo hace la permeabilidad. Importantes investigadores como Mindess y Young (1981) informaron en sus estudios que la relación Agua/Cemento (A/C) es el único parámetro que tiene la mayor influencia en la durabilidad del concreto.

Una excelente revisión de la estructura de poros y su influencia en la permeabilidad de la pasta de cemento y el concreto es presentada por Young (1988) donde se puede ampliar sobre el tema.

---

<sup>114</sup> Wong y Kwan, 2005.

En general, se tiene que para el concreto de peso normal, su porosidad reside principalmente en la pasta de cemento. La estructura de poros de la pasta se puede clasificar en dos tipos:

- I. Poros intrínsecos en el gel de cemento resultante de la hidratación.*
- II. Poros capilares procedentes del espacio relleno inicialmente con agua.*

No hay método de prueba estándar reconocido para medir la capacidad de permeabilidad del concreto. Diferentes investigadores han utilizado diferentes técnicas y procedimientos. En general, hay tres categorías de métodos:

- I. Permeabilidad al aire (de gas).*
- II. Permeabilidad hidráulica.*
- III. Permeabilidad a los iones de cloruro.*

Existe una revisión exhaustiva de los diferentes métodos para la medición de las propiedades de permeabilidad del concreto en la obra y ha sido presentada por Basheer y sus colaboradores en 1993.

Debido a la gran amplitud de la expresión "durabilidad", no existe un método estandarizado de medición. Proporcionar un bajo y eficaz coeficiente de permeabilidad para reducir o evitar la entrada de materiales perjudiciales es muy importante como primer paso, pero bajar permeabilidad por sí sola no siempre garantiza una durabilidad satisfactoria. La durabilidad de una estructura de concreto depende de varios factores, incluyendo la adecuación del diseño, el potencial de durabilidad del concreto producido, entregado y colocado, y las prácticas de construcción empleadas desde colocación inicial hasta el curado final. Es poco probable que un concreto que aunque tenga una alta calidad pueda superar por sí solo deficiencias relacionadas con el diseño y con las prácticas en la construcción. Por ejemplo, en un entorno agresivo, la baja permeabilidad ofrece un potencial considerable de durabilidad a largo plazo, siempre y cuando el

elemento estructural permanezca sin fisuras (que pueden ser causadas en muchas ocasiones por deficiencias en diseños estructurales). Agrietamientos imprevistos por el diseño, las prácticas de construcción o relacionadas a los materiales empleados, pueden representar potencialmente graves indicios de deficiencias en la durabilidad a largo plazo.

#### **2.8.4.2.1. PERMEABILIDAD.**

En general, existen tres categorías de permeabilidad del concreto que son de interés: permeabilidad de los gases, los líquidos y los iones de cloruro. Generalmente en las investigaciones (como en el caso de la presente) aborda sólo las últimas dos categorías.<sup>115</sup>

La tasa de penetración de iones cloruro se determina generalmente mediante la aplicación de la ley de Fick, teniendo difusividad en la edad como la variable dependiente. La absorción es un mecanismo de transporte de líquido por la succión por capilaridad en los poros del concreto. Balayssac y sus investigadores (1993) utilizaron la prueba de absorción de agua para medir tanto la porosidad del recubrimiento del concreto y el tamaño capilar más grande, que son factores importantes para la durabilidad del concreto. El criterio utilizado fue la cantidad de agua absorbida después de una hora. El valor es suficientemente representativo de la razón media de los capilares más grande. Los resultados mostraron que la prueba de absorción podría utilizarse para evaluar los efectos del contenido de cemento, de la porosidad del concreto y el recubrimiento para tener en cuenta los efectos beneficiosos del curado según el tamaño capilar. También se establecieron correlaciones entre la profundidad de carbonatación y la cantidad de agua absorbida después de una hora, lo que confirma la validez de las pruebas para la evaluación de la resistencia del concreto a la carbonatación.

---

<sup>115</sup> Basheer y sus colaboradores presentan una revisión exhaustiva de diversos métodos disponibles para la medición de las tres categorías de propiedades de permeación de concreto en el sitio, 1993.

#### **2.8.4.2.2. RESISTENCIA A LA CONGELACIÓN Y DESCONGELACIÓN.**

La resistencia del concreto a ciclos repetidos de congelación y descongelación, mientras se encuentra críticamente saturado o en la presencia de productos químicos de deshielo normalmente se estipula en términos del contenido total de aire del concreto basado en el tamaño máximo del agregado y la gravedad de exposición. La resistencia y la baja relación A/MC de los concretos de alta resistencia a la congelación y descongelación fue investigada por Kashi y Weyers en 1989. Se examinaron muestras de 27 lotes de concreto con aire incorporado y sin aire incorporado, con y sin humo de sílice en relaciones A/MC de 0.25 y 0.32. Se realizaron pruebas de congelación/descongelación de acuerdo con la norma ASTM C 666, Procedimiento A. Para determinar la influencia del curado, un segundo conjunto de muestras idénticas fueron curadas en húmedo durante 28 días, en lugar del tiempo normal de curado de 14 días establecido. Los resultados sugirieron que el concreto de alta resistencia sin aire incorporado con relaciones A/MC de menos de 0.30 era resistente a las heladas independientemente de la duración de tiempo de curado. El concreto de alta resistencia sin aire incorporado con relaciones A/MC de 0.32 era duradero a pesar de que no se utilizó el humo de sílice. La resistencia a la congelación/descongelación del concreto de alta resistencia sin aire incorporado producido con una relación A/MC de 0.35 y 10 por ciento de humo de sílice (por masa de cemento) se investigó por Cohen y su equipo en 1992 para evaluar los efectos de la duración del curado en agua de cal saturada de 7, 14, 21, y 56 días antes de la aparición de los ciclos de congelación y descongelación. Los resultados sugirieron de manera similar que el concreto sin aire arrastrado con una relación A/MC de 0.35 y que con un 10 por ciento de humo de sílice no eran resistentes a la rápida congelación y descongelación cuando se ensayaban de acuerdo con ASTM C 666 (Procedimiento A), incluso cuando curado había sido extendido a 56 días.<sup>116</sup> Casos favorables a la resistencia a la congelación y descongelación se ha encontrado cuando se utiliza Metakaolin como material cementante suplementario para producir concreto de alta

---

<sup>116</sup> Zia, 1997.

resistencia.<sup>117</sup> Los resultados de la investigación realizada por Pinto y Hover (2001) sobre la resistencia a la congelación y descongelación del concreto de alta resistencia indicaron que la incorporación de aire podría no ser necesaria para las mezclas con relaciones A/MC de menos de 0.35. No se tiene conocimiento de problemas documentados que implican daños por congelación/descongelación externa de elementos de alta resistencia verticales expuestos sin aire incorporado intencionalmente (es decir, columnas y muros).

La congelación y descongelación y la entrada de aire van de la mano. El arrastre de aire puede afectar profundamente la capacidad de lograr una alta resistencia. La cantidad proporcional de pérdida de resistencia que se produce en concretos estructurales con cada aumento en el aire incorporado no es una constante. La regla de que un aumento del 1 por ciento en el aire provoca una pérdida del 5 por ciento en la resistencia a la compresión no es válida. La pérdida de resistencia que ocurre con el aumento del aire incorporado depende de la clase de resistencia del concreto. Por ejemplo, si se considera dos concretos con resistencias a la compresión especificadas a 28 días de 30 MPa (4,000 psi) y 50 MPa (7,000 psi). Ambos sistemas contienen vacíos de aire con tamaño de burbujas similares, distribución y espaciamiento, cada uno con un contenido de aire total inicial del 5 por ciento. El aumento del contenido total de aire de cada mezcla del 5 al 7 por ciento (con el uso de un aditivo incorporador de aire) podría causar un 5 por ciento de disminución de la resistencia, o 2 MPa (300 psi) para la mezcla de resistencia convencional y una disminución del 20 por ciento, o 11 MPa (1,600 psi) en la mezcla de resistencia mayor. Las consecuencias del aumento del contenido de aire serían marginales en el concreto de resistencia convencional, pero devastadoras para el concreto de alta resistencia. El investigador Michael Caldarone dice en su libro *“High-Strength Concrete. A practical guide”* que ha sido testigo de este fenómeno en numerosas ocasiones. En el ejemplo anterior, se mencionó que las características del vacío de aire (tamaño de vacíos, distribución y separación) de cada concreto fueron similares. Esto es con el fin de hacer una

---

<sup>117</sup> Caldarone y colaboradores, 1994.

verdadera comparación de "manzanas con manzanas" a cerca de los efectos del contenido de aire en la resistencia. De hecho, las características del sistema de vacío de aire influyen la resistencia más que el propio contenido de aire total. Se ha observado que hoy en día en la más reciente generación de aditivos incorporadores de aire muchos producen burbujas más pequeñas y más numerosas, y por lo tanto significativamente más altas superficies específicas y significativamente más bajos factores de espaciado de vacíos que los obtenidos con los aditivos incorporadores de aire más tradicionales.<sup>118</sup> El volumen real teórico actual de aire necesario para acomodar el agua en los vacíos cuando se congela el concreto es menor del 1 por ciento del volumen de concreto. De ello se desprende que los sistemas de vacío de aire eficaces pueden obtener aun menores contenidos de aire cuando se utilizan aditivos incorporadores de aire que producen pequeños vacíos más estrechamente espaciados. Potencialmente, ambos de los límites superior e inferior de contenido de aire podrían reducirse en un 1 a 2 por ciento sin poner en peligro la durabilidad

El concreto no está saturado críticamente hasta que el contenido de humedad dentro de los capilares o poros es superior al 91.7 por ciento. Para llegar a estar críticamente saturado, el concreto tendría que estar en contacto directo con la humedad durante largos períodos. De la misma forma que la permeabilidad del concreto disminuye, el tiempo crítico para la saturación incrementa. La lluvia periódica o la nieve chocando contra una superficie vertical no constituyen condiciones favorables a la saturación crítica. En 1982, Armand ("Gus") Gustaferrero inspeccionó 20 de los 50 puentes de concreto construidos en Illinois, Estados Unidos en 1957. Fue de particular interés la falta de incorporación de aire en vigas de puente pretensadas de 35 MPa (5,000 psi). En 1957, 35 MPa (5,000 psi) se consideraba concreto de alta resistencia, y debido a la preocupación de que la resistencia de diseño no se podía lograr consistentemente con la incorporación de aire, se tomó la decisión de construir las vigas sin aire incorporado. Después de 25

---

<sup>118</sup> Jana y colaboradores, 2005.

años en condiciones de servicio severas, el autor de la inspección informó de un daño mínimo a causa de los efectos de congelación-descongelación.<sup>119</sup>

#### **2.8.4.2.3. RESISTENCIA A LA DESCAMACIÓN.**

La descamación, desprendimiento o “pelado” de la parte cercana a la superficie del concreto endurecido es generalmente resultado de la continua aplicación de sales de deshielo y los ciclos de congelación y descongelación. La descamación también puede ocurrir debido a la preexistencia de exfoliaciones debajo de la superficie causada por prematuro acabado formación de costras naturales mientras que el concreto todavía estaba exudando. La mejor prevención de la descamación es eliminar la capa débil del material, un diseño de mezcla adecuado y las buenas prácticas de construcción en lo referente a la colocación, acabado y curado. También se debe evitar aplicar demasiado la llana y un sangrado excesivo.

#### **2.8.4.2.4. RESISTENCIA A LAS REACCIONES SÍLICE-ALCALINOS.**

Potencialmente pueden ocurrir dos tipos de reacciones entre los agregados deletéreos o nocivos y los álcalis dentro del concreto:

- *Reacciones álcali-sílice (ASR).*
- *Reacciones álcali-carbonato (ACR).*

Para que la expansión deletérea se produzca, son necesarios tres mecanismos:

- ♦ *Agregado reactivo alcalino;*
- ♦ *Una efectiva elevada cantidad de álcalis en el concreto, y*

---

<sup>119</sup> Gustafarro y su equipo, 1983.

- ♦ *La humedad.*

ASR es significativamente más frecuente que ACR, por ello la discusión aquí presente se limitará a ASR. En comparación con todos los demás componentes, los materiales cementantes, sobre todo el cemento Portland, generalmente introducen la mayor cantidad de álcalis solubles. Los concretos de alta resistencia contienen invariablemente mayores cantidades de material cementante, es necesario tener una atención especial para evitar problemas relacionados con las reacciones álcali-agregado. Es normal que las reacciones álcali-sílice se produzcan en la mayor parte de concretos de cemento hidráulico. Sin embargo, si la reacción es lo suficientemente grave como para causar grietas visibles y una latente amenaza para la durabilidad a largo plazo esa es harina de otro costal.

Como el concreto de alta resistencia es rico en material cementante, tienen un elevado potencial de carga de álcali, se deben tomar precauciones para evitar el agrietamiento debido a la expansión de ASR. ASTM C1260 es una prueba utilizada para evaluar la susceptibilidad potencial de los agregados del concreto a ASR. ASTM C441 es una prueba que se utiliza para evaluar la eficacia de varias combinaciones de cementos y materiales cementantes suplementarios en la prevención de la expansión excesiva del concreto debido a la ASR.

ASTM C1567 es una prueba para determinar el potencial de reactividad ASR de combinaciones de materiales cementante y agregados. La determinación de los materiales susceptibles de ASR o combinaciones de materiales por medio de barras de mortero acelerados son generalmente adecuados para los propósitos de aceptación, sin embargo, a la luz de la gravedad de la exposición, los resultados de las pruebas aceleradas por sí solos no deben formar una base para rechazo de los materiales. En tales casos, las pruebas de largo plazo, como la ASTM C227 o C1293 se sugieren.

En la mayoría de los casos, la reacción álcali-sílice se puede controlar eficazmente mediante la adopción de uno o más de los siguientes pasos:

- Evitar agregados susceptibles a ASR: La experiencia local puede mostrar que ciertos tipos de agregados contienen sílice reactiva. Agregados susceptibles a ASR contienen sílice amorfa o poco cristalina, e incluyen gravas silíceas, caliza silícea de procrear, sílex, pizarra, vidrio volcánico, piedra arenisca, Opalines y cuarcita.
- El uso de una cantidad suficiente de una supresión de puzolana ASR: Por la reacción con el hidróxido de calcio en la pasta de cemento, una puzolana puede bajar el pH de la solución de los poros. Además, la sílice contenida en una puzolana puede reaccionar con el álcali en el cemento.
- El uso de cemento de bajo contenido de álcalis: Menos alcalino disponible para la reacción va a limitar la formación de gel.
- Baja relación A/MC: Cuanto menor sea la relación agua-cemento, menos permeable es el concreto. Baja permeabilidad ayudará a limitar el suministro de agua que causa la reacción en el gel álcali-sílice.
- Usar una mezcla química que inhibe la ASR, tales como nitrato de litio o carbonato de litio en una dosis alta efectiva.

#### **2.8.4.2.5. RESISTENCIA A LOS SULFATOS.**

El deterioro resultante de las reacciones entre sulfatos, por lo general en el suelo o las aguas subterráneas, y el concreto o mortero, es principalmente por la reacción química entre los componentes de la pasta de cemento. El sulfato es una sal mineral natural. El ataque de sulfatos es una descomposición química que se produce cuando los iones de sulfato de una fuente externa entran en el concreto y los componentes atacan la pasta de cemento, lo que resulta en la formación de etringita o yeso. El ataque de sulfatos puede ocurrir cuando el concreto está en contacto con suelos portadores de sulfato o agua. Cuando se produce ataque de

sulfatos, el resultado es un deterioro irreversible, por lo general en forma de agrietamiento o descamación. Stark (2002), concluyó que la mayor resistencia al ataque de los sulfatos se puede lograr con bajas relaciones agua/materiales cementantes totales. *Por lo tanto, el concreto de alta resistencia puede ser un material muy adecuado para la resistencia al ataque de los sulfatos.*

Formación tardía de yeso (DEF) es vista como una forma de ataque sulfato interna. Un número de factores han sido conocidos para influir en DEF, tales como la composición de los materiales cementantes, condiciones de curado y las condiciones de exposición. La DEF está influenciada significativamente por calor inadecuado en el curado del concreto, donde se debe suprimir la formación del yeso que se produce en circunstancias normales. La concentración de sulfato líquido en los poros es alta para un período inusualmente largo en el concreto endurecido. Finalmente, el sulfato reacciona con el calcio y las fases de aluminato ocurren en la pasta de cemento y la expansión se produce. Debido a esta expansión, se forman grietas alrededor de los agregados. Las grietas pueden permanecer vacías, después se llenan en parte, o incluso completamente con yeso. En general se acepta que la DEF se puede excluir en la mayoría de los casos, si la temperatura máxima dentro del elemento no excede los 70 °C.

#### **2.8.4.2.6. RESISTENCIA A LA CORROSIÓN.**

La electroquímica inducida por el deterioro causa la oxidación del acero de refuerzo incrustado y el desarrollo de presiones internas y el posterior desprendimiento y agrietamiento del concreto. La adecuación del concreto proporciona protección contra la corrosión del acero de refuerzo embebido y depende de varios factores, incluyendo la cantidad de recubrimiento de concreto sobre el acero, las propiedades del concreto (especialmente la permeabilidad) y el grado exposición del concreto a cloruros. El concreto de alta resistencia es un material de por sí con baja permeabilidad, tiene el potencial de proporcionar una

excelente protección contra la corrosión, si se le da la debida atención a la selección de materias primas, dosificación de mezcla, diseño y elaboración. ACI 201.2R ofrece una amplia discusión de los mecanismos específicos de deterioro del concreto, los requisitos recomendados para los componentes individuales, las consideraciones de calidad de las mezclas de concreto, y las prácticas de construcción. *Para más información sobre las propiedades de durabilidad del concreto de alta resistencia, puede consultar ACI 363R.*

#### **2.8.4.2.7. RESISTENCIA A LA ABRASIÓN.**

La resistencia a la abrasión se refiere a la capacidad de una superficie de resistirse a ser desgastada por el roce y la fricción. Los principales factores que influyen en la resistencia a la abrasión incluyen propiedades del agregado, acabado de las superficies, coberturas superficiales como endurecedores en polvo o líquidos endurecedores, y un adecuado curado. Las superficies de concreto se pueden desgastar por numerosas razones, incluyendo la erosión hidráulica, raspado y pulido. Desde el punto de vista de la seguridad, la resistencia a la abrasión es esencial para pavimentos y cubiertas de puentes. La resistencia a la abrasión eficaz también es importante en vertedores con el fin de soportar los daños debido al desgaste y a la cavitación. Pasta densa de alta calidad y agregados duros son necesarias para producir un concreto resistente a la abrasión. ASTM C 779 cubre tres métodos para determinar la resistencia a la abrasión relativa de las superficies de concreto horizontales, Procedimiento A (discos giratorios), Procedimiento B (dressing wheels) y el procedimiento C (ball bearings). ASTM C 779 se destina principalmente a caracterizar las variaciones en las propiedades superficiales que pueden ocurrir debido a cambios en los factores que afectan a la resistencia a la abrasión. Tales factores incluyen cambios en los materiales constitutivos o proporciones de un diseño de mezcla de concreto, practicas de construcción (colocación, consolidación, acabado, curado), y tratamientos de la superficie. La prueba no pretende proporcionar una medida

cuantitativa de la duración en condiciones de servicio (vida útil) que se puede esperar de una superficie sobre la base de las condiciones dadas.

El uso de humo de sílice en el concreto de alta resistencia con una baja relación A/MC se utilizó para la reparación de daños por abrasión y erosión en el cuenco amortiguador en Kinzua Dam y en el revestimiento del concreto del canal de bajo flujo, en el río de Los Angeles, esto fue descrito por McDonald (1991). Se demostró que el humo de sílice ofrece el potencial para mejorar muchas de las propiedades del concreto que son particularmente beneficiosas en la reparación de las estructuras hidráulicas. Cuando se compara con un pavimento de asfalto de alta calidad, la resistencia a la abrasión de un concreto de alta resistencia en pavimentos muy bien elaborados representa un aumento en la vida de servicio por un factor de casi diez.<sup>120</sup>

La resistencia a la abrasión de los concretos de alta resistencia que contienen aditivos químicos y materiales cementantes suplementarios fue investigada por Almeida (1994). Se evaluaron diez mezclas de concreto por su resistencia a la abrasión de acuerdo con un estándar portugués, que es similar a la norma brasileña y la norma alemana DIN 52108. La resistencia a la compresión del concreto varió de 60 a 110 MPa (9,000 a 16,000 psi) y la relación A/MC varió desde 0.24 hasta 0.42. Las mezclas de concreto contenían humo de sílice, cenizas volantes o puzolana natural, con o sin un aditivo reductor de agua de alto rango, manteniendo todas unas consistencias fijas. Los resultados de las pruebas sugieren que la resistencia a la abrasión del concreto generalmente varía inversamente con la relación A/MC, la porosidad, y el volumen de pasta del concreto. Por lo tanto, mediante el uso de un reductor de agua de alto rango para disminuir la relación A/MC, la resistencia a la abrasión del concreto conceptualmente podría ser mejorada en gran medida. El colocar una adición mineral sin usar superplastificante reduciría la resistencia a la abrasión del concreto ya que se necesitará más agua para mantener con consistencia

---

<sup>120</sup> Zia, 1997.

constante. Cabe señalar que los resultados del estudio deben aplicarse sólo a las mezclas de concreto de alta resistencia. Sin embargo, incluso el concreto menos resistente a la abrasión producido en el estudio dio lugar a un desgaste de la superficie que era sólo del 17 por ciento del desarrollado en un concreto convencional.<sup>121</sup>

**Figura 2.8.7.** Devil's Elbow Bridge en Missouri, Estados Unidos afectado por ataques químicos, con sus losas de concreto deterioradas por la permeabilidad y la posterior corrosión del acero.



---

<sup>121</sup> Zia y colaboradores, 1997.

### **2.8.4.3. PROPIEDADES TÉRMICAS.**

Las propiedades térmicas del concreto son de especial interés en las estructuras donde se pueden producir diferencias térmicas por efectos ambientales, incluido el calentamiento solar de pavimentos y cubiertas de puentes. Las propiedades térmicas del concreto son más complejas que en la mayoría de otros materiales, no sólo porque el concreto es un material compuesto cuyos constituyentes tienen diferentes propiedades térmicas, debido a sus propiedades también dependen del contenido de humedad y la porosidad. Las primeras investigaciones sobre los efectos de la elevada temperatura en las propiedades del concreto y su desempeño en gran medida fue en apoyo del desarrollo de los recipientes de presión de concreto pretensado para diseños de centrales nucleares.

Los datos sobre las propiedades térmicas del concreto de alto desempeño son limitados, aunque las propiedades térmicas del concreto de alta resistencia caen aproximadamente dentro del mismo rango que las del concreto de menor resistencia por características tales como el calor específico, la difusividad, la conductividad térmica y el coeficiente de expansión térmica.<sup>122</sup> Por lo cual si necesita una ampliación del tema también puede estudiar los efectos térmicos del concreto convencional. Para una mayor ampliación del tema visite los informes de Burg y Ost que midieron el coeficiente de expansión térmica de cinco concretos de altas resistencias disponibles comercialmente en el área de Chicago en 1992.

#### **2.8.4.3.1. RESISTENCIA AL FUEGO.**

Una de las mayores ventajas que el concreto de cemento hidráulico tiene sobre los materiales alternativos de construcción como el acero estructural o la madera es su resistencia superior al fuego, y por lo tanto, tiene la capacidad de cumplir con la tarea principal de proteger a las personas de los peligros relacionados con

---

<sup>122</sup> Famy y Panarese, 1994.

la seguridad. La resistencia al fuego se define como la capacidad de un elemento estructural para mantener su capacidad de carga cuando se expone a condiciones de incendio.

A medida que el uso del concreto de alta resistencia en las columnas continúa aumentando, se ha desarrollado especial interés con respecto a sus propiedades de resistencia al fuego, especialmente en lo referido a la exfoliación. Se presume de un desprendimiento explosivo, inducido por el fuego, este desprendimiento es causado por la acumulación de la presión en el poro durante el calentamiento.<sup>123</sup> La susceptibilidad del concreto de alta resistencia es principalmente debido a su permeabilidad significativamente menor en comparación con la permeabilidad de concretos de resistencia convencional. Debido a la porosidad capilar significativamente inferior de los concretos de alta resistencia, la humedad libre residual dentro del concreto puede quedar atrapada. Durante la exposición al fuego se generan presiones extremadamente altas de agua y es incapaz de escapar con facilidad debido a la alta densidad de la pasta del concreto de alta resistencia y esta presión a menudo alcanza los valores de la presión de vapor de saturación. A 300 °C (500 °F), la presión de vapor alcanza aproximadamente 8 MPa (1,200 psi), casi el doble de la resistencia a la tracción del concreto.<sup>124</sup> Además de la resistencia, Kodur (2000) señaló que la exfoliación también se atribuye al tipo de agregado, la intensidad de la carga, la configuración del refuerzo y el diseño. En los estudios realizados a miembros estructurales a gran escala se ha encontrado que el grado de resistencia al fuego de columnas de concreto de alta resistencia se podría mejorar mediante la adición de refuerzo de fibra sintética para el concreto.<sup>125</sup>

Por consiguiente, las presiones de vapor que normalmente son compensadas con la mayor porosidad del concreto, producen un aumento más rápido en los esfuerzos de tracción internos, que posteriormente conducen a un mayor

---

<sup>123</sup> Diederichs, 1995; Kodur y Lie, 1997.

<sup>124</sup> Phan y otros, 1997.

<sup>125</sup> Kodur, 2000.

desconchado. Un método que ha sido identificado para superar esta deficiencia consiste en añadir fibras de polipropileno en el concreto de alta resistencia. Las fibras de polipropileno se funden a aproximadamente 160 °C (320 °F), y por lo tanto son capaces de crear canales de transporte de humedad que pueden controlar efectivamente las presiones internas.

Olsen (1990) evaluó el riesgo de explosión de calor inducido en concreto de alta resistencia, en comparación con el concreto de resistencia normal. Cilindros de 100 x 200 mm, con resistencias a la compresión medidos en el intervalo de 30 MPa a 90 MPa (4,300 a 13,000 psi) se curaron de las dos maneras siguientes:

- ♦ **Condición N° 1:** 7 días en agua, seguido de 21 días en el ambiente de laboratorio [20 °C (68 °F) y 60 por ciento de humedad relativa).
- ♦ **Condición N° 2:** 7 días en agua seguido de 21 días sellados con papel de aluminio plástico.

Treinta y seis cilindros se calentaron en un horno eléctrico a una velocidad de calentamiento de 2.5 °C (4.5 °F) por minuto hasta alcanzar una temperatura de 600 °C (1112 °F). Después de 2 horas a esta temperatura, los cilindros se enfriaron a una velocidad de hasta 1 °C (1.8 °F) por minuto. Las pruebas mostraron que el riesgo de explosión depende de las condiciones de curado y que, en el caso del concreto de alta resistencia, el riesgo de explosión no es mayor que para el concreto de resistencia normal especialmente para el concreto curado bajo la Condición N° 1.<sup>126</sup>

---

<sup>126</sup> Zia y colaboradores, 1997.

### **2.8.5. ENSAYOS REALIZADOS AL CONCRETO DE ALTA RESISTENCIA Y A LOS MATERIALES CONSTITUYENTES.**

La construcción y el desempeño satisfactorios del concreto requieren un concreto con propiedades específicas. Para garantizar que se logren estas propiedades, los ensayos (pruebas, experimentaciones) de control de calidad y aceptación son partes indispensables del proceso constructivo.

Los resultados de los ensayos fornecen informaciones importantes para basar las decisiones con respecto a los ajustes del diseño de la mezcla. Sin embargo, la experiencia pasada y el buen juicio se deben basar en la evaluación de las pruebas y de su significado en el control de los procesos de diseño, revoltura (bachada, amasada) y colocación (colado), los cuales influyen el comportamiento final del concreto.

Los especificadores están empezando a utilizar las especificaciones basadas en el desempeño (también llamadas de resultado final o especificaciones para propiedades finales) que requieren que se logre el desempeño final del concreto independientemente del proceso que se use para esto. Las pruebas físicas y las propiedades del concreto se usan para medir la aceptación. Estas especificaciones siempre tienen límites de aceptación para los ensayos de control de proceso, tales como revenimiento (asentamiento), o límites de las cantidades de los ingredientes del concreto, los cuales normalmente se encuentran en las normas de prescripción. El resultado final de la resistencia a compresión, la baja permeabilidad, la durabilidad documentada y un número mínimo de grietas (fisuras), por ejemplo, podrían ser un criterio de aceptación. Claro que, incluso cuando estos ensayos de control de proceso no están especificados, el productor de concreto perspicaz los utilizaría para guiar el producto hasta un resultado final

satisfactorio. Sin embargo, la mayoría de las especificaciones hoy en día aún son una combinación de requisitos de prescripción y de desempeño.<sup>127</sup>

### **2.8.5.1. CLASES DE ENSAYOS.**

Las especificaciones de proyecto pueden afectar:

- 1) *Las características de la mezcla, tales como el tamaño máximo del agregado, las proporciones de los agregados o el contenido mínimo de cemento;*
- 2) *Las características del cemento, del agua, de los agregados y de los aditivos y*
- 3) *Las características del concreto fresco y endurecido, tales como temperatura, revenimiento (asentamiento), contenido de aire y resistencia a compresión o a flexión.*

Se prueban los materiales cementantes para verificar su conformidad con las normas a fin de evitar un desempeño anormal, tal como endurecimiento rápido, fraguado retrasado o baja resistencia del concreto.<sup>128</sup>

Los ensayos de los agregados tienen dos propósitos principales:

- 1) *Determinar la adecuación del material para su uso en concreto, incluyéndose ensayos de abrasión, sanidad contra los ciclos de congelación-deshielo en ambiente saturado, materiales perjudiciales por análisis petrográfico y reacción álcali-agregado potencial y*

---

<sup>127</sup> Parry, 2000.

<sup>128</sup> Algunas Normas a Cumplir: ASTM, AASHTO, CONVENIN, COPANIT, INEN, IRAM, NB, Nch, NGO, NMX, NTP, NP o UNIT.

- 2) *Garantizar la uniformidad, tales como las pruebas para control de humedad, densidad relativa (gravedad específica) y granulometría de los agregados. Algunas pruebas se usan para ambos propósitos.*

Los ensayos del concreto para evaluar el desempeño de los materiales disponibles, para establecer las proporciones de la mezcla y para controlar la calidad del concreto durante la ejecución incluyen *revenimiento, contenido de aire, temperatura, densidad (peso específico, peso volumétrico, peso unitario) y resistencia*. Las pruebas de revenimiento, de contenido de aire y de resistencia normalmente se requieren en las especificaciones del proyecto para el control de calidad del concreto, mientras que la densidad es más útil en el proporcionamiento de la mezcla. Sin embargo, algunas normas tales como la ASTM C 94 (AASHTO M 157), IRAM 1666, NCh1934, NGO 41 068, NMX-C-155, NTC 3318 y NTP 339.114 especifican que se deben hacer los ensayos de revenimiento, contenido de aire, densidad y temperatura cuando se moldean los especímenes (probetas) para resistencia.

