

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



**“USO DE AGREGADO LIGERO COMO MEDIO DE CURADO INTERNO EN
CONCRETOS DE ALTO COMPORTAMIENTO FABRICADO CON PUZOLANAS”**

T E S I S

Para la obtención del grado de:
Maestro en Ciencias con Orientación en Materiales de Construcción

Presenta:
ING. RAÚL TRUJILLO RODRÍGUEZ

Asesor de Tesis:
DR. ALEJANDRO DURÁN HERRERA
Co-director de Tesis:
DR. RODRIGO GONZÁLEZ LÓPEZ

San Nicolás de los Garza, Nuevo León; diciembre de 2011

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma de Nuevo León por abrirme sus puertas y cobijarme durante el período de mi formación profesional.

A la Facultad de Ingeniería Civil aceptandome como parte del grupo de Ingenieros.

Al Instituto de Ingeniería Civil “Raymundo Villareal” por prestar sus instalaciones, equipos y materiales para esta investigación.

Al departamento de Tecnología del Concreto a cargo del Dr. Alejandro Durán Herrera, alojándome durante la elaboración de mi tesis.

A los profesores del cuerpo académico de tecnología del concreto, por compartirme sus conocimientos y brindarme su apoyo para culminar este trabajo.

Al Dr. Alejandro Durán Herrera y al Dr. Rodrigo González López por su paciencia, consejos, apoyo, perseverancia, amistad, y motivación en lograr el objetivo que el día de hoy termina, además de compartirme sus conocimientos y experiencias profesionales.

A los empleados y técnicos del laboratorio de tecnología del concreto, por su apoyo durante la elaboración de las mezclas de mortero.

Al laboratorio de Materiales de construcción a cargo del Dr. Gerardo Fajardo San Miguel.

Al Ing. Villa Bárcenas, por apoyarme con equipos de laboratorio para la medición de mis ensayos.

A mis compañeros de maestría, que siempre me brindaron su compañía en momentos de alegrías y risas.

Al Ing. Enrique Armendáriz Lumbreras y al Ing. Carlos Alain Reza Manríquez, ya que me animaron brindándome su apoyo durante la elaboración de mi tesis.

ESPECIALMENTE A DIOS Y A MI FAMILIA.

DEDICATORIA

Este trabajo es dedicado principalmente a Dios y a mi Familia que fueron el motor principal de mi formación y mi carrera ya que me llevaron hacia el camino correcto, gestando confianza en mí y haciéndome sentir que siempre tuve un respaldo y soporte muy fuerte, y que siempre estuvieron a un lado mío aún y cuando físicamente me encontraba solo.

Papá: Sr. Raúl Trujillo Cisneros

Mamá: Sra. Estela Rodríguez Garza

Hermana: Liliana Trujillo Rodríguez

Hermana: María del Carmen Trujillo Rodríguez

Gracias...!! LOS QUIERO MUCHO...!!

Con mucho cariño; su hijo:

Ing. Raúl Trujillo Rodríguez

CONTENIDO

Agradecimientos	i
Dedicatoria.....	ii
Contenido	iii
Lista de Tablas.....	ix
Lista de Figuras	xii
Lista de Símbolos	xvii
Resumen	xix

Capítulo 1

Página

INTRODUCCIÓN

1.1 Generalidades.....	1
1.2 Concretos de alto comportamiento	2
1.3 Características, propiedades y aplicaciones de los concretos de alto comportamiento.....	3
1.4 Durabilidad de las estructuras de concreto	3
1.5 Importancia de los concretos de alto comportamiento	5
1.5.1 Hidratación del cemento Pórtland	6

Capítulo 2

MARCO TEÓRICO

2.1 Generalidades.....	10
2.2 Mecanismos de retracción	13
2.2.1 Retracción química	13
2.2.2 Retracción autógena	16
2.2.3 Retracción plástica.....	19
2.2.4 Retracción por secado	21
2.2.5 Retracción térmica	23
2.2.6 Retracción por carbonatación	24

2.3 Algunas maneras de mitigar la retracción autógena	26
2.3.1 Aditivos expansivos.....	27
2.3.2 Aditivos reductores de la retracción por secado.....	27
2.3.3 Polímeros super-absorbentes (SAP) como agentes de curado interno en concretos hidráulicos	28
2.3.4 Agregados Ligeros (AL), como agentes de curado interno en concretos hidráulicos.....	29
2.4 Efectos de curado interno en el concreto.....	30
2.5 Puzolanas	32
2.5.1 Ceniza volante	33
2.5.2 Humo de sílice.....	35
2.6 Antecedentes	38
2.7 Justificación del proyecto	40
2.8 Objetivos	41
2.9 Metas	42
2.10 Hipótesis	43

Capítulo 3

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Introducción.....	44
3.2 Etapa 1 Caracterización de los materiales empleados	44
3.2.1 Definiciones de los materiales utilizados.....	44
3.2.1.1 Cemento Portland compuesto.....	44
3.2.1.2 Ceniza volante.....	45
3.2.1.3 Humo de sílice.....	48
3.2.1.4 Arena de sílice estándar.....	49
3.2.1.5 Agregado calizo.....	49
3.2.1.6 Agregado de peso ligero	50
3.2.1.7 Aditivo	51
3.3 Caracterización de los materiales empleados.....	53

3.3.1 Cemento Portland compuesto.....	54
3.3.2 Ceniza volante	55
3.3.3 Humo de sílice	56
3.3.3.1 Distribución de tamaño de partícula de los materiales cementantes	57
3.3.4 Arena de sílice estándar.....	59
3.3.5 Agregado calizo	59
3.3.6 Agregado ligero.....	60
3.3.6.1 Análisis granulométrico de los agregados utilizados en las mezclas de mortero	61
3.3.7 Desorción de los agregados ligeros utilizados en las mezclas de mortero	63
3.3.8 Aditivo reductor de agua de alto rango y plastificante de alto desempeño.....	65
3.3.9 Agua para las mezclas de mortero.....	66

Capítulo 4

MÉTODO EXPERIMENTAL

4.1 Introducción.....	67
4.2 Etapa 2 Compatibilidad cemento-aditivo	67
4.2.1 Pruebas en pastas	69
4.2.1.1 Puntos de saturación.....	69
4.2.1.2 Procedimiento de mezclado para la obtención de puntos de saturación	70
4.2.1.3 Pérdida de consistencia	72
4.2.2 Pruebas en morteros.....	73
4.2.2.1 Procedimiento de mezclado de morteros	75
4.2.2.2 Contenido de aire	75
4.2.2.3 Fluidez.....	75

4.2.2.4	Peso volumétrico de morteros.....	76
4.2.2.5	Tiempos de fraguado	76
4.2.2.6	Pérdida de consistencia	77
4.2.2.7	Temperatura.....	77
4.2.2.8	Fabricación de especímenes cúbicos	77
4.2.2.9	Curado de especímenes cúbicos	78
4.2.2.10	Desarrollo de resistencia a la compresión.....	79
4.3	Etapa 3 Curado interno	79
4.3.1	Diseño de mezclas de mortero para evaluar los agregados ligeros como agentes de curado interno con y sin puzolanas.....	79
4.3.2	Fabricación de mezclas de mortero	81
4.3.3	Procedimiento de mezclado	82
4.3.3.1	Procedimiento de mezclado para morteros en la etapa de curado interno	82
4.3.4	Descripción de pruebas desarrolladas al mortero en la etapa de fresco	84
4.3.4.1	Fluidez.....	84
4.3.4.2	Peso volumétrico.....	84
4.3.4.3	Contenido de aire AASTHO T-199.....	85
4.3.4.4	Contenido de aire ASTM C-185-02	85
4.3.5	Pruebas al mortero en estado fresco-endurecido	85
4.3.5.1	Retracción química.....	85
4.3.5.2	Retracción autógena	86
4.3.5.3	Temperatura del mortero, método de coffe cup	88
4.3.5.4	Tiempos de fraguado	89
4.3.6	Fabricación de especímenes	89
4.3.7	Condiciones de curado.....	91
4.3.8	Pruebas desarrolladas al mortero en estado endurecido	91
4.3.8.1	Desarrollo de resistencia	91

4.3.8.2 Permeabilidad a los iones cloro.....	92
4.3.8.3 Porosidad abierta al agua	94
4.3.8.4 Retracción por secado	95

Capítulo 5

RESULTADOS EXPERIMENTALES Y DISCUSIÓN

5.1 Introducción.....	97
5.2 Etapa 2 Compatibilidad cemento-aditivo	97
5.2.1 Pruebas en pastas	97
5.2.1.1 Puntos de saturación.....	97
5.2.1.2 Pérdida de consistencia	103
5.2.2 Pruebas en morteros.....	108
5.2.2.1 Contenido de aire	109
5.2.2.2 Fluidez.....	110
5.2.2.3 Peso volumétrico.....	112
5.2.2.4 Resultados de pruebas de tiempo de fraguado.....	112
5.2.2.5 Resistencia a la compresión	120
5.3 Etapa 3 Curado interno	129
5.3.1 Pruebas en morteros.....	129
5.3.1.1 Fluidez en morteros.....	129
5.3.1.2 Contenido de aire	130
5.3.1.3 Peso volumétrico.....	131
5.3.1.4 Retracción química.....	132
5.3.1.5 Retracción autógena	134
5.3.1.6 Retracción por secado	138
5.3.1.7 Temperatura de los morteros	141
5.3.1.8 Tiempos de fraguado	143
5.3.1.9 Resistencia a la compresión	144
5.3.1.10 Permeabilidad a los iones cloro.....	148

5.3.1.11 Porosidad abierta al agua	149
CONCLUSIONES	151
PARTICIPANTES	155
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	157

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1	Reacción del C_3S durante la hidratación del cemento y cálculo de su retracción química	15
Tabla 3.1	Clasificación de la ceniza volante según ASTM C-618-01.....	47
Tabla 3.2	Requerimientos de humo de sílice según ASTM C-1240-05	48
Tabla 3.3	Composición química y densidad de los cementos utilizados.....	54
Tabla 3.4	Composición química y densidad de la ceniza volante	56
Tabla 3.5	Composición química y densidad del humo de sílice.....	57
Tabla 3.6	Propiedades físicas de la área estándar	59
Tabla 3.7	Propiedades físicas del agregado fino calizo	60
Tabla 3.8	Propiedades físicas de los agregados ligeros.....	61
Tabla 3.9	Resumen numérico en porciento del análisis granulométrico de los agregados utilizados en la etapa tres	62
Tabla 3.10	Propiedades físicas de los aditivos	66
Tabla 4.1	Tiempos de mezclado para las bachadas de pastas conforme a la uniformidad presentada durante el mezclado	71
Tabla 4.2	Proporciones de ingredientes en la fabricación de morteros dentro de la etapa de compatibilidad cemento-aditivo	74
Tabla 4.3	Proporciones de los componentes de las mezclas de morteros materiales secos sin agua de absorción	81
Tabla 4.4	Tiempos de mezclados para las bachadas de mortero sin agregado ligero.....	83
Tabla 4.5	Especímenes fabricados y sus dimensiones	90
Tabla 4.6	Estimación de la permeabilidad de cloruros en base a la carga inducida; de acuerdo con la norma ASTM C-1202.....	93

Tabla 5.1	Dosificaciones óptimas de aditivo (Punto de Saturación) en solución y en polvo para cada uno de los sistemas cementantes estudiados	102
Tabla 5.2	Tiempos de pérdida de consistencia para los 16 sistemas cementantes evaluados	107
Tabla 5.3	Clasificación de pérdida de consistencia en las pastas y su relación con diferentes aplicaciones en la industria de la construcción con concreto	108
Tabla 5.4	Resultados de tiempos de fraguado del sistema cementante A-I (etapa 2)	113
Tabla 5.5	Resultados de tiempos de fraguado del sistema cementante A-II (etapa 2)	114
Tabla 5.6	Resultados de tiempos de fraguado del sistema cementante A-IV (etapa 2)	115
Tabla 5.7	Resultados de tiempos de fraguado del sistema cementante B-II (etapa 2)	116
Tabla 5.8	Resultados de tiempos de fraguado del sistema cementante D-IV (etapa 2)	117
Tabla 5.9	Desarrollo de resistencia a la compresión en mezclas de mortero fabricadas con cemento Pórtland compuesto 30R de la marca A y arena estándar en la etapa de “compatibilidad cemento-aditivo”	123
Tabla 5.10	Desarrollo de resistencia a la compresión en mezclas de mortero fabricadas con cemento Pórtland compuesto 30R de la marca B y arena estándar en la etapa de “compatibilidad cemento-aditivo”	124
Tabla 5.11	Desarrollo de resistencia a la compresión en mezclas de mortero fabricadas con cemento Pórtland compuesto 30R de la marca C y arena estándar en la etapa de “compatibilidad cemento-aditivo”	125

Tabla 5.12	Desarrollo de resistencia a la compresión en mezclas de mortero fabricadas con cemento Pórtland compuesto 30R de la marca D y arena estándar en la etapa de “compatibilidad cemento-aditivo”	126
Tabla 5.13	Propiedades en estado fresco y endurecido de los morteros contemplados en la etapa 2	128
Tabla 5.14	Temperaturas máximas registradas en las mezclas de mortero con arena caliza, “etapa 3”	142