Enseguida, se presenta una discusión sobre la frecuencia de las pruebas y la descripción de los principales ensayos de control que se usan para garantizar la uniformidad de los materiales, las propiedades deseadas del concreto fresco y la resistencia requerida del concreto endurecido. También se describen pruebas especiales.

#### **2.8.5.2. FRECUENCIA DE LOS ENSAYOS.**

La frecuencia de los ensayos es un factor importante en la eficiencia del control de calidad del concreto. Se requieren pruebas con frecuencias especificadas para la aceptación del material o de uno de los componentes en una localización aleatoria dentro de una cantidad o periodo de tiempo representados por el ensayo. Tales frecuencias pueden no suceder con la periodicidad suficiente para controlar el

material, durante la producción, dentro de los límites especificados. Las pruebas de control de proceso no son aleatorias y se realizan con más frecuencia que lo especificado, a fin de documentar las tendencias que permiten que se hagan ajustes antes de la realización de las pruebas de aceptación.

La frecuencia de los ensayos de agregados y concreto para los procedimientos típicos de dosificación en planta depende principalmente de la uniformidad de los materiales, incluyéndose el contenido de humedad de los agregados, y del proceso de producción. *Inicialmente, es aconsejable que se hagan pruebas de control de proceso varias veces al día, pero a medida que el trabajo progresa y el material se vuelve más predecible, normalmente se puede reducir la frecuencia.* La ASTM C 1451 fornece una práctica estándar para la determinación de la uniformidad de los materiales cementantes, agregados y aditivos químicos empleados en el concreto.

Normalmente, las pruebas de contenido de humedad de los agregados se realizan una o dos veces al día. Frecuentemente, la primera revoltura de agregado fino por la mañana está excesivamente húmeda, pues la humedad migra durante la noche para el fondo del cubo de almacenamiento (tolva, cubeta). A medida que el agregado fino se retira del fondo del cubo y se adicionan más agregados, el contenido de humedad se estabiliza en un nivel más bajo y se puede hacer la primera prueba de humedad. Es importante la obtención de muestras representativas de humedad de los agregados que se van a utilizar, ya que un cambio de la humedad del agregado fino de sólo 1% cambiará la cantidad de agua necesaria en la mezcla en aproximadamente  $8 \text{ kg/m}^3$  ( $13 \text{ lb/yarda}^3$ ).

Hablando de casos en la obra, el ensayo de revenimiento (asentamiento en cono de Abrams) se debe hacer en la primera revoltura (bachada, amasada) de concreto del día, siempre que la consistencia del concreto parezca que varía y siempre que se moldeen cilindros en la obra para las pruebas de resistencia a compresión.

También las pruebas de contenido de aire se deben hacer con frecuencia suficiente y en el lugar de entrega para garantizar el contenido de aire adecuado, principalmente si se cambian la temperatura y la granulometría del agregado. Se debe realizar un ensayo de contenido de aire para cada muestra del concreto, de la cual se hacen cilindros, y también se debe conservar un registro de la temperatura de cada muestra.

El número de pruebas de resistencia realizadas va a depender de las especificaciones de la obra y de la ocurrencia de variaciones. El código de construcción ACI 318 y la ASTM C 94 requieren que se hagan pruebas de resistencia, para cada clase de concreto colocado en cada día, por lo menos una vez al día y por lo menos a cada 115 metros cúbicos (150 yardas cúbicas).

Adicionalmente, el ACI 318 recomienda que deben tomarse pruebas no menos que una vez para cada 500 m<sup>2</sup> (5000 pies<sup>2</sup>) de área de losa o muros colados en el mismo día. Se requiere el promedio de resistencia a los 28 días de dos cilindros, para cada prueba usada para evaluar el concreto. También se hacen cilindros para ensayos a los 7 días, juntamente con los de 28 días, a fin de fornecer una indicación temprana del desarrollo de resistencia. Como regla práctica, normalmente la resistencia a compresión a los 7 días es cerca de 60% a 70% de la resistencia a los 28 días, dependiendo del tipo de cemento, de la cantidad de material cementante, de la relación agua-cemento, de la temperatura de curado y de otras variables. Pueden ser necesarios especímenes adicionales en el caso del concreto de alta resistencia o cuando los requisitos estructurales sean críticos.

Hablando de concretos en estudio como en el caso de esta investigación, los procedimientos a seguir para validar los resultados son los dictados en las respectivas normas para concretos elaborados en laboratorio.

Los especímenes se deben curar en laboratorio cuando se los va a utilizar en pruebas de aceptación o de desempeño final del concreto. Sin embargo, no se

deben utilizar especímenes curados en laboratorio como una indicación de la resistencia del concreto en el sitio (en la estructura).<sup>129</sup>

Las resistencias del concreto en el sitio se documentan típicamente con muestras curadas en la obra (o lo más cerca posible) de la misma manera que el concreto de la estructura. Los especímenes curados en la obra normalmente se los usa para decidir cuándo se deben retirar las cimbras (encofrados) y los puntales debajo de una losa estructural o para determinar cuándo se puede permitir el tráfico sobre un pavimento nuevo. La ASTM C 31 (AASHTO T 23), COVENIN 0338, IRAM 1524, NCh1017, NGO 41 061, NTC 550, NMX- C-160, NTP 339.033 contienen información adicional sobre el manejo de los cilindros de concreto curado en la obra. A pesar que se pueden ensayar los cilindros curados en obra a cualquier edad, normalmente se hacen pruebas a los 7 días para que se comparen con las pruebas de laboratorio en la misma edad. Esto es útil para verificar si el curado y la protección durante el colado en clima frío están adecuados.

---

<sup>129</sup> ACI Comité 318, 2002.

### **2.8.5.3. ENSAYOS A LOS AGREGADOS.\***

#### **2.8.5.3.1. MUESTREO DE AGREGADOS.**

Los métodos para la obtención de muestras significativas de los agregados (áridos) se presentan en ASTM D 75 (AASHTO T 2).<sup>130</sup> La localización en el proceso de producción donde las muestras van a ser obtenidas debe ser planeada cuidadosamente. El muestreo en las esteras (bandas) transportadoras, pilas de almacenamiento o tolva (cubo, cubeta) de agregado puede requerir equipos especiales de muestreo. Se deben tomar precauciones para que se obtenga una muestra lejos de la parte segregada de la pila y en cantidad suficiente para atender el tamaño mínimo requerido por las normas. Además de esto, las muestras para la determinación del contenido de humedad se deben colocar en recipientes sellados o en bolsas de plástico, lo más pronto posible, para retener la humedad hasta que se haga la prueba.

La reducción de muestras grandes de campo para cantidades pequeñas de pruebas individuales se debe ejecutar con cuidado, a fin de que las muestras finales sean realmente representativas según ASTM C 702 (AASHTO T 248).<sup>131</sup> Con los agregados gruesos, se utiliza el método de cuarteamiento: la muestra, totalmente mezclada,



**Figura 2.8.8.** *Proceso de cuarteo mecánico de agregado grueso.*

<sup>130</sup> Otras normas relacionadas: COVENIN 0270, IRAM 1509, NCh164.E, NGO 41 057, NMX-C-030, NTC 129, NTE 0695, NTP 400.010, UNIT-NM 26.

*\*Previos al Diseño de Mezcla.*

<sup>131</sup> Otras normas relacionadas: NMX-C 170-1997-ONNCCE, NTC 3674, NTE 0695, UNIT-NM 27.

se esparce sobre un pedazo de lona, en una capa regular de 75 o 100 mm (3 a 4 pulg.) de espesor, y se la divide en cuatro partes iguales. Las dos partes opuestas se desechan. Este proceso se repite hasta que se obtenga el tamaño deseado. Algunas veces se utiliza un proceso similar para el agregado fino, húmedo. Se recomiendan los cuarteadores para los agregados secos, pero no se debe utilizar para agregados cuya humedad ultrapase la humedad de saturado con superficie seca.

#### **2.8.5.3.2. IMPUREZAS ORGÁNICAS.**

Las impurezas orgánicas en los agregados finos se deben determinar de acuerdo con ASTM C 40 (AASHTO T 21).<sup>132</sup> Se coloca una muestra de agregado fino en una solución de hidróxido de sodio y se agita. Al día siguiente, se compara el color de la solución de hidróxido de sodio con un estándar de color de vidrios o una solución de color estándar. Si el color de la solución que contiene la muestra es más oscuro que la solución estándar o que la placa de vidrio orgánico No. 3, no se debe utilizar el agregado fino para trabajos importantes en concreto, sin una investigación más profunda.

Algunos agregados finos contienen pequeñas cantidades de carbón o lignita que dan al líquido el color oscuro. La cantidad puede ser insuficiente para reducir apreciablemente la resistencia del concreto. Si la apariencia de la superficie del concreto no es importante, la ASTM C 33 (AASHTO M 6)<sup>133</sup> declara que el agregado fino es aceptable si la cantidad de carbón y lignita no exceden al 1% de la masa total de agregado fino. Se puede usar el agregado fino que no atiende a este límite si, al ensayarlo de acuerdo con ASTM C 87 (AASHTO T 71)<sup>134</sup> la

---

<sup>132</sup> Otras normas relacionadas: COVENIN 0256, NCh166, NMX-C-088-1997-ONNCCE, NTC 127, NTP 400.024, UNIT-NM49.

<sup>133</sup> Otras normas relacionadas: NCh163, IRAM 1512, IRAM 1531, NMX-C-111, NTC 174, NTP 400.037, UNIT 84.

<sup>134</sup> Otras normas relacionadas: COVENIN 0275, IRAM 1647, NMXC- 07, NTC 579, NTP 400.013.

resistencia a compresión<sup>135</sup> a los 7 días de cubos de mortero producidos con este agregado es, por lo menos, 96% de la resistencia del mortero producido con la misma arena, pero lavada en una solución de 3% de hidróxido de sodio y enjuagada totalmente con agua. Cantidades considerables de carbón y lignita en el agregado pueden causar erupciones y manchas del concreto y pueden disminuir su durabilidad, cuando expuesto a la intemperie.

La experiencia es normalmente la mejor indicación de la durabilidad del concreto producido con tales agregados.

#### **2.8.5.3.3. MATERIAL FINO OBJETABLE.**

Grandes cantidades de arcilla y limo en agregados puede afectar adversamente la durabilidad, aumentar la demanda de agua y aumentar la contracción (retracción).

Las especificaciones normalmente limitan la cantidad de material que pasa por el tamiz (malla, cedazo) No. 200 (75  $\mu\text{m}$ ) a 2% o 3% en el agregado fino y a 1% o menos en el agregado grueso. Las pruebas para el material más fino que 75  $\mu\text{m}$  (tamiz No. 200) deben estar de acuerdo con ASTM C 117 (AASHTO T 11)<sup>136</sup> es una prueba para el material más fino que 80  $\mu\text{m}$ . Las pruebas de terrones de arcilla deben estar de acuerdo con la ASTM C 142 (AASHTO T 112)<sup>137</sup>.

#### **2.8.5.3.4. GRANULOMETRÍA.**

La granulometría de los agregados afecta considerablemente a proporción de la mezcla de concreto y su trabajabilidad.

---

<sup>135</sup> Pruebas de Resistencia a la Compresión del Concreto: ASTM C 109 o AASHTO T 106, COVENIN 484, NTC 220, NTE 0488, NTP 334.051.

<sup>136</sup> Otras pruebas relacionadas: IRAM 1540, NMX-C-084, NTC 78, NTE 0697, NTP 400.018, UNIT-NM 46. La NCh1223.

<sup>137</sup> Otras pruebas relacionadas: COVENIN 0257, IRAM 1647, NMX-C-071, NCh1327, NTC 589, NTE 0698, NTP 400.015 o UNIT-NM 44.

Las pruebas de granulometría son elementos importantes para la garantía de la calidad. La granulometría o la distribución de los tamaños de partículas del agregado se determina por el análisis de la prueba, en la cual las partículas se separan en sus varios tamaños a través de tamices estándares. El análisis debe ser realizado de acuerdo con ASTM C 136 (AASHTO T 27)<sup>138</sup>.

Los resultados de los análisis se usan de tres maneras:

1. *Para determinar si los materiales obedecen las especificaciones;*
2. *Para seleccionar el material más adecuado, si hay varios agregados disponibles y*
3. *Para detectar variaciones en la granulometría que son suficientes para justificar la mezcla de tamaños seleccionados o un ajuste de las proporciones de la mezcla de concreto.*

Los requisitos de granulometría de los agregados para concreto se presentan en las normas ASTM C 33 (AASHTO M 5/M80).<sup>139</sup> Se deben evitar los materiales que contengan cantidades excesivas o cantidades demasiado pequeñas de cualquiera de los tamaños. Algunas especificaciones requieren que las proporciones de mezcla se ajusten si el promedio del módulo de finura cambia más de 0.20. Otras especificaciones requieren ajustes de las proporciones de la mezcla si la cantidad retenida en cualquiera de dos tamices consecutivos superar 10% de la masa total de la muestra del agregado. *Una pequeña cantidad de material limpio que pasa por la malla No. 100 (150  $\mu$ m), pero que se queda retenida en la malla No. 200 (75  $\mu$ m), es deseable para la trabajabilidad. Por esta razón, la mayoría de las especificaciones permite hasta 10% de este material en el agregado fino.*

---

<sup>138</sup> Otras pruebas relacionadas: COVENIN 0255, IRAM 1505, IRAM 1627, NMX-C-077, NCh165, NTC 77, NTE 0696, NTP 400.012 o UNIT 48.

<sup>139</sup> Otras normas relacionadas: COVENIN 277, IRAM 1627, NCh163, NMX-C-111, NTC 174, NTP 400.037 o UNIT 82.

El agregado bien graduado (granulometría continua) contiene partículas en cada tamaño de tamiz. El agregado bien graduado realza numerosos factores que resultan en mayor trabajabilidad y durabilidad. Cuanto mejor graduado un agregado sea, más va a empaquetar las partículas juntas, reduciendo el volumen entre ellas que debe ser lleno por la pasta. Por otro lado, agregados con granulometría discontinua, o sea, aquéllos que tienen una gran cantidad o deficiencia de uno o más tamaños de malla, pueden disminuir la trabajabilidad durante mezclado, bombeo, colocación, consolidación y acabado.

También se puede afectar la durabilidad con el uso de más del necesario agregado fino y la cantidad de agua a fin de producirse una mezcla trabajable.

#### **2.8.5.3.5. CONTENIDO DE HUMEDAD EN LOS AGREGADOS.\***

*\*A excepción de las pruebas anteriores, ésta se realiza al momento de proporcionar y ajustar las mezclas ya sea en laboratorio, planta u obra.*

Se usan muchos métodos para la determinación del contenido de humedad en las muestras de agregado. El contenido total de humedad en el agregado fino y en el agregado grueso se puede ensayar de acuerdo con las normas ASTM C 566 (AASHTO T 255).<sup>140</sup> En este método una muestra medida de agregado húmedo se seca en un horno convencional ventilado, en un horno de microondas, en un horno eléctrico o sobre una placa directa al fuego.

A través de la masa antes y después del secado, se puede calcular el contenido de humedad como sigue:

$$P = \frac{(H - S)}{S} 100$$

---

<sup>140</sup> Otras normas relacionadas: COVENIN 1375, NMX-C-166, NTC 1776, NTP 339.185.

*Siendo:*

$P$  = Contenido de humedad de la muestra en porcentaje.

$H$  = Masa original de la muestra.

$S$  = Masa seca de la muestra.

La humedad (libre) de la superficie se puede calcular si se conoce el porcentaje de humedad absorbida en el agregado. El contenido de humedad en la superficie es igual a la humedad total menos la humedad absorbida. Se puede utilizar la información histórica para la fuente de agregado, a fin de que se obtengan los datos de contenido de humedad absorbida, si la composición mineralógica de la mina o de la cantera no se ha cambiado considerablemente.

Sin embargo, si no hay datos recientes disponibles, se los puede determinar a través de ASTM C 127 (AASHTO T 85)<sup>141</sup> para el agregado grueso y ASTM C 128 (AASHTO T 84)<sup>142</sup> para el agregado fino. Sólo la humedad de la superficie, no la humedad absorbida, se vuelve parte del agua de la mezcla en el concreto.

Los porcentajes de la humedad superficial se usan para calcular la cantidad de agua en los agregados, a fin de que se reduzca la cantidad de agua de la mezcla, usada en la dosificación. Adicionalmente, se debe aumentar la masa de agregados en la dosificación en el porcentaje de humedad superficial presente en cada tipo de agregado. Si no se hacen ajustes durante la dosificación, el agua superficial va a reemplazar una parte de la masa de agregado y la mezcla no va a rendir adecuadamente.

Otro método para la determinación del contenido de humedad, el cual no es preciso, consiste en evaporar la humedad con la quema de alcohol.

---

<sup>141</sup> Otras normas relacionadas: COVENIN 0269, IRAM 1533, NCh1117, NMX-C-164, NTC 176, NTP 400.021, UNIT-NM 30 y UNIT-NM 53.

<sup>142</sup> Otras normas relacionadas: COVENIN 0268, IRAM 1520, NCh1239, NMX-C-165, NTC 237, NTP 400.022, UNIT-NM 64, UNIT-NM 52.

Cuando equipos de secado no están disponibles, se puede determinar la humedad (libre) superficial del agregado fino, en la obra o en la planta mezcladora, de acuerdo con ASTM C 70 y COVENIN 0272. El mismo procedimiento se puede utilizar para el agregado grueso con los cambios adecuados en el tamaño de la muestra y en el tamaño del recipiente. Esta prueba depende de la sustitución del agua por una masa conocida de agregado húmedo, por lo tanto, la densidad relativa del agregado se debe conocer con precisión.

Los medidores (contadores) eléctricos de humedad se usan en muchas plantas de concreto premezclado, principalmente para monitorear el contenido de humedad de los agregados finos, pero algunas plantas también los usan para verificar el agregado grueso. Operan basándose en el principio que la resistencia eléctrica del agregado húmedo disminuye con el aumento de la humedad, dentro del intervalo de humedades normalmente encontradas. Los contadores miden la resistencia eléctrica de los agregados entre electrodos proyectados dentro de la tolva de dosificación o depósito. Los medidores de humedad que usan el método de absorción de microondas se están volviendo más populares porque son más precisos que los medidores eléctricos. Sin embargo, ambos métodos miden el contenido de humedad precisa y rápidamente, aunque sólo al nivel de la sonda.

#### **2.8.5.4. ENSAYOS AL CONCRETO EN ESTADO FRESCO.**

##### **2.8.5.4.1. MUESTREO DEL CONCRETO FRESCO.**

Se debe enfatizar la importancia de la obtención de muestras realmente representativas del concreto fresco para los ensayos de control. A menos que la muestra sea representativa, los resultados de las pruebas serán engañosos. Las muestras se deben obtener y manejar de acuerdo con ASTM C 172 (AASHTO T 141).<sup>143</sup> A excepción de las pruebas de rutina, tales como revenimiento (asentamiento) y contenido de aire, realizadas para el control del proceso, la ASTM C 172 (AASHTO T 141) requiere que el tamaño de la muestra para el propósito de aceptación debe ser, por lo menos, 28 litros (1 pie<sup>3</sup>) y se la debe obtener durante los 15 minutos entre la primera y la última porción de la amasada (bachada, revoltura). La muestra compuesta, producida con dos o más porciones, no se debe tomar enseguida a la porción inicial de la descarga, ni tampoco a la porción final. La muestra se debe proteger del sol, viento y otras fuentes de evaporación rápida durante el muestreo y el ensayo.

*Tomar en cuenta que en revolturas para pruebas en laboratorio se debe agregar el volumen necesario para realizar las respectivas pruebas al concreto en estado fresco.*

##### **2.8.5.4.2. CONSISTENCIA.**

El ensayo de revenimiento o asentamiento del cono de Abrams, ASTM C 143 (AASHTO T 119)<sup>144</sup> es el método más ampliamente aceptable y utilizado para medir la consistencia del concreto.

---

<sup>143</sup> Otras normas relacionadas: COVENIN 0344, IRAM 1541, NMX-C-161-1997-ONNCCE, NCh171.E, NGO 41 057, NTC 454, NTE 1763, NTP 339.036, UNIT-NM 33.

<sup>144</sup> Otras normas relacionadas: COVENIN 0339, IRAM 1536, NCh1019, NMX-C-156-1997-ONNCCE, NTC 3696, NTE 1578, NTP 339.035, UNIT-NM 67

El equipo de prueba consiste en un cono de revenimiento (molde cónico de metal 300 mm [12 pulg.] de altura, con 200 mm [8 pulg.] de diámetro de base y 100 mm [4 pulg.] de diámetro de la parte superior) y una varilla de metal con 16 mm de diámetro (5/8 pulg.) y 600 mm (24 pulg.) de longitud con una punta de forma hemisférica. El cono húmedo, colocado verticalmente sobre una superficie plana, rígida y no absorbente, se debe llenar en tres capas de volúmenes aproximadamente iguales. Por lo tanto, se debe llenar el cono hasta una profundidad de 70 mm (2 1/2 pulg.) en la primera capa, una profundidad de 160 mm (6 pulg.) en la segunda y la última capa se debe sobrellenar. Se aplican 25 golpes en cada capa. Después de los golpes, se enrasa la última capa y se levanta el cono lentamente aproximadamente 300 mm (12 pulg.) en  $5 \pm 2$  segundos.



**Figura 2.8.9.** Ensayo de revenimiento (asentamiento en cono de Abrams) para la consistencia del concreto. La Figura A muestra un revenimiento más bajo, la Figura B muestra un revenimiento mayor.

A medida que el concreto se hunde o se asienta en una nueva altura, se invierte el cono vacío y se lo coloca gentilmente cerca del concreto asentado. El revenimiento o el asentamiento es la distancia vertical que el concreto se ha asentado, medida con una precisión de 5 mm (1/4 pulg.). Se usa una regla para medir de la parte superior del molde del cono hasta en centro original desplazado del concreto asentado (véase la *Figura 2.8.9*).

Un valor más elevado de revenimiento (asentamiento) es indicativo de un concreto más fluido. Todo el ensayo hasta la remoción del cono se debe completar en 2 1/2

minutos, pues el concreto pierde revenimiento con el tiempo. Si hay desmoronamiento de una parte del concreto, se debe realizar otra prueba con otra porción de la muestra.

Otro método de ensayo para la fluidez (flujo) del concreto fresco envuelve el uso del medidor k de revenimiento (ASTM C 1362). Éste es un aparato de sondeo que se introduce dentro del concreto en cualquier localización donde haya una profundidad de concreto mínima de 175 mm (7 pulg.) y un radio de concreto alrededor del medidor de 75 mm (3 pulg.). La cantidad de mortero fluyendo para dentro de las aberturas del medidor es la medida de fluidez.

Ensayos adicionales de consistencia incluyen: el aparato de vibración inclinada de la FHWA (Federal Highway Administration - Administración de las Autopistas Federales)<sup>145</sup>, ensayo del factor de compactación británico (BS 1881), ensayo de remoldeo de Powers<sup>146</sup>, prueba alemana de la mesa de flujo (DIN 1048-1), el consistómetro Vebe para el concreto compactado con rodillos (ASTM C 1170), el ensayo de penetración de la esfera de Nelly (ASTM C 360-92, ahora suspendida), el medidor Thaulow, el cono de revenimiento invertido para el concreto reforzado con fibras (ASTM C 995), el plastómetro de Powers y Wiler<sup>147</sup>, el aparato de trabajabilidad de Tattersall (1971), el ensayo Colebrand, viscómetro BMI<sup>148</sup>, el reómetro BTRHEOM para concreto fluido<sup>149</sup>, reómetro de orificio libre<sup>150</sup>, medidor del torque del tambor de entrega (patente EE.UU. 4,332,158 [1982]), camioneta de entrega (patente EE.UU. 4,578,989 [1986]), Caja de flujo de Angles<sup>151</sup>, ensayo de penetración del anillo<sup>152</sup> y el consistómetro de Wigmore (1948). La prueba de Vebe y la prueba de Thaulow se aplican principalmente a mezclas ásperas y de

---

<sup>145</sup> Wong y otros, 2001; Saucier, 1966.

<sup>146</sup> Powers, 1932.

<sup>147</sup> Powers y Wiler, 1941.

<sup>148</sup> Wallevik 1996.

<sup>149</sup> Larrard, Sztikar, Hu y Joly; 1993.

<sup>150</sup> Bartos, 1978.

<sup>151</sup> Angles, 1974.

<sup>152</sup> Teranishs y otros 1994.

consistencia seca, mientras que la tabla de flujo se aplica principalmente a concretos fluidos<sup>153</sup>.

#### **2.8.5.4.3. MEDICIÓN DE LA TEMPERATURA.**

Como la temperatura del concreto tiene una gran influencia sobre las propiedades tanto del concreto fresco como del endurecido, muchas especificaciones limitan la temperatura del concreto fresco. Están disponibles termómetros de vidrio o con coraza (*Figura 2.8.10*). El termómetro debe tener precisión de  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$  ( $\pm 1^{\circ}\text{F}$ ) y debe permanecer en una muestra representativa de concreto, por lo menos, 2 minutos o hasta que la lectura se estabilice.

Un mínimo de 75 mm de concreto debe rodear la porción sensitiva del termómetro. También están disponibles los medidores de temperatura electrónicos con lectura digital.



**Figura 2.8.10.** Termómetro que mide la temperatura del concreto en estado fresco.

La medición de la temperatura se realiza bajo la norma ASTM C 1064 (AASHTO T 309), se debe terminar en un periodo de 5 minutos después de tomada la muestra.

---

<sup>153</sup> Scanlon, 1994.

#### 2.8.5.4.4. DENSIDAD Y RENDIMIENTO.

La densidad (peso unitario, peso volumétrico, peso específico) y el rendimiento del concreto fresco (*Figura 2.8.11.*) se determinan de acuerdo con ASTM C 138 (AASHTO T 121)<sup>154</sup>. Los resultados deben ser suficientemente precisos para determinar la cantidad volumétrica (rendimiento) del concreto producido en cada mezcla. La prueba también fornece una indicación del contenido de aire, desde que se conozcan las densidades relativas de los ingredientes. Se requiere una balanza o una báscula con precisión de 0.3% de la masa prevista de la muestra y del recipiente. Por ejemplo, un recipiente con 7 litros (0.25 pies<sup>3</sup>) requiere una



*Figura 2.8.11. Se pesa el concreto fresco en un recipiente de volumen conocido para la determinación de la densidad (peso unitario).*

balanza con precisión de 50g (0.1 lb). El tamaño del recipiente empleado en la determinación del peso específico y del rendimiento varía con el tamaño del agregado. Por ejemplo, si está en buenas condiciones, el recipiente del medidor de aire con capacidad para 7 litros (0.25 pies<sup>3</sup>) se puede utilizar con agregados de hasta 25 mm (1 pulg.), mientras que el recipiente de 14 litros (0.5 pies<sup>3</sup>) se usa con agregados de hasta 50 mm (2 pulg.).

El recipiente se debe calibrar por lo menos una vez al año (ASTM C 1077). Se debe tener cuidado para consolidar el concreto adecuadamente, sea a través de golpes, sea a través de vibración interna. Se debe utilizar una chapa o placa plana para enrasar la superficie superior del concreto, a fin de que el recipiente esté lleno y con acabado plano y liso. La densidad (peso específico) se expresa en kilogramos por metro cúbico (libras por pie cúbico) y el rendimiento en metros cúbicos (pies cúbicos).

<sup>154</sup> Otras normas relacionadas: COVENIN 0349, IRAM 1562, NCh1564, NGO 41 017 h5, NMX-C-162-ONNCCE-2000, NTP 339.046, UNIT-NM 56

La densidad del concreto no endurecido, también como del concreto endurecido, se puede determinar por métodos nucleares ASTM C 1040 (AASHTO T 271).

#### **2.8.5.4.5. CONTENIDO DE AIRE.**

Se pueden utilizar varios métodos para medir el contenido de aire del concreto fresco. Las normas incluyen el método por presión<sup>155</sup>, el método volumétrico<sup>156</sup> y el método gravimétrico<sup>157</sup>.

El método por presión (*Figura 2.8.12.*) se basa en la ley de Boyle, la cual relaciona presión y volumen. Muchos medidores de aire comercialmente disponibles están calibrados para leer contenido de aire directamente cuando se aplica una presión predeterminada. La presión aplicada comprime el aire dentro de la muestra de concreto, incluyendo el aire en los poros de los agregados. Por esta razón, las pruebas por este método no son adecuadas para medir el contenido de aire de concretos producidos con algunos agregados ligeros u otros materiales muy porosos.



**Figura 2.8.12.** Medidor del tipo de presión para la determinación del contenido de aire.

<sup>155</sup> Según: ASTM C 231 (AASHTO T 152), COVENIN 0348, IRAM 1602, NGO 41 017 h7, NMX-C-157, NTC 1032, NTP 339.080, UNIT-NM 47.

<sup>156</sup> Según: ASTM C 173 (AASHTO T 196), COVENIN 0347, IRAM 1511, NGO 41 017 h6, NMX-C-158, NTC 1028, NTP 339.081.

<sup>157</sup> Según: ASTM C 138 (AASHTO T 121), COVENIN 0349, NCh1564, NGO 41 017 h5, NMX-C-162- ONNCC-2000, NTP 339.046, UNIT-NM 56.

Los factores de corrección del agregado, el cual compensa el aire atrapado (aire ocluido) en los agregados de peso normal son relativamente constantes y, a pesar de pequeños, se los debe sustraer de la lectura en el medidor de presión para obtenerse el contenido de aire correcto.

Se debe calibrar el equipo para varias altitudes sobre el nivel del mar, si va a utilizar en sitios que tengan diferencia en altitudes considerables. Algunos medidores usan cambio de presión de un volumen conocido de aire y no se afectan por los cambios de altitudes. Los medidores de presión son ampliamente usados porque no hay necesidad de conocerse las proporciones de la mezcla, ni la gravedad específica de los ingredientes del concreto. Además, se puede realizar esta prueba en menos tiempo de lo requerido por otros métodos.

Existen muchos métodos para llevar a cabo ésta prueba pero en cualquiera de estos, las pruebas de contenido de aire se deben empezar hasta 5 minutos después que la porción final de la muestra fue obtenida.

#### **2.8.5.4.6. ESPECÍMENES PARA PRUEBAS DE RESISTENCIA.**

Los especímenes (probetas) moldeados para los ensayos de resistencia se deben preparar de acuerdo con ASTM C 31 (AASHTO T 23)<sup>158</sup> para probetas moldeadas en la obra o ASTM C 192 (AASHTO T 126)<sup>159</sup> para probetas moldeadas en el laboratorio. La preparación de los especímenes debe empezar, al máximo, 15 minutos después de la obtención de la muestra del concreto.

La probeta estándar para la resistencia a compresión del concreto con agregado de dimensión máxima de 50 mm (2 pulg.) o menor es un cilindro de 150 mm (6 pulg.) de diámetro por 300 mm (12 pulg.) de altura. Para agregados mayores, el

---

<sup>158</sup> Otras normas relacionadas: COVENIN 0338, IRAM 1524, NCh1017, NGO 41 061, NTC 550, NMX - C-160 y NTP 339.033.

<sup>159</sup> Otras normas relacionadas: COVENIN 0340, COVENIN 0338, IRAM 1534, NGO 41 060, NMX-C-159, NTC 1377, 339.045 y UNIT-NM 79.

diámetro del cilindro debe ser, por lo menos, tres veces mayor que la dimensión máxima del agregado y la altura debe ser dos veces el diámetro. Aunque se prefieren los moldes metálicos rígidos, se puede usar moldes de plástico, de cartón parafinado u otro tipo de molde desechable, conforme ASTM C 470. Se deben colocar los moldes sobre una superficie lisa, nivelada y rígida y se los deben llenar cuidadosamente para evitar distorsiones en su forma.

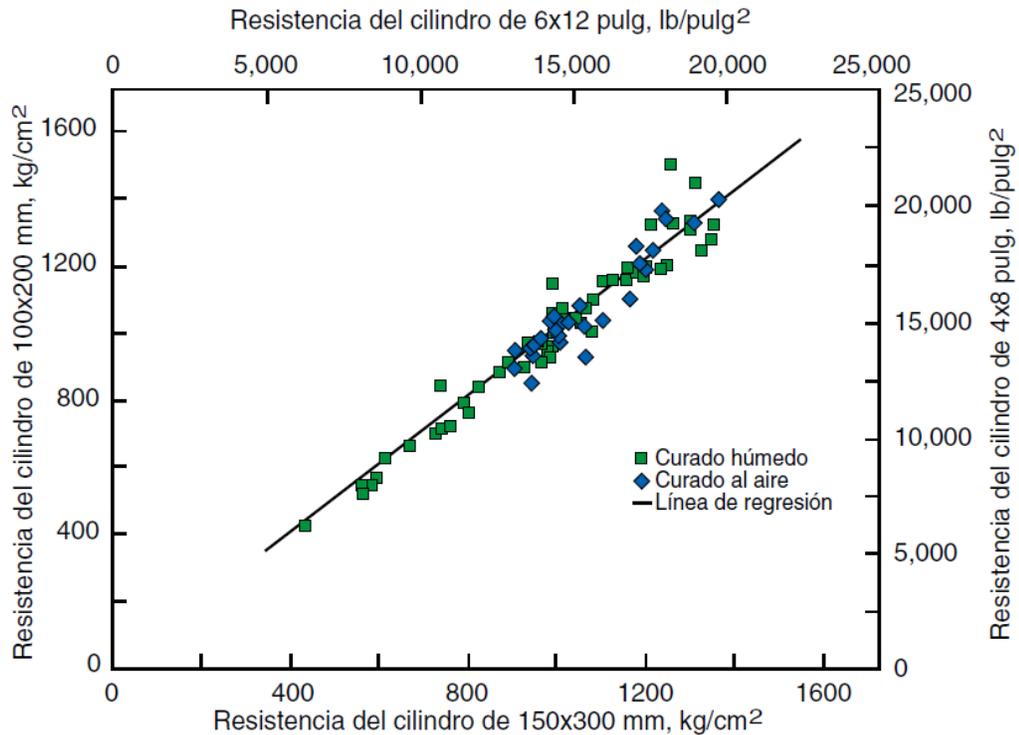


**Figura 2.8.13.** Preparación de los especímenes estándar para la prueba de resistencia a compresión del concreto utilizando un tipo de moldes artesanales no muy recomendados.

El molde de cilindro con 100 mm (4 pulg.) de diámetro por 200 mm (8 pulg.) de altura está siendo utilizado comúnmente para los concretos de alta resistencia que contienen agregado de dimensión máxima de 19 mm (3/4 pulg.).<sup>160</sup>

<sup>160</sup> Buró and Ost, 1994; Forstie y Schnormeier, 1981; y Date y Schnormeier, 1984.

El cilindro de 100 x 200 mm (4 x 8 pulg.) es más fácil de moldear, requiere menos muestra, pesa mucho menos que el cilindro de concreto de 150 x 300 mm (6 x 12 pulg.) y, por lo tanto, es más fácil de manejarlo y requiere menos espacio para su curado húmedo.



**Figura 2.8.14.** Comparación de la resistencia de cilindros de 100 x 200 mm (4 x 8 pulg.) y 150 x 300 mm (6 x 12 pulg.) (Burg y Ost 1994).

Adicionalmente, la sección transversal menor permite que se alcance una resistencia a compresión mayor por una máquina de ensayo que tenga una capacidad de carga menor. La diferencia en la resistencia indicada entre los dos tamaños de cilindro es insignificante, como se puede observar en la *Figura 2.8.14*.

El desvío y el coeficiente de variación del cilindro de 100 mm es ligeramente mayor o similar al del cilindro de 150 mm.<sup>161</sup>

<sup>161</sup> Buró y otros, 1999; Pistilli y Willems, 1993.

Las vigas para el ensayo de resistencia a flexión tienen normalmente 150 x 150 mm (6 x 6 pulg.) de sección transversal para concretos con agregados de hasta 50 mm (2 pulg.). Cuando se utilizan agregados mayores que éstos, la dimensión mínima de sección transversal no debe ser menor que tres veces la dimensión máxima del agregado.

La longitud de las vigas debe ser, por lo menos, tres veces la profundidad de la viga más 50 mm (2 pulg.) o un total de más de 500 mm (20 pulg.) para la viga de 150 x 150 mm (6 x 6 pulg.).

Los cilindros de prueba que se compactan con golpes si es que el revenimiento es de 25 mm (1 pulg.) o más, se deben llenar en tres capas aproximadamente iguales y cada capa debe recibir 25 golpes en los cilindros de 150 mm (6 pulg.) de diámetro, mientras que las vigas con hasta 200 mm (8 pulg.) de profundidad se deben llenar en dos capas, golpeándolas con una varilla de 16 mm (5/8 pulg.) de diámetro una vez por capa para cada 1400 mm<sup>2</sup> (2 pulg<sup>2</sup>) de área de superficie superior. Si la varilla deja agujeros, los lados de los moldes se deben golpear ligeramente con una maceta o con la mano abierta. Los cilindros que son vibrados, se deben llenar en dos capas con una inserción por capa en los cilindros de 100 mm (4 pulg.) de diámetro y dos inserciones en los cilindros de 150 mm (6 pulg.) de diámetro.

Las vigas con más de 200 mm (8 pulg.) de profundidad y los cilindros con profundidad de 300 a 450 mm (12 a 18 pulg.), que se van a vibrar (con revenimiento menor o igual a 75 mm [3 pulg.]), se deben llenar en dos capas y vigas con profundidad de 150 a 200 mm (6 a 8 pulg.), que se van a vibrar, se pueden llenar en una capa. Los vibradores internos deben tener un ancho máximo de no más que 1/3 del ancho de las vigas o 1/4 del diámetro del cilindro.

Inmediatamente después de la fundición, la parte superior del espécimen debe:

1. *Cubrirse con un vidrio o placa de acero aceitado,*
2. *Sellarse con una bolsa de plástico o*
3. *Sellarse con una cubierta de plástico.*

La resistencia de especímenes de prueba se puede afectar grandemente con golpes, cambios de temperatura y exposición al secado, principalmente en las primeras 24 horas después de su moldeo. Por lo tanto, los especímenes de prueba se deben colar en sitios donde no sean necesarios movimientos y donde sea posible su protección. Los cilindros y las vigas se deben proteger contra manejos brutos en cualquier edad.

Es importante acordarse de identificar los especímenes en la parte externa de los moldes para prevenir confusión y errores en la información. Y no grabar el número de identificación en la superficie de los especímenes de concreto fresco. Se debe usar cinta adhesiva o una etiqueta de identificación que no dañe la muestra.

Los procedimientos normalizados de prueba requieren que las probetas se curen bajo condiciones controladas, sea en laboratorio (*Figura 2.8.15.*), sea en la obra. El curado controlado en el laboratorio en un cuarto húmedo o en un tanque de almacenamiento con agua de cal fornece una indicación precisa de la calidad del concreto entregado. El agua de cal debe estar saturada de cal hidratada, no cal agrícola, de acuerdo con ASTM C 511 (AASHTO M 201)<sup>162</sup>, para prevenir la lixiviación de la cal del espécimen de concreto.

Las probetas curadas en la obra, de la misma manera que la estructura, representan más fielmente la resistencia real del concreto en la estructura en la edad del ensayo, pero fornecen poca indicación si la deficiencia se debe a la calidad del concreto entregado o al manejo y curado inadecuados.

---

<sup>162</sup> Otras normas relacionadas: NMX-C-148, NTC 3494, NTP 334.077.

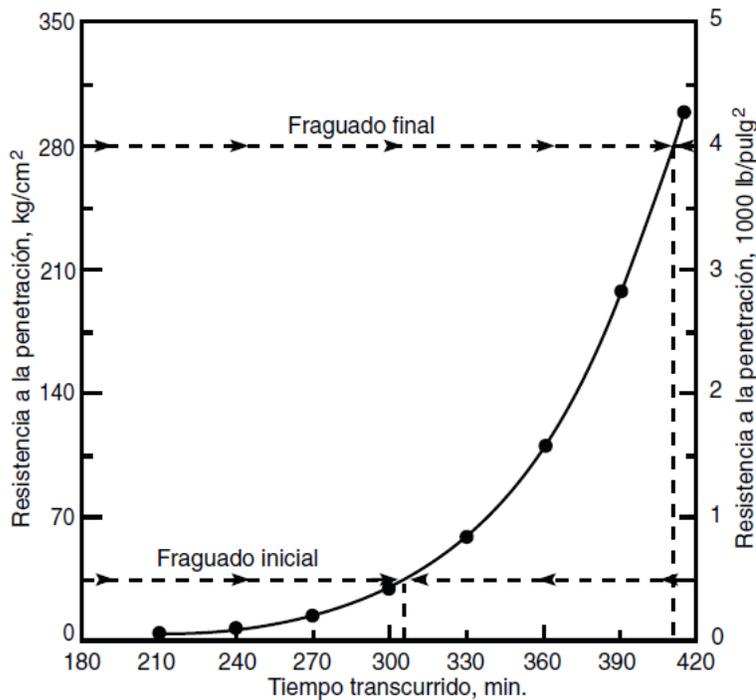


**Figura 2.8.15.** Curado húmedo controlado en laboratorio de especímenes estándar con humedad relativa de 95% a 100% y temperatura de  $23\pm 2^{\circ}\text{C}$  ( $73\pm 3^{\circ}\text{C}$ ) (ASTM C 511 o AASHTO M 201).

En algunos proyectos, las probetas curadas en el campo se producen complementariamente a las probetas destinadas al curado controlado en el laboratorio, siendo muy útiles, principalmente, cuando el clima no es favorable para determinar cuándo se pueden remover las cimbras (encofrados) o cuando se puede poner la estructura en uso.

El desarrollo de la resistencia del concreto en el sitio también se puede evaluar a través de los ensayos de madurez (ACI Comité 306 y ASTM C 1074).

### 2.8.5.4.7. TIEMPO DE FRAGUADO.



**Figura 2.8.16.** Curva de los resultados de la prueba de tiempo de fraguado.

Los métodos de ensayo ASTM C 403 (AASHTO T 197)<sup>163</sup> se usan para determinar el tiempo de fraguado del concreto, midiéndose la resistencia a la penetración producida en intervalos de tiempo regulares sobre el mortero de la mezcla de concreto. El tiempo de fraguado inicial y final se determinan como el tiempo correspondiente a la resistencia a la penetración es 35 kg/cm<sup>2</sup> o 3.5 MPa (500 lb/pulg<sup>2</sup>) y 280 kg/cm<sup>2</sup> o 27.6 MPa (4000 lb/pulg<sup>2</sup>), respectivamente. Normalmente, el inicio de fraguado ocurre entre 2 y 6 horas después del mezclado, y el final ocurre entre 4 y 12 horas. La velocidad de endurecimiento del concreto influencia grandemente la tasa de progreso de la construcción. La temperatura, la relación agua-material cementante y los aditivos afectan el tiempo de fraguado.

También debe tomarse en cuenta el tipo de cemento implementado pues este puede acelerar el fraguado fuera de valores considerados como normales.

<sup>163</sup> Otras normas relacionadas: COVENIN 0352, IRAM 1662, NCh2183, NGO 41 017 h12, NMX-C-177-1997-ONNCCE, NTC 890, NTP 339.082, UNIT-NM 9.

#### **2.8.5.4.8. ENSAYOS DE COMPRESIÓN ACELERADOS PARA LA PROYECCIÓN DE LA RESISTENCIA A EDADES MÁS AVANZADAS.**

La necesidad de evaluarse la calidad del concreto a edades tempranas en comparación con las pruebas tradicionales a los 28 días ha recibido más atención, debido el paso apresurado de la construcción hoy en día. La ASTM ha desarrollado dos métodos para estimarse la resistencia de especímenes de concreto a edades más avanzadas basada en pruebas en edad temprana. ASTM C 684<sup>164</sup>, usan los ensayos de resistencia acelerados para facilitar el control de calidad del concreto. Se aceleran los cilindros de prueba de resistencia usando uno de los cuatro procedimientos de curado: agua caliente a  $35^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$  ( $95^{\circ}\text{F} \pm 5^{\circ}\text{F}$ ), agua ferviente, autógeno (aislado) y alta temperatura a  $150^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$  ( $300^{\circ}\text{F} \pm 5^{\circ}\text{F}$ ). Los ensayos de resistencia acelerados se realizan en edades que varían de 5 a 49 horas, dependiendo del procedimiento de curado utilizado.

Las resistencias en edades más avanzadas se estiman usando relaciones previamente establecidas entre la resistencia acelerada y los ensayos normalizados de resistencia a compresión a los 28 días.

La ASTM C 918 usa el método de la madurez de temperatura controlada de cilindros curados de acuerdo con (AASHTO T 23). Se ensayan los cilindros en edades tempranas, después de 24 horas, y la historia de la temperatura del concreto se usa para calcular el índice de madurez en la edad del ensayo. A través de los datos históricos se desarrolla una ecuación de pronóstico para la resistencia en edades más avanzadas, basada en el índice de madurez y en las pruebas de resistencia en edad temprana.

---

<sup>164</sup> Otras normas relacionadas: IRAM 1552, IRAM 1614, NMX-C-290.

#### **2.8.5.4.9. CONTENIDO DE CLORUROS.**

El contenido de cloruros del concreto y sus ingredientes se debe verificar para asegurarse que se encuentra abajo de los límites necesarios, a fin de evitar la corrosión del acero del refuerzo (armadura). Se puede hacer una aproximación del contenido de cloruros solubles en agua del concreto fresco, de los agregados y de los aditivos usando el método creado por la Asociación Nacional de Concreto Premezclado (NRMCA 1986). Se puede determinar el contenido total de cloruros del concreto fresco sumándose el contenido de cloruros individuales de todos los constituyentes de la mezcla. El método de la NRMCA da una aproximación rápida, pero no se lo debe utilizar para la verificación del cumplimiento de las especificaciones.

#### **2.8.5.4.10. CONTENIDO DE CEMENTO PORTLAND, CONTENIDO DE AGUA, RELACIÓN AGUA-CEMENTO.**

Están disponibles métodos de ensayo para estimarse los contenidos de cemento portland y de agua del concreto recién mezclado. Los resultados de estas pruebas pueden ayudar en la determinación de la resistencia y de la durabilidad potenciales del concreto antes del fraguado y del endurecimiento, y puede indicar si se obtuvieron los contenidos deseados de cemento y agua. Los métodos de prueba de la ASTM C 1078-87 y C 1079-87 (suspendidas en 1998) basadas en el método de Nelly-Vail, se pueden utilizar para determinar los contenidos de cemento y agua, respectivamente. Se desarrollaron métodos experimentales, usando absorción de microondas, para estimar la relación agua-cemento. La desventaja de estos métodos de prueba es que necesitan de equipos sofisticados y habilidades especiales del operador, los cuales no siempre están disponibles.

Otros ensayos para la determinación de los contenidos de cemento y agua se pueden clasificar en cuatro categorías: determinación química, separación por asentamiento y decantación, método nuclear y método eléctrico.

La máquina de análisis rápido y medidor nuclear de cemento han sido usados para medir el contenido de cemento.<sup>165</sup> El horno de microondas (AASHTO T 23) y el método de dispersión de neutrones se han usado para medir el contenido de agua.

Estas pruebas se pueden realizar independientes una de la otra para determinar el contenido de cemento o de agua, a fin de recalcularse la relación agua-cemento.

#### **2.8.5.4.11. CONTENIDO DE MATERIAL CEMENTANTE SUPLEMENTARIO.**

No están disponibles métodos de ensayo normalizados para determinar el contenido del material cementante suplementario del concreto fresco. Sin embargo, la presencia de ciertos materiales cementantes suplementarios, tales como ceniza volante, se puede determinar a través del lavado de una muestra del mortero del concreto, sobre un tamiz de malla de 45  $\mu\text{m}$  (No. 325) y el análisis del residuo retenido a través de un microscopio estéreo (150 x 250X). Las partículas de ceniza volante aparecen como esferas de muchos colores. El tamizado del mortero a través del tamiz de mallas 150  $\mu\text{m}$  o 75  $\mu\text{m}$  (No. 100 o No. 200) es útil para la remoción de los granos de arena.

---

<sup>165</sup> Forester, Black y Lees 1974; PCA, 1983.

#### **2.8.5.4.12. SANGRADO (EXUDACIÓN) DEL CONCRETO.**

Las propiedades de sangrado (exudación) del concreto fresco se pueden determinar a través de dos métodos descritos en ASTM C 232 (AASHTO T 158)<sup>166</sup>.

Un método consolida el espécimen amasándolo sin disturbios posteriores. El otro consolida el espécimen por vibración, después de la cual, el espécimen se vibra intermitentemente durante todo el ensayo. La cantidad del agua de sangrado en la superficie se expresa como el volumen de agua de sangrado por unidad de área expuesta del concreto o como el porcentaje de la cantidad neta de agua de la mezcla en el espécimen. Los valores típicos varían de 0.01 a 0.08 ml/cm<sup>2</sup> o 0.1% a 2.5% del agua de la mezcla. La prueba de sangrado raramente se realiza en la obra.



**Figura 2.8.17.** Imagen común de concreto exudando en la obras.

<sup>166</sup> Otras normas relacionadas: COVENIN 0353, IRAM 1604, NGO 41 017 h9, NTC 1294, NMX-C-296-ONNCCE-2000, NTP 339.077 y UNIT-NM 102.

## **2.8.5.5. ENSAYOS AL CONCRETO EN ESTADO ENDURECIDO.**

### **2.8.5.5.1. INTRODUCCIÓN.**

Según lo declarado por Bickley, Ryell y Read en 1990: *“Es inútil especificar concreto de alto desempeño si las pruebas realizadas no proporcionan cierta seguridad de haber logrado esas características, pero al mismo tiempo, debe ser esencial que las pruebas se realicen correctamente, algo que no ha sucedido siempre el concreto de alto desempeño”.*

A primera vista, no parece necesario dedicar tanta importancia para definir y detallar adecuadamente formas de llevar a cabo pruebas tan sencillas como la resistencia a la compresión y las mediciones de contracción en el concreto de alto desempeño. Los métodos de prueba estándar se encuentran bien definidos, y han sido ampliamente utilizados en concretos convencionales durante mucho tiempo, ya deben haber sido tratadas casi todas las situaciones de comportamiento posibles en el concreto. Por otra parte, las relaciones empíricas basadas en gran número de ensayos de campo y de laboratorio se han establecido en los últimos años, creando un alto grado de confianza y comodidad cuando se trata de datos de prueba. Por último, los códigos de construcción que se basan en los resultados de estas pruebas estándar y los valores dados por estas relaciones empíricas han demostrado ser seguros. Por lo tanto, ¿por qué deberían ser cuestionados los métodos de prueba estándar y las relaciones empíricas cuando se trata de concretos de alto desempeño (Carino, Guthrie y Lagergen, 1994)?

De hecho, se ha descubierto de la experiencia práctica de que algunos de los procedimientos estándar y relaciones utilizados y desarrollado para el concreto convencional no están bien adaptados para el concreto de alta resistencia y que necesitan ser ajustados o parcialmente modificados. Afortunadamente, la mecánica de rocas se ocupa de estudiar rocas muy fuertes que tienen aproximadamente las mismas propiedades mecánicas que el concreto de alta resistencia, o incluso más fuertes, para lo cual se han desarrollado los métodos y

procedimientos de prueba estándar. Como en el concreto, en los últimos años se han desarrollado un gran número de relaciones empíricas en la mecánica de rocas, y algunos de estas relaciones son fácilmente aplicables a concreto de alta resistencia. En algunos aspectos el concreto de alta resistencia puede ser considerado como una roca artificial que es tan fuerte, o incluso más fuerte, que muchas rocas naturales. En un amplio número de casos, los métodos y procedimientos de prueba de la mecánica de rocas se pueden adaptar fácilmente a las necesidades de las pruebas del concreto de alta resistencia, aunque esto no es siempre el caso.

Afortunadamente, no todos los ensayos estándar actuales utilizados para caracterizar el concreto convencional tienen la necesidad de ser modificados o adaptados. Por ejemplo, los métodos de prueba estándar para medir el módulo de ruptura, módulo de elasticidad, resistencia a la tracción indirecta y resistencia a la abrasión del concreto convencional se pueden utilizar directamente sin modificación para las pruebas en concreto de alta resistencia, ya que en estos casos la energía y las tensiones desarrolladas durante el ensayo de concreto de alta resistencia no son drásticamente diferentes de las desarrolladas cuando se prueba concreto convencional.

Hay, sin embargo, otros casos en los que los métodos de prueba utilizados habitualmente para el concreto normal se deben aplicar con precaución, o modificarlos, ya que se pueden desarrollar condiciones inestables durante las pruebas. Este es el caso en particular cuando se trata de determinar la curva de tensión-deformación del concreto de alta resistencia.

Hay otros casos en los que los dispositivos de prueba estándar que se utilizan actualmente para poner a prueba a un valor crítico determinado no funcionan en absoluto con concreto de alta resistencia, por lo que tienen que ser desarrollados nuevos procedimientos de prueba, dispositivos y aparatos. Este es particularmente el caso para las mediciones de contracción y fluencia. En el caso de la fluencia, el

uso de resortes para desarrollar una carga constante no funciona debido a las cargas constantes muy altas que necesitan ser mantenidas en los especímenes.

Por último, hay casos en los que los presentes métodos de prueba no son adecuados para las pruebas de concreto de alta resistencia y no se pueden adaptar ni copiar de la mecánica de rocas, como la contracción y mediciones de permeabilidad.

En este apartado, serán discutidos en detalle los métodos más apropiados para medir la resistencia a la compresión, la resistencia a la flexión y el módulo de elasticidad; que son los temas más comunes en el estudio de los concretos de alta resistencia, cabe señalar que para otras aplicaciones como la contracción, la fluencia, la permeabilidad y las formulas empíricas de cálculo de la curva de tensión-deformación completa del concreto de alta resistencia se puede visitar los libros *“High-Performance Concrete” de Pierre-Claude Aïtcin en su Capítulo 15 y el Capítulo 16 del libro “Diseño y Control de Mezclas de Concreto” de la PCA en su apartado ENSAYOS DEL CONCRETO ENDURECIDO*. De donde se ha tomado un extracto.

#### **2.8.5.5.2. MEDICIÓN DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN.**

Generalmente se utiliza la norma ASTM C 39 / C 39 M para ensayar los esfuerzos de compresión en especímenes cilíndricos de concreto de resistencias convencionales, algo correcto para estos tipos de concreto, pero que debe ser adaptado o cuidadosamente implementado para el estudio de concretos de alta resistencia según algunas indicaciones presentadas en este apartado.

Se utilizan de costumbre probetas cilíndricas estándar de 150 mm (6 pulg.) de diámetro por 300 mm (12 pulg.) de altura (o cubos 150 mm según la normativa) con el fin de evaluar la resistencia del concreto a la compresión, aunque en la actualidad cada vez es más común evaluar la resistencia en probetas de 100 mm (4 pulg.) de diámetro por 200 mm (8 pulg.) de altura para incrementar la capacidad de las máquinas.

El diámetro de la muestra puede variar ligeramente de un país a otro (Neville, 1995), pero siempre es de una proporción dimensional (altura/diámetro) igual a 2.

Después de 28 días de curado estándar en el cuarto de curado o sumergidos en agua de cal a  $23\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$  (o en su defecto a la edad de interés para probar a compresión), las muestras tienen que ser cabeceadas unas horas antes de la prueba. Esto se hace generalmente con un material a base de azufre de endurecimiento rápido, también llamado como compuesto para cabeceo (nivelación). Este compuesto se funde y se vierte en un dispositivo especial, asegurando que ambas tapas sean paralelos entre sí y perpendiculares al eje del espécimen. Esta preparación de la muestra se asegura de que la probeta de concreto se pondrá a prueba en el *modo de compresión uniaxial* y no en un modo de corte. Para el concreto convencional, la resistencia a la compresión del compuesto de nivelación es más fuerte que la del concreto probado.

La muestra cabeceada se coloca entonces entre las dos platinas de una máquina de ensayo y la carga se aplica a una tasa definida hasta ocasionar la falla. Por ejemplo, la falla se produce cuando una carga de 350 kN es aplicada por la máquina de ensayo a un espécimen de concreto de 20 MPa con dimensiones de 150 x 300 mm:

$$Falla = \frac{\pi \times 0.15^2}{4} \times 20 \times 10^4 \text{ Newtons} \cong 350 \text{ kN}$$

Por supuesto, esta carga se duplica a 700 kN cuando la resistencia a compresión del concreto se eleva a 40 MPa. Mientras la resistencia a la compresión del concreto se mantiene entre 20 y 40 MPa, la carga de ruptura que tiene que ser desarrollada por la máquina de ensayo se adapta bien a las capacidades de carga de las máquinas de ensayo convencionales que se encuentran en la mayoría de los laboratorios. De hecho, la mayoría de los fabricantes de máquinas de ensayo construyen tradicionalmente máquinas de ensayo con una capacidad total de alrededor de 1.3 Mega Newtons.

Con el fin de medir correctamente la resistencia a la compresión del concreto de alta resistencias, hay que profundizar a cerca de de las limitaciones de la máquina de prueba, las implicaciones de la preparación de la muestra final, la posición de la muestra durante el ensayo, y la influencia de la forma y tamaño de las muestras. Por último, hay que evaluar las opciones fundamentales de ¿cómo?, ¿a qué edad? y ¿después de cuáles condiciones de curado? se debe probar las muestras.

A continuación se mencionan algunos de los aspectos principales que influyen en los estudios de resistencia a compresión del concreto, para una mejor comprensión y ampliación de los temas, que son fundamentales se sugiere reforzar en el libro *“High-Performance Concrete”* de Pierre-Claude Aïtcin en su *Capítulo 15, Sección 15.2 COMPRESSIVE STRENGTH MEASUREMENT* los aquí presentes.

### **2.8.5.5.2.1. ASPECTOS PRINCIPALES QUE INFLUYEN EN LAS PRUEBAS DE COMPRESIÓN DEL CONCRETO DE ALTA RESISTENCIA.<sup>167</sup>**

#### **I. INFLUENCIA DE LA MÁQUINA DE ENSAYO**

- a) Limitaciones de prueba debido a la capacidad de la máquina de ensayo.
- b) Influencia de las dimensiones esféricas del cabeceado.
- c) Influencia de la rigidez de la máquina de ensayo.

#### **II. INFLUENCIA DE LOS PROCEDIMIENTOS DE PRUEBA.**

- a) Preparación de muestras y acabado.
- b) Influencia de la excentricidad.

#### **III. INFLUENCIA DE LA MUESTRA.**

- a) Influencia de la forma del espécimen.
- b) Influencia del molde espécimen.
- c) Influencia del diámetro de la probeta.

#### **IV. INFLUENCIA DEL CURADO.**

- a) Edad de prueba.
- b) Los métodos de curado de especímenes de concreto de alta resistencia.

---

<sup>167</sup> Por favor dirijase al libro: "High-Performance Concrete" de Pierre-Claude Aitcin en su Capítulo 15, Sección 15.2 COMPRESSIVE STRENGTH MEASUREMENT, para una ampliación del contenido. En esta parte de la investigación solo se hace referencia al autor original.

## **V. RESISTENCIA DE LA BASE VERSUS RESISTENCIA DEL ESPECÍMEN.**

Una vez logramos cubrir con cautela cada aspecto de los antes mencionados y que se han llevado a cabo en base a requisitos de normativas adecuadas todas las etapas previas a evaluar los especímenes a esfuerzos de compresión podemos asegurar que los resultados de las pruebas de resistencia son aceptables pues se ha minimizado cualquier causa de fallas en los procedimientos.

### **2.8.5.5.2.2. CABECEO DE ESPECÍMENES DE CONCRETO.**

Existen varios materiales están comercialmente disponibles para el cabeceo de las probetas para la prueba de resistencia a compresión. La *ASTM C 617 (AASHTO T 231 y sus similares IRAM 1553, Nch 1172, NMX-C-109-1997-ONNCCE, NTP 339.037, UNIT-NM 77) “Práctica Estándar para el Cabeceo de Especímenes Cilíndricos de Concreto<sup>168</sup>”* presenta métodos de cabeceo con el uso de mortero de azufre (que actualmente está dejando de usarse por prácticas de protección medio ambiental). Se debe permitir que el cabeceo se endurezca, por lo menos dos horas antes del ensayo. Pueden utilizarse también las almohadillas de neopreno (placas de elastómero) no adherentes, si se necesitan resultados rápidos. Los cabeceos con mortero de azufre se deben producir lo más delgado posible para evitar la falla del cabeceo, pues puede reducir los resultados de las pruebas. El uso de yeso de alta resistencia generalmente no es conveniente porque su resistencia es inferior a la de los especímenes de concreto a ensayar.

La *ASTM C 1231* y la *IRAM 1709* describen el uso de las almohadillas de neopreno, sin adherencia o unión con las extremidades de los especímenes. Este método de cabeceo usa una almohadilla de neopreno en forma de disco, con  $13 \pm$

---

<sup>168</sup> Se sugiere referirse a la norma *La ASTM C 617* para reforzar sobre los métodos de cabeceo existentes actualmente.