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	Variedades de forma, colores y textura que puede adoptar el concreto	1
Figura 1.2	Análisis del desarrollo de la hidratación (α) de una pasta de cemento expuesta a un sistema cerrado según Powers.....	7
Figura 1.3	Análisis del desarrollo de la hidratación (α) de una pasta de cemento expuesta a un sistema abierto según Powers	7
Figura 2.1	Fase de edad temprana: líquido, transición, rigidización	11
Figura 2.2	Cambios de volumen del concreto.....	12
Figura 2.3	Representación esquemática en una sección transversal de una pasta de cemento durante la hidratación	16
Figura 2.4	Cambios de volumen por retracción química y retracción autógena de pasta fresca y endurecida	17
Figura 2.5	Relación entre retracción autógena y retracción química de la pasta de cemento a edades tempranas	19
Figura 2.6	Grietas generadas por contracción plástica.....	21
Figura 2.7	Agrietamiento del concreto provocado por la retracción por secado	22
Figura 2.8	Grietas generadas por contracción térmica	24
Figura 2.9	Aparición de grietas en el concreto con respecto a su edad	25
Figura 2.10	Humo de sílice se utiliza en concretos de alta resistencia, para dar rigidez. Torre en Cleveland, Ohio	37
Figura 3.1	Cemento Portland.....	45
Figura 3.2	Central carboeléctrica “José López Portillo”, de la Comisión Federal de Electricidad en el municipio de Nava, Coahuila	46
Figura 3.3	Agregado calizo de 4.75 mm, para la fabricación de concreto y/o mortero	49

Figura 3.4	Aditivos líquidos	51
Figura 3.5	Esquema descriptivo de pruebas realizadas a los materiales utilizados.....	53
Figura 3.6	Distribución de tamaño de partícula para los cementos, obtenida mediante difracción de luz láser	58
Figura 3.7	Análisis granulométrico de los agregados utilizados en las mezclas de mortero, en la etapa tres	63
Figura 3.8	Desorción de los agregados ligeros utilizados en las mezclas de mortero, en la etapa tres	65
Figura 4.1	Esquema descriptivo de pruebas realizadas a las pastas cemento Portland	68
Figura 4.2	Geometría y dimensiones del cono de Marsh en milímetros	69
Figura 4.3	Pasta de cemento Portland con aditivo.....	72
Figura 4.4	Fluidez de la pasta de cemento a través del cono de Marsh	72
Figura 4.5	Rodillos giratorios	73
Figura 4.6	Equipo para la medición del contenido de aire AASHTO T199 ...	75
Figura 4.7	Fluidez del mortero	75
Figura 4.8	Tiempos de fraguado por penetración	76
Figura 4.9	Pérdida de consistencia en los morteros	77
Figura 4.10	Desarrollo de resistencia a la compresión	78
Figura 4.11	Esquema descriptivo de pruebas realizadas a morteros en la etapa de curado interno	80
Figura 4.12	Contenido de aire ASTM C-185-02.....	85
Figura 4.13	Medición de la retracción química ASTM C-1608-07.....	86
Figura 4.14	Medición de la retracción autógena	88
Figura 4.15	Análisis térmico del mortero, utilizando equipo marca “SperScientific datalogging Thermometers”	89
Figura 4.16	Máquina Universal INSTRON	92
Figura 4.17	Prueba de permeabilidad a los iones de cloro	94

Figura 4.18	Determinación de la porosidad del mortero conectada al exterior	95
Figura 4.19	Medición de la retracción por secado	96
Figura 5.1	Tipos de comportamiento reológico en pastas presentados en este estudio	98
Figura 5.2	Determinación de puntos de saturación en los aditivos (I, II, III, IV), cuando se combinan con el cemento A.....	100
Figura 5.3	Determinación de puntos de saturación en los aditivos (I, II, III, IV), cuando se combinan con el cemento B.....	100
Figura 5.4	Determinación de puntos de saturación en los aditivos (I, II, III, IV), cuando se combinan con el cemento C. ...	101
Figura 5.5	Determinación de puntos de saturación en los aditivos (I, II, III, IV), cuando se combinan con el cemento D. ...	101
Figura 5.6	Determinación de pérdida de consistencia en pastas de cemento Pórtland “A”, donde <i>P.S. es el punto de saturación</i>	104
Figura 5.7	Determinación de pérdida de consistencia en pastas de cemento Pórtland “B”, donde <i>P.S. es el punto de saturación</i>	105
Figura 5.8	Determinación de pérdida de consistencia en pastas de cemento Pórtland “C”, donde <i>P.S. es el punto de saturación</i>	105
Figura 5.9	Determinación de pérdida de consistencia en pastas de cemento Pórtland “D”, donde <i>P.S. es el punto de saturación</i>	106
Figura 5.10	Contenido de aire en las mezclas de mortero fabricadas para la etapa “compatibilidad cemento-aditivo”	110
Figura 5.11	Fluidez en las mezclas de mortero fabricadas con cemento Pórtland y arena estándar en la etapa “compatibilidad cemento-aditivo”	111
Figura 5.12	Pesos volumétricos en mezclas de mortero fabricadas con cemento Pórtland y arena estándar en la etapa “compatibilidad cemento-aditivo”	112

Figura 5.13	Tiempos de fraguado de los morteros fabricados con A-I, A-II, A-IV, B-II y D-IV, y arena estándar (etapa 2), por el método ASTM C 403.....	118
Figura 5.14	Correlación de tiempos de fraguado de los SC A-I, A-II, A-IV, B-II y D-IV, fabricados con arena estándar en la etapa “compatibilidad cemento-aditivo” (etapa 2), por el método ASTM C 403	119
Figura 5.15	Desarrollo de resistencia a la compresión en mezclas de mortero fabricadas con cemento Pórtland compuesto 30R de la marca A y arena estándar en la etapa “compatibilidad cemento-aditivo”.....	123
Figura 5.16	Desarrollo de resistencia a la compresión en mezclas de mortero fabricadas con cemento Pórtland compuesto 30R de la marca B y arena estándar en la etapa “compatibilidad cemento-aditivo”.....	124
Figura 5.17	Desarrollo de resistencia a la compresión en mezclas de mortero fabricadas con cemento Pórtland compuesto 30R de la marca C y arena estándar en la etapa “compatibilidad cemento-aditivo”.....	125
Figura 5.18	Desarrollo de resistencia a la compresión en mezclas de mortero fabricadas con cemento Pórtland compuesto 30R de la marca D y arena estándar en la etapa “compatibilidad cemento-aditivo”.....	126
Figura 5.19	Clasificación de los sistemas cementantes, fabricados con agregado calizo en la etapa “curado interno”	129
Figura 5.20	Fluidez de morteros fabricados con arena caliza en la etapa de “curado interno” (etapa 3) por el método ASTM C-1437-07	130
Figura 5.21	Contenido de aire en morteros fabricados con arena caliza mediante el método ASTM C-185-02.....	131

Figura 5.22	Peso volumétrico de los morteros fabricados con arena caliza, en la etapa de fresco	132
Figura 5.23	Retracción química de los morteros fabricados con agregado calizo y agregados ligeros saturados	133
Figura 5.24	Determinación de la retracción autógena del mortero	137
Figura 5.25	Determinación de la retracción por secado de mezclas de mortero con agregado calizo.....	140
Figura 5.26	Determinación de la retracción por secado de mezclas de mortero con agregado arcilla expandida	140
Figura 5.27	Determinación de la retracción por secado de mezclas de mortero con agregado pumicita.....	141
Figura 5.28	Temperatura de los morteros de la etapa “curado interno”	143
Figura 5.29	Tiempos de fraguado de los morteros de la etapa “curado interno”	144
Figura 5.30	Resistencia a la compresión en cubos de mortero	147
Figura 5.31	Resistencia a la compresión de morteros en % con respecto a la mezcla R (referencia)	148
Figura 5.32	Permeabilidad a los iones cloro en mezclas de mortero “etapa curado interno”	149
Figura 5.33	Porosidad abierta al agua en los morteros “etapa curado interno”	150

LISTA DE SÍMBOLOS Y PALABRAS

A	Cemento Portland Compuesto 30R marca 1.
A/C	Relación Agua Cemento.
A/Cem	Relación Agua Cementante.
AL	Agregado Ligeró.
ALS	Agregado Ligeró Saturado.
An/C	Relación Agua no evaporable Cemento.
APN	Agregado de Peso Normal.
ASF	Aditivos Superfluidificantes.
B	Cemento Portland Compuesto 30R, marca 2.
Bachadas	Cantidad de mezcla producida por lote en litros.
C	Cemento Portland Compuesto 30R, marca 3.
CAC	Concretos de Alto Comportamiento.
CH	Hidróxido de Calcio.
Cm	Centímetros.
CPC 30R	Cemento Portland Compuesto que cumple con la norma NMX-C-414 ONNCCE.
CV	Ceniza volante.
Cv	Mezcla con ceniza volante.
Cv-a	Mezcla de mortero con ceniza volante y arcilla expandida.
Cv-p	Mezcla de mortero con ceniza volante y pumicita.
°C	Grados Celsius.
Contracción	Retracción.
D	Cemento Portland Compuesto 30R, marca 4.
d	Diámetro.
Fig.	Figura.
F.F.	Fraguado Final.
F.I.	Fraguado Inicial.
g	Gramo.
g/kgC	Gramo por kilogramo de Cemento.
H.R.	Humedad Relativa.
HS	Humo de Sílice.
Hs	Mezcla con humo de sílice.
Hs-a	Mezcla de mortero con humo de sílice y arcilla expandida.
Hs-p	Mezcla de mortero con humo de sílice y pumicita.
kg	Kilogramo.
kgf	Kilogramo Fuerza.

kg/cm ²	Kilogramo por centímetro cuadrado.
kg/m ³	Kilogramo por metro cúbico.
L	Litro.
LbsF	Libras Fuerza.
MCS	Materiales Cementantes Suplementarios.
min	Minutos.
ml/g	Mililitro por gramo.
mL/KgCT	Mililitro por Kilogramo de cementante.
mm	Milímetros.
MPa	Mega Pascales.
PC	Perdida de Consistencia.
PS	Punto de Saturación.
Psi	Libras por pulgada cuadrada.
R	Mezcla de referencia.
R-a	Mezcla de mortero con arcilla expandida.
R-p	Mezcla de mortero con pumicita.
s	Segundo.
SAP	Polímeros super-absorbentes.
SC	Sistema Cementante.
SRA	Aditivo Reductor de la Retracción.
Vb	Volumen de la base.
Vp	Volumen de los productos de reacción.
Vrq	Retracción química total.
Vs	Retracción de volumen.
%	Porcentaje.
α	Grado de hidratación.
μm	Microdeformaciones.
I	Aditivo superfluidificante marca 1.
II	Aditivo superfluidificante marca 2.
III	Aditivo superfluidificante marca 3.
IV	Aditivo superfluidificante marca 4.

RESUMEN

Debido a que en la actualidad las estructuras de concreto requieren de características de sustentabilidad, altas resistencias y durabilidad, se han desarrollado los *concretos de alto comportamiento (CAC)* con relaciones A/Cem bajas (menores a 0.42) los cuales forman una matriz cementante muy densa casi impermeable, lo cual es benéfico desde el punto de durabilidad.

En esta investigación se optó por fabricar morteros con características típicas de los concretos de alto comportamiento con una relación agua-cementante baja ($A/Cem = 0.35$). De esta manera se amplifica la evaluación de la retracción en el sistema.

En este estudio se emplearon agregados finos ligeros comercialmente disponibles en el país en mezclas de mortero con y sin puzolanas con el fin de evaluar su desempeño como agentes de curado interno. La idea fue guardar reservas de agua en los poros abiertos conectados al exterior de los agregados ligeros (AL) mediante el método de saturación, para después adicionarlos durante la etapa de mezclado en sustitución al 20% en volumen por el agregado de peso normal con el fin de que esta agua atrapada sea liberada después del mezclado, cuando exista escasez de agua en la pasta de cemento producto de la reacción de hidratación y sea aprovechada por las partículas de cemento para que continúen hidratándose y evitar que se presente una auto-desecación.

El resultado de utilizar agregado saturado como agente de curado interno en concretos de alto comportamiento es la disminución de la retracción autógena.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 Generalidades.