2 mm ( $1/2 \pm 1/16$  pulg.) de espesor, que es aproximadamente el diámetro del espécimen. Se coloca la almohadilla en un retenedor cilíndrico de acero con una cavidad de aproximadamente 25 mm (1 pulg.) de profundidad y un poco menor que el diámetro de la almohadilla.

Es muy importante que el durómetro de las almohadillas de neopreno sea el adecuado para las resistencia a evaluar, de lo contrario se tendrán datos no satisfactorios y gastos excesivos en almohadillas.

El procedimiento es sencillo, se coloca una cápsula en una o en ambas caras del cilindro y, entonces, se prueba el espécimen de acuerdo con la ASTM C 39 (AASHTO T 22), con la adición de una etapa para interrumpir el ensayo cuando se alcanza el 10% de la carga esperada, a fin de verificarse si el eje del cilindro está vertical con una tolerancia de  $0.5^\circ$ . Si no se logran la perpendicularidad de la cara del cilindro o la alineación vertical durante el cargamento, la carga aplicada al cilindro puede estar concentrada en uno de los lados del cilindro. Esto puede resultar en una falla o rotura por esfuerzo cortante, donde el plano de falla intercepta la cara del cilindro. Este tipo de rotura normalmente indica que el cilindro falló prematuramente, proporcionando resultados bien más bajos que la resistencia real del concreto.

Si no se obedecen los requisitos de perpendicularidad, el cilindro se puede cortar con una sierra o pulir (esmerilar) siempre de acuerdo con ASTM C 617 (AASHTO T 231).

*Puede reducirse la rotura por esfuerzo de cortante:* al espolvorearse la almohadilla y la cara del cilindro con talco, previniéndose que el exceso de agua de los cilindros o de la lona escurran para dentro del retenedor y debajo de la cápsula, verificándose la planicidad y la presencia de imperfecciones en la superficie de rodamiento de los retenedores. Adicionalmente, se debe limpiar y lubricar

anualmente el bloque asentado de manera esférica y el casquillo adyacente en la máquina de compresión.

### **2.8.5.5.3. MEDICIÓN DE RESISTENCIA A LA FLEXIÓN.**

El módulo de rotura (resistencia a flexión) se debe determinar a través del cargamento en los tercios del tramo según ASTM C 78 (AASHTO T 97)<sup>169</sup>. Sin embargo, el módulo de rotura se puede evaluar a través de la aplicación de esfuerzos en el centro del tramo según ASTM C 293 (AASHTO T 177)<sup>170</sup> o cargamento en voladizo para el control de calidad en la obra, si antes se determina su relación empírica con los resultados de los ensayos con cargas en los tercios del tramo.

Para fines de diseño, la resistencia a la flexión del concreto se toma con frecuencia como el 10 por ciento de la resistencia a la compresión, sin embargo, la resistencia a la flexión del concreto de alta resistencia puede no ser tan proporcionalmente alta como ya ha sido abordado en el apartado 2.8.4.1.4.2. *RESISTENCIA A LA TRACCIÓN.*

El contenido de humedad del espécimen tiene un gran efecto sobre los resultados de resistencia. Las vigas para los ensayos de flexión son especialmente vulnerables a los efectos de gradientes de humedad. Un espécimen saturado presentará resistencia a compresión menor y resistencia a flexión mayor que los especímenes hermanos ensayados en condición seca. Éste es un aspecto importante que se debe considerar al compararse corazones (núcleos) retirados del concreto endurecido en servicio y probetas moldeadas y retiradas del cuarto de curado húmedo o del tanque de almacenamiento con agua.

---

<sup>169</sup> Normas equivalentes: COVENIN 0342, IRAM 1547, NCh1038, NGO 41 017 h2, NMX-C-191, NTC 2871, NTP 339.078 o UNIT-NM 55.

<sup>170</sup> Normas equivalentes: COVENIN 0343, NCh1038, NMX-C-303, NTP 339.079 y UNIT-NM 55.

Los cilindros usados para los ensayos de aceptación con una resistencia específica, deben curarse de acuerdo con ASTM C 31 (AASHTO T 23), para que representen la calidad del concreto con precisión. Además, los corazones son sujetos a su confección, condiciones ambientales variables en la obra y condiciones variables después de la extracción. Los corazones se prueban en la condición seca o en la condición húmeda, pero raramente en la condición saturada, similar a los cilindros curados en laboratorio.

Como los corazones y cilindros se manejan de varias maneras diferentes, no se puede esperar que presenten los mismos resultados.

El grado de variación de los ensayos de resistencia a compresión es mucho menor que de los ensayos de resistencia a flexión. Se pueden usar pruebas de resistencia a compresión para controlar la calidad del concreto, a fin de evitar el cuidado extremo que se necesita en los ensayos de campo para determinar la resistencia flexión, sin embargo, se debe establecer, en laboratorio, la relación empírica entre las resistencias a compresión y a flexión del concreto utilizado (Kosmatka 1985). Debido a esta relación y a la economía del ensayo de cilindros en lugar de vigas, la mayoría de las secretarías estatales de transporte de los Estados Unidos están utilizando los ensayos de resistencia a compresión de cilindros para controlar la cualidad del concreto para sus pavimentos y proyectos de puentes.

#### ***2.8.5.5.4. MEDICIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD.***

La medición del módulo de elasticidad de un concreto de alta resistencia se puede hacer de la misma manera que para el concreto convencional y no repercute en los resultados.

El diagrama esfuerzo-deformación del concreto, es el factor más importante a partir del cual se deducen ecuaciones para el cálculo de elementos de concreto reforzado en relación con la rigidez del material.

Los diseñadores están interesados en la forma de la parte posterior del pico de la curva de esfuerzo-deformación y de cómo calcularla. Para el concreto convencional, los investigadores han propuesto una serie de fórmulas matemáticas para esta parte de la curva, que se supone que representa adecuadamente esta importante característica del concreto (y de las condiciones de ensayo).<sup>171</sup>

La determinación del módulo de elasticidad estático se hace generalmente según la normativa *ASTM C469 / C469M - 10 Método de prueba estándar para módulo estático de elasticidad y coeficiente de Poisson del concreto en compresión*.

Se han establecido una relación directa entre el módulo de elasticidad del concreto y su resistencia a la compresión, sin embargo, el módulo de elasticidad del concreto depende en gran medida de sus características y proporción dentro de la mezcla, como se explico en la sección 2.8.4.1.2. *MÓDULO DE ELASTICIDAD*. Se han establecido numerosas ecuaciones a lo largo del tiempo, todas ellas experimentales, para obtener el valor del módulo de elasticidad, una de estas ecuaciones es propuesta en la Norma técnica para el diseño y construcción de estructuras de concreto de El Salvador, la que se sugiere visitar si tiene interés en ampliar sobre el tema, ya que en esta investigación el efecto del Módulo de Elasticidad no ha sido una prioridad.

---

<sup>171</sup> Kaan, Hanson y Capell, 1978.



**CAPITULO 3:**  
*DISEÑO DE MEZCLA*

## **CAPITULO 3: DISEÑO DE MEZCLA.**

*(Tomando como base el método de diseño de mezclas ACI 211.4R-08)*

### **3.1. INTRODUCCION.**

Para el diseño de mezclas de concreto de alta resistencia se requiere seleccionar con cuidado la calidad y dosificación de los componentes de la mezcla para obtener los mejores resultados en las propiedades en estado fresco y endurecido del concreto.

En este capítulo se describe el proporcionamiento de la mezcla, es decir la cantidad de los materiales del concreto usando materias primas locales para lograr las características especificadas en ACI 211.4R-08; los resultados obtenidos de la caracterización de los agregados (grava y arena), el tipo de aditivos y las pruebas realizadas al cemento, se describe el procedimiento implementado para la dosificación de la mezcla de concreto de alta resistencia tomando como base el ACI 211.4R-08<sup>172</sup>, así como el procedimiento de mezclado que se realizó para garantizar la homogenización de los componentes de la mezcla.

El objetivo del método de diseño implementado es: proporcionar una mezcla de concreto con los materiales constituyentes adecuados, económicos y en correctas cantidades; optimizando su uso y su disponibilidad en nuestro medio; además de, establecer posteriormente las posibles causas en las variaciones del comportamiento de la mezcla en condiciones de laboratorio para establecer un diseño definitivo de la mezcla de concreto de alta resistencia.

---

<sup>172</sup> Guía para la selección de proporciones para concreto de alta resistencia con cemento Portland y otros materiales cementantes.

### **3.2. MÉTODO DE DISEÑO DE MEZCLAS DE CONCRETOS DE ALTA RESISTENCIA DEL COMITÉ ACI 211.4R-08.**

Esta guía presenta métodos generales para la selección de las proporciones de mezcla para concreto de alta resistencia y optimización de estas proporciones de la mezcla sobre la base de lotes de prueba. Los métodos están limitados a concreto de alta resistencia que contiene cemento Portland, ceniza volante, humo de sílice y cemento de escoria de alto horno, producido utilizando materiales convencionales y técnicas de producción implementadas en el medio.

Esta guía se limita a concretos de alta resistencia utilizando agregados de peso normal, con procedimientos para la selección de las proporciones de mezcla para resistencia a la compresión especificada de  $422 \text{ kg/cm}^2$ .

### **3.2.1. DOSIFICACIÓN DE MEZCLAS DE CONCRETO DE ALTA RESISTENCIA USANDO HUMO DE SÍLICE.**

El Humo de Sílice tiene un efecto pronunciado sobre las propiedades del concreto. Esto es especialmente así para concreto de alta resistencia, debido a sus propiedades físicas y químicas. El Humo de Sílice aumenta la resistencia del concreto en gran parte debido a que aumenta la resistencia de la unión entre la pasta de cemento y las partículas de agregado<sup>173</sup>. El Humo de Sílice se combina con hidróxido de calcio  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , un débil subproducto del proceso de hidratación del cemento, lo que resulta en productos cementantes adicionales, aumentando así la resistencia del concreto y reduciendo significativamente su permeabilidad.

---

<sup>173</sup> Mindess, 1988.

### 3.2.1.1. PROCEDIMIENTO DE DOSIFICACIÓN DE LA MEZCLA.

Aunque no existe un método empírico disponible para dosificar concretos de alta resistencia con Humo de Sílice, el procedimiento empleado es considerando como una alternativa de mezcla de concreto de alta resistencia con ceniza volante y se ejecuta de la manera siguiente:

**Paso 1:** Seleccionar el revenimiento o slump y la resistencia del concreto requeridos, valores recomendados para el revenimiento se muestran en la *Tabla 3.1*. A pesar que un concreto de alta resistencia es producido exitosamente con la adición de un superplastificante sin una medida inicial del revenimiento, es recomendado un revenimiento de 1” a 2” antes de adicionar el superplastificante. Esto asegurará que el cemento esté hidratado y permitirá que el superplastificante sea efectivo.

**Tabla 3.1.** *Revenimiento o Slump recomendado para concretos de Alta Resistencia con y sin superplastificante.*

Concreto fabricado utilizando Aditivo HRWRA <sup>174</sup> *	
Revenimiento antes de añadir HRWRA	1 a 2 pulg
Concreto fabricado sin HRWRA	
Revenimiento	2 a 4 pulg

\* Ajustar caída al deseado en el campo a través de la adición de HRWRA.

**Paso 2:** Seleccionar el tamaño máximo del agregado, basados en los requerimientos de resistencia, el tamaño máximo del agregado grueso se presenta

<sup>174</sup> Aditivo superplastificante reductor de agua de mezclado de alto rango.

en la tabla 3.2. El ACI 318<sup>175</sup> establece que el tamaño máximo de un agregado no debe exceder una quinta parte de la dimensión menor entre los lados del elemento, una tercera parte de la profundidad de la losa, o tres cuartas partes del mínimo espaciamiento entre las barras de refuerzo.

**Tabla 3.2.** *Tamaño máximo del agregado grueso.*

Resistencia requerida en el concreto, kg/cm <sup>2</sup>	Sugerencia del tamaño máximo del agregado grueso, pulg.*
< 630	3/4 a 1
> 630	3/8 a 1/2

*Cuando se utiliza HRWRA y agregado grueso seleccionado, resistencia a la compresión del concreto en el rango de 630 a 8400 kg/cm<sup>2</sup> puede alcanzarse mediante un diámetro nominal máximo de agregados gruesos de hasta 1 pulgada.*

**Paso 3:** Seleccionar el contenido óptimo de agregado grueso, el óptimo contenido de agregado grueso depende su resistencia característica y tamaño máximo. El contenido óptimo recomendado de agregado grueso, expresado como una fracción del peso unitario compactado, es dado en la *Tabla 3.3* como una función del tamaño máximo nominal.

El peso seco del agregado grueso por m<sup>3</sup> de concreto puede ser calculado usando la siguiente ecuación:

$$\text{Peso seco del agregado grueso} = VCA(P.V.V)$$

(3.1)

Donde VCA es el volumen fraccional de la *Tabla 3.3*.

<sup>175</sup> Requisitos de reglamento para concreto estructural y comentarios.

**Tabla 3.3.** Volumen de Agregado Grueso por unidad de volumen de concreto (Para Agregado Fino con módulo de finura entre 2.5 - 3.2).

Contenido óptimo de agregado grueso para tamaños máximos nominales de agregado; para ser utilizado con agregados finos con MF entre 2.5 y 3.2.				
Tamaño máximo nominal, pulg.	3/8	1/2	3/4	1
Volumen fraccional de agregado grueso secado al horno.	0.65	0.68	0.72	0.75

Los volúmenes se basan en agregados secados al horno, condición tal como se describe en la norma ASTM C29/C29M por unidad de masa o densidad aparente de los agregados.

En un proporcionamiento de una mezcla de concreto normal, el contenido óptimo de agregado grueso es dado como una función del tamaño máximo y del módulo de fineza del agregado fino. Las mezclas de concretos de alta resistencia, sin embargo, tienen un alto contenido de materiales cementantes, y por lo tanto no son dependientes del agregado fino para lograr la lubricación y compactibilidad de la mezcla. Por supuesto los valores dados en la tabla 3.3 son recomendados para arenas que tienen un módulo de finura entre 2.5 a 3.2.

**Paso 4:** Estimar el agua de mezcla y el contenido de aire, la cantidad de agua por unidad de volumen de concreto requerida para producir un revenimiento dado es dependiente del tamaño máximo, forma de las partículas, gradación del agregado, cantidad de cemento y tipo de plastificante o superplastificante usados. Si se usa un superplastificante, el contenido de agua en este aditivo es tomado en cuenta para el cálculo de la relación A/MC: La tabla 3.4 da una primera estimación del agua de mezclado requerida para concretos elaborados con agregados de tamaño máximo entre 1" y 3/8", esta cantidad de agua es estimada sin la adición del aditivo, en la misma tabla también se da los valores estimado de aire atrapado. Estas cantidades de agua de mezclado son máximas para un agregado bien

graduado, angular y limpio que cumple con los límites de la norma ASTM C 33. Dado que la forma de las partículas y la textura superficial del agregado fino puede influenciar significativamente su contenido de vacíos, el requerimiento de agua de mezclado puede ser diferente de los valores dados.

**Tabla 3.4.** Primera estimación de las necesidades de agua de la mezcla y el contenido de aire del concreto recién mezclado basado en el uso de agregado fino con un 35% de vacíos.

AGUA DE MEZCLADO, kg/m <sup>3</sup>				
	Tamaño máximo de agregado grueso, pulg.			
Revenimiento, pulg.	3/8	1/2	3/4	1
1 a 2	183	174	168	165
2 a 3	189	183	174	171
3 a 4	195	189	180	177
Contenido de aire atrapado (%)	3 (2.5)	2.5 (2.0)	2 (1.5)	1.5 (1.0)

Los valores dados en la tabla 3.4 son aplicables cuando el agregado fino usado tiene un contenido de vacíos igual a 35%, el contenido de vacíos del agregado fino puede ser calculado usando la siguiente ecuación:

$$\text{Contenido de Vacíos}(\%) = \left(1 - \frac{\text{Densidad aparente}}{\text{Densidad Relativa}}\right) * 100 \quad (3.2)$$

Cuando el contenido de vacíos del agregado fino no es 35%, es necesario un ajuste a la cantidad de agua de mezclado, este ajuste puede ser calculado usando la siguiente ecuación:

$$\text{Ajuste del agua de mezclado, } A \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 4.72(V - 35) \quad (3.3)$$

Usando la ecuación 3.3 obtenemos un ajuste de 4.72 kg/m<sup>3</sup> por cada punto porcentual del contenido de vacíos de la arena.

**Paso 5:** Seleccionar la relación agua/materiales cementantes, en la *Tabla 3.5*, los valores máximos recomendados para la relación agua/materiales cementantes son mostrados como una función del tamaño máximo del agregado para alcanzar diferentes resistencias a compresión en 28 o 56 días.

**Tabla 3.5.** Recomendaciones de máxima relación A/MC para concreto de alta resistencia.

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN PROMEDIO REQUERIDA $f'_{cr}$ (kg/cm <sup>2</sup> )		Relación A / MC							
		Tamaño máximo de agregado grueso, pulg.							
		3/8		1/2		3/4		1	
		con HRWRA	sin HRWRA	con HRWRA	sin HRWRA	con HRWRA	sin HRWRA	con HRWRA	sin HRWRA
492	28-días	0,50	0,42	0,48	0,41	0,45	0,40	0,43	0,39
	56-días	0,55	0,46	0,52	0,45	0,48	0,44	0,46	0,43
562	28-días	0,44	0,35	0,42	0,34	0,40	0,33	0,38	0,33
	56-días	0,48	0,38	0,45	0,37	0,42	0,36	0,40	0,35
632	28-días	0,38	0,30	0,36	0,29	0,35	0,29	0,34	0,28
	56-días	0,42	0,33	0,39	0,32	0,37	0,31	0,36	0,30
703	28-días	0,33	0,26	0,32	0,26	0,31	0,25	0,30	0,25
	56-días	0,37	0,29	0,35	0,28	0,33	0,27	0,32	0,26
773	28-días	0,30	-	0,29	-	0,27	-	0,27	-
	56-días	0,33	-	0,31	-	0,29	-	0,29	-
843	28-días	0,27	-	0,26	-	0,25	-	0,25	-
	56-días	0,30	-	0,28	-	0,27	-	0,26	-

**Paso 6:** Calculo del contenido de material cementante, el peso del material cementante requerido por m<sup>3</sup> de concreto puede ser determinado por la división de la cantidad de agua de mezclado entre la relación A/MC seleccionada. Sin

embargo si las especificaciones incluyen un límite mínimo en la cantidad de material cementante por  $m^3$ , este debe ser cumplido. Para el caso de humo de sílice se considera del 5 a 15% en peso del cemento como una cantidad de material cementante adicional.

**Paso 7:** Proporcionamiento de la mezcla de prueba base, para determinar las proporciones optimas primero se debe realizar una mezcla base, los siguiente pasos deben ser seguidos para completar la mezcla:

1. Contenido de cemento. Para esta mezcla, el peso del cemento será igual al calculado en el paso 6.
2. Contenido de arena. Después de determinar los pesos por  $m^3$  de agregado grueso, cemento, agua, y contenido de aire atrapado, el contenido de arena puede ser calculado usando el método de volúmenes absolutos.

**Paso 8:** Proporcionamiento de mezclas usando Aditivo superplastificante, la adición de este reducirá la demanda de agua, reduce la temperatura.

**Paso 9:** Mezclas de prueba, para cada mezcla el proporcionamiento se hará siguiendo los pasos del 1 al 8, una mezcla de prueba debe ser producida determinando su trabajabilidad y características de resistencia.

**Paso 10:** Ajuste de las proporciones de la mezcla, si las propiedades deseadas del concreto no han sido obtenidas en las mezclas de prueba, las proporciones de la mezcla base deben ser modificadas siguiendo el procedimiento siguiente:

1. **Revenimiento inicial.-** Si el revenimiento inicial no se encuentra en los rangos deseados, el agua de mezclado debe ser ajustada, el contenido de cemento debe ser corregido para mantener constante la relación A/MC, y el contenido de arena debe ser ajustado para asegurar el flujo del concreto.

2. **Dosis de superplastificante.-** Si un superplastificante es usado, debe ser determinado su efecto en la trabajabilidad y resistencia. Se debe seguir las indicaciones dadas por el fabricante en cuanto a su tasa máxima de uso. El uso en laboratorio de superplastificantes debe ser ajustado para su uso en campo.
3. **Contenido de agregado grueso.-** Una vez que las mezcla de prueba de concreto han sido ajustadas para el revenimiento deseado, se debe determinar si la mezcla es demasiado áspera. Si es necesario el contenido de agregado grueso puede ser reducido y el contenido de arena ajustado. Sin embargo este incremento del contenido de arena incrementara la demanda de agua, y por lo tanto el contenido de cemento.
4. **Contenido de aire.-** Si el contenido de aire difiere significativamente de las proporciones deseadas, el contenido de arena puede ser ajustado.
5. **Relación A/MC.-** Si la resistencia requerida no es alcanzada, mezclas adicionales con una menor relación A/MC deben ser elaboradas.

**Paso 11:** Selección de la mezcla optima, una vez que las proporciones de mezcla han sido ajustadas para producir la trabajabilidad y resistencia deseadas, es necesario realizar pruebas en las condiciones de campo de acuerdo a los procedimientos recomendados por el ACI 211.1.<sup>176</sup>

---

<sup>176</sup> Proporcionamiento de Mezclas, concreto normal, pesado y masivo.

### **3.3. ELECCIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LA MEZCLA.**

Antes que se pueda determinar las proporciones de la mezcla, se seleccionan sus características considerando el uso que se espera dar al concreto, las condiciones de exposición, tamaño y forma de los elementos y las propiedades físicas del concreto (resistencia mecánica) requeridas para la estructura.

Considerando esta investigación como un aporte en la tecnología del concreto en El Salvador; las características de la mezcla elegida son tomadas en cuenta a partir de la disponibilidad de recursos, materiales y equipo para llevarse a cabo. De esta manera se realizan estudios a los materiales presentes en el medio, para determinar sus características principales, sabiendo que son parte fundamental en los resultados y la economía del concreto propuesto por la investigación ya que los agregados representan desde un 50% hasta 75% del volumen del concreto según el caso.

### 3.3.1. RESULTADOS DE PRUEBAS DE LABORATORIO A LOS COMPONENTES DE LA MEZCLA.

Las propiedades de los componentes de la mezcla de concreto de alta resistencia garantizan los resultados de resistencia a compresión, de este modo se presentan los resultados obtenidos de la caracterización de los agregados y cemento obtenidos de las pruebas realizadas; considerando que de los resultados obtenidos se inicia el proporcionamiento de las mezclas y determinar el diseño óptimo.

**Tabla 3.6.** Resumen de resultados de pruebas de laboratorio.

ENSAYOS DE LABORATORIO	NORMA	RESULTADOS	REQUISITO	REFERENCIA
<b>Granulometría Agregado Grueso</b>	ASTM C 136	<b>No Cumple<sup>177</sup></b>	Según ASTM C 33	ANEXO 1
<b>Granulometría agregado fino</b>	ASTM C 136	<b>Cumple MF = 2.98</b>	Según ASTM C 33 2.9 < MF < 3.1	ANEXO 1
<b>Gravedad específica y Absorción del agregado grueso</b>	ASTM C 127	<b>G<sub>SH</sub> = 2.55 Abs. = 1.49%</b>	2.4 < G <sub>s</sub> < 2.9 %Abs. < 4%	ANEXO 2
<b>Gravedad específica y Absorción del agregado Fino</b>	ASTM C 128	<b>G<sub>SH</sub> = 2.54 Abs. = 2.42%</b>	2.4 < G <sub>s</sub> < 2.9 %Abs. < 6%	ANEXO 2
<b>Peso volumétrico varillado y suelto para agregado Grueso</b>	ASTM C 29	<b>PVS=1302.38 PVV=1445.4</b>	PVS 1260- 1750 kg/m <sup>3</sup>	ANEXO 3
<b>Peso volumétrico varillado y suelto para agregado Fino</b>	ASTM C 29	<b>PVS=1563.66 PVV=1701.37</b>	---	ANEXO 3
<b>Resistencia a compresión de morteros de cemento hidráulico</b>	NSO 91.13.02:99	<b>Cumple</b>	---	ANEXO 4

<sup>177</sup> El agregado grueso no cumple los requisitos de granulometría de las normas ASTM se encontró uniformidad en un tamaño en especial. Se decidió continuar con la investigación porque actualmente éste es el tipo de agregados que se encuentran disponibles en el país y éstos se utilizan. Las razones de las deficiencias en esta característica de producción son nuevas y no dependen de los investigadores. Optar por una granulometría combinada estaría lejos de la realidad actual.

Es importante aclarar, que en esta investigación se utilizaron agregados locales, para establecer una mezcla de concreto de alta resistencia que resulte económica. Sin embargo, aunque el agregado cumpla con las normas ASTM C 33 o AASHTO M 6/M80, COVENIN 277, IRAM 1512, IRAM 1531, IRAM 1627, NCh163, NMX-C-111, NTC 174, NTP 400.037, UNIT 84, UNIT 102 no se garantiza necesariamente que el concreto estará libre de defectos<sup>178</sup>.

### **3.3.2. CALCULO DE DOSIFICACION DE MEZCLA DE CONCRETO DE ALTA RESISTENCIA.**

#### **3.3.2.1. REQUISITOS DE DISEÑO.**

Diseñar un concreto con una resistencia especificada a los 28 días de 600 Kg/cm<sup>2</sup>, esto considerando que en investigaciones similares realizadas las resistencia a la compresión obtenidas han sido de 500kg/cm<sup>2</sup> <sup>179</sup>. Un revenimiento de 8.5" es requerido para lograr la trabajabilidad necesaria. El tamaño del agregado no debe exceder 1/2".

Uso de un aditivo superplastificante para obtener el revenimiento requerido. Asuma que no existe registro anterior de producción de concretos de alta resistencia.

---

<sup>178</sup> PCA - Portland Cement Association, Diseño y Control de Mezclas de Concreto, 2004. Pág. 104.

<sup>179</sup> Tesis: Influencia del Uso de microsilice en las propiedades en estado fresco y endurecido de concreto de alta resistencia.

### **3.3.2.2. PROCEDIMIENTO.**

#### ***Paso 1: Seleccionar el revenimiento y Resistencia requerida.***

Un aditivo superplastificante deberá utilizarse para alcanzar el revenimiento establecido, tomando como base un revenimiento de 1” a 2” antes de la adición del aditivo superplastificante de acuerdo a la *Tabla 3.1*.

Por la no existencia de registro de pruebas anteriores calculamos la resistencia promedio a compresión requerida del concreto a los 28 días según ACI 318S-08<sup>180</sup>  
*Tabla 5.3.2.2*

$$f'_{cr} = 1.10f'_c + 5 \quad (MPa)$$

$$f'_{cr} = 1.10(58.840836) + 5 = 69.749MPa$$

$$f'_{cr} = 711 \frac{kg}{cm^2}$$

Este dato se considerara para la selección de la relación A/MC, es importante aclarar que los parámetros con los que se parte esta investigación, corresponden a concretos de alta resistencia utilizando cemento portland de Tipo I que cumple con la norma ASTM C150, lo que implica que los resultados a obtener en laboratorio diferirán por estar utilizando un cemento ASTM C1157 tipo HE.

#### ***Paso 2: Seleccionar el tamaño máximo del agregado.***

El agredo a utilizar es proveniente de la cantera de Comalapa de Holcim El Salvador, que son obtenidos mediante un proceso de trituración de rocas extraídas de un depósito aluvial, con un tamaño máximo nominal de 9.5mm (3/8” o No. 89), tomando como recomendación los datos establecidos en la *Tabla 3.2*.

---

<sup>180</sup> Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural.

**Paso 3: Seleccionar el contenido óptimo del agregado grueso.**

De la *Tabla 3.3*, obtenemos el volumen de agregado grueso, seco y compactado por unidad de volumen de concreto igual a 0.65, calculamos el peso seco del agregado grueso/m<sup>3</sup> de concreto:

$$W_{seco} = 0.65 \times 1445.4 = 939.5 \frac{kg}{m^3}$$

**Paso 4: Estimación de contenido de agua y contenido de aire.**

Basados en un revenimiento de 1" a 2" y el tamaño máximo nominal del agregado grueso de 3/8", la primera estimación del contenido de agua requerida elegida de la *Tabla 3.4* es 183.92 Kg/m<sup>3</sup> y un contenido de aire del 2.5%.

Corrección por contenido de vacíos de la arena:

$$\text{Contenido de vacíos} = \left(1 - \frac{1701.37}{2.54 * 1000}\right) * 100 = 33\%$$

Ajuste del contenido de agua:

$$\text{Ajuste del agua de mezclado, } A \frac{kg}{m^3} = 4.72(33 - 35) = -9.42 \frac{kg}{m^3}$$

$$\text{Agua de mezcla final} = \left(183.92 \frac{kg}{m^3} - 9.42 \frac{kg}{m^3}\right) = 174.50 \text{ Kg/m}^3$$

**Paso 5: Seleccionar la relación agua/materiales cementantes.**

La relación agua material cementante es de 0.28, según el libro concreto de alta resistencia<sup>181</sup> los mejores resultados obtenidos en diversas investigaciones han sido con este parámetro por lo que se optó tomar esta recomendación.

---

<sup>181</sup> High-Strength Concrete: A practical guide. Página 74.

También se cuenta con la *Tabla 3.5* que nos brinda parámetros para elegir esta relación según sea la resistencia promedio a la compresión requerida.

***Paso 6: Calcular el contenido de material Cementante.***

El contenido de material cementante por metro cubico es:

$$MC = \frac{A}{0.28} = \frac{174.5}{0.28} = 623.20 \frac{kg}{m^3}$$

***Paso 7: Proporción básica para mezcla de concreto de alta resistencia por el método de volúmenes absolutos.***

La **Mezcla “A”** está compuesta por cemento, microsilice y aditivo superplastificante, lo que implica en el diseño de la mezcla un incremento de agua debido a la gran superficie específica de la microsilice. ACI 211.4 recomienda incrementar el agua a una cantidad igual en peso de la microsilice, generando así que la relación A/MC se incremente, influyendo directamente en la resistencia del concreto.

La cantidad de material cementante se determinó por la relación A/MC de 0.28, y la cantidad de agua inicial de 174.5 lts, a esto hay que sumarle 93.48 lts de agua adicional correspondientes al 15% de microsilice, obteniendo así un total de 268 lts de agua por metro cubico de concreto. La relación A/MC resultante es de 0.37, con la que se parte en la bachada de prueba para la **Mezcla “A”**.

## MEZCLA "A" (Cemento + Microsilice + Aditivo)

### PASO 7: CALCULO DE CANTIDAD DE MATERIALES

Agua de Mezclado :	174.50 Kg/m <sup>3</sup>
A / C	0.28
Porcentaje de Microsilice =	15%

MC=	716.68 Kg/m <sup>3</sup>
Cemento =	623.20 Kg/m <sup>3</sup>
Microsilice =	93.48 Kg/m <sup>3</sup>

### PASO 8: PROPORCIONAMIENTO DE LA MEZCLA POR M<sup>3</sup>

Materiales por m <sup>3</sup>	
Cemento :	0.215 m <sup>3</sup>
Microsilice =	0.042 m <sup>3</sup>
Masa del Agregado	0.368 m <sup>3</sup>
Agua de Mezclado :	0.268 m <sup>3</sup>
Aire =	0.020 m <sup>3</sup>
Arena =	0.086 m <sup>3</sup>
Suma total =	1.000 m <sup>3</sup>

Peso Especifico de Material (kg/m <sup>3</sup> )
2900
2200
2550
1000
2540

### **Corrección por contenido de Humedad y uso de aditivos en el Agua/m<sup>3</sup>:**

La dosificación de aditivo superplastificante a 1.3 lts de aditivo por cada 100kg de cemento utilizados en la mezcla<sup>182</sup>.

<sup>182</sup> Ficha técnica del aditivo Megaflow, International Materials Industries, L.L.C.

## MEZCLA "A" (Cemento + Microsilice + Aditivo)

No. Cilindros = 607

Edad de prueba = 07 días

No. Bachada = 25.0

Vol. Concreto = 1.0000 m<sup>3</sup>

### MATERIALES

VOLUMENES	PESO
-----------	------

Cemento =	0.21489 m <sup>3</sup>	623.19 Kg
-----------	------------------------	-----------

Microsilice =	0.04249 m <sup>3</sup>	93.48 Kg
---------------	------------------------	----------

Grava =	0.36843 m <sup>3</sup>	939.49 Kg
---------	------------------------	-----------

Agua =	0.26797 m <sup>3</sup>	259.87 Lts
--------	------------------------	------------

Aire =	0.02000 m <sup>3</sup>	-
--------	------------------------	---

Arena =	0.08620 m <sup>3</sup>	218.95 Kg
---------	------------------------	-----------

Aditivo Superplastificante =	8.10 Lts	8,101.41 ml
------------------------------	----------	-------------

### CORRECCION DE DISEÑO ANTES DE MEZCLA DE PRUEBA DEBIDO A HUMEDAD O ABSORCION DE

Materiales	Peso	Peso corregido
CEMENTO =	623.19 Kg	623.2 Kg

Microsilice =	93.48 Kg	93.5 Kg
---------------	----------	---------

Grava =	939.49 Kg	951.2 Kg
---------	-----------	----------

% Humedad =	1.25 %	
-------------	--------	--

Agua =	259.87 Lts	247.8 Kg
--------	------------	----------

Absorcion Arena =	2.42 %	
-------------------	--------	--

Absorcion grava =	1.49 %	
-------------------	--------	--

Arena =	218.95 Kg	238.6 Kg
---------	-----------	----------

% Humedad =	8.96 %	
-------------	--------	--

### ***Paso 8: Proporción de mezclas de compañía para estudiar el comportamiento del concreto.***

Las mezclas de compañía se clasifican en **Mezcla "B"** y **Mezcla "C"**.

La mezcla B está diseñada con el fin de conocer el efecto que el aditivo superplastificante ejerce sobre el concreto, además de permitir una reducción de la demanda de agua para garantizar la trabajabilidad del concreto.

## MEZCLA "B" *(Cemento + Aditivo)*

### PASO 7: CALCULO DE CANTIDAD DE MATERIALES

Agua de Mezclado :	174.50 Kg/m3
A/C	0.28

Cemento =	623.20 Kg/m3
-----------	--------------

### PASO 8: PROPORCIONAMIENTO DE LA MEZCLA POR M<sup>3</sup>

Materiales por m3	
Cemento :	0.215 m3
Grava :	0.368 m3
Agua de Mezclado :	0.174 m3
Aire =	0.020 m3
Arena =	0.222 m3
Suma total =	1.000 m3

Peso Especifico de Material (kg/m <sup>3</sup> )
2900
2550
1000
2540

### Corrección por contenido de Humedad y Aditivo del Agua/m<sup>3</sup>:

## MEZCLA "B" *(Cemento + Aditivo)*

No. Cilindros = 607

Edad de prueba = 07 días

No. Bachada = 25.0

Vol. Concreto = 1.0000 m3

MATERIALES		
VOLUMENES		PESO
Cemento =	0.21489 m3	623.19 Kg
Grava =	0.36843 m3	939.49 Kg
Agua =	0.17449 m3	166.39 Lts
Aire =	0.02000 m3	-
Arena =	0.22217 m3	564.30 Kg
Aditivo Superplastificante =	8.10 Lts	8,101.41 ml

### CORRECCION DE DISEÑO ANTES DE MEZCLA DE PRUEBA DEBIDO A HUMEDAD O ABSORCION DE

Materiales	Peso	Peso corregido
CEMENTO =	623.19 Kg	623.2 Kg
Grava =	939.49 Kg	951.2 Kg
% Humedad =	1.25 %	
Agua =	166.39 Lts	131.74 Kg
Absorcion Arena =	2.42 %	
Absorcion grava =	1.49 %	
Arena =	564.30 Kg	614.9 Kg
% Humedad =	8.96 %	

La finalidad de la Mezcla C es conocer principalmente la resistencia del concreto sin adición de superplastificante ni microsilice, de esta forma se obtiene los parámetros de resistencia en el diseño.

## MEZCLA "C" *(Cemento)*

### PASO 7: CALCULO DE CANTIDAD DE MATERIALES

Agua de Mezclado :	174.50 Kg/m <sup>3</sup>
--------------------	--------------------------

Cemento =	623.20 Kg/m <sup>3</sup>
-----------	--------------------------

A/C	0.28
-----	------

### PASO 8: PROPORCIONAMIENTO DE LA MEZCLA POR M<sup>3</sup>

Materiales por m <sup>3</sup>	
-------------------------------	--

Peso Especifico de Material (kg/m <sup>3</sup> )	
--	--

Cemento :	0.215 m <sup>3</sup>
-----------	----------------------

2900	
------	--

Grava :	0.368 m <sup>3</sup>
---------	----------------------

2550	
------	--

Agua de Mezclado :	0.174 m <sup>3</sup>
--------------------	----------------------

1000	
------	--

Aire =	0.020 m <sup>3</sup>
--------	----------------------

Arena =	0.222 m <sup>3</sup>
---------	----------------------

2540	
------	--

Suma total =	1.000 m <sup>3</sup>
--------------	----------------------

## Corrección por contenido de Humedad del Agua/m<sup>3</sup>:

### MEZCLA "C" (Cemento)

No. Cilindros = 607

Edad de prueba = 07 días

No. Bachada = 25.0

Vol. Concreto = 1.0000 m<sup>3</sup>

MATERIALES		
VOLUMENES		PESO
Cemento =	0.21489 m <sup>3</sup>	623.19 Kg
Grava =	0.36843 m <sup>3</sup>	939.49 Kg
Agua =	0.17449 m <sup>3</sup>	174.49 Lts
Aire =	0.02000 m <sup>3</sup>	-
Arena =	0.22217 m <sup>3</sup>	564.30 Kg

#### CORRECCION DE DISEÑO ANTES DE MEZCLA DE PRUEBA DEBIDO A HUMEDAD O ABSORCION DE

Materiales	Peso	Peso corregido
CEMENTO =	623.19 Kg	623.2 Kg
Grava =	939.49 Kg	951.2 Kg
% Humedad =	1.25 %	
Agua =	174.49 Lts	139.8 Kg
Absorcion Arena =	2.42 %	
Absorcion grava =	1.49 %	
Arena =	564.30 Kg	614.9 Kg
% Humedad =	8.96 %	

**Paso 9: Mezclas de Prueba.**

Las mezclas de prueba se realizan en base a las proporciones obtenidas en los pasos 7 y 8, los resultados obtenidos en laboratorio demandaron una mayor cantidad de agua para las mezclas A, B y C, que se detallan a continuación:

RESULTADOS	
MEZCLA	AGUA ADICIONAL (Lts/m <sup>3</sup> )
A	33.8
B	75.76
C	75.76
MEZCLA	REVENIMIENTO
A	8 ½"
B	8 ¾"
C	2"
MEZCLA	RESISTENCIA A 7 DIAS (KG/CM <sup>2</sup> )
A	381.4
B	363.1
C	354

**Tabla 3.7.** Promedio de resultados de mezclas de prueba.

**Paso 10: Proporciones óptimas de las mezclas.**

Tomando en cuenta los resultados obtenidos en el paso 9, se procede a determinar la mezcla óptima de diseño implementado en la investigación.

### 3.3.2.2.1. DISEÑO DEFINITIVO: MEZCLA "A".

La cantidad de agua adicionada en laboratorio, necesaria para hidratar el cemento es de 1.4 lts para un volumen de concreto de 0.0414 m<sup>3</sup> correspondiente a una bachada de prueba, esta agua adicional genera un aumento de la relación A/MC que ya estaba afectada por la adición de microsilice en la mezcla, obteniendo finalmente una relación A/MC final de 0.42. En la tabla 3 se presenta el diseño de la mezcla óptima por metro cubico.

## MEZCLA "A"

(Cemento + Microsilice + Aditivo)

### CANTIDAD DE MATERIALES

Agua de Mezclado Corregida =	301.77 Kg/m <sup>3</sup>	CM =	716.68 Kg/m <sup>3</sup>
A / CM =	0.42	Cemento =	623.20 Kg/m <sup>3</sup>
Porcentaje de Microsilice =	15%	Microsilice =	93.48 Kg/m <sup>3</sup>

### PROPORCIONAMIENTO DE LA MEZCLA POR M<sup>3</sup>

Materiales por m <sup>3</sup>	Peso Especifico de Material (kg/m <sup>3</sup> )	
Cemento =	0.215 m <sup>3</sup>	2900
Microsilice =	0.042 m <sup>3</sup>	2200
Masa del Agregado Grueso =	0.368 m <sup>3</sup>	2550
Agua de Mezclado =	0.294 m <sup>3</sup>	1000
Aditivo Superplastificante =	0.008 m <sup>3</sup>	Dosificación de Aditivo Superplastificante: Por cada 100 kg de cemento se adicionan 1.3 litros de aditivo.
Aire =	0.020 m <sup>3</sup>	
Arena =	0.052 m <sup>3</sup>	2540
<b>Suma total =</b>	<b>1.000 m<sup>3</sup></b>	

### 3.3.2.2. DISEÑO DEFINITIVO: MEZCLA "B".

La mezcla B requirió un total de 3 lts de agua adicionada para un volumen de concreto de 0.0396 m<sup>3</sup>, la relación A/C final utilizada en el diseño de la mezcla compañera es de 0.40.

MEZCLA "B"	
(Cemento + Aditivo)	
CANTIDAD DE MATERIALES	
Agua de Mezclado Corregida =	250.22 Kg/m <sup>3</sup>
A / C =	0.40
Cemento =	623.20 Kg/m <sup>3</sup>
PROPORCIONAMIENTO DE LA MEZCLA POR M <sup>3</sup>	
Materiales por m <sup>3</sup>	Peso Especifico de Material (kg/m <sup>3</sup> )
Cemento =	2900
Masa del Agregado Grueso =	2550
Agua de Mezclado =	1000
Aditivo Superplastificante =	Dosificación de Aditivo Superplastificante: Por cada 100 kg de cemento se adicionan 1.3 litros de aditivo.
Aire =	
Arena =	2540
<b>Suma total =</b>	<b>1.000 m<sup>3</sup></b>

### 3.3.2.2.3. DISEÑO DEFINITIVO: MEZCLA "C".

Para la mezcla C se requirió la misma cantidad de agua que la mezcla B, la relación A/C es de 0.40.

## MEZCLA "C"

(Cemento )

### CANTIDAD DE MATERIALES

<b>Agua de Mezclado Corregida =</b>	250.22 Kg/m <sup>3</sup>
-------------------------------------	--------------------------

<b>Cemento =</b>	623.20 Kg/m <sup>3</sup>
------------------	--------------------------

<b>A / C =</b>	0.40
----------------	------

### PROPORCIONAMIENTO DE LA MEZCLA POR M<sup>3</sup>

#### Materiales por m<sup>3</sup>

<b>Cemento =</b>	0.215 m <sup>3</sup>
------------------	----------------------

<b>Masa del Agregado Grueso =</b>	0.368 m <sup>3</sup>
-----------------------------------	----------------------

<b>Agua de Mezclado =</b>	0.250 m <sup>3</sup>
---------------------------	----------------------

<b>Aire =</b>	0.020 m <sup>3</sup>
---------------	----------------------

<b>Arena =</b>	0.146 m <sup>3</sup>
----------------	----------------------

<b>Suma total =</b>	1.000 m <sup>3</sup>
---------------------	----------------------

#### Peso Especifico de Material (kg/m<sup>3</sup>)

2900
------

2550
------

1000
------

2540
------

### **3.4. PROCEDIMIENTO DE MEZCLADO DEL CONCRETO DE ALTA RESISTENCIA USANDO HUMO DE SILICE EN LABORATORIO.**

**Elaboración de concreto con humo de sílice en el laboratorio<sup>183</sup>:**

1. *Añadir 75% del agua en el mezclador o tambor<sup>184</sup>*
2. *Añadir agregado grueso*
3. *Añadir poco a poco el humo de sílice en el mezclador giratorio*
4. *Mezclar 1 minuto y 1/2*
5. *Añadir cemento poco a poco*
6. *Mezclar 1 minutos y 1/2*
7. *Añadir agregado fino*
8. *Añadir en todos los ingredientes que utilizan el restante 25% de agua*

*Para terminar la mezcla siga el siguiente procedimiento:*

9. *Mezclar 5 minutos<sup>185</sup>*
10. *Descanse 3 minutos*
11. *Mezclar 5 minutos<sup>186</sup>*

El humo de sílice siempre debe ser añadido con el agregado grueso y una parte del agua. Colocar el humo de sílice por sí solo puede causar formación de bolas o que éste se pegue en el mezclador. Mezclar humo de sílice, agregados gruesos y agua durante 1-1/2 minutos.

---

<sup>183</sup> Humo de Sílice: Manual del Usuario. Este Manual ha sido preparado bajo Acuerdo Cooperativo DTFH61-99-X-00 063 entre la Administración Federal de Carreteras y la Asociación de humo de sílice.

<sup>184</sup> Siga ASTM C192 para la adición de aditivos. Consulte a los fabricantes del aditivo y recomendaciones para la dosificación adecuada y la secuencia de adición.

<sup>185</sup> El tiempo puede ser extendido por el usuario en función de los equipos y el rendimiento resultados.

<sup>186</sup> El tiempo puede ser extendido por el usuario en función de los equipos y el rendimiento resultados.

Añadir el cemento portland y cualquier otro material de cemento, tales como cenizas volantes o escoria de cemento. Mezclar durante un período adicional de 1 ½ minutos.

Añadir el agregado fino y utilizar el resto del agua para añadir el aditivo químico. Mezclar durante 5 minutos, dejar reposar por 3 minutos, y mezclar durante 5 minutos. Tiempo de mezcla real puede variar, dependiendo de las características de un mezclador específico. Si hay alguna duda sobre la correcta dispersión y mezcla eficiente que se ha logrado, mezcle más, hasta que el concreto con humo de sílice no pueda estar más mixto.

Siguiendo estas recomendaciones ayudará a asegurar que los resultados en el laboratorio se asemejan a los resultados que pueden esperarse en la producción de concreto humo de sílice real.



# CAPITULO 4: *ANÁLISIS DE RESULTADOS*

## **4. CAPITULO 4: ANÁLISIS DE RESULTADOS.**

### **4.1. INTRODUCCIÓN.**

Las pruebas de laboratorio constituyen una parte fundamental en la realización de mezclas de concreto, ya que nos proporcionan resultados importantes para conocer las propiedades, características y calidad del concreto; para garantizar que se logren las propiedades deseadas, los ensayos de control de calidad y aceptación son parte indispensable, las pruebas físicas y las propiedades del concreto se usan para medir la aceptación de este, los resultados de los ensayos proporcionan información importante con respecto a si es necesario realizar un ajuste del diseño de mezcla original o no. El resultado final de la resistencia a compresión, la baja permeabilidad, la durabilidad, por ejemplo, podrían ser un criterio de aceptación.

En la sección que se presenta a continuación se detalla la metodología del trabajo experimental en laboratorio, se explican las pruebas indispensables realizadas a la mezclas de concreto para poder llevar un adecuado control de calidad del producto esperado, aunque hay muchas más que nos ayudan a llevar un control mucho más estricto de las mezclas cuando así se requiere.

## **4.2. DESCRIPCIÓN DE ESPECÍMENES PARA RESISTENCIA.**

En vista de que los especímenes de concreto de alta resistencia tienen propiedades de consistencia similares a las de concretos convencionales, generalmente se suelen tratar de la misma forma en su estado plástico, mucha experiencia durante años de estudio nos demuestra que al trabajar con concretos de alta resistencia (de la misma línea que los concretos de alto desempeño) incluso puede facilitar su manejo pues sus propiedades en estado fresco son analizadas desde los laboratorios, por ello se sigue el mismo patrón de moldeado según ASTM C31 “Práctica Normalizada para Preparación y Curado de Especímenes de Ensayo de Concreto en la Obra”.

La probeta estándar para la resistencia a compresión del concreto con agregado de dimensión máxima de 50 mm (2 pulg.) o menor es un cilindro de 150 mm (6 pulg.) de diámetro por 300 mm (12 pulg.) de altura. Para agregados con tamaños máximos nominales mayores, el diámetro del cilindro debe ser, por lo menos, tres veces mayor que la dimensión máxima del agregado y la altura debe ser dos veces el diámetro por criterios de esbeltez y para proteger el equipo. La esbeltez en las probetas puede afectar el desempeño del equipo, no estaría de más que el lector pudiera referirse a este tema si no se cuenta con la suficiente experiencia en laboratorio y planea hacer uso de otras normativas para verificar resistencias en el concreto de alta resistencia. Aunque se prefieren los moldes metálicos rígidos, se puede usar moldes de plástico, de cartón parafinado u otro tipo de molde desechable, que sea conforme a ASTM C470.

En el caso de los concretos de alta resistencia comúnmente está siendo utilizado el molde cilíndrico de 100 mm (4 pulg.) de diámetro por 200 mm (8 pulg.) de altura que contienen agregado de dimensión máxima de 19 mm (3/4 pulg.). Por las siguientes ventajas: El cilindro de 4 pulg. de diámetro por 8 pulg. de altura es relativamente más fácil de moldear, requiere menos material para su elaboración, pesa mucho menos que el cilindro tradicional (de 6x12 pulg.) y por lo tanto, es más

fácil de manejar y requiere menos espacio para su curado húmedo. Adicionalmente, la sección transversal menor permite que se alcance una resistencia a la compresión mayor por una máquina de ensayo que tenga una capacidad de carga menor. La diferencia en la resistencia a la compresión entre los dos tamaños de cilindro es insignificante. Si necesita una ampliación del tema refiérase a la sección 2.8.5.4.6. *ESPECÍMENES PARA PRUEBAS DE RESISTENCIA*.

Como una alternativa que prestaban los cilindros de 4x8 pulg. se decidió implementar estas dimensiones para ampliar el rango de resistencia de la máquina de laboratorio a emplear en las pruebas de resistencia a compresión.

Se elaboraron las siguientes cantidades de especímenes:

**Tabla 4.1. Descripción de especímenes.**

DISEÑO	CARACTERISTICAS	EDAD DE PRUEBA	CANTIDAD DE ENSAYOS	ESPECÍMENES	ESPECÍMENES TOTALES
<b>Mezcla "A"</b>	Materiales Constituyentes: Cemento ASTM C1157 Tipo HE, Agregado Grueso Triturado con diámetro nominal 3/8", Agregado Fino Triturado, Humo de Sílice, Aditivo Superplastificante Tipo F, Agua.	<b>7 DIAS</b>	<b>15</b>	<b>45</b>	<b>180</b>
		<b>28 DIAS</b>	<b>30</b>	<b>90</b>	
		<b>56 DIAS</b>	<b>15</b>	<b>45</b>	
<b>Mezcla "B"</b>	Materiales Constituyentes: Cemento ASTM C1157 Tipo HE, Agregado Grueso Triturado con diámetro nominal 3/8", Agregado Fino Triturado, Aditivo Superplastificante Tipo F, Agua.	<b>7 DIAS</b>	<b>3</b>	<b>9</b>	<b>27</b>
		<b>28 DIAS</b>	<b>3</b>	<b>9</b>	
		<b>56 DIAS</b>	<b>3</b>	<b>9</b>	
<b>Mezcla "C"</b>	Materiales Constituyentes: Cemento ASTM C1157 Tipo HE, Agregado Grueso Triturado con diámetro nominal 3/8", Agregado Fino Triturado, Agua.	<b>7 DIAS</b>	<b>3</b>	<b>9</b>	<b>27</b>
		<b>28 DIAS</b>	<b>3</b>	<b>9</b>	
		<b>56 DIAS</b>	<b>3</b>	<b>9</b>	

### 4.3. PRUEBAS AL CONCRETO EN ESTADO FRESCO.

Las siguientes pruebas fueron realizadas al concreto en estado fresco:

- ♦ *Consistencia (ASTM C 143).*
- ♦ *Temperatura.*
- ♦ *Densidad del Concreto (ASTM C138).*
- ♦ *Contenido de Aire.*

Los resultados obtenidos en la elaboración se presentan en la *Tabla 4.2*, los resultados son los promedios de las diferentes pruebas realizadas.

**Tabla 4.2.** Pruebas en estado fresco del concreto.

PRUEBAS EN ESTADO FRESCO DEL CONCRETO				
MEZCLAS	REVENIMIENTO	TEMPERATURA	CONTENIDO DE AIRE	PESO VOLUMETRICO
A	7 1/2"	27°	0.70%	2260.12 kg/m <sup>3</sup>
B	8 1/4"	26°	0.80%	2322.9 kg/m <sup>3</sup>
C	2 1/4"	25.75°	1.50%	2308.6 kg/m <sup>3</sup>

Fuente: Los autores.



*Figura 4.1. Peso volumétrico del concreto y revenimiento.*

#### **4.3.1. ELABORACIÓN Y CURADO EN EL LABORATORIO DE ESPECÍMENES DE CONCRETO (ASTM C192).**

Para la elaboración de los especímenes de la mezcla de concreto se sigue el procedimiento estipulado por la norma ASTM C 192 “Elaboración y Curado en el Laboratorio de Especímenes de Concreto para Ensayo”.

Antes de colar el concreto en los moldes de 4x8 plg. éstos fueron limpiados y debidamente armados de modo que no existan fugas de agua de la mezcla al verter el concreto en ellos.

La norma ASTM C192 establece que para desenmoldar los especímenes debe transcurrir un lapso de  $24 \pm 8$  horas, después de colar el concreto, luego de ese

tiempo los especímenes pueden ser retirados e identificados. La nomenclatura utilizada fue la siguiente:

1. El tipo de mezcla elaborada A, B o C.
2. La fecha de elaboración del espécimen en números, primero el día seguido del mes.
3. El número del espécimen.



**Figura 4.2.** Identificación de especímenes.

La resistencia de los especímenes se puede afectar considerablemente con golpes, cambios de temperatura y exposición al secado, principalmente en las primeras 24 horas después de su moldeo.<sup>187</sup>

---

<sup>187</sup>Kosmatka, Steven H.; Kerckhoff, Beatrix; Panarese, William C.; y Tanesi, Jussara: Diseño y Control de Mezclas de Concreto, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, EE.UU. 2004.

#### **4.3.1.1. CURADO DE ESPECÍMENES.**

El método de curado con agua, más minucioso, consiste en la inmersión total del elemento de concreto. Este método se usa normalmente en laboratorio para el curado de especímenes o probetas de ensayo. El curado de las mezclas B y C se aplicó con forme lo establecido en la norma ASTM C 192, para la mezcla A se determinó en base a bachadas de prueba, el tiempo de inmersión de los especímenes elegido fue  $4\pm 1/2$  horas para asegurar la continua hidratación del cemento. Generalmente cuando se trata de concretos de alta resistencia el tiempo de fraguado difiere con el tiempo de fraguado de concretos convencionales<sup>188</sup>.

#### **4.4. PRUEBAS AL CONCRETO EN ESTADO ENDURECIDO.**

Las pruebas en estado fresco del concreto son fundamentales para lograr los objetivos establecidos en la investigación, pero no son los únicos parámetros necesarios para validarla, un concreto puede cumplir con los requisitos en estado fresco, pero puede estar deficiente en los requisitos en estado endurecido.

En esta investigación las propiedades en estado endurecido del concreto, se enfocó directamente a la resistencia a la compresión, para conocer el comportamiento mecánico de la combinación del cemento ASTM C1157 Tipo HE con la adición de microsilice.

#### **4.4.1. CABECEADO DE ESPECÍMENES.**

El cabeceado de especímenes en concreto de alta resistencia es muy importante, debido a que la adecuada nivelación de estos, garantiza la distribución uniforme de esfuerzos en el ensayo de resistencia a compresión.

---

<sup>188</sup> P. C. Aitcin.

La elección del método de cabeceado, depende principalmente de la resistencia del material a utilizar para dicho fin. Entre los métodos más comunes para cabeceo de concretos de alta resistencia, se encuentran el mortero de azufre (ASTM C-287), estos han demostrado ser efectivos en concretos con resistencias de  $700 \text{ kg/cm}^2$ , sin embargo puede ser inconveniente cuando el espesor es mayor a  $3 \text{ mm}$  ( $1/8''$ ). El uso de membranas elastoméricas con anillo de metal que las restringen adecuadamente son excelentes como material de cabeceo.



**Figura 4.3.** Esmerilado de especímenes.

El cabeceado utilizado en los especímenes de la investigación, se realizó inicialmente utilizando almohadillas de neopreno (ASTM C-1231). Este método de cabeceo consiste en ajustar almohadillas confinadas dentro de un plato de retención. Este ensamble se coloca en las bases del cilindro que deben estar adecuadamente enrasados, y luego se lleva a la máquina de ensayo. El corte realizado a la cabeza de los cilindros de la investigación fue a través de una esmeriladora, dejándola lo más uniforme posible. La dureza utilizada de las almohadillas de neopreno es de grado 60, lo que genero el desgaste rápido de estos, reduciendo

así el número de usos, provocando someter los cilindros al ensayo de compresión de forma directa a la maquina universal.

#### **4.4.2. ENSAYOS DE RESISTENCIA A LA COMPRESION.**

Los ensayos de resistencia a la compresión del concreto se realizaron a las edades de 7, 28 y 56 días, para poder obtener una representación gráfica sobre el comportamiento de la resistencia del diseño de la mezcla en estudio.

El ensayo de resistencia a la compresión se realizó de acuerdo a la norma ASTM C-39 (Método Estándar de Ensayo para la Resistencia a la Compresión de Especímenes Cilíndricos de Concreto). Para la ruptura de especímenes se utilizó la maquina universal del Instituto Salvadoreño del Cemento y del Concreto.