El concreto es un material de construcción que puede moldearse en una gran variedad de formas, colores y texturas, para utilizarse en un número ilimitado de aplicaciones. El concreto es básicamente una mezcla de dos componentes: agregados y pasta. La pasta compuesta de cemento Portland y agua, une a los agregados creando una masa similar a una roca ⁽¹⁾. Actualmente es el material de construcción más utilizado en el mundo y su consumo aproximado anual es de 11,000 millones de m³ ⁽²⁾. En México la producción se estima en 140 millones de m³

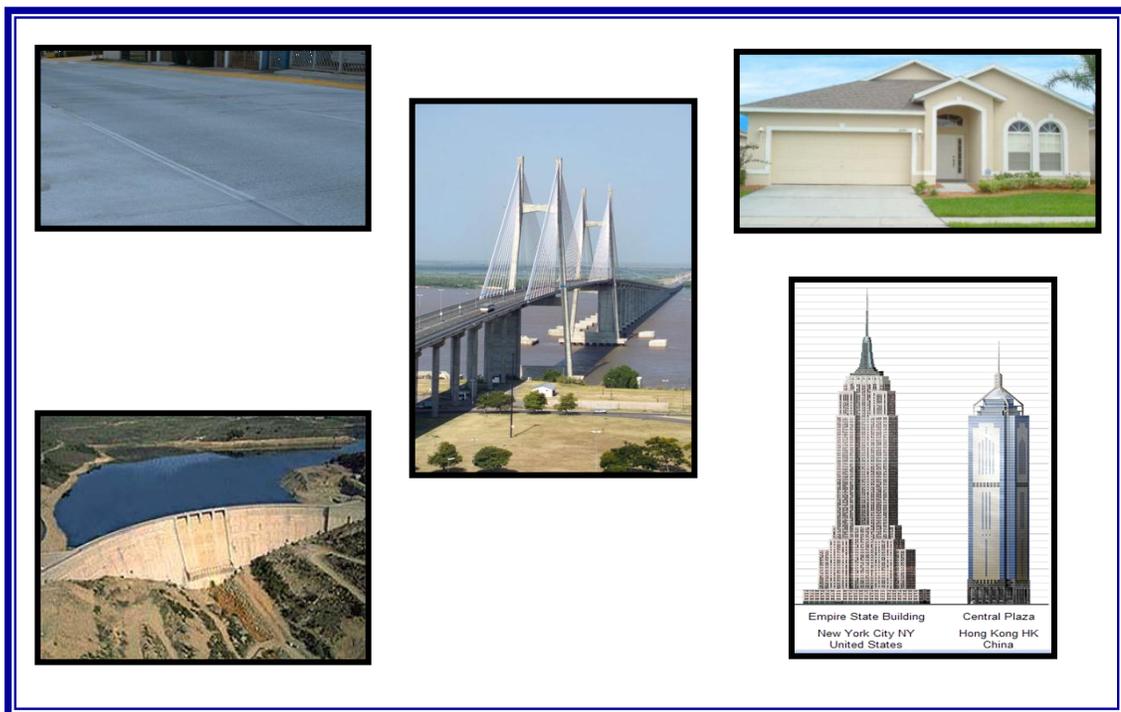


Figura 1.1 *Variedades de forma, colores y textura que puede adoptar el concreto.*

1.2 Concretos de alto comportamiento.

El concreto de cemento Portland se utiliza desde 1850, y hasta 1970 la atención se enfocó en fabricar concretos de alta resistencia a la compresión; fue entonces cuando, a raíz de esta particularidad y con la ayuda de los aditivos superplastificantes, se pudo disminuir la relación agua/cemento (A/C) ó agua/cementante (A/Cem), en lugar de utilizarlos exclusivamente como fluidificantes para concretos convencionales. También, con el afán de duplicar las resistencias a la compresión, surgieron en la década de 1980 los concretos de alto comportamiento (CAC) conocidos también como concretos de alto desempeño ⁽³⁾. El nombre de concretos de alto desempeño se propuso debido a que, además de su baja relación A/Cem también tienen otras características mejoradas, tales como: consistencia más alta, módulo elástico más alto, mayor resistencia al esfuerzo de flexión, permeabilidad más baja, mejor resistencia a la abrasión y mayor durabilidad ⁽³⁾.

El CAC es aquel que cumple especificaciones especiales de desempeño y requerimientos de uniformidad que no siempre pueden alcanzarse de manera rutinaria al utilizar componentes, prácticas de mezclado, colocación y curados tradicionales ⁽⁴⁾. En general, se puede decir que estos concretos se desarrollan para cumplir ciertas características en aplicaciones y ambientes particulares y que tienen una A/Cem menor que 0.42, la cual se acerca al valor teórico sugerido por Powers, para asegurar una hidratación completa de cemento Portland ⁽³⁾. El uso de relaciones A/Cem bajas conlleva problemas de retracción autógena que impactan directamente en el agrietamiento del concreto.

La retracción autógena del concreto es un fenómeno conocido desde los comienzos del siglo XX, pero su importancia ha sido reconocida en los últimos años a raíz de la fabricación de los CAC ⁽⁵⁾. En la actualidad, el criterio de mayor importancia para la selección de las proporciones de un concreto de cemento Portland radica más en su durabilidad que en su resistencia, incrementando así

la probabilidad de un mayor tiempo de vida útil ^{(6), (7)}. Los CAC utilizan relaciones A/C ó A/Cem menores a 0.42, el éxito de relaciones A/Cem bajas en estos concretos depende de la eficiencia del uso de aditivos para obtener alta trabajabilidad y concretos más durables por períodos de vida útil de casi 100 años ó más ^{(6), (7)}. Pero, especialmente se debe de poner énfasis a edades tempranas, asegurando un buen curado y minimizando los cambios volumétricos; por otro lado, los concretos convencionales son aquellos en los que se manejan relaciones A/Cem mayores que 0.42, en las que un curado tradicional es efectivo en el mayor de los casos.

1.3 Características, propiedades y aplicaciones de los concretos de alto comportamiento.

Los CAC se preparan mediante una cuidadosa selección de cada uno de sus ingredientes. Las características importantes para el diseño de los CAC pueden ser: el tipo de cemento, la relación A/Cem, el uso de aditivos superfluidificantes (ASF), la compatibilidad cemento-aditivo, la dosificación de aditivo, la selección de puzolanas y la selección de agregados. Estos concretos normalmente resultan en una matriz densificada endurecida y sus aplicaciones son determinadas de acuerdo con las especificaciones. En estado fresco, los CAC demandan un mayor cuidado y control de sus propiedades. El curado se torna de mayor importancia en estos concretos por el mayor potencial de retracciones y por la mayor impermeabilidad de su matriz cementante.

1.4 Durabilidad de las estructuras de concreto

La durabilidad del concreto reforzado, debido a la presencia de agentes promotoras del deterioro en el medio ambiente depende mucho de la permeabilidad del concreto ^{(8),(9)}. Tres mecanismos pueden utilizarse para describir el transporte de fluidos dentro del concreto: (1) permeabilidad, (2)

difusión y (3) absorción. La permeabilidad es la medida del flujo del agua bajo un gradiente de presión, la difusión es el movimiento de los iones debido al gradiente de la concentración y la absorción puede ser descrita como la habilidad de los materiales para tomar agua por medio de la succión capilar^{(10),(11)}. El agua de absorción es un indicador útil para estimar la durabilidad de los sistemas cementantes.

El Comité ACI 201, en 1991, definió la durabilidad como la capacidad de un concreto de cemento hidráulico para resistir la acción de la erosión, ataque químico, abrasión o cualquier otro proceso de deterioro. Los concretos en servicio y bajos los efectos de un ambiente determinado se consideraran durables si son estables en forma, calidad y servicio. Una manera de incrementar la durabilidad del concreto reforzado es utilizando adecuados contenidos de aire, procedimientos de compactación, niveles de uniformidad, relaciones A/Cem bajas y procedimientos-períodos de curado⁽¹²⁾. Para producir un concreto durable se debe tener en cuenta la relación A/Cem, el grado de hidratación del cemento y la acción positiva o negativa de añadirle materiales suplementarios, y/o aditivos, entre otros. El desarrollo de materiales cementantes suplementarios (MCS) alternativos para intentar sobrellevar los problemas de durabilidad por los factores físico-químicos, ha venido acaparando la atención en el área de la construcción. Una solución viable para obtener un concreto durable es diseñar con una relación A/Cem baja, un consumo de cemento bajo y un consumo maximizado de MCS.

El uso de cenizas volantes como adición al concreto está ampliamente extendido por dos razones: el ahorro económico que supone la reducción del cemento empleado, con su consecuente beneficio ecológico y los cambios micro-estructurales motivados por esta adición. Sobre este segundo punto existe consenso en considerar que las cenizas generan un concreto más compacto y una reducción del tamaño medio del poro, además, la ceniza volante (CV) reduce la permeabilidad del concreto debido a que disminuye la cantidad de agua necesaria para el mezclado, por su forma y distribución de

partículas densifican la matriz cementante y como resultado de la actividad puzolánica se da lugar a la formación de más Silicatos de Calcio Hidratados (S-C-H) reduciendo la porosidad del concreto y contribuyendo a incrementar la resistencia y la impermeabilidad.

1.5 Importancia de los concretos de alto comportamiento

El incremento reciente en el uso de los concretos con relaciones A/Cem bajas ha generado un nuevo interés sobre el estudio de la retracción autógena. La retracción autógena se evidenció por primera vez en 1930⁽¹³⁾ pero, en ese tiempo, era despreciable en los concretos que se utilizaban en comparación con la retracción por secado, ya que los concretos utilizados en aquel tiempo tenían relaciones A/Cem altas (≥ 0.5). El desarrollo de retracción autógena no controlada puede ser catastrófico desde el punto de vista de durabilidad, porque se desarrolla tan pronto la reacción de hidratación comienza y se desarrolla cuando el concreto es muy débil a los esfuerzos de tensión que ésta induce. Si el concreto no se cura esto puede resultar en un severo agrietamiento temprano que puede llevar a un posterior deterioro de la estructura; es decir, si la mezcla no está diseñada para cumplir las condiciones de servicio en las que pueda desempeñar su función estructural, y si no se maneja y cura de manera apropiada, el resultado puede ser un fracaso parcial o total⁽¹⁴⁾.

Con base en experiencias de campo y laboratorio, se ha probado que los CAC son muy sensibles al agrietamiento temprano, que se puede mitigar tomando precauciones. Como se mencionó anteriormente, un apropiado curado es crucial para el desempeño del concreto y deberá ser considerado como la clave para alcanzar un CAC durable.

1.5.1 Hidratación del cemento Portland.

La expresión “hidratación del cemento Portland” y “reacción de hidratación” se utilizan para describir el conjunto de procesos físico-químicos y termodinámicos que se desarrollan simultáneamente cuando el cemento Portland entra en contacto con el agua. Al progreso de este fenómeno desde que una partícula de cemento comienza a reaccionar hasta que se completa la misma y a los niveles intermedios se les denomina “grado de hidratación” (α).

El agua es un ingrediente clave en las pastas de cemento, mortero y concreto base cemento Portland, ya que las diferentes fases que conforman al cemento Portland tienen que reaccionar químicamente con el agua para la formación de las fases hidratadas que dan resistencia al sistema.

Powers, Jensen y Hansen⁽¹²⁾, esquemáticamente, representaron los resultados de sus trabajos sobre el desarrollo la hidratación (fig. 1.2 y 1.3). Estos esquemas muestran claramente que la hidratación completa no puede alcanzarse en un sistema cerrado, que es un sistema donde no hay intercambio de humedad con el exterior, a menos de que la relación agua-cemento (A/C) sea igual o mayor que 0.42, la cual será un sistema que contiene más agua de la necesaria para hidratar por completo al cemento⁽¹²⁾.

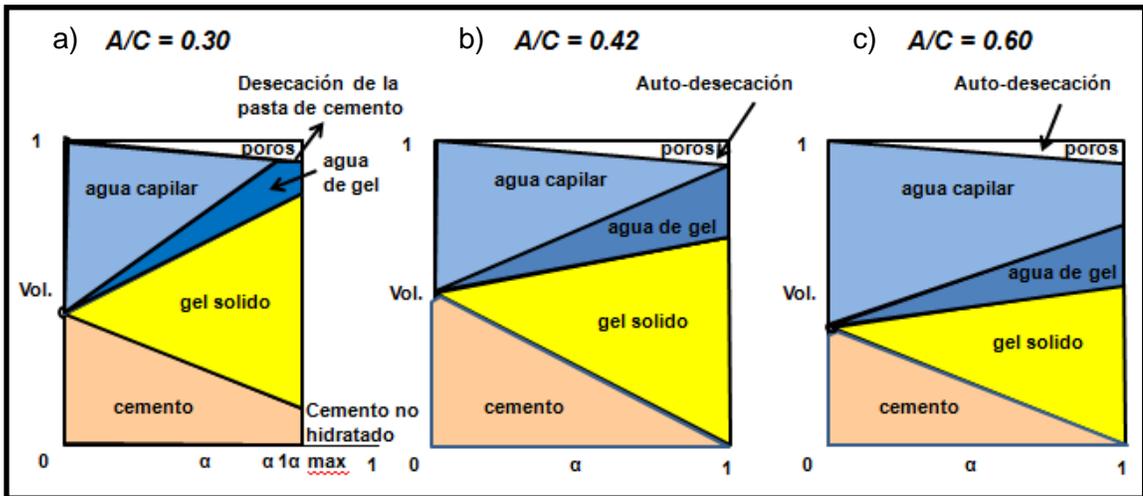


Figura 1.2. Análisis del desarrollo de la hidratación (α) de una pasta de cemento expuesta a un sistema cerrado según Powers et. al ⁽¹²⁾.