**Figura4.4.** Pruebas de especímenes a compresión.

Los resultados de los ensayos de resistencia a la compresión son los siguientes:

**Tabla 4.3. Resultados del Ensayo de Resistencia del Concreto a Compresión de la Mezcla A.**

<b>MEZCLA: "A"</b>	<b>RELACION A/MC =0.40</b>	<b>FECHA DE COLADO: 05/06/2013 - 31/07/2013</b>	
TAMAÑO MAXIMO DEL AGREGADO: 3/8"		ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE: MEGAFLOW ASTM C-494 Tipo F (1.3L por 100 Kg. de cemento).	ADICION MICROSILICE NORCHEM = 15%

<b>MEZCLA "A"</b>									
<b># Corr.</b>	<b>Edad de prueba (días)</b>	<b>Diam. (cm)</b>	<b>Alt. (cm)</b>	<b>Área (cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Peso (g)</b>	<b>Peso-Vol (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Carga (kg)</b>	<b>Resist. (kg/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Observaciones</b>
A-1	7	10.1	20.3	80.1	3539.7	2176.40	33220	<b>414.6</b>	Neopreno
A-2	7	10.1	20.3	80.1	3526.5	2168.28	33030	<b>412.3</b>	Neopreno
A-3	7	10.1	20.3	80.1	3534.2	2173.01	33870	<b>422.7</b>	Neopreno
A-4	7	10.1	19.9	80.1	3444.2	2160.24	30620	<b>382.2</b>	Esmerilado
A-5	7	10.1	19.6	80.1	3396.7	2163.06	30660	<b>382.7</b>	Esmerilado
A-6	7	10.1	20.2	80.1	3505.2	2165.85	30860	<b>385.2</b>	Esmerilado
A-7	7	10.1	20.3	80.1	3508.4	2157.15	30320	<b>378.4</b>	Esmerilado
A-8	7	10.1	20.3	80.1	3522.6	2165.88	30280	<b>377.9</b>	Esmerilado
A-9	7	10.1	19.8	80.1	3447.3	2173.11	30560	<b>381.4</b>	Esmerilado

A-10	7	10.1	19.8	80.1	3435.2	2165.48	30670	<b>382.8</b>	Esmerilado
A-11	7	10.1	19.8	80.1	3440.7	2168.95	30380	<b>379.2</b>	Esmerilado
A-12	7	10.1	19.7	80.1	5437.8	3445.28	30960	<b>386.4</b>	Esmerilado
A-13	7	10.1	19.6	80.1	3489.9	2222.41	30780	<b>384.2</b>	Esmerilado
A-14	7	10.1	19.6	80.1	3488.6	2221.58	30880	<b>385.4</b>	Esmerilado
A-15	7	10.1	19.8	80.1	3445.9	2172.23	30580	<b>381.7</b>	Esmerilado
<b>PROMEDIO A 7 DÍAS</b>								<b>389.0</b>	
A-16	28	10.1	20.2	80.1	3551	2194.15	51270	<b>639.9</b>	Neopreno
A-17	28	10	19.8	78.5	3485	2241.03	50110	<b>638.0</b>	Neopreno
A-18	28	10	19.3	78.5	3391	2237.08	50450	<b>642.3</b>	Neopreno
A-19	28	10	19.3	78.5	3384	2232.46	47510	<b>604.9</b>	Esmerilado
A-20	28	10	19.3	78.5	3400	2243.01	47770	<b>608.2</b>	Esmerilado
A-21	28	10	19.3	78.5	3369	2222.56	47050	<b>599.1</b>	Esmerilado
A-22	28	10	19.2	78.5	3378	2240.11	46800	<b>595.9</b>	Esmerilado
A-23	28	10	19.3	78.5	3365	2219.92	47570	<b>605.7</b>	Esmerilado
A-24	28	10	19.3	78.5	3378	2228.50	47450	<b>604.2</b>	Esmerilado
A-25	28	10	19.3	78.5	3386	2233.78	47110	<b>599.8</b>	Esmerilado
A-26	28	10	19.3	78.5	3395	2239.71	47170	<b>600.6</b>	Esmerilado
A-27	28	10	19.7	78.5	3445	2226.55	47830	<b>609.0</b>	Esmerilado
A-28	28	10	19.9	78.5	3395	2172.19	47000	<b>598.4</b>	Esmerilado
A-29	28	10.1	19.3	80.1	3385	2189.12	47870	<b>597.5</b>	Esmerilado
A-30	28	10	19.3	78.5	3382	2231.14	47910	<b>610.0</b>	Esmerilado
A-31	28	10	19.7	78.5	3454	2232.37	47170	<b>600.6</b>	Esmerilado
A-32	28	10	19.7	78.5	3455	2233.02	47110	<b>599.8</b>	Esmerilado

A-33	28	10.1	20.1	80.1	3517	2183.95	47370	<b>591.2</b>	Esmerilado
A-34	28	10.1	20.3	80.1	3535	2173.51	47810	<b>596.7</b>	Esmerilado
A-35	28	10	20.2	78.5	3518	2217.45	47450	<b>604.2</b>	Esmerilado
A-36	28	10	20.3	78.5	3550	2226.60	47470	<b>604.4</b>	Esmerilado
A-37	28	10	20.3	78.5	3539	2219.70	47990	<b>611.0</b>	Esmerilado
A-38	28	10	19.7	78.5	3445	2226.55	51500	<b>655.7</b>	Neopreno
A-39	28	10.1	19.6	80.1	3425	2181.08	47650	<b>594.7</b>	Esmerilado
A-40	28	10.1	19.5	80.1	3395	2173.06	47270	<b>590.0</b>	Esmerilado
A-41	28	10.1	19.5	80.1	3387	2167.94	47130	<b>588.3</b>	Esmerilado
A-42	28	10.1	19.7	80.1	3445	2182.68	47340	<b>590.9</b>	Esmerilado
A-43	28	10.1	18.7	80.1	3265	2179.26	47450	<b>592.2</b>	Esmerilado
A-44	28	10.1	19.2	80.1	3343	2173.21	47960	<b>598.6</b>	Esmerilado
A-45	28	10.1	19.6	80.1	3435	2187.45	48060	<b>599.9</b>	Esmerilado
A-46	28	10.1	19.7	80.1	3428	2171.91	47960	<b>598.6</b>	Esmerilado
A-47	28	10.1	19.6	80.1	3415	2174.71	48330	<b>603.2</b>	Esmerilado
A-48	28	10.1	19.5	80.1	3410	2182.67	46670	<b>582.5</b>	Esmerilado
A-49	28	10.1	19.5	80.1	3415	2185.87	48380	<b>603.9</b>	Esmerilado
A-50	28	10.1	19.5	80.1	3420	2189.07	48740	<b>608.3</b>	Esmerilado
A-51	28	10.1	19.7	80.1	3425	2170.01	48200	<b>601.6</b>	Esmerilado
A-52	28	10.1	20.1	80.1	3515	2182.71	46500	<b>580.4</b>	Esmerilado
A-53	28	10.1	19.9	80.1	3495	2192.11	47000	<b>586.6</b>	Esmerilado
A-54	28	10.1	19.5	80.1	3405	2179.46	47390	<b>591.5</b>	Esmerilado
A-55	28	10.1	19.6	80.1	3398	2163.89	48140	<b>600.9</b>	Esmerilado
A-56	28	10.1	19.5	80.1	3390	2169.86	47620	<b>594.4</b>	Esmerilado

A-57	28	10.1	19.5	80.1	3407	2180.75	47950	<b>598.5</b>	Esmerilado
A-58	28	10.1	19.7	80.1	3443	2181.41	47090	<b>587.8</b>	Esmerilado
A-59	28	10.1	18.8	80.1	3273	2172.98	47170	<b>588.8</b>	Esmerilado
A-60	28	10.1	20.1	80.1	3510	2179.61	48120	<b>600.6</b>	Esmerilado
A-61	28	10.1	19.5	80.1	3390	2169.86	48630	<b>607.0</b>	Esmerilado
<b>PROMEDIO A 28 DÍAS</b>								<b>602.3</b>	
A-62	56	10.1	20.2	80.1	3523	2176.85	53827	<b>671.8</b>	Esmerilado
A-63	56	10.1	19.8	80.1	3456.3	2178.78	53840	<b>672.0</b>	Esmerilado
A-64	56	10.1	19.6	80.1	3423.3	2180.00	52980	<b>661.3</b>	Esmerilado
A-65	56	10.1	19.7	80.1	3429.9	2173.11	53550	<b>668.4</b>	Esmerilado
A-66	56	10.1	19.5	80.1	3389.2	2169.35	53878	<b>672.5</b>	Esmerilado
A-67	56	10.1	19.6	80.1	3404.2	2167.84	53689	<b>670.1</b>	Esmerilado
A-68	56	10.1	19.8	80.1	3447.7	2173.36	53775	<b>671.2</b>	Esmerilado
A-69	56	10.1	19.6	80.1	3423.8	2180.32	53824	<b>671.8</b>	Esmerilado
A-70	56	10.1	19.6	80.1	3418.6	2177.01	52990	<b>661.4</b>	Esmerilado
A-71	56	10.1	19.6	80.1	3405.7	2168.79	53985	<b>673.8</b>	Esmerilado
A-72	56	10.1	19.8	80.1	3465.9	2184.83	53561	<b>668.5</b>	Esmerilado
A-73	56	10.1	19.6	80.1	3461.9	2204.58	53678	<b>670.0</b>	Esmerilado
A-74	56	10.1	19.7	80.1	3416	2164.31	53989	<b>673.9</b>	Esmerilado
A-75	56	10.1	19.8	80.1	3490	2200.02	52988	<b>661.4</b>	Esmerilado
A-76	56	10.1	19.6	80.1	3423.5	2180.13	53798	<b>671.5</b>	Esmerilado
<b>PROMEDIO A 56 DIAS</b>								<b>669.3</b>	

**Tabla 4.4. Resultados del Ensayo de Resistencia del Concreto a Compresión de la Mezcla B.**

<b>MEZCLA: "B"</b>	<b>RELACION A/MC =0.40</b>	<b>FECHA DE COLADO: 06/05/2013 - 29/07/2013</b>		
<b>TAMAÑO MAXIMO DEL AGREGADO: 3/8"</b>		<b>ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE: MEGAFLOW ASTM C-494 Tipo F (1.3L por 100 Kg. de cemento).</b>		<b>ADICION MICROSILICE NORCHEM = 0.0%</b>

<b>MEZCLA "B"</b>									
<b># Corr.</b>	<b>Edad de prueba (días)</b>	<b>Diam. (cm)</b>	<b>Alt. (cm)</b>	<b>Área (cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Peso (g)</b>	<b>Peso-Vol (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Carga (kg)</b>	<b>Resist. (kg/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Observaciones</b>
B-1	7	10.1	20.4	80.1	3761.2	2301.25	30580	<b>381.7</b>	Neopreno
B-2	7	10.1	20.4	80.1	3746	2291.95	29270	<b>365.3</b>	Neopreno
B-3	7	10	20.5	78.5	3759	2334.69	30320	<b>386.0</b>	Neopreno
B-4	7	10.1	20.5	80.1	3774	2297.82	30110	<b>375.8</b>	Neopreno
B-5	7	10.1	20.4	80.1	3773	2308.47	29920	<b>373.4</b>	Neopreno
B-6	7	10.1	20.4	80.1	3756	2298.07	29930	<b>373.6</b>	Neopreno
B-7	7	10.1	20.5	80.1	3765	2292.34	29010	<b>362.1</b>	Neopreno
B-8	7	10.1	20.4	80.1	3751	2295.01	29090	<b>363.1</b>	Neopreno
B-9	7	10	20.4	78.5	3763	2348.63	29460	<b>375.1</b>	Neopreno
B-10	7	10.1	20.4	80.1	3766	2304.19	29420	<b>367.2</b>	Neopreno
<b>PROMEDIO A 7 DÍAS</b>								<b>372.3</b>	
B-11	28	10	10.4	78.5	3553	4349.83	40530	<b>516.0</b>	Neopreno
B-12	28	10	19.4	78.5	3519	2309.55	39880	<b>507.8</b>	Esmerilado

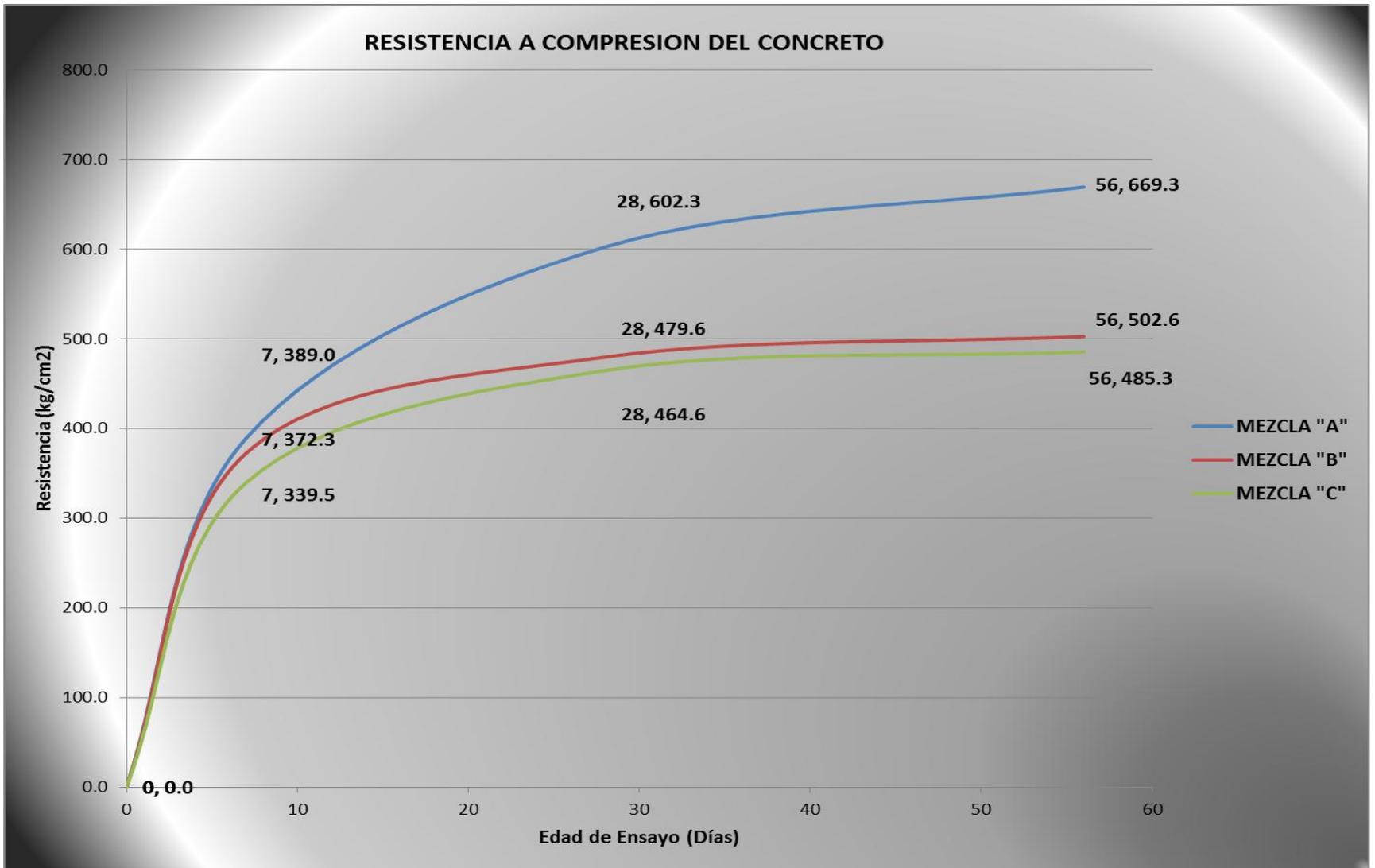
B-13	28	10.1	19.3	80.1	3544	2291.94	33800	<b>421.9</b>	Esmerilado
B-14	28	10	19.3	78.5	3505	2312.28	30790	<b>392.0</b>	Esmerilado
B-15	28	10.1	19.3	80.1	3577	2313.28	39940	<b>498.5</b>	Esmerilado
B-16	28	10.1	19.3	80.1	3526	2280.30	30720	<b>383.4</b>	Esmerilado
B-17	28	10	19.3	78.5	3563	2350.55	40180	<b>511.6</b>	Neopreno
B-18	28	10	19.3	78.5	3551	2342.63	40510	<b>515.8</b>	Neopreno
B-19	28	10	19.3	78.5	3528	2327.46	38390	<b>488.8</b>	Esmerilado
B-20	28	10	19.4	78.5	3533	2318.74	41900	<b>533.5</b>	Neopreno
B-21	28	10	19.4	78.5	3549	2329.24	39780	<b>506.5</b>	Esmerilado
<b>PROMEDIO A 28 DÍAS</b>								<b>479.6</b>	
B-22	56	10.1	20.1	80.1	3675	2282.07	40490	505.4	Esmerilado
B-23	56	10.1	20	80.1	3646	2275.38	39370	491.4	Esmerilado
B-24	56	10.1	19.9	80.1	3648	2288.07	38360	478.8	Esmerilado
B-25	56	10.1	20	80.1	3629	2264.77	38470	480.2	Esmerilado
B-26	56	10.1	20	80.1	3703	2310.95	38720	483.3	Esmerilado
B-27	56	10.1	20	80.1	3692	2304.09	39700	495.5	Esmerilado
B-28	56	10.1	20	80.1	3651	2278.50	40010	499.4	Esmerilado
B-29	56	10.1	20.1	80.1	3704	2300.08	41170	513.9	Esmerilado
B-30	56	10.1	20.1	80.1	3700	2297.59	39160	488.8	Esmerilado
B-31	56	10.1	20.1	80.1	3688	2290.14	43660	544.9	Neopreno
B-32	56	10.1	20	80.1	3640	2271.64	43810	546.8	Neopreno
<b>PROMEDIO A 56 DÍAS</b>								<b>502.6</b>	

**Tabla 4.5. Resultados del Ensayo de Resistencia del Concreto a Compresión de la Mezcla C.**

<b>MEZCLA: "C"</b>	<b>RELACION A/MC =0.40</b>	<b>FECHA DE COLADO: 28/05/2013 - 30/07/2013</b>		
<b>TAMAÑO MAXIMO DEL AGREGADO: 3/8"</b>		<b>ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE: 0.0</b>		<b>ADICION MICROSILICE NORCHEM = 0.0%</b>

<b>MEZCLA "C"</b>									
<b># Corr.</b>	<b>Edad de prueba (días)</b>	<b>Diam. (cm)</b>	<b>Alt. (cm)</b>	<b>Área (cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Peso (g)</b>	<b>Peso-Vol (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Carga (kg)</b>	<b>Resist. (kg/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Observaciones</b>
C-1	7	10.1	20.3	80.1	3654	2246.67	29200	<b>364.5</b>	Neopreno
C-2	7	10.1	20.3	80.1	3669	2255.90	29950	<b>373.8</b>	Neopreno
C-3	7	10.1	20.3	80.1	3656	2247.90	31180	<b>389.2</b>	Neopreno
C-4	7	10.1	20.4	80.1	3673	2247.28	32830	<b>409.8</b>	Neopreno
C-5	7	10.1	20.4	80.1	3656	2236.88	29140	<b>363.7</b>	Neopreno
C-6	7	10.1	20.4	80.1	3666	2243.00	29560	<b>369.0</b>	Neopreno
C-7	7	10.1	20.3	80.1	3650	2244.21	29420	<b>367.2</b>	Neopreno
C-8	7	10.1	20.3	80.1	3663	2252.21	28360	<b>354.0</b>	Neopreno
C-9	7	10	20.3	78.5	3661	2296.22	29560	<b>376.4</b>	Neopreno
C-10	7	10.1	20.3	80.1	3676	2260.20	29370	<b>366.6</b>	Neopreno
<b>PROMEDIO A 7 DÍAS</b>								<b>339.5</b>	
C-11	28	10.1	20.3	80.1	3679	2262.04	40560	<b>506.3</b>	Neopreno
C-12	28	10.1	20.3	80.1	3680	2262.66	39280	<b>490.3</b>	Neopreno

C-13	28	10.1	20.3	80.1	3670	2256.51	36590	<b>456.7</b>	Esmerilado
C-14	28	10.1	20.3	80.1	3680	2262.66	36550	<b>456.2</b>	Esmerilado
C-15	28	10.1	19.5	80.1	3545	2269.08	36700	<b>458.1</b>	Esmerilado
C-16	28	10.1	19	80.1	3430	2253.24	36980	<b>461.6</b>	Esmerilado
C-17	28	10.1	19.6	80.1	3545	2257.50	36230	<b>452.2</b>	Esmerilado
C-18	28	10.1	19.6	80.1	3553	2262.59	37550	<b>468.7</b>	Esmerilado
C-19	28	10.1	19.6	80.1	3555	2263.87	36760	<b>458.8</b>	Esmerilado
C-20	28	10.1	19.6	80.1	3553	2262.59	35950	<b>448.7</b>	Esmerilado
C-21	28	10.1	19.5	80.1	3540	2265.88	36330	<b>453.5</b>	Esmerilado
<b>PROMEDIO A 28 DÍAS</b>								<b>464.6</b>	
C-22	56	10	20	78.5	3611.4	2299.09	37300	<b>474.9</b>	Esmerilado
C-23	56	10.1	19.6	80.1	3543.7	2256.67	37970	<b>473.9</b>	Esmerilado
C-24	56	10.1	19.4	80.1	3508.6	2257.35	38000	<b>474.3</b>	Esmerilado
C-25	56	10.1	19.6	80.1	3550	2260.68	38880	<b>485.3</b>	Esmerilado
C-26	56	10	19.5	78.5	3536.2	2308.94	36930	<b>470.2</b>	Esmerilado
C-27	56	10	19.5	78.5	3534	2307.50	37590	<b>478.6</b>	Esmerilado
C-28	56	10.1	19.7	80.1	3565.8	2259.22	37700	<b>470.6</b>	Esmerilado
C-29	56	10.1	19.5	80.1	3542.7	2267.60	39910	<b>498.1</b>	Neopreno
C-30	56	10.1	19.3	80.1	3486.4	2254.69	43410	<b>541.8</b>	Neopreno
<b>PROMEDIO A 56 DÍAS</b>								<b>485.30</b>	

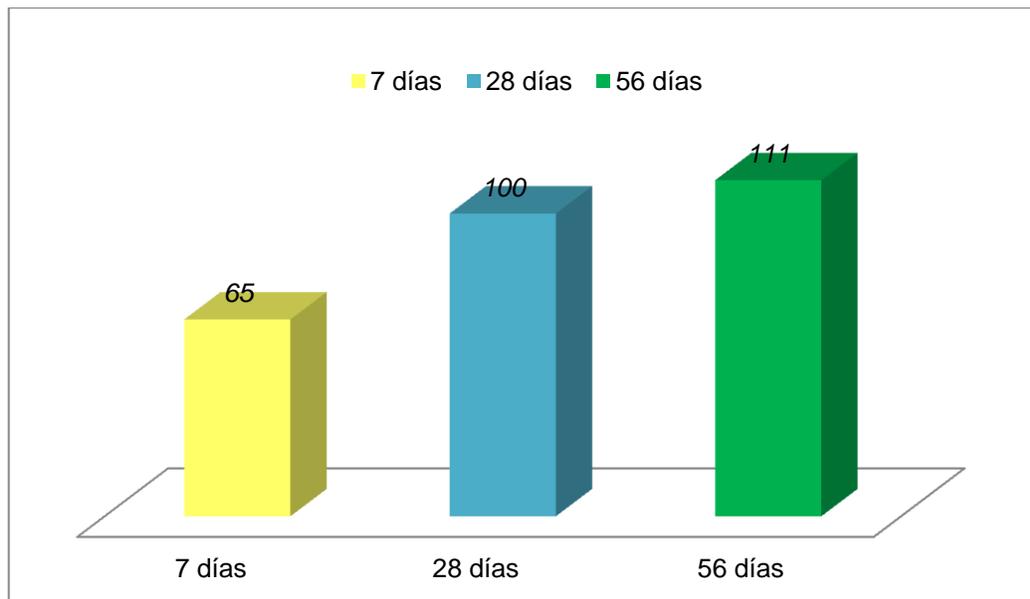


**Figura 4.5.** Gráfica de ensayos de resistencia a la compresión versus edad de prueba.

En la grafica anterior, se observa que el diseño de Mezcla A adicionada con microsilice, obtuvo mayores valores de resistencias a esfuerzos de compresión a las diferentes edades que las otras mezclas diseñadas para comparar el comportamiento mecánico del concreto.

***De estos resultados obtenidos se establece que:***

El incremento de la resistencia a la edad de 7 días de la mezcla A, corresponde a un 65% de la resistencia obtenida a los 28 días, y un incremento en la resistencia a la edad de 56 días del 11%.



***Figura 4.6.*** Incremento de resistencia por porcentaje teniendo como referencia la resistencia alcanzada a la edad de diseño de 28 días.

En las mezclas de comparación B Y C, a la edad de 56 días el incremento en la resistencia fue mínimo, la tendencia de la resistencia después de los 28 días se mantiene constante, algo típico debido al tipo de cemento utilizado.



# CAPITULO 5: *CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES*

## 5. **CAPITULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.**

### 5.1. **CONCLUSIONES.**

1. Debido a la adición de Humo de Sílice en el diseño de mezcla A, el concreto demandó una mayor cantidad de agua a causa de la superficie específica del Humo de Sílice y de los requisitos de consistencia, generando un incremento en la relación A/MC de 0.28 inicial a 0.42 final, necesario para hidratar los materiales cementantes. De igual manera las mezclas de comparación B y C, requirieron incrementar la relación A/C de 0.28 inicial a 0.40 final, para obtener una adecuada consistencia. Por lo que con las características de los materiales utilizados, resulta inoperante realizar concretos de alta resistencia con una relación A/C o A/MC tan baja.
2. En lo referente al comportamiento del concreto en estado fresco se comprobó que la densidad de la mezcla patrón es menor, por lo tanto la función del Humo de Sílice no es densificar las mezclas de concreto de alta resistencia, si no mejorar el comportamiento mecánico y la durabilidad del concreto.
3. El resultado obtenido de resistencia a los esfuerzos de compresión del concreto de la mezcla patrón a la edad de 28 días es de  $602.3 \text{ kg/cm}^2$  (8,567 psi); por lo que es posible elaborar concretos de alta resistencia utilizando cemento ASTM C1157 Tipo HE, siguiendo los procedimientos establecidos en ACI 211.4R-08, que requiere una resistencia superior a  $422 \text{ kg/cm}^2$  (6,000 psi) para ser considerados concretos de alta resistencia.
4. Basados en los resultados obtenidos de resistencia a los esfuerzos de compresión de la mezcla patrón a las diferentes edades, se obtuvieron valores superiores comparados con las mezclas de compañía, por lo tanto el uso de Humo de Sílice como material cementante, incrementa considerablemente la resistencia hasta en un 30 % a la edad de 28 días comparado con un concreto

utilizando únicamente cemento como conglomerante y un 25 % para concreto elaborado con aditivo superplastificante y cemento como conglomerante.

5. Los procedimientos de mezclado recomendados por ASTM C192 para concretos convencionales, no son aplicables en concretos de alta resistencia utilizando Humo de Sílice como adición. El tiempo y la secuencia de mezclado indicados en ASTM C192 afectan la resistencia final del concreto porque no se logra romper las aglomeraciones y dispersar adecuadamente el Humo de Sílice en la matriz de concreto.
6. El método de curado por inmersión de especímenes de concreto de alta resistencia con Humo de Sílice después de  $4 \pm 1$  horas de su acabado superficial es el método más eficiente para la obtención de los resultados de resistencia a esfuerzos de compresión alcanzados.

## **5.2. RECOMENDACIONES.**

1. Evite tratar al concreto de alta resistencia como concreto de resistencia convencional; son concretos muy distintos.
2. Verificar que todo el cemento a utilizar provenga de un mismo lote de producción, muestras distintas pueden generar variaciones en la resistencia de las pruebas de cubos de mortero ASTM C109 e influir en la resistencia del concreto.
3. Es importante aclarar que los resultados obtenidos con la utilización de agregado grueso, con un tamaño máximo nominal de 3/8", son satisfactorios, sin embargo estas mezclas de concreto podrían ser más eficientes haciendo uso de una granulometría combinada, ya que estas reducen la demanda de agua, menos contracción por secado, mayor trabajabilidad y desarrollo de resistencia a edades tempranas.
4. Antes de la elaboración de mezclas de concreto, es importante verificar que el cemento y materiales cementantes a utilizar estén libres de grumos, principalmente si se encuentra en época lluviosa, ya que la humedad relativa del ambiente genera que el cemento entre en proceso de hidratación provocando pérdida de cemento (por la formación de grumos). Si los materiales cementantes presentan esta característica, se deberá de tamizar por la malla #16.
5. Es indispensable en el proceso de mezclado del concreto de alta resistencia, seguir el procedimiento establecido en el capítulo 3 sección 3.4, debido a la adición de Humo de Sílice como material cementante.
6. Si se está trabajando en mezclas que contienen Humo de Sílice inmediatamente después de conformar los especímenes de concreto se

debe enraizar su superficie y realizar el acabado. Retardar el proceso puede generar deficiencias en la superficie e impactar su resistencia.

7. Generalmente se utiliza la norma ASTM C192 para los métodos de curado, en ella se establece que los cilindros de concreto deberán de curarse por inmersión después de  $24 \pm 8$  horas desde su elaboración, la mezcla A se curó en base a esta normativa en la etapa de mezclas de prueba, obteniendo resultados fallidos, debido a los tiempos de fraguado de la mezcla, generalmente cuando se trata de concretos de alta resistencia, el tiempo de fraguado final ronda por las  $4 \pm 1/2$  hora, lo que hace que los especímenes pierdan humedad, y esto influye directamente en la resistencia del concreto. Considerando los tiempos de fraguado, y siguiendo sugerencias de expertos en diseños de mezclas de concreto en El Salvador, se recomienda curar los especímenes por inmersión sin desmoldar en un tiempo aproximado de  $4 \pm 1$  hora después de elaborados para garantizar la hidratación de los materiales cementantes, evitando la pérdida de humedad superficial del concreto.
8. El acabado superficial del espécimen al momento de someterlo a compresión debe cumplir los requisitos presentados en ASTM C617-09A, si la superficie presenta irregularidades pronunciadas se recomienda seguir los procedimientos de cabeceo propuestos en esta normativa. Pulir o esmerilar la cabeza de la probeta, o utilizar almohadillas elastoméricas con características especificadas en ASTM C1231 son soluciones útiles y aplicadas en El Salvador. Si se opta por utilizar almohadillas elastoméricas se debe implementar la dureza adecuada para la resistencia estimada a trabajar, para permitir que el esfuerzo aplicado sea distribuido correctamente y sin deficiencias inducidas. Como última alternativa se puede cabecear el espécimen con mortero de azufre, aunque realizar el ensayo mediante esta alternativa puede requerir personal altamente capacitado y graves daños ambientales.

9. En el ensayo de resistencia a compresión de especímenes de concreto de alta resistencia, se debe tomar en cuenta que estos pueden exceder la capacidad de la mayoría de máquinas antiguas usadas por algunos laboratorios nacionales, porque no tiene la capacidad de probar concretos de alta resistencia que sobrepasan los  $700 \text{ kg/cm}^2$ . Para poder llevar a cabo estas pruebas se requerirá tener una rigidez longitudinal y lateral, estabilidad y capacidad de carga de al menos un 20% en exceso de la resistencia a compresión esperada en los especímenes de concreto.
  
10. Para investigaciones de tecnologías del concreto, es importante contar con técnicos laboratoristas muy capacitados y con amplia experiencia en el diseño de mezclas de concreto y en pruebas de laboratorio, ya que la realización de investigaciones de concreto de alta resistencia requiere un cumplimiento estricto de normativas e incluye propiedades que pueden ser influidas por errores humanos (como ejemplo al momento de aplicar los esfuerzos a los especímenes bajo compresión, las cargas aplicadas de forma discontinua afectan los resultados esperados).
  
11. El gobierno salvadoreño debería establecer un ente que documente los avances tecnológicos en el sector construcción.

## GLOSARIO

**Absorción de Agua:** (1) el proceso por el cual un líquido (agua) se absorbe y tiende a llenar los poros permeables en un sólido poroso. (2) la cantidad de agua absorbida por un material bajo condiciones especificadas de ensayo, comúnmente expresada como el porcentaje de la masa de la probeta de ensayo.

**Acabado:** operaciones mecánicas tales como nivelación, consolidación, emparejado, alisado o texturización, que establecen la apariencia final de cualquier superficie de concreto.

**Adición:** en los Estados Unidos es cualquier sustancia que se muele conjuntamente o se adiciona en cantidades limitadas al cemento portland durante su producción. En algunos países de Latinoamérica, también puede referirse a los materiales cementantes suplementarios. Es un material inorgánico finamente dividido, utilizado en el concreto para mejorar ciertas propiedades o lograr propiedades especiales. Existen dos tipos de adiciones inorgánicas: adiciones inertes (Tipo I) y adiciones hidráulicas latentes o puzolánicas (Tipo II).

**Aditivo:** material, que no sea agua, agregado y cemento hidráulico, usado como ingrediente del concreto, del mortero, del grout o del revoque y adicionado a la mezcla inmediatamente antes o durante el mezclado.

**Aditivo HRWR (High Range Water Reducing):** Aditivo superplastificante reductor de agua de mezclado de alto rango.

**Aditivo Acelerador (Acelerante):** aditivo que acelera la velocidad de hidratación del cemento hidráulico, disminuyendo el tiempo normal del inicio del fraguado o aumentando la velocidad de endurecimiento, de desarrollo de resistencia o ambas, del cemento portland, concreto, mortero, grout o revoque.

**Aditivo Incorporador de Aire:** aditivo para concreto, mortero o grout que, durante el mezclado, promueve la inclusión de aire en la mezcla en la forma de pequeñas burbujas, normalmente para mejorar la trabajabilidad (docilidad) y aumentar la resistencia a la congelación.

**Agregado:** material mineral granular, tal como la arena natural, la arena manufacturada, la grava, la piedra triturada, la escoria granulada de alto horno enfriada al aire, la vermiculita y la perlita.

**Agregado fino:** agregado que pasa por el tamiz 9.5 mm pasa casi totalmente por el tamiz de 4.75 mm (No.4) y se retiene predominantemente en el tamiz de 75 mm (no. 200).

**Agregado grueso:** grava natural, piedra triturada o escoria de alto horno de hierro, frecuentemente mayor que 5 mm (0.2 pulg.) y cuyo tamaño normalmente varía entre 9.5 mm y 37.5 mm.

**Aire atrapado (Aire Ocluido):** vacío de aire no intencional, con forma irregular, en el concreto fresco o endurecido, con tamaño igual o superior a 1 mm.

**Aire Incluido (Aire Incorporado):** burbujas de aire microscópicas y esféricas-normalmente con diámetro entre 10 um y 1000 um - intencionalmente incorporadas en el concreto para suministrar resistencia a la congelación-deshielo y/o para mejorar la durabilidad.

**Ataque de Sulfatos:** la forma más común de ataque químico del concreto, causada por los sulfatos en las aguas subterráneas o en el suelo, que se manifiesta por la expansión y la desintegración del concreto.

## **B**

**Bachada:** Cantidad de materiales mezclados, que en cada ciclo produce una revoladora o planta mezcladora.

## **C**

**Cal:** generalmente este término incluye las varias formas químicas y físicas de la cal viva, cal hidratada y cal hidráulica. Se puede clasificar en alto calcio, magnesia o dolomítica.

**Cal Hidratada:** polvo seco obtenido del tratamiento de la cal viva con suficiente cantidad de agua para satisfacer sus afinidades químicas con el agua. Consiste esencialmente en hidróxido de calcio o en una mezcla de hidróxido de calcio y óxido de magnesio o hidróxido de magnesio o ambos.

**Cambio de Volumen:** un aumento o una disminución del volumen por cualquier motivo, tal como un cambio de la humedad, de la temperatura o cambios químicos.

**Carbonatación:** reacción entre el dióxido de carbono y un hidróxido u óxido para formar carbonato.

**Cemento Hidráulico:** el cemento que se fragua y se endurece por la reacción química con el agua y es capaz de endurecerse incluso bajo el agua. (Véase también cemento portland).

**Cemento Portland:** cemento hidráulico de silicato de calcio que se produce por la pulverización del clínker de cemento portland y normalmente también contiene sulfato de calcio y otros compuestos. (Véase también cemento hidráulico).

**Cemento Portland Blanco:** cemento portland que se produce con materias primas con bajo contenido de hierro.

**Cemento Portland con Inclusor de Aire:** cemento portland al cual se le adiciona un inclusor de aire (incorporador de aire) durante su producción.

**Cemento Portland de Escoria de Alto Horno:** Cemento hidráulico que consiste en: (1) la molienda conjunta de la mezcla del clínker de cemento portland y escoria granulada de alto horno, (2) una mezcla íntima y uniforme del cemento portland y de una escoria granulada de alto horno fina o (3) una escoria de alto horno finamente molida con o sin adiciones.

**Cemento Portland Puzolánico:** cemento hidráulico que consiste en: (1) una mezcla íntima y uniforme de cemento portland o de cemento portland de escoria y una puzolana fina producida por la molienda conjunta del cemento portland y de la puzolana, (2) mezcla de cemento portland o de cemento portland de escoria de alto horno y una puzolana finamente molida o (3) por la combinación de molienda conjunta y mezclado, en la cual la cantidad del constituyente puzolánico está dentro de los límites especificados.

**Ceniza Volante:** residuo de la combustión del carbón, que se transporta en los gases del conducto de humo y se usa como puzolana o material cementante en el concreto.

**Clínker:** producto final del horno de cemento portland, material cementante bruto antes de la molienda. Caliza cocida.

**Cloruros (Ataque):** compuestos químicos que contienen iones cloruros, los cuales promueven la corrosión del refuerzo de acero. Los descongelantes (agentes de deshielo) a base de cloruros son su principal fuente.

**Cohesión:** atracción mutua a través de la cual los elementos de una sustancia se mantienen unidos.

**Compactación:** proceso de inducción de una disposición más cerca de las partículas sólidas en el concreto, mortero o grout frescos, a través de la reducción de los vacíos, frecuentemente logrado con la vibración, el varillado, los golpes o la combinación de estos métodos. También llamada de consolidación.

**Concreto:** mezcla de material aglomerante (conglomerante) y agregados fino y grueso. En el concreto normal, comúnmente se usan como medio aglomerante, el cemento portland y el agua, pero también pueden contener puzolanas, escoria y/o aditivos químicos.

**Concreto de alta resistencia:** según el ACI un concreto de alta resistencia es aquel que alcanza una resistencia igual o superior a  $500 \text{ Kg/cm}^2$  a los 28 días, las mezclas de este tipo de concreto se deben diseñar partiendo de una relación agua/cemento baja, para poder alcanzar altas resistencias.

**Concreto de Peso Normal:** tipo de concreto producido con agregados de densidad normal, frecuentemente piedra triturada o grava, y que tiene una densidad de aproximadamente  $2400 \text{ kg/m}^3$  ( $150 \text{ lb/pie}^3$ ).

**Concreto de Revenimiento Cero:** concreto cuyo revenimiento no es mensurable.

**Concreto Endurecido:** El concreto se encuentra en este estado cuando propiamente comienza la formación del tejido filamentoso 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 mismo.

**Concreto Premezclado o Concreto Elaborado en Planta:** concreto producido para la entrega en la obra en el estado fresco.

**Concreto Pretensado (Presforzado):** concreto donde se inducen esfuerzos de compresión a través de tendones o varillas de acero de alta resistencia antes que se apliquen las cargas al elemento de concreto. Esto va a balancear los esfuerzos de tensión impuestos al elemento durante el servicio. Se lo puede lograr a través de: *Postensado -un método de pre-esfuerzo en el cual se aplican esfuerzos a los tendones/varillas después que el concreto se haya endurecido; o Pre-esforzado - en el cual se aplican los esfuerzos a los tendones/varillas antes de la colocación del concreto.*

**Concreto Reforzado (Armado):** concreto al cual se adicionan materiales resistentes a la tensión, tales como varillas de acero o alambre metálico.

**Concreto Sin Revenimiento:** concreto con revenimiento menor que 6 mm.

**Consistencia:** Es una medida de la trabajabilidad referida a la movilidad y la compactación del concreto, en términos de la apariencia que exhibe al ser manipulada y expresada con base en resultados de alguna prueba específica.

**Contenido de Aire:** volumen total de vacíos de aire, sea incluido, sea atrapado, en la pasta de cemento, mortero o concreto. El aire incluido aumenta la durabilidad del mortero o concreto endurecidos sometidos a congelación-deshielo y aumenta la trabajabilidad de las mezclas frescas.

**Contracción (retracción, encogimiento):** disminución de la longitud o del volumen del material, resultante de cambios del contenido de humedad, de la temperatura y de cambios químicos.

**Control de Calidad:** acciones realizadas por el productor o el contratista, a fin de proveer un control sobre lo que se está haciendo y sobre lo que se está suministrando, para que las normas de buenas prácticas de obra se sigan.

**Corrosión:** deterioro del metal por la reacción química, electroquímica o electrolítica.

**Curado:** proceso, a través del cual se mantienen el concreto, mortero, grout o revoque frescos, en la condición húmeda y a una temperatura favorable, por el periodo de tiempo de sus primeras etapas, a fin de que se desarrollen las propiedades deseadas del material. El curado garantiza la hidratación y el endurecimiento satisfactorios de los materiales cementantes.

**Curado Húmedo al Aire:** curado con aire húmedo (no menos del 95% de humedad relativa) a presión atmosférica y a una temperatura de unos 23°C (73°F).

## **D**

**Descascaramiento (descamación o desconchamiento):** disgregación y lascamiento de la superficie de concreto endurecido, frecuentemente resultante de ciclos de congelación-deshielo y de la aplicación de sales descongelantes.

**Dosificación:** proceso de medición, por peso o por volumen, de los ingredientes y su introducción en la mezcladora para una cantidad de concreto, mortero, grout o revoque.

**Durabilidad:** capacidad del concreto, mortero, grout o revoque de cemento portland de resistir a la acción de las intemperies y otras condiciones de servicio, tales como ataque químico, congelación-deshielo y abrasión.

## **E**

**Endurecimiento Rápido:** desarrollo rápido de la rigidez en la pasta de cemento hidráulico, mortero, grout, o concreto frescos.

**Escoria de Alto Horno:** subproducto no metálico de la producción de acero que consiste básicamente en silicatos y aluminosilicatos del calcio que se desarrollan en la condición fundida simultáneamente con el hierro en el alto horno.

## **F**

**Filler:** Material fino, compuesto por arena molida y seca.

**Fraguado del concreto:** Cuando el cemento y el agua entran en contacto, se inicia una reacción química exotérmica que determina el paulatino endurecimiento de la mezcla. Dentro del proceso general de endurecimiento se presenta un estado en que la mezcla pierde apreciablemente su plasticidad y se vuelve difícil de manejar; tal estado corresponde al fraguado inicial de la mezcla. A medida que se produce el endurecimiento normal de la mezcla, se presenta un nuevo estado en el cual la consistencia ha alcanzado un valor muy apreciable; este estado se denomina fraguado final.

## **G**

**Granulometría (Gradación):** distribución del tamaño de las partículas de agregado, que se determina por la separación a través de tamices normalizados.

**Grava Triturada:** Producto resultante de una trituración artificial de la grava, donde la mayoría de las partículas poseen por lo menos una cara resultante de la fractura.

**Gravedad Específica:** La razón de la masa de un volumen de material (incluyendo los vacíos permeables e impermeables, pero excluyendo los vacíos entre partículas), a una temperatura establecida, con la masa de un volumen igual de agua destilada a una temperatura establecida.

**Grout:** mezcla de material cementante con o sin agregados o aditivos, a la cual se adiciona una cantidad suficiente de agua para lograr una consistencia fluida o de bombeo sin segregación de los materiales constituyentes.

## **H**

**Hidratación:** es la reacción entre el cemento hidráulico y el agua, a través de la cual se forman nuevos compuestos que confieren resistencia al concreto, mortero, grout y revoque.

**Humedad dentro del concreto:** La distribución de la humedad en una estructura de concreto está determinada por la composición del concreto, el curado y el microclima en las diferentes partes de la estructura. Las diferencias en las condiciones de humedad entre el sistema de poros y el microclima circundante causarán un flujo de humedad hacia adentro y fuera de la superficie de concreto y en la profundidad de la estructura.

**Humo de Sílice (Microsilice):** sílice no cristalina muy fina, que es un subproducto de la producción de la aleación de silicio y ferrosilicio en los hornos eléctricos y que se usa como puzolana en el concreto. Véase también la definición de *Microsilice*.

## **I**

**Inclusión de Aire:** introducción intencional de aire en la forma de minúsculas burbujas desconectadas (normalmente menores de 1 mm) durante el mezclado del concreto, mortero, grout o revoque de cemento portland para mejorar las características deseables, tales como cohesión, trabajabilidad y durabilidad.

## **L**

**Lechada:** mezcla fina de una sustancia insoluble, tal como cemento portland, escoria o arcilla, con un líquido, tal como el agua.

## **M**

**Masa Específica:** masa por unidad de volumen, peso por unidad de volumen al aire, expresados, por ejemplo, en kg/m<sup>3</sup> (lb/pie<sup>3</sup>).

**Masa Específica Relativa (Densidad Relativa):** una proporción entre la masa y el volumen del material con relación a la densidad del agua, también llamada gravedad específica.

**Masa Unitaria (Masa Volumétrica, Densidad):** masa volumétrica del concreto fresco o del agregado, que normalmente se determina pesándose un volumen conocido de concreto o agregado (la densidad a granel o suelta de los agregados incluye los vacíos entre las partículas).

**Material Cementante (Material Cementicio):** cualquier material que presente propiedades cementantes o que contribuya para la formación de compuestos hidratados de silicato de calcio. En el proporcionamiento del concreto se consideran como materiales cementantes: cemento portland, cemento hidráulico mezclado, ceniza volante, escoria granulada de alto horno molida, humo de sílice, arcilla calcinada, metacaolinita, esquistos calcinados y ceniza de cáscara de arroz.

**Material Cementante Suplementario:** material cementante que no sea el cemento portland o el cemento mezclado. Véase también material cementante.

**Materiales Constituyentes o Componentes del Concreto:** Son aquellos materiales que en conjunto constituyen el concreto, los cuales básicamente son agregados (arena y grava) y pasta (cemento Portland y agua); los aditivos y adiciones son incluidos en la mezcla como componentes especiales.

**Metacaolinita:** puzolana altamente reactiva producida de las arcillas caolinitas.

**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.

**Microsílice o Humo de Sílice:** Según el ACI 116R la microsílice se define como un “muy fino y no cristalino sílice producido en horno de arco eléctrico, como un subproducto de la producción de silicio o de aleaciones elementales que contienen silicio; también es conocido como humo de sílice condensado o humo de sílice”.

**Módulo de Elasticidad:** relación entre el esfuerzo normal y la deformación unitaria correspondiente para esfuerzos de tensión o compresión menores que el límite de proporcionalidad del material. También conocido como módulo de Young y módulo Young de elasticidad, designado por el símbolo E.

**Módulo de Finura (MF):** factor que se obtiene por la suma de los porcentajes acumulados de material de una muestra de agregado en cada uno de los tamices de la serie especificada y dividido por 100.

**Mortero:** mezcla de materiales cementantes, agregado fino y agua, que puede contener aditivos, y normalmente se usa para unir unidades de mampostería.

## **P**

**Pasta de Cemento:** constituyente del concreto, mortero, grout y revoque que consiste en cemento y agua.

**Permeabilidad:** propiedad que permite el pasaje o paso de fluidos y gases.

**pH:** símbolo químico que representa el logaritmo del recíproco de la concentración de iones hidrógeno en átomos gramo por litro, usado para expresar la acidez y la alcalinidad (base) de la solución en una escala de 0 a 14, donde menos que 7 representa acidez y más que 7 alcalinidad.

**Plasticidad:** aquella propiedad de la pasta, concreto, mortero, grout o revoque frescos que determina su trabajabilidad, resistencia a deformación o facilidad de moldeo.

**Plastificante:** aditivo que aumenta la plasticidad del concreto, mortero, grout o revoque de cemento portland.

**Puzolana:** materiales silíceos o silíceos y aluminosos, tales como la ceniza volante o el humo de sílice, que, por si mismos, poseen poco o ningún valor cementante, pero que cuando están finamente molidos y en presencia de agua, reaccionan con el hidróxido de calcio a temperaturas normales, para formar compuestos que poseen propiedades cementantes.

**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.

## **R**

**Reactividad álcali-agregado:** producción de gel expansivo por la reacción entre los agregados que contienen ciertas formas de sílice o carbonatos y el hidróxido de calcio en el concreto.

**Reductor de Agua:** aditivo cuyas propiedades permiten una reducción del agua necesaria para producir una mezcla de concreto con un cierto revenimiento, reducir la relación agua-cemento, reducir el contenido de cemento o aumentar el revenimiento.

**Relación Agua-Cemento (A/C):** relación entre la masa de agua y la masa de cemento en el concreto.

**Relación Agua-Material Cementante (A/MC, W/CM, W/B o relación Agua/Conglomerante):** relación de la masa de agua por la masa de materiales cementantes en el concreto, incluyéndose el cemento portland, el cemento mezclado, el cemento hidráulico, la escoria, la ceniza volante, el humo de sílice, la arcilla calcinada, la metacaolinita, el esquisto calcinado y la ceniza de cáscara de arroz.

**Rendimiento:** volumen por amasada (bachada, pastón) de concreto que se expresa en metros cúbicos (pies cúbicos).

**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.

**Resistencia a la Compresión:** resistencia máxima que una probeta de concreto, mortero o grout puede resistir cuando es cargada axialmente en compresión en una máquina de ensayo a una velocidad especificada. Normalmente se expresa en fuerza por unidad de área de sección transversal, tal como *Mega Pascal* (MPa) o libras por pulgada cuadrada (lb/pulg<sup>2</sup> o psi).

**Resistencia a congelación-deshielo:** capacidad del concreto de resistir a ciclos de congelación y deshielo (Véase también inclusión de aire y aditivo inclusor de aire).

**Resistencia a la Flexión:** capacidad de los sólidos de resistir a la flexión.

**Resistencia a la Tensión (tracción):** esfuerzo hasta el cual el concreto puede resistir sin agrietarse bajo el cargamento a tensión axial.

**Resistencia al fuego:** aquella propiedad del material, elemento o partes de la construcción de resistir al fuego o de dar protección contra el fuego. Se caracteriza por la capacidad de confinar el fuego o de continuar a desempeñar una cierta función estructural durante el fuego o ambos.

**Retardador (retardante):** aditivo que retarda el fraguado y el endurecimiento del concreto.

**Revenimiento (Asentamiento De Cono De Abrams):** medida de consistencia del concreto fresco, igual al asentamiento inmediato de una probeta moldeada con un cono normalizado.

## S

**Sangrado (exudación):** flujo del agua de la mezcla del concreto fresco, causado por el asentamiento de los materiales sólidos de la mezcla.

**Segregación:** La separación involuntaria de los constituyentes del concreto o las partículas de agregado, causando una falta de uniformidad en su distribución.

**Superplastificante:** los aditivos superplastificantes son aditivos reductores de agua de alto rango que aumentan la fluidez del concreto fresco. En algunos países, tales como EE.UU., México y Ecuador, se puede usar el término plastificante como sinónimo del término superplastificante. Pero, en países tales como Argentina y Chile, el término superplastificante se refiere a los reductores de agua de alto rango, mientras que el término plastificante (fluidificante) se refiere a los reductores de agua convencionales y por lo tanto, en estos casos, los términos superplastificante y plastificante no se pueden usar como sinónimos.

## T

**Trabajabilidad del concreto:** Es la propiedad que determina el esfuerzo necesario para manipular, una cantidad de mezcla fresca de concreto con la mínima pérdida de homogeneidad.

## U

*No se encontraron definiciones.*

## V

**Vacíos de aire:** vacíos de aire atrapado (aire ocluido) o burbujas de aire incluido en el concreto, mortero o grout. Los vacíos atrapados normalmente tienen un

diámetro mayor que 1 mm y los vacíos incluidos son menores. La mayoría de los vacíos atrapados se debe remover a través de vibración interna, plantillas vibratorias o varilladas.

***Vibración:*** agitación de alta frecuencia del concreto fresco a través de aparatos mecánicos, con propósitos de consolidación.

## **BIBLIOGRAFÍA**

### **LIBROS PRINCIPALES:**

- ♦ ***High-Strength Concrete: A Practical Guide, 1st Ed.***

Autor: Michael A. Caldarone.

Primera edición en 2009 en los EE.UU. y Canadá por Taylor & Francis.

270 Madison Avenue, New York, NY 10016, USA.

- ♦ ***High-Performance Concrete.***

Autor: Pierre-Claude Aïtcin.

Primera edición en 1998 por E & FN Spon, un sello de Routledge.

11 New Fetter Lane, London SE4P 4EE.

- ♦ ***Diseño y Control de Mezclas de Concreto.***

Autor: Steven H. Kosmatka, Beatrix Kerkhoff, William C. Panarese, y Jussara Tanesi, Portland Cement Association.

Primera edición en 2004.

Skokie, Illinois, EE.UU.

- ♦ ***Silica Fume User's Manual.***

Autor: Silica Fume Association.

Abril de 2005.

38860 Sierra Lane, Lovettsville, Virginia, Estados Unidos.

### **INVESTIGACIONES RELACIONADAS CONSULTADAS:**

- ♦ ***Concreto de Gran Comportamiento: Consideraciones Básicas y Económicas para su Aplicación.***

Autor: Ricardo Cubias, Henry Martínez, Carlos Rivas.

Universidad de El Salvador, 1998.

## **REFERENCIAS DE AUTORES MENCIONADOS EN EL DOCUMENTO.**

**Nota:** Cuando en las referencias a lo largo del documento únicamente se mencione al autor dirigirse a este apartado donde se definen los autores y sus respectivas obras; tomar en cuenta que los artículos siguientes en su mayoría únicamente se encuentran en el idioma Inglés.

**Aïtcin, P.C. and Laplante, P. (1990)** “Long-Term Compressive Strength of Silica Fume Concrete,” *Journal of Materials in Civil Engineering*, Aug, Vol. 2, No. 3, pp. 164–70.

**de Almeida, I.R. (1994)** “Abrasion Resistance of High Strength Concrete with Chemical and Mineral Admixtures. Durability of Concrete,” *Proceedings of the Third International Conference*, held May 22–28, 1994, Nice, France; ed. By V.M. Malhotra; American Concrete Institute, Detroit, Michigan, pp. 1099–1113. (ACI SP 145).

**Balayssac, J.P., Detriche, Ch. D., and Grandet, J. (1993)** “Validity of the Water Absorption Test for Characterizing Cover Concrete,” *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, May, Vol. 26, No. 158, pp. 226–30.

**Basheer, P.A.M., Long, A.E., and Montgomery, F.R. (1993)** “A Review of Measurement of Permeation Properties of Concrete on Site. NDT in Civil Engineering,” *Proceedings of the British Institute of Non-Destructive Testing International Conference*, Vol. 1, April 14–16, University of Liverpool, UK; ed. By J.H. Bungey; British Institute of NDT, Northampton, pp. 273–300.

**Burg, R.G. and Ost, B.W. (1992)** *Engineering Properties of Commercially Available High-Strength Concretes*, Research and Development Bulletin RD104T, Portland Cement Association, Skokie, Illinois.

**Caldarone, M.A., Gruber, K.A., and Burg, R.G. (1994)** “High-Reactivity Metakaolin: A New Generation Mineral Admixture,” *Concrete International*, Vol. 16, No. 11, American Concrete Institute, pp. 37–40.

**Caldarone, M.A., Taylor, P.T., Detwiler, R.J., and Bhide, S.B. (2005)** *Guide Specification for High-Performance Concrete for Bridges*, EB233, 1st edn, Portland Cement Association, Skokie, Illinois.

**Cohen, M.D., Zhou, Y., and Dolch, W.L. (1992)** “Non-Air Entrained High-Strength Concrete—Is It Frost Resistant?,” *Materials Journal*, Vol. 89, No. 4, American Concrete Institute, pp. 406–15.

**Collins, T.M. (1989)** “Proportioning High-Strength Concrete to Control Creep and Shrinkage,” *Materials Journal*, American Concrete Institute, Nov–Dec, Vol. 86, No. 6, pp. 576–80.

**de Larrard, F. and Aïtcin, P.C. (1993)** “Apparent Strength Retrogression of Silica Fume Concrete,” *ACI Materials Journal*, Vol. 90, No. 6, American Concrete Institute, pp. 581–5.

**Dewar, J.D. (1964)** *The Indirect Tensile Strength of Concretes of High Compressive Strength*, Technical Report No. 42.377, Cement and Concrete Association, Wexham Springs, March.

**Diederichs, U., Jumppanen, U-M. and Scheider, U. (1995)** “High Temperature Properties and Spalling Behaviour of High-Strength Concrete,” *Proceedings of Fourth Weimar Workshop on High Performance Concrete*, HAB Weimer, Germany, pp. 219–35.

**Farny, J.A. and Panarese, W.C. (1994)** *High-Strength Concrete*, PCA Engineering Bulletin No. 114, Portland Cement Association, Skokie, Illinois.

**Feldman, R.F. (1969)** “Volume Change and Creep of Concrete,” *Canadian Building Digest*, CBD–119.

**Geiker, M., Bentz, D.P., and Jensen, O.M. (2004)** *Mitigating Autogenous Shrinkage by Internal Curing, High-Performance Structural Lightweight Concrete*, SP-218, J.P. Ries and T.A. Holm, eds, American Concrete Institute, pp. 143–54.

**Gross, Shawn P. and Burns, N.H. (1999)** “Field performance of Prestressed High Performance Concrete Highway Bridges in Texas,” *Preliminary Research Report 580/589–3*, Center for Transportation Research, University of Texas at Austin, Austin, Texas.

**Gustafarro, A., Hillier, M.A., and Janney, J.R. (1983)** “Performance of Prestressed Concrete on the Illinois Tollway After 25 Years of Service,” *PCI Journal*, V. 28, No. 1, Prestressed Concrete Institute, Chicago, Illinois, pp. 50–67.

**Hansen, T.C., (1958)** *Creep of Concrete*, Bulletin No. 33, Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm, Sweden.

**Holm, T.A. (1980)** Physical Properties of High Strength Lightweight Aggregate Concretes, *Proceedings, 2nd International Congress on Lightweight Concrete, Ci80*, Construction Press, Lancaster, pp. 187–204.

**Jana, D., Erlin, B., and Pistilli, M.F. (2005)** “A Closer Look at Entrained Air in Concrete,” *Concrete International*, Vol. 27, Issue 07, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan.

**Jansen, D.C., Shah, S.P. and Rossow, E.C. (1995)** “Stress Strain Results of Concrete from Circumferential Strain Feedback Control Testing,” *Materials Journal*, Vol. 92, No. 4, American Concrete Institute, pp. 419–28.

**Jensen, O.M. and Hansen, P.F. (2002)** “Water-Entrained Cement-Based Materials: I. Principle and Theoretical Background,” *Cement and Concrete Research*, Vol. 31, No. 4, 2001, pp. 647–54; “Water-Entrained Cement-Based Materials: II. Experimental Observations,” *Cement and Concrete Research*, Vol. 32, No. 6, pp. 973–8.

**Kaplan, M.F. (1959)** *Ultrasonic Pulse Velocity, Dynamic Modulus of Elasticity, Poisson’s Ratio and the Strength of Concrete Made with Thirteen Different Coarse Aggregates*, RILEM Bulletin, Paris, France, New Series No. 1, pp. 58–73.

**Kodur, V.R. and Lie, T.T. (1997)** “Fire Resistance of Fibre-Reinforced Concrete,” *Fibre Reinforced Concrete: Present and the Future*, Canadian Society of Civil Engineers, pp. 1–46.

**Kodur, V.R. (2000)** *Spalling in High Strength Concrete Exposed to Fire—Concerns, Causes, Critical Parameters and Cures*, ASCE Structures Congress Proceedings, CD Rom, American Society of Civil Engineers, May.

**Lam, H., (2005)** *Effects of Internal Curing Methods on Restrained Shrinkage and Permeability*, Thesis, University of Toronto, PCA R&D No. 2620.

**Mather, B. (2001)** “Self-Curing Concrete, Why Not?,” *Concrete International*, Vol. 23, No. 1, American Concrete Institute, pp. 46–7.

**Mehta, P.K. (1986)** *Concrete: Structures, Properties and Materials*, Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey.

**Mindess, S. and Young, J.F. (1981)** *Concrete*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.

**Mokhtarzadeh, A. and French, C. (2000)** “Mechanical Properties of High-Strength Concrete with Consideration for Precast Applications,” *Materials Journal*, Mar–Apr, American Concrete Institute, pp. 136–48.

**Myers, J.J., Carrasquillo, R.L. (1999)** “The Production and Quality Control of High Performance Concrete in Texas Bridge Structures,” *Preliminary Report*, Center for Transportation Research, pp. 580–9.

**Neville, A. (1997)** “Aggregate Bond and Modulus of Elasticity of Concrete,” *Materials Journal*, Vol. 94, Issue 1, American Concrete Institute, pp. 71–4.

**Nilsen, A.U. and Aïtcin, P.C. (1992)** “Static Modulus of Elasticity of High-Strength Concrete from Pulse Velocity Tests,” *Journal of Cement, Concrete and Aggregates*, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pennsylvania, Summer, Vol. 14, No. 1, pp. 64–6.

**Olsen, N.H. (1990)** *Heat-Induced Explosion in High Strength Concrete*, Danmarks Teckniske Hojskole, Afdelingen for Baerende Konstruktioner, Series R, No. 231.

**Paulson, K.A., Nilson, A.H., and Hover, K.C. (1991)** “Long-Term Deflection of High Strength Concrete Beams,” *Materials Journal*, American Concrete Institute, Mar–Apr, Vol. 88, No. 2, pp. 197–206.

**Perenchio, W.F. and Klieger, P. (1978)** *Some Physical Properties of High Strength Concrete*, Research and Development Bulletin No. RD056.01T, Portland Cement Association, Skokie, Illinois.

**Phan, L.T., Carino, N.J., Duthinh, D., and Garboczi, E. (1997)** *International Workshop on Fire Performance of High-Strength Concrete*, NIST Special Publication 919, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland.

**Pinto, R.C.A. and Hover, K.C. (2001)**, *Frost and Scaling Resistance of High-Strength Concrete*, PCA Research and Development Bulletin RD 122, Portland Cement Association, Skokie, Illinois.

**Russell, H.G. and Larson, S.C. (1989)** “Thirteen Years of Deformations in Water Tower Place,” *Structural Journal*, American Concrete Institute, Mar–Apr, Vol. 86, No. 2, pp. 182–91.

**Saric-Coric, M. and Aïtcin, P.C. (2003)** “Influence of Curing Conditions on Shrinkage of Blended Cements Containing Various Amounts of Slag,” *Materials Journal*, Nov/Dec, American Concrete Institute, pp. 477–84.

**Tazawa, E. (1999)** *Autogenous Shrinkage of Concrete*, Proceedings of the International Workshop, Organized by JCI (Japan Concrete Institute), Hiroshima, Japan, June 13–14, 1998, edited by Ei-ichi Tazawa, Taylor & Francis, London.

**Tomosawa, F. and Noguchi, T. (1995)** “Relationship between Compressive Strength and Modulus of Elasticity of High-Strength Concrete,” *Journal of Structural Engineering*, Vol. 474, Architectural Institute of Japan, Aug, pp. 1–10.

**Young, J.F. (1988)** “A Review of the Pore Structure of Cement Paste and Concrete and Its Influence on Permeability. Permeability of Concrete,” *Special Publication No. 108*, American Concrete Institute, pp. 1–18.

**Zia, P., Ahmad, S. and Leming, M. (1997)** *High-Performance Concretes A State of Art Report (1989–1994)*, FHWA-RD-97–030, US Department of Transportation.

**Boulay, C. (1996)** *Capping H.P.C. Cylinders with the Sand Box: New Developments*, Proceedings of the 4th International Symposium on Utilization of High-Strength/High-Performance Concrete, Paris, May, Vol. 2, pp. 197–202.

**Burg, R.G. and Ost, B.W. (1992)** *Engineering Properties of Commercially Available High-Strength Concretes*, RD 104.01T, Portland Cement Association, Skokie, IL, USA, 55 pp.

**Carrasquillo, R.L., Nilson, A.H. and Slate, F.O. (1981)** Properties of high strength concrete subject to short-term loads. *Journal of the American Concrete Institute*, 78(3), May–June, 171–8.

**Carrasquillo, P.M. and Carrasquillo, R.L. (1988a)** Effect of using unbonded capping systems on the compressive strength of concrete cylinders. *ACI Materials Journal*, 85(3), March–April, 144–7.

**Carrasquillo, P.M. and Carrasquillo, R.L. (1988b)** Evaluation of the use of current concrete practice in the production of high-strength concrete. *ACI Materials Journal*, 85(1), January–February, 49–54.