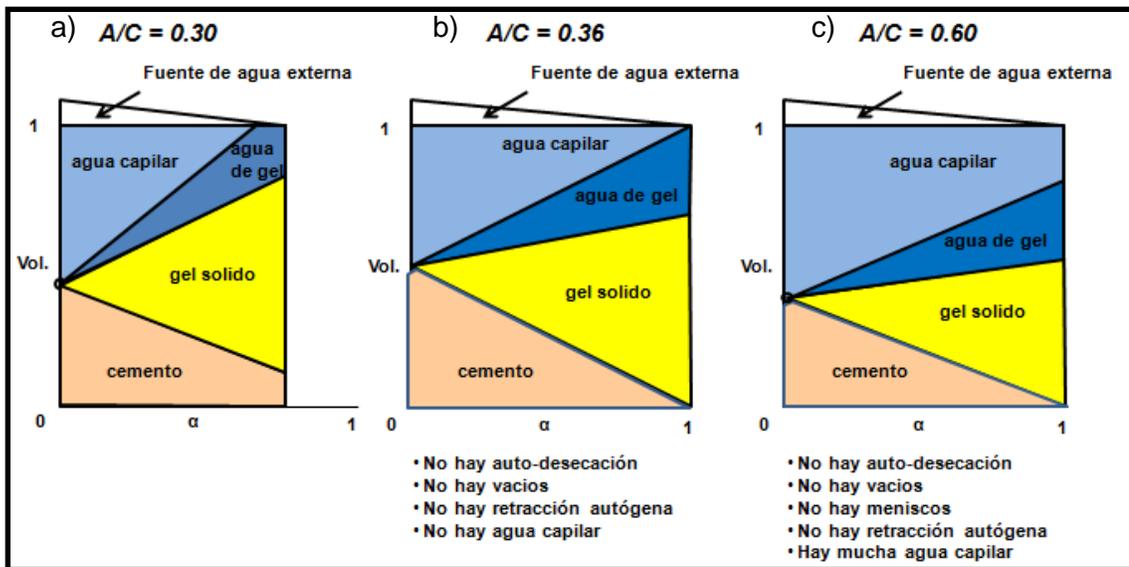


Figura 1.3. Análisis del desarrollo de la hidratación (α) de una pasta de cemento expuesta a un sistema abierto según Powers et. al ⁽¹²⁾.

Jensen y Hansen, además, demostraron que cuando una fuente de agua externa se encuentra disponible durante la hidratación del cemento portland, es posible obtener una pasta de cemento sin poros cuando la relación A/C es menor o igual que 0.36 ⁽¹²⁾.

Para los concretos de resistencia normal (menores de 35 Mpa), el máximo grado de hidratación de la pasta es 1 ó 100%, que se alcanza después de muchos años ⁽¹²⁾. En concretos de alta resistencia, ya sea en un sistema cerrado o en un sistema abierto, la hidratación puede no ser capaz de continuar debido a la carencia de agua, que es necesaria para la hidratación completa del cemento. En tal caso, el grado de hidratación puede solamente proceder hasta $\alpha \ll 1$ (i.e. $\alpha_{max} = 0.5$ at a una relación $A/C = 0.21$) ⁽¹⁵⁾. Para estimar el grado de hidratación del material hidratado, se usa normalmente el contenido de agua no evaporable. Para convertir la cantidad de agua no evaporable en un indicador del grado de hidratación, se hace necesario el conocimiento del valor de la relación agua no – evaporable/cemento (A_n/C) ⁽¹⁶⁾. El agua no evaporable es aquella que esta químicamente ligada con las partículas de cemento. También de manera alterna, se puede estimar la relación agua no – evaporable – cemento (A_n/C) para la completa hidratación por medio de la composición potencial de Bogue ⁽¹²⁾.

Durante la reacción de hidratación, el agua fluye por la red de capilares finos, dentro de los cuales los meniscos que se forman generan grandes esfuerzos de tensión en un medio en el que la resistencia a estos esfuerzos es prácticamente nula. Estos esfuerzos son los responsables de la retracción volumétrica aparente y cuando se detiene la reacción de hidratación, la retracción autógena comienza, debido a la falta de disponibilidad de agua en este sistema cerrado, ya que el agua en el exterior no alcanza el interior del concreto. El efecto desfavorable de la escasez de agua, combinado con el calor de hidratación y la auto-desección, afectan las propiedades mecánicas y la durabilidad; disminuyendo la resistencia a la compresión, aumentando la porosidad, resultando, en consecuencia, en un concreto más susceptible al agrietamiento. Esto es característico en concretos con relaciones A/C_{em} bajas (menores que 0.42), el agua de curado o neblina en los primeros días no es perceptible para mejorar las propiedades en los CAC, por ello la importancia de un curado satisfactorio.

Debido a que las propiedades del concreto a edades tempranas son de vital importancia para el mejor desempeño durante su vida útil, y ya que el curado convencional es insuficiente para contrarrestar la retracción autógena en los CAC, el *curado interno* ha sido propuesto como un método de curado para mitigar este fin. Con la intención de proveer a la industria de la construcción regional herramientas que involucren materiales comercialmente disponibles y dar una alternativa de solución a este problema, en esta investigación se estudió el efecto de sustituir un 20% en volumen de agregado ligero fino saturado (Arcilla expandida y Pumicita) por arena de peso normal en morteros con relación $A/Cem = 0.35$ con y sin puzolanas (Ceniza volante y Humo de sílice). El enfoque principal de esta propuesta es coadyuvar con tecnologías que faciliten la explotación de estos morteros. Ya que los concretos están compuestos por una fracción de mortero y ésta es más propensa a cambios volumétricos, puesto a que no contiene agregado grueso que ayude a disminuir retracciones y tomando en consideración las características típicas de los CAC, como lo es una relación A/Cem baja, se optó por trabajar en esta investigación con morteros. De esta manera se amplifica el fenómeno de la retracción y podemos visualizar de manera más clara el efecto del agente de curado interno. Además en esta tesis se examinan compatibilidad de cemento-aditivo como base para la fabricación de concretos de alto comportamiento.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

2.1 Generalidades.

El mayor inconveniente asociado con el concreto como material de construcción es la inestabilidad de su volumen con el paso del tiempo, al igual que otros materiales de construcción, se contrae y se expande con los cambios de humedad y temperatura y se deforma dependiendo de la carga y las condiciones de apoyo, en otras palabras, es propenso a sufrir retracciones y finalmente a presentar fisuras si no se toman las medidas necesarias en el diseño y construcción para soportar dichos movimientos⁽¹⁷⁾. Estas grietas ó fisuras son fallas que aparecen en el concreto como consecuencia de su debilidad para resistir los esfuerzos de tensión inducida por las retracciones. Las retracciones del concreto toman lugar en dos distintas etapas de su vida: edad temprana y edad tardía.

La edad temprana se refiere a edades en las cuales el concreto es aun débil y se encuentra en estado líquido-fresco apenas comenzando a endurecer, mientras que la edad tardía es aquella cuando el concreto ya ha endurecido⁽¹⁵⁾.

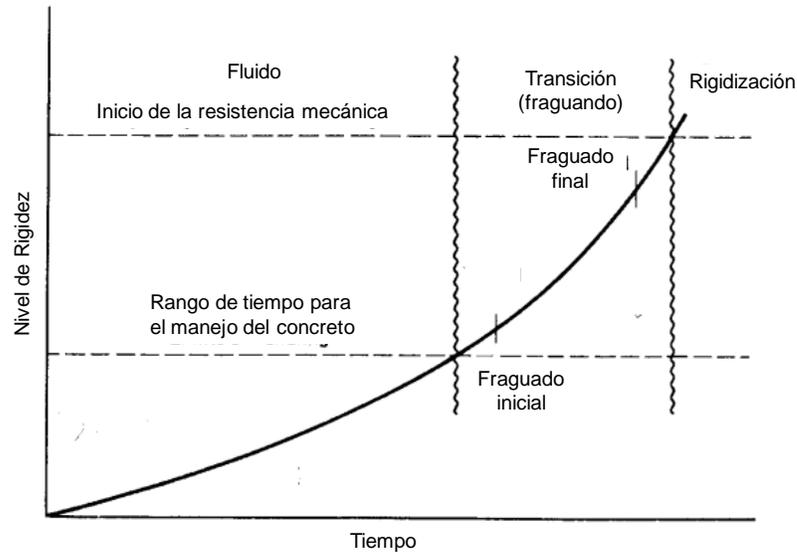


Figura 2.1. Fase de edad temprana: líquido, transición, rigidización. [Metha & Monteiro 1993]⁽¹⁵⁾.

La retracción del concreto se debe al movimiento o pérdida de agua. Esta pérdida de agua por evaporación (retracción por secado) o reacciones internas (retracción química y autógena) genera esfuerzos de tensión que ocasionan un bloqueo de la red de poros capilares, que se traduce en un cambio de volumen. Estos cambios son expansiones y contracciones, cuando los elementos del concreto están restringidos, la expansión origina esfuerzos de compresión y la contracción origina esfuerzos de tensión. El concreto es débil ante estos últimos y produce agrietamientos cuando el esfuerzo sobrepasa su resistencia a la tensión⁽¹⁸⁾. A edades tempranas, la contracción es incluso más crítica, puesto que el concreto aún no ha ganado mucha resistencia, incluso el esfuerzo más pequeño durante la edad temprana puede inducir contracciones significativas⁽¹⁵⁾. Los cambios tempranos de volumen (durante las primeras 24 horas), pueden influir en la formación de fisuras en el concreto en su etapa de endurecido, especialmente en concretos con baja relación agua-cemento⁽¹⁾.

En la figura 2.2 se señalan aquellos fenómenos que producen expansiones y contracciones sobre el concreto, que se traducen en cambios volumétricos que

se originan durante las primeras horas del concreto, después del mezclado, (Edad Temprana) y los originados una vez que el concreto ya ha endurecido (Edad Tardía). En este estudio se hace énfasis en los cambios volumétricos a edades tempranas (retracción química y autógena) descartando la retracción por asentamiento, debido a que los concretos producidos con relación agua-cementante baja tienden a minimizar el agrietamiento, por este tipo de retracción, y se considera dentro del estudio la retracción por secado ya que aún en la etapa de endurecido, el concreto sigue propenso a perder o ganar humedad y, tomando en consideración que se trabajará con agregados ligeros como medio de curado interno, es imprescindible evaluar la cantidad de humedad restante y la posible hidratación de los materiales cementantes que pueden tener efecto favorable/desfavorable en los cambios volumétricos originales.

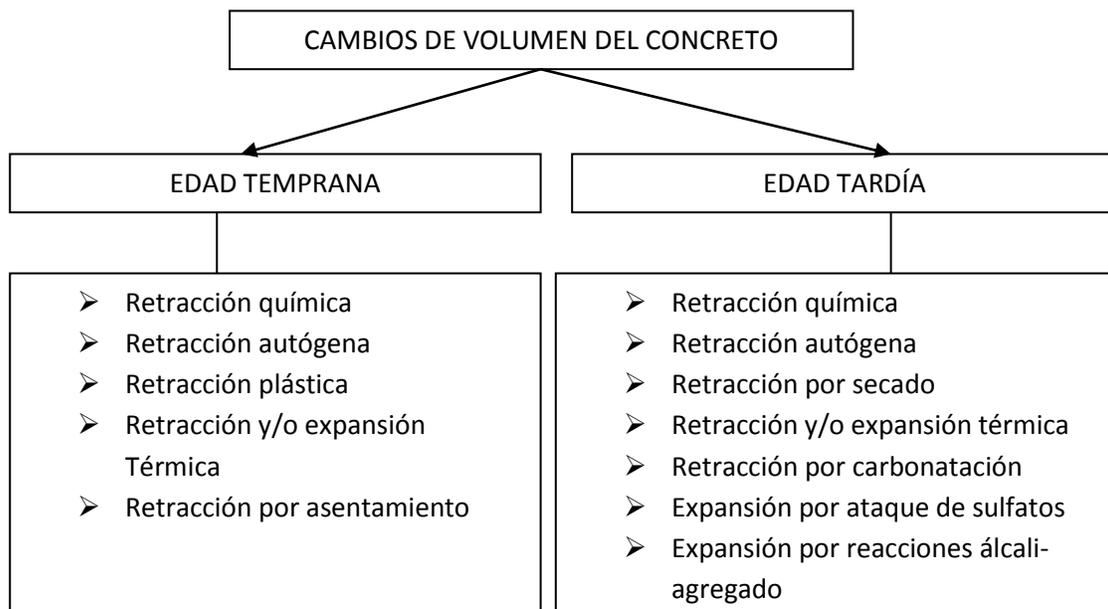


Figura 2.2. *Cambios de volumen del concreto [Según PCA]⁽¹⁾.*

2.2 Mecanismos de retracción.

Los cambios de volumen en el concreto constituyen un fenómeno inevitable, que es consecuencia de la pérdida de humedad de los materiales que constituyen al concreto al estar en su entorno de servicio o debido a la auto-deseccación del material. El concreto no sólo experimenta retracciones de tipo químico, autógeno, plástico, térmico o por carbonatación; sino que, además, está susceptible a que se desarrollen expansiones por exceso de humedad, misma que al irse secando inducirá retracciones.

En las siguientes secciones se da una breve descripción sobre algunos mecanismos de retracción que se presentan en el concreto, como consecuencia de los cambios volumétricos.

2.2.1 Retracción química.

El término de retracción química se utiliza para describir el fenómeno en el que el volumen de los productos hidratados por la reacción química entre el cemento y el agua es menor que el volumen total de cemento y agua sin hidratar⁽¹⁹⁾ y puede calcularse mediante la ecuación 1 [E. Tazawa, 1998]⁽²⁰⁾. El problema al realizar este cálculo es que a menudo no se conocen con precisión los volúmenes de los componentes dentro del concreto, sin antes elaborar ensayos.

$$CS = \frac{(V_c + V_w) - V_{hy}}{V_{ci} + V_{wi}} \times 100 \quad \text{Ec. (1)}$$

Donde : CS = Retracción química (%).

V_{ci} = Volumen del cemento antes del mezclado.

V_c = Volumen de cemento hidratado.

V_{wi} = Volumen de agua antes del mezclado.

V_w = Volumen de agua que ha reaccionado.

V_{hy} = Volumen de productos hidratados.

Le Chatelier, en 1904, concluyó que la hidratación del cemento resulta en una retracción volumétrica absoluta, y que, de acuerdo con las condiciones de curado, esta retracción volumétrica absoluta resulta en un incremento o disminución del volumen aparente. Este tipo de retracción se relaciona con la química del cemento (principalmente con los compuestos potenciales) y con el desarrollo de la presión capilar interna dentro de la pasta de cemento⁽¹⁵⁾.

Los compuestos potenciales del cemento y su reacción al entrar en contacto con el agua son los siguientes:



Otra manera de analizar las reacciones químicas es calculando matemáticamente los volúmenes de los productos de reacción, basados sobre el peso y densidad. Como se ha visto en las ecuaciones (2) a (5), cada uno de los compuestos potenciales del clinker de cemento requiere agua para reaccionar. Estos procesos son exotérmicos y conducen a una disminución del volumen de los productos de hidratación. Esta reducción de volumen, comienza inmediatamente después del mezclado del cemento con el agua y la tasa de velocidad se incrementa durante las primeras horas y días. La magnitud de la retracción química puede determinarse utilizando el peso molecular y las densidades de los compuestos, como el cambio de ellos desde su forma básica hasta el producto de hidratación.

En la tabla 2.1 se muestra un ejemplo del cálculo para la reacción del C_3S , con

base en los trabajos de [E. Tazawa,1998] ⁽²⁰⁾.

Tabla 2.1. *Reacción del C₃S durante la hidratación del cemento y cálculo de su retracción química [E. Tazawa,1998] ⁽²⁰⁾.*

Hidratación					Retracción Química (%)	
	2 C ₃ S	+	6 H	→	C ₃ S ₂ H ₃ + 3 CH	
Peso (g/mol)	456.630		108.089		342.443 222.275	9.56
Densidad (g/cm ³)	3.130		0.998		2.630 2.230	
Volumen (cm ³ /mol)	145.888		108.306		130.206 99.675	
Volumen total de: base (V _b) y producto (V _p)	V _b = 254.19		V _p = 229.88		V _s = 24.31	

La diferencia de volumen molecular de la base (V_b) y el volumen los productos de reacción (V_p) da como resultado la retracción del volumen (V_s). Entonces, es necesario relacionar la retracción volumétrica con la masa sólida original del producto base, para obtener la retracción química total (V_{rq}). En la ecuación 6 se ilustra esta relación.

$$V_{rq} = \frac{V_s}{M} = \frac{24.31}{456.6} = 0.0532 \text{ cm}^3/\text{gr}, \text{ para el C}_3\text{S} \quad \text{Ec. (6)}$$

Basado en los productos de hidratación y en los cambios de volumen debidos a la retracción química E. Holt and M. Leivo [2003] ⁽²⁰⁾ derivaron una ecuación general [Ec.(7)] que estima la retracción química total. (V_{rq}).

$$V_{rq} = 0.0532[C_3S] + 0.0400 [C_2S] + 0.1113 [C_4AF] + 0.1785 [C_3A] \quad \text{Ec. (7)}$$

La retracción química de la pasta de cemento no se ve afectada por la relación A/C [Gangé et al. 1999] ⁽¹⁵⁾. La relación A/C y la fineza del cemento pueden afectar solo la velocidad de la retracción química. Cuando el grado de hidratación del cemento es casi el 100%, tanto el valor de la retracción como el propio grado de hidratación se verán involucrados por la composición química del cemento.

Tazawa et. al. encontraron que una retracción química más baja puede

asociarse con valores bajos de C_3S , C_3A y álcalis⁽²¹⁾.

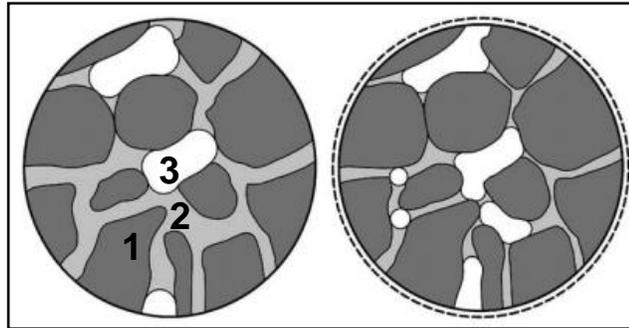


Figura 2.3. Representación esquemática en una sección transversal de una pasta de cemento durante la hidratación. Izquierda: bajo grado de hidratación. Derecha: alto grado de hidratación. Materia sólida (1, cemento hidratado y no hidratado), porosidad con agua (2), y volumen de porosidad vacía (3). La figura ilustra la formación de volumen de poros vacíos debido a la retracción química, que resulta en una disminución del radio de curvatura del menisco y la retracción total debido al incremento en los esfuerzos de tensión producto de la hidratación del cemento y la auto-desección.

Las cantidades típicas de retracción química, cuando la hidratación ha alcanzado el 100%, son de 6 a 7 ml para cada 100 gr de cemento que ha reaccionado⁽²²⁾. Incluso la retracción es mayor si el sistema contiene humo de sílice, ya que éste reacciona con hidróxido de calcio: en este caso, la reacción química típica es de 20 ml por cada 100 gr de humo de sílice que reacciona en el sistema.⁽²³⁾

2.2.2 Retracción autógena.

Cualquier concreto que no se cura durante las primeras edades de endurecimiento, independientemente de su relación A/Cem , desarrollará retracción autógena. La retracción autógena es consecuencia de la retracción química que se presenta durante la hidratación del cemento⁽¹²⁾; dicha retracción es referida como la reducción macroscópica del volumen (cambio dimensional

visible) de la pasta de cemento, mortero ó concreto, causada por la hidratación del cemento. Esta retracción se etiqueta como deformación autógena, contracción por auto desecación, cambio de volumen autógeno [Justnes et al. 1996] ⁽¹²⁾ y no ocurre en presencia de agua de curado; pero cuando el agua no se encuentra disponible, el cemento consume agua de los poros, causando auto-desección de la pasta y una reducción uniforme del volumen.

En la figura 2.4 se ilustra mediante un gráfico de barras, cómo la retracción autógena es una porción de la retracción química. Mientras la retracción química es un volumen de retracción interna, la retracción autógena es un volumen de retracción externa. Por lo tanto, es posible medir la retracción autógena como un cambio lineal sobre una barra de concreto u otro arreglo similar.

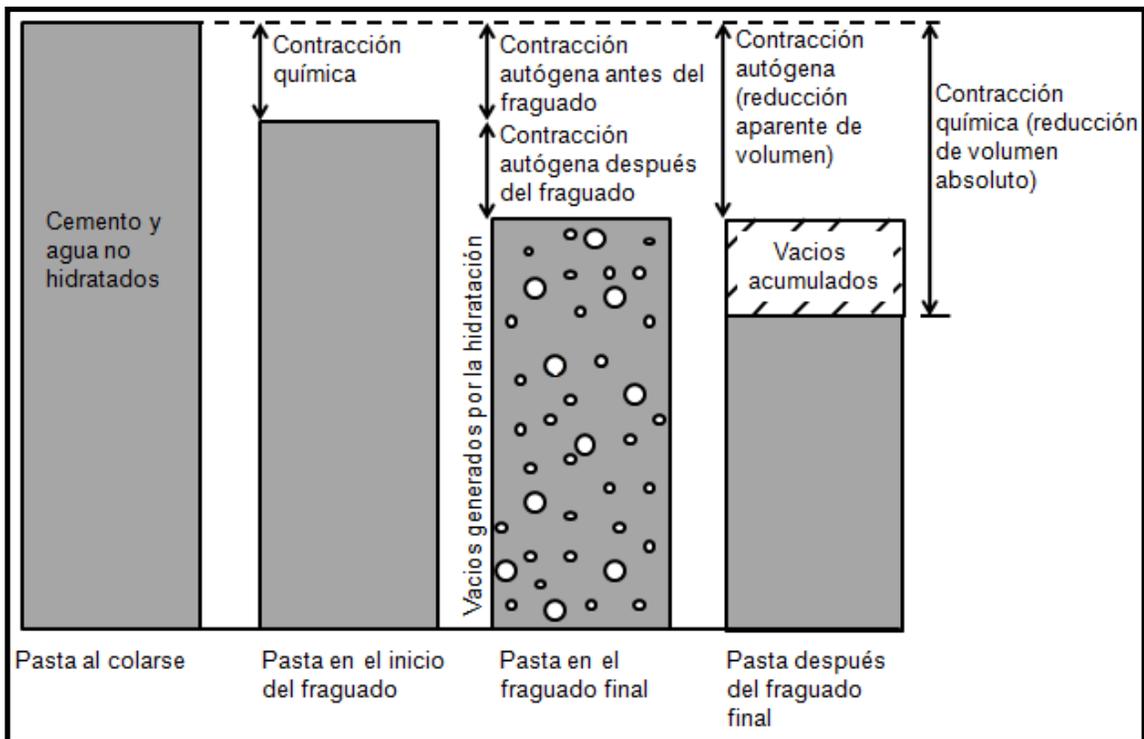


Figura 2.4. Cambios de volumen por retracción química y retracción autógena de pasta fresca y endurecida. (Editada por la PCA) ⁽¹⁾.

Las variaciones volumétricas de la pasta de cemento durante la hidratación tienen consecuencias tecnológicas despreciables, cuando la relación agua-

cemento es mayor que 0.5. En particular, estas variaciones volumétricas representan menos del 10% de la variación volumétrica asociada con la retracción por secado (Aïtcin et al., 1998). Con relaciones A/Cem bajas utilizadas para producir concretos de alta resistencia ó CAC se ha encontrado que en ausencia de agua de curado pudiera desarrollarse retracción autógena igual o mayor que la retracción por secado de los concretos convencionales y si no se controla, el concreto puede tener serios problemas de agrietamiento.

La fase del concreto que es más susceptible al agrietamiento es la pasta del cemento; ciertos agregados porosos pueden sufrir retracciones; sin embargo, esta magnitud es pequeña en comparación con la que sufre la pasta y no es relevante para el concreto convencional. La pasta de cemento sufre retracción a medida que se va secando debido a la tensión superficial del agua en poros parcialmente llenos produciendo tensiones hacia adentro de las paredes de los espacios porosos. El concreto responde a estas fuerzas internas contrayéndose. La fuerza de todos los poros es la causa principal de la retracción. Así, la retracción que experimenta la pasta de cemento es función principal de su relación A/C ó A/Cem, y del tiempo de endurecimiento, pero puede también estar afectada por el tipo de cemento, su finura y algún otro elemento que altere la distribución de tamaño de los poros⁽²⁴⁾.

La relación entre retracción autógena y retracción química se presenta en las figuras 2.4 y 2.5. Algunos investigadores y organizaciones consideran que la retracción autógena comienza con el inicio del fraguado y otros la evalúan desde el momento de la colocación (colado) del concreto⁽¹⁾. En la figura 2.5 se observa que la retracción autógena es proporcional a la retracción química (sección A-B, primera etapa después del colado). Esto significa que la retracción autógena se debe sólo a los cambios químicos; después de este punto, la retracción autógena comienza a perder proporcionalidad. Más allá del punto C, la retracción autógena se compone de menos retracción química, por lo que las futuras reducciones de volumen se deben solamente a la auto-deseccación [Boivin et al. 1999]⁽¹⁵⁾.