**Freedman, S. (1971)** *High-Strength Concrete*, IS176.01T, Portland Cement Association, Skokie, IL, USA, 19 pp.

**Gagné, R., Aïtcin, P.-C. and Lamothe, P. (1993)** *Chloride Ion Permeability of Different Concretes*, Proceedings of the 6th International Conference on Durability of Building Materials and Components, Omiya, Japan, E & FN Spon, London, ISBN 0–419–18670–0, pp. 1171–80.

**Holland, T.C. (1987)** Testing high-strength concrete. *Concrete Construction*, 32(6), June, 534–6.

**Howard, L.N. and Leatham, D.M. (1989)** The production and delivery of high-strength concrete. *Concrete International: Design and Construction*, 11(4), April, 26–30.

**Jensen, O.M. and Hansen, P.F. (1995)** A dilatometer for measuring autogenous deformation in hardening Portland cement paste. *Materials and Structures*, 28(181), August–September, 406–9.

**Jung, F. (1968)** *Shrinkage Due to Hydration and its Relation to Concrete Strength*, RILEM International Conference on Shrinkage of Hydraulic Concretes, Madrid, Spain, March, 18 pp.

**Kaan, P.H., Hanson, N.W. and Capell, H.T. (1978)** *Stress Strain Characteristics of High-Strength Concrete*, RD051.01D, Portland Cement Association, Skokie, IL, USA, 10 pp.

**Lessard, M. and Aïtcin, P.C. (1992)** Testing high-performance concrete, in *High Performance Concrete—From Material to Structure* (ed. Y.Malier), E & FN Spon, London, ISBN 0419 176004, pp. 196–213.

**Mak, S., Attard, M.M., Ho, D.W.S. and Darvall, P.L.P. (1990)** *In-situ Strength of High Strength Concrete*, Monash University Australia, Civil Engineering Report, ISBN 0 7326 0218 1, 90 pp.

**Malhotra, V.M. (1976)** Are 4x8 inch concrete cylinders as good as 6x12 inch cylinders for quality control of concrete? *Journal of the American Concrete Institute*, 73(1), January, 33–6.

**Matsushita, H., Kawai, T. and Mohri, K. (1987)** Study on capping method for compressive strength test. *CAJ Review*, May, 226–9.

**Miao, B., Aïtcin, P.-C., Cook, W.D. and Mitchell, D. (1993)** Influence of concrete strength on in situ properties of large columns. *ACI Materials Journal*, 90(3), May–June, 214–19.

**Mirza, S.A. and Johnson, C.D. (1996)** Compressive strength testing of HPC cylinders using confined caps. *Construction and Building Materials*, 10(8), 589–95.

**Mobasher, B. and Mitchell, T.H. (1988)** *Laboratory Experience with the Rapid Chloride Permeability Test*, ACI SP-108, pp. 117–44.

**Moreno, J. (1990)** 225 W.Wacker Drive. *Concrete International: Design and Construction*, 12(1), January, 35–9.

**Neville, A.M. (1995)** *Properties of Concrete*, Longman Scientific & Technical, 4<sup>th</sup> edn, pp. 581–94.

**Neville, A.M. and Brooks, J.J. (1987)** *Concrete Technology*, Longman Scientific & Technical, 1st edn, pp. 300–326.

**Ozyildirim, C. (1985)** Neoprene pads for capping concrete cylinders. *Cement, Concrete, and Aggregates*, 17(1), Summer, 25–8.

**Perraton, D., Aïtcin, P.-C. and Vézina, D. (1988)** *Permeabilities of Silica Fume Concrete*, ACI SP-108, pp. 63–84.

**Tazawa, E. and Miyazawa, S. (1993)** Autogenous shrinkage of concrete and its importance in concrete technology, in *Proceedings of the 5th International RILEM Symposium on Creep and Shrinkage of Concrete*, Barcelona (ed. Z.P. Bazant and I.Carol), E & FN Spon, London, pp. 159–68.

**Tazawa, E. and Miyazawa, S. (1995)** Experimental study in the mechanism of autogenous shrinkage of concrete. *Cement and Concrete Research*, 25(8), December, 1633–8.

**Tazawa, E. and Miyazawa, S. (1996)** *Influence of Autogenous Shrinkage on Cracking in High-Strength Concrete*, 4th International Symposium on Utilization of High Strength/High-Performance Concrete, Paris, ISBN 2-85878-258-3, pp. 321-30.

**Thaulow, S. (1962)** Apparent strength of concrete as affected by height of test specimen and friction between the loading surfaces. *Bulletin R.I.L.E.M., Matériaux et Constructions—Recherches et Essais*, No. 17, December, 31-3.

**Thorenfeldt, E., Tomaszewicz, A. and Jensen, J.J. (1987)** Mechanical properties of high-strength concrete and application in design, in *Proceedings of the Symposium on Utilization of High-Strength Concrete*, Stavanger (ed. I.Holland et al.), Tapir, N-7034 Trondheim, NTH, Norway, ISBN 82-519-0797-7, pp. 149-59.

## **CÓDIGOS INTERNACIONALES UTILIZADOS**

**ACI 211.4R-08 (2008):** “Guide for Selecting Proportions for High-Strength Concrete Using Portland Cement and Other Cementitious Materials”. Reported by ACI Committee 211, American Concrete Institute.

**ACI 214-02 (2002):** “Recommended Practice for Evaluation of Strength Test Results of Concrete”. Reported by ACI Committee 214, American Concrete Institute.

**ACI 363R-92 (2007):** “State-of-the-Art Report on High-Strength Concrete,” Reported by ACI Committee 363, *Manual of Concrete Practice*, American Concrete Institute.

**ACI 211.1-91 (2002):** “Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete”. Reported by ACI Committee 211, American Concrete Institute.

**ACI 318-08 (2008):** “Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary”. Reported by ACI Committee 318, American Concrete Institute.

**ACI 209R-92 (2007):** “Prediction of Creep, Shrinkage, and Temperature Effects in Concrete Structures,” Reported by ACI Committee 209, *ACI Manual of Concrete Practice*, American Concrete Institute.

**ACI 304R-00 (2007):** “Guide for Measuring, Mixing, Transporting, and Placing Concrete,” Reported by ACI Committee 304, *ACI Manual of Concrete Practice*.

## **NORMAS ASTM IMPLEMENTADAS**

Se presentan a continuación los documentos de la Sociedad Americana de Ensayos y Materiales (ASTM) relacionados con agregados, materiales cementantes y el concreto que son relevantes en la investigación o que se referencian en el texto.

**C 29-97** Método de ensayo para determinar el peso volumétrico (Densidad Suelta, Peso Unitario, Masa Unitaria) y vacíos en el agregado “*Standard Test Method for Bulk Density (“Unit Weight”) and Voids in Aggregate*”

**C 33-01** Especificación de norma para agregados para concreto “*Standard Specification for Concrete Aggregates*”

**C 39-01** Método de ensayo para determinar la resistencia a compresión de cilindros de concreto “*Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*”

**C 42-99** Método de ensayo para la obtención y ensayo de testigos (corazones) de concreto extraídos y vigas aserradas de concreto “*Standard Test Method for Obtaining and Testing Drilled Cores and Sawed Beams of Concrete*”

**C 91-99** Especificación de norma para el cemento de albañilería “*Standard Specification for Masonry Cement*”  
**C 94-00** Especificación de norma para el concreto premezclado “*Standard Specification for Ready Mixed Concrete*”

**C 109-99** Método de ensayo para determinar la resistencia a compresión de morteros de cemento hidráulico (usando cubos de 50 mm [2 pulg.]) “*Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (using 50 mm [2 in.] Cube Specimens)*”

**C 125-02** Terminología de norma relacionada con el concreto y con los agregados para concreto “*Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates*”

**C 127-01** Método de ensayo para determinar la densidad, densidad relativa (Gravedad específica) y la absorción del los agregados gruesos “*Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate*”

**C 128-01** Método de ensayo para determinar la densidad, densidad relativa (Gravedad específica) y la absorción del los agregados finos “*Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate*”

**C 136-01** Método de ensayo para el análisis granulométrico de los agregado fino y grueso “*Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates*”

**C 138-01** Método de ensayo para determinar la densidad (Peso unitario), rendimiento y contenido de aire (gravimétrico) del concreto “*Standard Test Method for Density (Unit Weight), Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete*”

**C 143-00** Método de ensayo para determinar el revenimiento (asentamiento) del concreto de cemento portland “*Standard Test Method for Slump of Hydraulic Cement Concrete*”

**C 150-00** Especificación de norma para el cemento portland “*Standard Specification for Portland Cement*”

**C 173-01** Método de ensayo para determinar el contenido de aire del concreto fresco por el método volumétrico “*Standard Test Method for Air Content of Freshly Mixed Concrete by the Volumetric Method*”

- C 188-95** Método de ensayo para determinar la densidad del cemento hidráulico  
*“Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement”*
- C 192-00** Práctica normalizada para la producción y el curado de especímenes de concreto en laboratorio *“Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory”*
- C 231-97** Método de ensayo para determinar el contenido de aire del concreto fresco por el método de presión *“Standard Test Method for Air Content of Freshly Mixed Concrete by the Pressure Method”*
- C 494-99** Especificación de norma para aditivos químicos para concreto *“Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete”*
- C 618-00** Especificación de norma para ceniza volante de carbón y puzolana natural calcinada o cruda para el uso como adición mineral en el concreto *“Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete”*
- C 702-98** Práctica normalizada para la reducción de muestras de agregados para el tamaño de ensayo *“Standard Practice for Reducing Samples of Aggregate to Testing Size”*
- C 1231-00** Práctica normalizada para el uso de almohadillas no adherentes en la determinación de la resistencia a compresión de cilindros de concreto endurecido.
- C 1240-01** Especificación de norma para el uso de humo de sílice como una adición mineral en el concreto, mortero y groute de cemento hidráulico *“Standard Specification for Use of Silica Fume for Use as a Mineral Admixture in Hydraulic-Cement Concrete, Mortar, and Grout”*

## ANEXOS

### **ANEXO 1. Resultados del Ensayo de Análisis Granulométrico realizado al Agregado Fino y Grueso, en base a la norma ASTM C-136.**

	<b>Instituto Salvadoreño del Cemento y del Concreto</b> <b>Laboratorio de Investigaciones ISCYC</b>  <b>Urb. Madre Selva, Av. El Espino y Boulevard Sur,</b> <b>Antiguo Cuscatlán La Libertad</b> <b>Tel. 2505-0162 y 2505-0163 Fax. 2505-0164</b>				
<b>ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO</b> <b>ASTM C-136</b>					
PROYECTO :	Concreto de Alta Resistencia				
TIPO DE MUESTRA :	Arena				
UBICACIÓN :	Plantel Chanmico				
FECHA DE MUESTREO :					
FECHA DE ENSAYO :					
LABORATORISTAS :	Rafael García, Felipe Martínez, Jonny Linares				
REVISÓ :	Tec. Julio Hernández, Ing. Ricardo Burgos				
OBSERVACIONES :					
<b>HOJA DE LABORATORIO</b>					
<b>MASA TARA, g = 157.0</b>		<b>MASA TARA + MUESTRA, g = 667.5</b>		<b>MASA MUESTRA, g = 510.5</b>	
<b>MALLA</b>	<b>M. RETENIDO PARCIAL (%)</b>	<b>MASA RETENIDA (%)</b>	<b>RETENIDO ACUMULADO (%)</b>	<b>QUE PASA LA MALLA (%)</b>	<b>OBSERVACIONES</b>
					<i>Rangos ASTM C-33</i>
3/8"	0	0	0	100	100   100
No.4	5.3	1.04	1.04	98.96	95   100
No.8	89.8	17.56	18.59	81.41	80   100
No.16	136.4	26.67	45.26	54.74	50   85
No.30	97.4	19.04	64.30	35.70	25   60
No.50	81.1	15.86	80.16	19.84	5   30
No.100	58.3	11.40	91.55	8.45	0   10
FONDO	43.2	8.45	100		
SUMAS	511.5	100			<b>CUMPLE</b>



**Instituto Salvadoreño del Cemento y del Concreto**  
**Laboratorio de Investigaciones ISCYC**

**Urb. Madre Selva, Av. El Espino y Boulevard Sur,**  
**Antiguo Cuscatlán La Libertad**  
**Tel. 2505-0162 y 2505-0163 Fax. 2505-0164**



**ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO**  
**ASTM C-136**

PROYECTO :	Concreto de Alta Resistencia
TIPO DE MUESTRA :	Grava
UBICACIÓN :	Plantel Chanmico
FECHA DE MUESTREO :	
FECHA DE ENSAYO :	
LABORATORISTAS :	Rafael García, Felipe Martínez, Jonny Linares
REVISÓ :	Tec. Julio Hernández, Ing. Ricardo Burgos
OBSERVACIONES :	

**HOJA DE LABORATORIO**

MASA TARA, g = 2486		MASA TARA + MUESTRA, g = 16040		MASA MUESTRA, g = 13554	
MALLA	M. RETENIDO PARCIAL (%)	MASA RETENIDA (%)	RETENIDO ACUMULADO (%)	QUE PASA LA MALLA (%)	OBSERVACIONES
					Rangos ASTM C-33
2"					
1 1/2"					
1"					
3/4"					
1/2"	0	0	0	100	
3/8"	6.1	0.60	0.60	99.40	
No. 4	958.4	93.98	94.58	5.42	
No.8	51.5	5.05	99.63	0.37	
No. 16	1.1	0.11	99.74	0.26	
FONDO	2.7	0.26	100	0	
SUMAS	1019.8	100			

**ANEXO 2. Resultados del Ensayo de Gravedad Especifica y Absorción de Agregados Grueso y Fino, en base a la norma ASTM C-127 y ASTM C-128, respectivamente.**

	<p><b>Instituto Salvadoreño del Cemento y del Concreto</b>  <b>Laboratorio de Investigaciones ISCYC</b></p> <p><b>Urb. Madre Selva, Av. El Espino y Boulevard Sur, Antiguo Cuscatlán La Libertad</b>  <b>Tel. 2505-0162 y 2505-0163 Fax. 2505-0164</b></p>		
<b>GRAVEDAD ESPECIFICA Y ABSORCION DE AGREGADOS GRUESOS ASTM C-127</b>			
PROYECTO :	Concreto de Alta Resistencia		
UBICACIÓN :	Plantel Chanmico		
TIPO DE MUESTRA :	Grava		
FECHA DE MUESTREO :			
FECHA DE ENSAYO :			
LABORATORISTAS :	Rafael García, Felipe Martínez, Jonny Linares		
REVISO :	Tec. Julio Hernández, Ing. Ricardo Burgos		
OBSERVACIONES :			
<b>HOJA DE LABORATORIO</b>			
<b>MUESTRA No: 1</b>		<b>MUESTRA No: 2</b>	
MASA TARA/sss (g):	16.1	MASA TARA/sss (g):	16.1
MASA SATURADA, W <sub>sss</sub> + TARA (g):	2500	MASA SATURADA, W <sub>sss</sub> + TARA (g):	2500
MASA SATURADA, W <sub>sss</sub> (g):	2483.9	MASA SATURADA, W <sub>sss</sub> (g):	2483.9
MASA TARA SUMERGIDA (g):	851	MASA TARA SUMERGIDA (g):	851
MASA SUMERGIDA. W <sub>sum</sub> + TARA SUM (g):	2375	MASA SUMERGIDA. W <sub>sum</sub> + TARA SUM (g):	2376
MASA SUMERGIDA NETA, W <sub>sum</sub> (g):	1524	MASA SUMERGIDA NETA, W <sub>sum</sub> (g):	1525
MASA TARA/seca (g):	336.8	MASA TARA/seca (g):	293.6
MASA SECA, W <sub>seca</sub> + TARA (g):	2784.5	MASA SECA, W <sub>seca</sub> + TARA (g):	2740.7
MASA SECA, W <sub>seca</sub> (g):	2447.7	MASA SECA, W <sub>seca</sub> (g):	2447.1
AGUA (g):	36.2	AGUA (g):	36.8
ABSORCION, (%):	1.48%	ABSORCION, (%):	1.50%
GRAVEDAD ESPECIFICA SECA:	2.55	GRAVEDAD ESPECIFICA SECA:	2.55
GRAVEDAD ESPECIFICA SSS:	2.59	GRAVEDAD ESPECIFICA SSS:	2.59
GRAVEDAD ESPECIFICA SECA PROMEDIO:	2.55	GRAVEDAD ESPECIFICA SSS PROMEDIO:	2.59
ABSORCIÓN PROMEDIO (%)	1.49%		



**Instituto Salvadoreño del Cemento y del Concreto**  
**Laboratorio de Investigaciones ISCYC**

**Urb. Madre Selva, Av. El Espino y Boulevard Sur, Antiguo**  
**Cuscatlán La Libertad Tel. 2505-0162 y 2505-0163 Fax.**  
**2505-0164**



**GRAVEDAD ESPECIFICA Y ABSORCION DE AGREGADOS FINOS ASTM C-128**

PROYECTO :	Concreto de Alta Resistencia
UBICACIÓN :	Plantel Chanmico
TIPO DE MUESTRA :	Arena
FECHA DE MUESTREO :	
FECHA DE ENSAYO :	
LABORATORISTAS :	Rafael García, Felipe Martínez, Jonny Linares
REVISO :	Tec. Julio Hernández, Ing. Ricardo Burgos
OBSERVACIONES :	

**HOJA DE LABORATORIO**

MUESTRA No: 1		MUESTRA No: 2	
S MASA DE LA MUESTRA SSS (g):	500	S MASA DE LA MUESTRA SSS (g):	500
B MASA PICNOMETRO + AGUA (g):	1443.4	B MASA PICNOMETRO + AGUA (g):	1443.4
C MASA PICNOM. + AGUA + MUESTRA (g):	1750.5	C MASA PICNOM. + AGUA + MUESTRA (g):	1751.5
MASA SECA DE LA MUESTRA + TARA (g):	790.8	MASA SECA DE LA MUESTRA + TARA (g):	817.6
MASA TARA (g):	302.5	MASA TARA (g):	329.5
A MASA SECA DE LA MUESTRA (g):	488.3	A MASA SECA DE LA MUESTRA (g):	488.1
AGUA (g):	11.7	AGUA (g):	11.9
ABSORCION, (%):	2.40%	ABSORCION, (%):	2.44%
GRAVEDAD ESPECIFICA SECA:	2.53	GRAVEDAD ESPECIFICA SECA:	2.54
GRAVEDAD ESPECIFICA SSS:	2.59	GRAVEDAD ESPECIFICA SSS:	2.61
GRAVEDAD ESPECIFICA SECA PROMEDIO:	2.54	GRAVEDAD ESPECIFICA SSS PROMEDIO:	2.60
ABSORCIÓN PROMEDIO (%)	2.42%		

**ANEXO 3. Resultados del Ensayo de Peso Unitario de Agregados Grueso y Fino, en base a la norma ASTM C-29.**

	<p><b>Instituto Salvadoreño del Cemento y del Concreto</b>  <b>Laboratorio de Investigaciones ISCYC</b></p> <p><i>Urb. Madre Selva, Av. El Espino y Boulevard Sur, Antiguo Cuscatlán La Libertad Tel. 2505-0162 y 2505-0163 Fax. 2505-0164</i></p>		
<b>METODO DE ENSAYO ESTANDAR PARA PESO UNITARIO DE AGREGADOS ASTM C-29</b>			
PROYECTO :	Concreto de Alta Resistencia		
UBICACIÓN :	Plantel Chanmico		
TIPO DE MUESTRA :	Arena		
FECHA DE MUESTREO :			
FECHA DE ENSAYO :			
LABORATORISTAS :	Rafael García, Felipe Martínez, Jonny Linares		
REVISO :	Tec. Julio Hernández, Ing. Ricardo Burgos		
Volumen Nominal de Recipiente :	1/10 pie <sup>3</sup>		
OBSERVACIONES :			
<b>HOJA DE LABORATORIO</b>			
<b>SUELTO</b>		<b>VARILLADO</b>	
A MASA RECIPIENTE VACIO (kg):	1.728	A MASA RECIPIENTE VACIO (kg):	1.728
B VOLUMEN RECIPIENTE (m3):	0.00284	B VOLUMEN RECIPIENTE (m3):	0.00284
MASA RECIPIENTE + AGREGADO (kg) #1:	6.173	MASA RECIPIENTE + AGREGADO (kg) #1:	6.537
MASA RECIPIENTE + AGREGADO (kg) #2:	6.185	MASA RECIPIENTE + AGREGADO (kg) #2:	6.569
MASA RECIPIENTE + AGREGADO (kg) #3:	6.148	MASA RECIPIENTE + AGREGADO (kg) #3:	6.573
MASA RECIPIENTE + AGREGADO (kg) PROMEDIO:	6.169	MASA RECIPIENTE + AGREGADO (kg) PROMEDIO:	6.56
C MASA AGREGADO (kg) PROMEDIO:	4.441	C MASA AGREGADO (kg) PROMEDIO:	4.832
PESO UNITARIO (kg/m3):	1563.73	PESO UNITARIO (kg/m3):	1701.41
<b>FORMULAS:</b>			
C Masa Agregado Promedio: [MASA AGREGADO + RECIPIENTE (kg) PROMEDIO] - A =			kg
Peso Unitario: (C/B) =			kg/m3
<b>CALIBRACIÓN DEL RECIPIENTE (cada año)</b>			
A MASA RECIPIENTE VACIO (kg):	-	TEMPERATURA DEL AGUA (°C):	-
D MASA VIDRIO (kg):	-	F MASA DEL AGUA (kg):	-
E MASA RECIPIENTE + VIDRIO + AGUA (kg):	-	G DENSIDAD DEL AGUA (kg/m3):	-
F MASA DEL AGUA = (E - A - D) =	-		kg
VOLUMEN DEL RECIPIENTE = F/G =	-		m3



**Instituto Salvadoreño del Cemento y del Concreto**  
**Laboratorio de Investigaciones ISCYC**  
 Urb. Madre Selva, Av. El Espino y Boulevard Sur, Antiguo  
 Cuscatlán La Libertad  
 Tel. 2505-0162 y 2505-0163 Fax. 2505-0164



**METODO DE ENSAYO ESTANDAR PARA PESO UNITARIO DE AGREGADOS  
 ASTM C-29**

PROYECTO :	Concreto de Alta Resistencia
UBICACIÓN :	Plantel Chanmico
TIPO DE MUESTRA :	Grava
FECHA DE MUESTREO :	
FECHA DE ENSAYO :	
LABORATORISTAS :	
REVISO :	Tec. Julio Hernández, Ing. Ricardo Burgos
Volumen Nominal de Recipiente :	1/10 pie <sup>3</sup>
OBSERVACIONES :	

**HOJA DE LABORATORIO**

SUELTO		VARILLADO	
A MASA RECIPIENTE VACIO (kg):	1.728	A MASA RECIPIENTE VACIO (kg):	1.728
B VOLUMEN RECIPIENTE (m3):	0.00284	B VOLUMEN RECIPIENTE (m3):	0.00284
MASA RECIPIENTE + AGREGADO (kg) #1:	5.405	MASA RECIPIENTE + AGREGADO (kg) #1:	5.812
MASA RECIPIENTE + AGREGADO (kg) #2:	5.421	MASA RECIPIENTE + AGREGADO (kg) #2:	5.828
MASA RECIPIENTE + AGREGADO (kg) #3:	5.454	MASA RECIPIENTE + AGREGADO (kg) #3:	5.859
MASA RECIPIENTE + AGREGADO (kg) PROMEDIO:	5.427	MASA RECIPIENTE + AGREGADO (kg) PROMEDIO:	5.833
C MASA AGREGADO (kg) PROMEDIO:	3.699	C MASA AGREGADO (kg) PROMEDIO:	4.105
PESO UNITARIO (kg/m3):	1302.46	PESO UNITARIO (kg/m3):	1445.42

**FORMULAS:**

C Masa Agregado Promedio: [MASA AGREGADO + RECIPIENTE (kg) PROMEDIO] - A = kg  
 Peso Unitario: (C/B) = kg/m3

**CALIBRACIÓN DEL RECIPIENTE (cada año)**

A MASA RECIPIENTE VACIO (kg):	-	TEMPERATURA DEL AGUA (°C):	-
D MASA VIDRIO (kg):	-	F MASA DEL AGUA (kg):	-
E MASA RECIPIENTE + VIDRIO + AGUA (kg):	-	G DENSIDAD DEL AGUA (kg/m3):	-
F MASA DEL AGUA = (E - A - D) =		-	kg
VOLUMEN DEL RECIPIENTE = F/G =		-	m3

**ANEXO 4. Resultados del Ensayo de Compresión de Cubos de Mortero, en base a la norma ASTM C-109.**

**Especímenes de Prueba a los 7 días.**

<b>Muestra</b>	<b>Peso (kg)</b>	<b>Área (cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Carga (kg)</b>	<b><math>\sigma</math> (kg/cm<sup>2</sup>)</b>	<b><math>\sigma</math> (MPa)</b>
1	0.269	25	7800	312	30.89
2	0.259	25	7700	308	30.49
3	0.264	25	7710	308.4	30.53
				Promedio	30.64

**Especímenes de Prueba a los 28 días.**

<b>Muestra</b>	<b>Peso (kg)</b>	<b>Área (cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Carga (kg)</b>	<b><math>\sigma</math> (kg/cm<sup>2</sup>)</b>	<b><math>\sigma</math> (MPa)</b>
4	0.278	25	10,220	408.8	40.48
5	0.278	25	9,560	382.4	37.86
6	0.280	25	9,820	392.8	38.89
				Promedio	39.08

## ANEXO 5. Ficha Técnica de Aditivo Superplastificante MEGAFLOW.

**IMI** Concrete Admixtures and Fiber

### MEGAFLOW

Reductor de Agua de Alto Alcance

#### DESCRIPCION

**MEGAFLOW** es un compuesto líquido color café, formulado con poderosos reductores de agua que funcionan de forma electro-química con las partículas del cemento. Al tener contacto con el cemento, **MEGAFLOW** hace que las partículas de cemento se carguen negativamente, causando que se repelan entre sí, produciendo un movimiento de plasticidad al tratar de polarizarse con una cantidad mínima de agua presente en la mezcla. Este fenómeno causa que se reduzca el agua de amasado substancialmente. Como resultado se produce un aumento de la resistencia a temprana y última edad. Se puede obtener resistencias muy altas a temprana edad. Esta alta resistencia puede reducir o eliminar en algunos casos el uso de curado a vapor o por calor en operaciones de prefabricado o preforzado. El uso de losas de piso y secciones de carreteras el próximo día, usando **MEGAFLOW** es posible. Aditivos suplementarios como retardadores, acelerantes de fraguado, reductores de agua o impermeabilizantes se pueden usar con **MEGAFLOW** cuando sea necesario.

#### USO

- ? Para producir concreto con resistencias muy altas a edades de 18 a 24 horas.
- ? Para producir concreto fluido
- ? Para la fabricación de concreto prefabricado o preforzado sin el uso de vapor.
- ? Para acelerar la rehabilitación de reparaciones en losas de concreto o pavimentos.

#### INFORMACION TECNICA

**MEGAFLOW** cumple con la norma ASTM C-494 Tipo F y no contiene cloruro.

#### VENTAJAS

- ? Aumento a temprana edad de la resistencia a la compresión, flexión y adherencia que se obtiene por la reducción de 15% a 30% de agua que produce.
- ? Reduce el contenido de cemento substancialmente mientras mantiene el nivel de resistencia y trabajabilidad deseado.

### INTERNATIONAL MATERIALS INDUSTRIES, L.L.C.

2131 Peters Road\* Harvey, Louisiana 70058 \* PHONE: (504) 227-9944 \* Fax: (504) 227-9040

Final 23 Av Sur # 480 San Salvador, Telefono (503) 221-2299 Cel (503) 700-4321

GARANTIA: La información que contiene esta ficha técnica está basada en pruebas e informaciones de fuentes confiables; sin embargo, no se ofrece garantía ni expresión ni implícita concerniente a la exactitud de estos datos, de los resultados que se obtienen por el uso de este o que este uso no infrinja ni constituya patente. Esta información se suministra con la condición de que los usuarios que la reciben harán sus propias pruebas para determinar lo adecuado para su propósito de uso particular. La responsabilidad por datos para el fabricante será, en ningún caso, mayor que el precio del material entregado.

# IMI Concrete Admixtures and Fiber

- ? Produce concreto facil de colocar con revenimiento alto, eliminando o reduciendo la necesidad de compactación mecánica.
- ? Reduce la permeabilidad, produciendo un concreto mas denso.
- ? En reparaciones, permite el uso de las estructuras reparadas el próximo día.

## APLICACION

Usado como Reductor de Agua de alto alcance MEGAFLOW se debe introducir a la mezcla con el agua de mezclado. Use de 8 a 30 onzas fluidas por 100 libras de cemento (522ml a 2.0L por 100 Kg. de cemento). Para resistencias de 280 Kg/c.c. (4000 lbs/pulg<sup>2</sup>) a 24 horas en adelante hay que usar una relación agua/cemento de por lo menos 0.3 y una dosificación de MEGAFLOW de 20 oz por 100 lbs de cemento (1.3L por 100 Kg. de cemento).

Usado para producir Concreto Fluido MEGAFLOW produce concreto fluido de 6 a 10 pulgadas (15 a 25cm) de revenimiento, partiendo de un revenimiento inicial de 2 a 4 pulgadas (5 a 10 cm). El MEGAFLOW se debe añadir al camión / mezcladora en la obra y luego mezclar por tres minutos antes de descargar. Use de 8 a 16 onzas fluidas por 100 libras de cemento (522ml a 1.0L por 100 Kg. de cemento)

Usado para mantener el revenimiento: MEGAFLOW se puede re-dosificar varias veces hasta que la dosificación total de MEGAFLOW alcance 30 onzas por 100 lbs de cemento (2.0L por 100 Kg. de cemento). Cuando el colocado de concreto se demora y el revenimiento se comienza a perder, añade MEGAFLOW directamente al camión/mezcladora a razón de una a dos onzas fluidas por 100 libras de cemento (130 - 260 ml por 100 kg de cemento) para mantener el revenimiento.

## INTERNATIONAL MATERIALS INDUSTRIES, L.L.C.

2131 Peters Road\* Harvey, Louisiana 70058 \* PHONE: (504) 227-9944 \* Fax: (504) 227-9040

Final 23 Av Sur # 480 San Salvador, Telefono (503) 221-2299 Cel (503) 700-4321

GARANTIA: La información que contiene esta Hoja Técnica está basada en pruebas e información de fuentes confiables; sin embargo, no se ofrece garantía ni responsabilidad por la exactitud de estos datos, de los resultados que se obtienen por el uso de este uso, que este uso no infrinja ni viola patentes. Esta información se suministra con la condición de que los usuarios que la reciben aceptan sus propios riesgos 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.