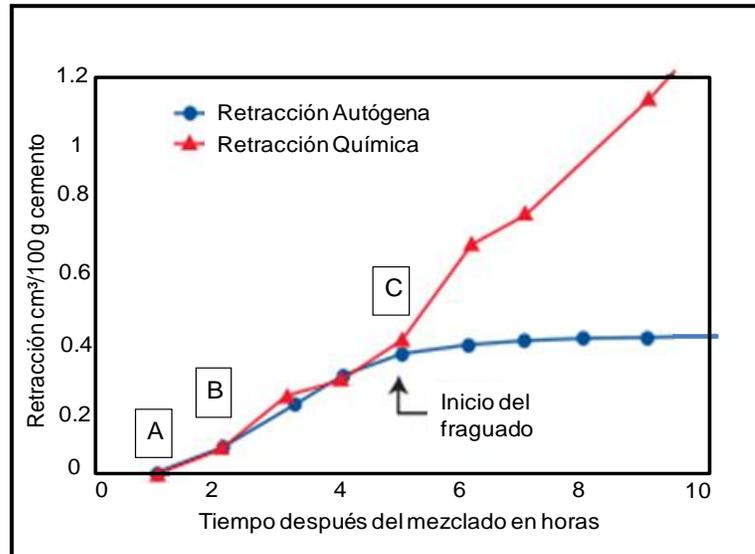


Figura 2.5. Relación entre la retracción autógena y la retracción química de la pasta de cemento, a edades tempranas (Hammer 1999)⁽¹⁾.

Después de que el concreto ha endurecido, la retracción puede no ser sólo resultado de la retracción química. Durante las edades posteriores, la retracción autógena puede conducir a la auto-deseccación de la pasta, resultando en una disminución de la humedad relativa, por la demanda de agua que el cemento necesita para su hidratación ó curado.

A medida que la relación A/Cem aumenta, la porosidad capilar aumenta y la resistencia disminuye. Si se usa más del 35% de agua, aproximadamente, en masa de cemento (relación A/C = 0.35) va a permanecer una porosidad en el material endurecido, incluso después de la hidratación completa. Las propiedades de transporte, tales como permeabilidad y difusividad también aumentan, permitiendo que sustancias perjudiciales puedan atacar al concreto o a la armadura (refuerzo) más fácilmente.

2.2.3 Retracción plástica.

Ésta se refiere a los cambios que ocurren mientras el concreto aún está en estado fresco, antes de endurecer (etapa plástica). La retracción plástica resulta

de la combinación de la retracción química y autógena junto con la rápida evaporación de la humedad de la superficie, que supera la tasa de sangrado, siguiendo el siguiente mecanismo:

El agua que se encuentra por debajo de la superficie del concreto forma un menisco entre las partículas finas de cemento y de agregados, causando una fuerza de tensión que se desarrolla en las capas superficiales. Si la superficie del concreto ha comenzado a fraguar y ha desarrollado suficiente resistencia a la tensión para resistir dichas fuerzas, no se forman grietas. Si la superficie se seca muy rápidamente, el concreto puede permanecer plástico y las grietas no se desarrollan en ese momento, pero se formarán tan pronto como el concreto se endurezca un poco más.

Los factores que reducen la cantidad de sangrado son: un alto contenido de materiales cementantes, un alto contenido de finos, un contenido reducido de agua, el aire incluido, una elevada temperatura del concreto y las secciones más finas.

Cualquier factor que retrase el fraguado incrementa la posibilidad del agrietamiento por contracción plástica. El fraguado retardado puede ser consecuencia de uno o más de los siguientes factores: clima frío, sub-bases frías, altos contenidos de agua, bajos contenidos de cemento, retardantes del fraguado, algunos aditivos reductores de agua, y el uso de adiciones minerales⁽¹⁷⁾.

Las grietas por retracción plástica son usualmente paralelas entre sí, a una distancia de 0.3 a 0.9 m, aunque también se pueden presentar en direcciones preferentes y distribuidas al azar; son relativamente superficiales (de 20 a 40mm de profundidad), pudiendo en ocasiones atravesar las losas. Son antiestéticas, aparecen en las primeras horas (de 1 a 10 horas), se manifiestan en grupos, no atraviesan las partículas de agregado grueso, más bien las rodean, no presentan peligro estructural⁽¹⁸⁾ y raramente afectan la resistencia o la durabilidad del concreto⁽¹⁷⁾.

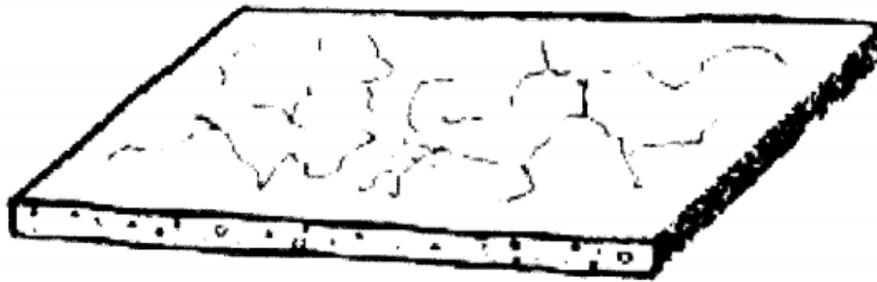


Figura 2.6. *Grietas generadas por retracción plástica [60].*

2.2.4 Retracción por secado.

El concreto endurecido se expande ligeramente con el aumento de humedad y se contrae con la pérdida de la misma. En condiciones ambientales normales, el concreto después de fraguado y ya en estado endurecido sigue expuesto a perder más agua por efecto de la evaporación y por consumo debido a la hidratación del material cementante. Esta reducción de agua, que progresa paulatinamente con el tiempo, es motivo de que se contraiga gradualmente a medida que endurece; a esta retracción se le conoce como *retracción por secado*. La retracción por secado es una deformación lineal dependiente del tiempo, a temperatura constante, que se mide sobre una probeta no cargada que se deja secar⁽²⁵⁾. La situación más común resultante de la desecación en edades tempranas, es la aparición de grietas superficiales (Mindess & Young 1981)⁽²⁵⁾.

Cuando se trata del secado del concreto, los poros más grandes son los primeros en perder su agua interna, esto fue demostrado por Koenders en 1997⁽²⁵⁾. Además, el secado ocurre de manera no uniforme, desde la superficie hacia el núcleo del concreto y el agrietamiento creará tanto esfuerzos de tensión internos y próximos a la superficie, como esfuerzos de compresión en el núcleo. La retracción diferencial puede provocar alabeos y grietas superficiales⁽²⁴⁾. Esta retracción puede transcurrir durante años, antes de llegar a la retracción última, porque la pérdida de humedad del concreto endurecido

se controla por difusión.

Con el flujo del agua de sangrado hacia la superficie del concreto, la interacción entre los poros y el agua interna se ve influenciada por el movimiento de humedad. Durante el secado del concreto fresco, la tasa de evaporación puede exceder la cantidad de agua de sangrado. La pérdida del agua interna causa entonces la retracción por secado. Powers (1968) ⁽²⁵⁾. La magnitud de las retracciones por secado depende en gran medida de la cantidad de agua que se pierde y de la tasa de evaporación. Los valores típicos de la retracción por secado son de 500 a 1000 $\mu\epsilon$ (0,5 a 1 mm / m); pero ésta puede superar estos valores en algunos casos; además, la cantidad de retracción que ocurre sobre el primer día puede ser mayor que el 60% de la retracción por secado ultima [J. Bisschop, 2002].

En la figura 2.7 se observa el agrietamiento por secado, de una probeta sin carga, cuando es restringida en sus extremos.

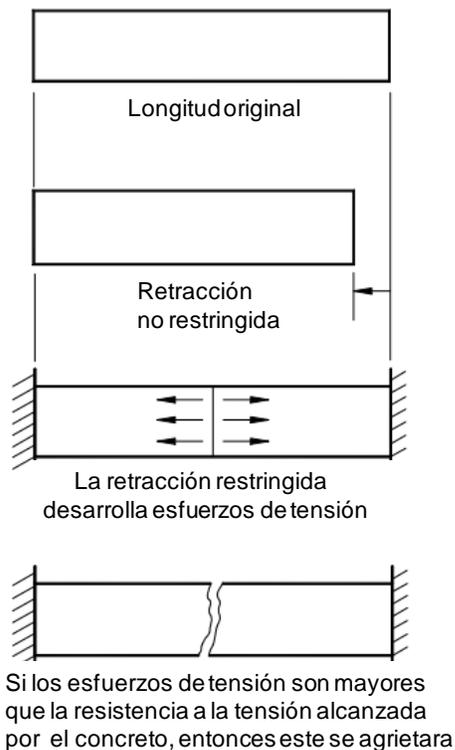


Figura 2.7. Agrietamiento del concreto provocado por la retracción por secado

2.2.5 Retracción térmica.

Como todo material, el concreto se dilata con los aumentos de la temperatura y se contrae cuando ésta baja. La expansión térmica causa problemas cuando la temperatura cambia de manera significativa, provocando grietas en el concreto. La tendencia a la retracción se incrementa por un descenso significativo de la temperatura del concreto o del ambiente. *La retracción térmica* es la contracción del concreto originada por tensiones locales que se producen por las diferencias térmicas entre el concreto y el medio ambiente. El agrietamiento sobre el concreto se producirá en el instante en que el valor de retracción sea igual a la relación entre el esfuerzo de tensión de ruptura del material y su módulo de deformación⁽¹⁸⁾.

Cada concreto tiene un "coeficiente de dilatación térmica", que depende de las propiedades térmicas de los agregados y de la pasta de cemento hidratada, así como de las proporciones en las que intervienen en el concreto. A edades tempranas, la temperatura del concreto está cambiando debido a la hidratación del cemento. Después de 24 horas de edad, se reportan coeficientes de dilatación térmica de 6 a 12 $\mu\epsilon / ^\circ\text{C}$ ó 6 a 12 $\times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ (Mehta y Monteiro, 1993). Como regla general, se considera que la temperatura adiabática que se genera por el calor de hidratación a edad temprana, aumenta de 5 a 8 $^\circ\text{C}$ por cada 45 kg de cemento [Kosmatka y Panarese 1988], así, una mezcla de mortero tendrá mucho mayor cantidad de calor generado en comparación con una mezcla de concreto, ya que es más rico en cemento. El aumento de calor se produce normalmente en las primeras 12 horas, siempre y cuando no existan condiciones de efecto retardante.

Entre las medidas para contrarrestar las causas del agrietamiento de origen térmico está el no utilizar cementos con muy alto contenido de aluminato tricálcico (C_3A), evitar los gradientes térmicos entre la superficie y el interior de un mismo elemento, así como diseñar y construir correctamente las juntas de

dilatación previstas⁽¹⁸⁾.

En la figura 2.8 se observa el agrietamiento por retracción térmica sobre losas de concreto cuando existe una diferencia de temperaturas.

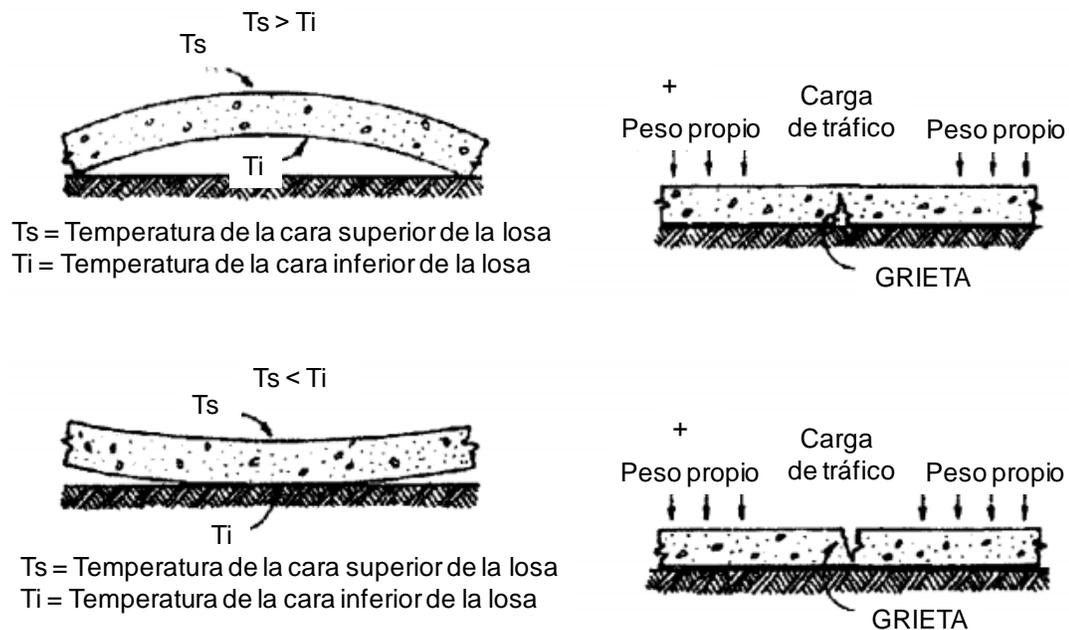


Figura 2.8. Grietas generadas por retracción térmica [60].

2.2.6 Retracción por carbonatación

De acuerdo con la ecuación 8, la retracción por carbonatación del concreto es un proceso que resulta de la reacción de los hidróxidos con la humedad y el dióxido de carbono (CO_2), normalmente en el aire (Mehta y Monteiro, 1993)⁽¹⁸⁾.



El CO_2 externo, en forma de gas, se combina con la humedad para convertirse en ácido carbónico, que reacciona con los hidróxidos en el concreto, particularmente con el hidróxido de calcio acompañado. Esta reacción origina la

liberación de agua del gel y, como resultado, propicia una ligera retracción y una reducción en el PH del concreto. Un descenso en el PH puede ser perjudicial para otras formas de deterioro, principalmente la corrosión del acero de refuerzo. Los óxidos que se producen en el proceso de corrosión pueden causar expansión, agrietamiento y desprendimiento del concreto. En este trabajo, la retracción por carbonatación queda fuera del alcance del mismo, por el hecho de enfocarse a retracciones en edades tempranas como lo es la retracción química y autógena principalmente.

En la figura 2.9 se ilustra la aparición de grietas, de acuerdo a su edad ⁽¹⁸⁾, excluyendo las que pudieran aparecer producto de la retracción autógena. Este tipo de grietas pueden no aparecer durante las primeras edades del concreto.

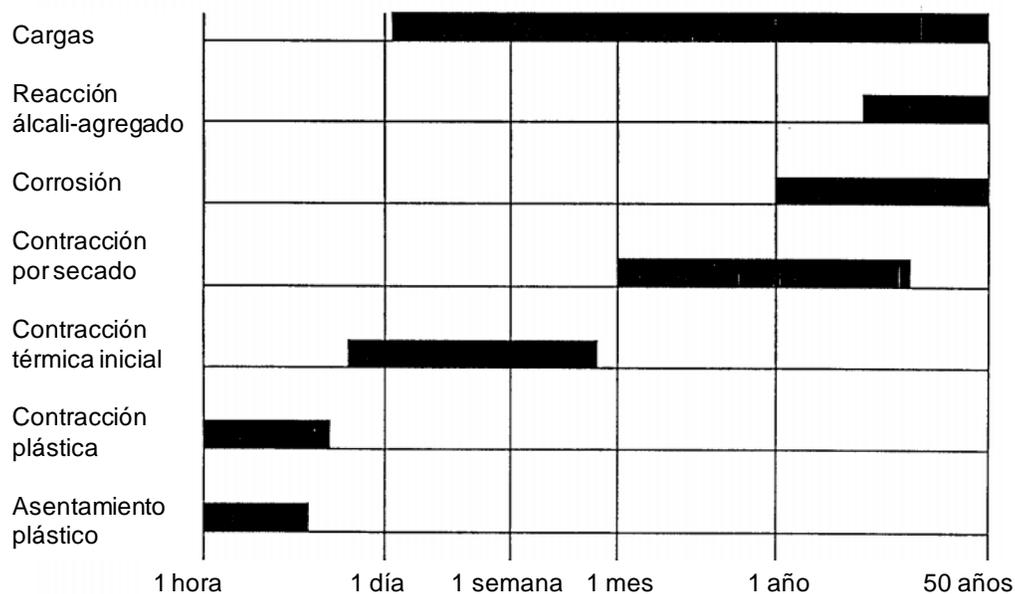


Figura 2.9. Aparición de grietas en el concreto con respecto a su edad [61].

2.3 Algunas maneras de mitigar la retracción autógena.

El término: “curado”, se usa frecuentemente para describir el proceso mediante el cual el concreto de cemento hidráulico desarrolla con el tiempo las propiedades en estado endurecido que resultan de la continua hidratación del cemento, en presencia de suficiente agua. Debido a que en CAC el curado convencional con agua, que se recomienda para los concretos convencionales, resulta ser insuficiente para una buena hidratación, ya que sólo se cura de manera eficientemente los primeros centímetros hacia el interior del concreto a partir de la superficie expuesta al ambiente. Por tal motivo, el curado interno en CAC ha sido propuesto como un método para mitigar la retracción autógena, ya que estos métodos representan una reserva de agua dentro del concreto que contribuye al curado cuando se presenta la auto-deseccación, minimizando tanto a la propia auto-deseccación como a la retracción autógena.

El curado interno consiste en incorporar al concreto ingredientes con pequeñas reservas de agua dentro de la mezcla de concreto, como lo son los agregados porosos o polímeros super-absorbentes que sirvan como agentes de curado. Este agente puede ser cualquier componente (aditivo ó agregado especial) o un agregado normal introducido dentro de la mezcla de concreto en estado saturado.

Los beneficios de curar internamente el concreto van más allá de mejorar la resistencia a la compresión. Principalmente se logra un mayor grado de hidratación y una reducción de la permeabilidad; si a esto se le suma el hecho de añadirle aditivos minerales como el humo de sílice, entonces se puede refinar la estructura del poro, incrementando la impermeabilidad de la matriz cementante; aunque, como consecuencia de la presencia de esta adición mineral en la mezcla, se podría incrementar la auto-deseccación ⁽²⁶⁾.

Durante años, varios métodos han sido desarrollados y ampliamente utilizados para mitigar la retracción autógena y la tensión interna que puede ser inducida en el concreto, tales como:

2.3.1 Aditivos expansivos.

El uso de productos químicos expansivos para contrarrestar la retracción a edad temprana ha sido conocida por décadas y se utiliza comúnmente en la práctica en países como Japón⁽²⁷⁾. La adición durante el mezclado de hidróxido de calcio (CH) con una adecuada distribución de tamaño de partícula ha sido propuesta por Collepardi y sus colaboradores⁽²⁸⁾. La cantidad de cal muerta (CH) se selecciona de modo que durante los primeros 2 ó 3 días la expansión sea igual a la retracción potencial del concreto. Este método es muy eficiente y práctico, pero requiere de un estricto control en la preparación del concreto y no puede ser implementado por personal inexperto. Utilizar cementos expansivos, aditivos expansivos a base de sulfoaluminato de calcio ó aditivos que tengan una combinación de óxido de calcio y sulfoaluminato de calcio es otra opción para contrarrestar la retracción del concreto^{(29),(30)}.

Mayor información sobre la retracción compensada del concreto puede encontrarse en el ACI 223-83, "Standard Practice for the Use of Shrinkage-Compensating Concrete."

2.3.2 Aditivos reductores de retracción por secado.

La retracción por secado siempre ha sido un fenómeno no deseado en las construcciones elaboradas con concreto y, en especial, en las obras de pavimentos y pisos industriales⁽²⁴⁾. Para mitigar este fenómeno, uno de los aditivos químicos desarrollados por K.J. Folliard and N.S. Berke, 1997⁽²⁰⁾ es el aditivo reductor de la retracción (SRA, por sus siglas en ingles). Este aditivo altera el mecanismo básico de la retracción sin añadir ningún material expansivo al concreto, reduciendo la tensión superficial del agua que tienen todos los espacios internos del concreto y minimiza la presión capilar. Los SRA pueden ser de diferentes mezclas químicas como el éter alquil polixialkileno y el propileno glicol [C.K. Nmai et al, 1998]⁽²⁰⁾. Estos aditivos tienen efectos

significativos sobre el revenimiento y la pérdida de aire, y pueden retardar el fraguado. Una dosificación del 2% puede disminuir entre el 30% y el 40% de la retracción total de en especímenes de concreto y mortero, a la edad de 60 días. Además, reduce entre el 20% y 30% la retracción autógena a la edad 90 días. Comparado con algunos aditivos expansivos, los SRA son mejores cuando no existe agua de curado.

2.3.3 Polímeros super-absorbentes (SAP) como agentes de curado interno en concretos hidráulicos.

Un polímero super-absorbente (SAP), es un material polimérico que es capaz de absorber una importante cantidad de líquido y retenerlo dentro de su estructura⁽³¹⁾. Existen diferentes tipos de polímeros, de los cuales algunos llegan a retener hasta 5,000 veces su propio peso; sin embargo, los polímeros super-absorbentes que comercialmente están disponibles en el mercado retienen alrededor de 50g/g en disoluciones como la orina, y en las altas soluciones como en la pasta de cemento pueden llegar a absorber alrededor de 20g/g⁽³¹⁾.

O.M. Jensen y P.F. Hansen [2001]⁽²³⁾ fueron los primeros en publicar el uso de inclusiones de agua como aditivo para la prevención de la auto-deseccación, Ellos concluyeron que las inclusiones de SAP fueron capaces de mitigar la deformación autógena y mantener una humedad relativa alta dentro de la pasta de cemento. Una característica de los SAP es su capacidad para utilizarse en las mezclas de concreto en estado seco, ya que toman agua de la mezcla fácilmente durante la etapa de mezclado.

En este trabajo no se contempló el estudio de estos compuestos como medio de curado interno.

2.3.4 Agregados Ligeros (AL) como agentes de curado interno en los concretos hidráulicos.

Por la capacidad de absorber agua y retenerla en su interior durante el mezclado, por décadas, se ha hecho uso de los agregados ligeros para absorber humedad y para producir concretos que fueran menos sensibles a curados de campo deficientes. Para evitar la auto-desección, este concepto pudo ser retomado a principios de la década de 1990, con el uso de agregados ligeros previamente saturados, como agentes de curado interno en concretos de baja relación A/Cem. Fue entonces cuando este procedimiento surgió como un nuevo y original concepto en curado interno, para mitigar la retracción autógena. El procedimiento consiste en incorporar pequeñas reservas de agua mediante el uso de agregado ligero saturado dentro del concreto^{(35),(36)}, los cuales sirven como reservas de agua para contrarrestar la auto-desección producida por la reacción química durante la hidratación del cemento antes del fraguado, esta agua se mantiene dentro de las partículas principalmente por el equilibrio de fuerzas capilares en la solución de poro, cuando este equilibrio se rompe por el surgimiento de auto-desección, entonces las reservas de agua se liberan para mitigar la auto-desección y la consecuente retracción autógena⁽³⁷⁾. Solamente poros mayores que 100 nm se utilizan para almacenar agua de curado interno⁽³⁴⁾. En poros más pequeños el agua no puede ser liberada para participar en el proceso. El espaciamiento entre las partículas debe ser convenientemente pequeño, de modo que el agua no tenga que recorrer una gran distancia para contrarrestar la auto-desección. Esta estrategia ha demostrado ser eficaz en reducir la retracción autógena y el agrietamiento^{(38),(39)}.

Recientemente se ha demostrado que es eficiente sustituir agregado ligero saturado por arena de peso normal, para mitigar la retracción autógena. Estas fuentes dispersantes de agua saturada en la red de poros, creada por la retracción química que se desarrolla durante la hidratación del cemento,

disminuye el desarrollo de la auto-deseccación y consecuentemente la retracción autógena ⁽⁴⁰⁾.

2.4 Efecto de curado interno en el concreto.

Cuando no hay una fuente externa de agua durante la hidratación del cemento, se desarrolla una porosidad muy fina dentro de la pasta. Esta porosidad fina drena el agua desde los capilares y, como resultado, el concreto se seca sin perder peso. El agua simplemente se mueve de un capilar grueso hacia los capilares finos

Las mezclas con relación A/Cem bajas experimentan auto-deseccación, especialmente en condiciones selladas de curado. La auto-deseccación ocurre como resultado de la retracción química. Durante la hidratación del cemento, los productos de hidratación ocupan un volumen que es aproximadamente 10% más pequeño que los reactivos ^{(41),(42)}. Esto resulta en la creación de vacíos llenos de vapor dentro del concreto ⁽⁴³⁾. Estos vacíos llenados de vapor crecen con el incremento de la hidratación y penetran poco a poco en los poros. Los agregados ligeros pueden utilizarse como reserva de agua para remplazar la demanda de agua producto de la hidratación de la pasta del cemento, de tal modo que reduce los vacíos llenos de vapor y, por lo tanto, mitiga los efectos de la auto-deseccación en mezclas de concreto con relaciones agua/cementante bajas. La razón es que cuando el agua deja el ALS, la pasta continúa hidratándose, resultando en una micro-estructura más densa en la pasta. Esto es similar a una fuente de agua externa. Además, en términos de durabilidad del concreto, ha sido probado que el agua de curado interno, llamado también “curado autógeno” es el método más seguro y eficiente para reducir la retracción autógena en comparación con el uso de aditivos expansivos en el concreto. La idea es que la auto-deseccación pueda ser contrarrestada mediante el remplazo parcial de agregado de peso normal por agregado ligero saturado, como ha sido demostrado por varios autores ^{(23),(44-46)}.

La eficiencia de un sistema de curado está fuertemente relacionada con el contenido y los parámetros del ALS utilizado como lo es: absorción, estructura de poro, tamaño de distribución de grano, relación de porosidad abierta a cerrada, así como las propiedades mecánicas. La proximidad entre la pasta y el agregado es un factor determinante para que el agua de curado interno pueda penetrar fácilmente en la pasta. Algunos autores han reportado el hallazgo de que el agregado ligero fino es más afectivo para distribuir la humedad disponible por curado interno que el agregado ligero grueso^{(47),(48)}. Mientras otros autores han estimado que el tamaño de poro juega un papel más significativo en el proceso de curado interno que el tamaño de la partícula⁽³²⁾. La dosificación de ALS depende principalmente de la cantidad de agua de curado interno introducida dentro de la matriz cementante. Se ha considerado que un bajo contenido de ALS (6% del peso del cemento) puede totalmente eliminar la retracción autógena de los CAC⁽⁴⁸⁻⁵⁰⁾. Inversamente, Bentur et al. han estimado que un 25% en volumen de ALS fino, como remplazo de agregado de peso normal (APN) puede ser efectivo eliminando toda la retracción autógena en los CAC⁽⁵⁰⁾.

De acuerdo con estas consideraciones, la eficiencia del curado interno en morteros con ALS se examina desde el punto de vista de fluidez, resistencia, reducción de la retracción química, autógena y por secado.

K. Kohno et al,[1999] demostraron que el nivel de humedad absorbida por el incremento del ALS disminuye la retracción autógena. Otras investigaciones [A. Bentur et al, 2001]⁽⁵⁰⁾ además llegaron a la conclusión que el ALS disminuye tanto la retracción autógena como la contracción restringida.

El inconveniente de utilizar ALS como agente de curado interno es la disminución en la resistencia a la compresión y la rigidez del concreto. Además, utilizar ALS para reducir la retracción autógena puede llevar a un efecto negativo en la humedad absorbida dentro del agregado, si ésta no está completamente saturada antes de introducirla a la mezcla.

2.5 Puzolanas

El término “puzolana” se deriva del nombre de una ciudad italiana – Puzzuol- que se considera la cuna de las cenizas tectónicas. El ASTM C 125 define a una puzolana como:

“Un material silícico o silícico aluminoso que por sí solo posee poco o nulo valor cementante, pero finamente dividido y en presencia de humedad, reacciona químicamente con el hidróxido de calcio (CH) a temperaturas ordinarias para formar compuestos que poseen propiedades cementantes” ⁽⁵¹⁾.

Las puzolanas se pueden clasificar por su origen, ya sea naturales o artificiales, las puzolanas naturales son materiales derivados de las erupciones volcánicas excepto las tierras diatomáceas, las cuales se formaron por silicatos amorfos hidratados, derivados de los esqueletos de microorganismos acuáticos. En el caso del material de las erupciones volcánicas, éstos están compuestos principalmente por alumino-silicatos que al enfriarse bruscamente, resultan en la formación de materiales con estructura desordenada o vítrea con minerales pobremente cristalinos. Los primeros en utilizar las puzolanas naturales fueron los griegos, pero la palabra puzolana se acuñó en Italia y se utilizó para describir las cenizas volcánicas de Pozzouli, una villa cerca de Nápoles.

Las puzolanas artificiales son subproductos industriales, que antiguamente se consideraban como desperdicio y contaminaban el medio ambiente, tal es el caso de la ceniza volante (residuo de la quema de carbón mineral para la producción de energía eléctrica), el humo de sílice (residuo de la producción de ferro-aleaciones de silicio), las escorias producidas a partir de la fundición y la ceniza obtenida de la quema de la cascarilla de arroz. Por otro lado, se tienen las puzolanas artificiales, que se producen especialmente con la finalidad de ser complemento cementante, como es el caso del micrón³ de Boral, ceniza volante tipo C cribada con tamaño máximo de 3 micras y el metakaolin de

Powerpozz, arcilla de caolín calcinada.

Las puzolanas, como material cementante suplementario (MCS) aportan factores técnicos, económicos y ambientales en la producción del concreto, algunos de los MCS más empleados en la actualidad son las puzolanas artificiales (subproductos contaminantes provenientes de procesos industriales).

Una de las aplicaciones más importantes de las puzolanas es utilizarlas en sustitución parcial en mezclas de concreto, debido a que, en conjunto con el cemento Pórtland contribuyen a mejorar las propiedades del concreto en estado fresco, y endurecido principalmente, debido a sus reacciones puzolánicas. La mayoría de los MCS tienen un rasgo en común: contienen sílice reactiva, la cual al combinarse con hidróxido de calcio (portlandita) en presencia de humedad y a temperatura ambiente, forma silicatos de calcio hidratados (S-C-H) similares a los que se forman durante la hidratación del cemento Portland. Básicamente, una reacción puzolánica puede escribirse de la siguiente manera:



2.5.1 Cenizas volantes.

El uso más importante de las cenizas volantes (CV) es en la fabricación de concreto. La importancia de estos materiales en la producción del concreto radica en que por su finura densifican la matriz cementante y por su constitución química y mineralógica presentan propiedades cementantes que contribuyen a incrementar la durabilidad del concreto.

El hecho de introducir materiales puzolánicos en CAC es con la finalidad de hacer concretos más durables y que ganen resistencia a edades avanzadas, con la consecuencia de dificultar el curado del concreto. Además, el uso de

cenizas volantes desplaza parcialmente la producción de otros ingredientes en los concretos, como el cemento; resultando en ahorros de agotamiento de recursos naturales, reducción en la inversión de la energía en el procesamiento de materiales primarios, conservación de materiales primarios, reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero y, además, alivian la contaminación.

Al fabricar concreto con CV, éste demanda menor cantidad de agua, reduce el calor de hidratación y su tamaño de partículas finas es crucial para que el concreto alcance las resistencias deseadas. Las CV tienen un peso unitario inferior al cemento, lo que significa que en kilo de ceniza contribuye aproximadamente a un 30% más volumen que un en kilo de cemento. Cuanto mayor sea el porcentaje de CV, mayor será la cantidad de la pasta, menor cantidad de arena pudiera ser utilizada, mejor será la trabajabilidad y mayor será la fluidez del concreto debido a la forma esférica de las partículas.

Las cenizas volantes contribuyen a fabricar concretos más ligeros y, por su forma esférica de partícula, crean una acción de lubricante en el concreto, dando origen a los siguientes beneficios:

En estado plástico

- Mayor trabajabilidad.- más fácil colocación con menos esfuerzo.
- Mayor facilidad de bombeo.- requiere menor energía y cubre mayores distancias.
- Mejor acabado.
- Menor sangrado.
- Reducción de segregación
- Mejora la cohesión.

En estado endurecido

- Mayor resistencia a edades avanzadas.- la ceniza volante se combina el hidróxido de calcio producto de la reacción química del cemento para formas nuevos compuestos (S-C-H).

- Disminución de la permeabilidad.- densifican la matriz cementante.
- Mayor durabilidad.- Protección contra la corrosión, reduce la permeabilidad al agua, a los productos químicos, agentes corrosivos, aumenta la resistencia a los sulfatos y reduce la reactividad álcali-sílice.
- Reducción de ataque álcali-agregado.
- Reducción de eflorescencia.
- Reducción de la retracción.- la lubricación de las partículas de cenizas reduce el contenido de agua de la mezcla y la retracción por secado.
- Reducción del calor de hidratación.- la reacción puzolánica entre hidróxido de calcio y ceniza volante genera menos calor, lo que resulta en choques térmicos menores.

2.5.2 Humo de sílice.

Durante los años de 1970, casi todo el humo de sílice (HS) producido era arrojado a la atmosfera, pero debido a las preocupaciones ambientales, éste se convirtió en un material viable para ser utilizado en mezclas de CAC⁽⁵²⁾.

El humo de sílice es un material puzolánico altamente reactivo e ingrediente clave en la fabricación de mezclas de morteros ó concreto de alto comportamiento debido a que aumenta de manera significativa la vida útil de las estructuras, ya que posee una extrema finura (aproximadamente 100 veces más pequeñas que el tamaño de partícula del cemento promedio), gran superficie específica y alto contenido de sílice. La calidad del humo de sílice se especifica en ASTM C 1240 y AASTHO M 307⁽⁵³⁾.

El humo de sílice añadido en mezclas de concreto de cemento Portland mejora sus propiedades de resistencia a la compresión y resistencia a la abrasión debido a la reacción puzolánica de este material con el hidróxido de calcio libre en la masa de concreto o mortero producto de la reacción química del cemento⁽⁵⁴⁾. Además de reducir la permeabilidad del concreto a los iones cloro y

proteger al acero de refuerzo de la corrosión, especialmente en ambientes ricos en cloruros como las regiones costeras⁽⁵²⁾ el humo de sílice puede llevar la estructura de poro hacia una microestructura más fina y entre más fina sea la estructura de poro el consumo de agua puede incrementarse y, como resultado, la contracción autógena puede aumentar debido a la auto-deseccación. Por otro lado, investigaciones de Kinuthia et al. (2000) han demostrado que el aditivo mineral metacaolín puede reducir la retracción autógena causada por auto-deseccación, mejorando la distribución de tamaño de partículas y causando expansión que compensa la retracción.

El humo de sílice tiene una contribución muy importante en la resistencia a la compresión del concreto. Medio kilo de humo de sílice produce aproximadamente la misma cantidad de calor que un kilogramo de cemento Portland, y los rendimientos de 3 a 5 veces más que la fuerza de compresión.

Las dosificaciones comúnmente empleadas para el humo de sílice son del 8% al 15%, en peso del cemento que se añade, teniendo los siguientes efectos documentados:

8% a 10%.....Durabilidad alta/baja permeabilidad, tales como cubiertas ó estructuras de los puentes.

10% a 15%.....Columnas de alta resistencia estructural



Figura 2.10. *Humo de sílice se utiliza en concretos de alta resistencia, para dar rigidez. Torre en Cleveland, Ohio.*

Cuanto mayor sea el porcentaje de humo de sílice utilizado, mayor será la demanda de agua en la mezcla ó cantidad de superplastificante necesario y la mezcla puede llegar a ser viscosa.

2.6 Antecedentes.

Weber y Reinhardt (1997) propusieron el remplazo parcial en volumen de agregado ligero saturado por arena de peso normal para contrarrestar la retracción autógena internamente.

Jensen y Hansen (2001) propusieron el uso de polímeros finos súper-absorbentes para almacenar agua de curado durante el mezclado. Esta agua se introduce para el control del desarrollo de la retracción autógena.

Durán-Herrera, Calude Aïtcin y Petrov (2005) propusieron la sustitución del 28%, en volumen de arena de peso normal por arena de peso ligero en mezclas de concreto con relación $A/C = 0.35$ y demostraron la eficiencia de la sustitución en la reducción de retracción autógena y retracción por secado sin sacrificar resistencia a la compresión⁽³⁹⁾.

Jensen y Laura (2006) describieron algunas técnicas para la incorporación de agua de curado en el concreto, utilizando polímeros super-absorbentes, arcillas, pumicita, perlita, tierra diatomáceas, y determinaron aquellos agregados que retienen mayor cantidad de agua de curado interno para evitar desecación en la pasta de cemento. Entre ellos destacan los polímeros super absorbentes, seguidos de la perlita y la pumicita.

Mustafá, Mohamed, et al. (2009) Propusieron remplazar agregado volcánico fino (fracción 0.59 – 4.75 mm) pumicita, en diferentes niveles de sustitución por peso de arena sílica total, dentro de un sistema cementante (SC), teniendo relación $A/Cem = 0.27$, con diferentes niveles de CV en sustitución por masa del cemento. Los resultados confirman que la retracción autógena y la retracción por secado disminuyen significativamente con el incremento del contenido de CV, además, el incremento de CV muestra tener un efecto positivo en la durabilidad del mortero. También el uso de agregado ligero fino como

agente de curado interno reduce la retracción autógena y retracción por secado en mezclas de mortero, sacrificando resistencias a la compresión.

2.7 Justificación del proyecto.

Hoy en día, los concretos de alto comportamiento (CAC) están siendo más utilizados por la industria del concreto. El efecto de producir CAC con relaciones A/Cem bajas es presentar un fenómeno de auto-deseccación que conduce a cambios volumétricos que se conocen como retracciones autógenas. Los CAC presentan una matriz muy impermeable, por lo que el curado convencional con agua no resulta muy efectivo para hidratar el cemento como en los concretos convencionales, por ello la necesidad de un curado interno. La tendencia es utilizar cada vez más los CAC pensando en prepararnos y explotar los agregados comercialmente disponibles en el país y utilizarlos como agentes de curado interno en este tipo concretos, para así mitigar las retracciones autógenas que diesen conducir a severos agrietamientos indeseables. Para ello se propone estudiar 2 diferentes tipos de agregados ligeros, que son: arcilla expandida y pumicita.

2.8 Objetivos.

Objetivo General:

Estudiar y comparar el desempeño de dos agregados ligeros disponibles en la región como agentes de curado interno en morteros con características típicas de concretos de alto comportamiento con puzolana con una relación $A/Cem = 0.35$.

Objetivos particulares:

- Determinar las *propiedades de los morteros con y sin puzolanas*, en estado fresco y endurecido, al adicionarle un 20% en volumen de agregado ligero saturado, en sustitución a la arena de peso norma (agregado calizo).
- Evaluar el efecto en la *retracción química*, al sustituir un 20% en volumen de agregado ligero saturado, por arena de peso normal (agregado calizo).
- Evaluar el efecto en la *retracción autógena*, al sustituir un 20% en volumen de agregado ligero saturado, por arena de peso normal (agregado calizo).
- Determinar los efectos de *durabilidad* en los morteros elaborados con características típicas de los concretos de alto comportamiento.

2.9 Metas.

2.9.1. Analizar el comportamiento de los morteros con agregados ligeros saturados "no convencionales", en cuanto a sus propiedades en estado fresco y endurecido.

2.9.2 Generar información útil, relacionada con el desempeño de los agregados ligeros, para su uso como agentes de curado interno en concretos de alto comportamiento.

2.10 Hipótesis.

Si en los morteros y concretos de cemento Portland se sustituye un 20% del volumen de la arena de peso normal por agregados ligeros saturados (agentes de curado interno) éstos contribuirán a la continuidad de la hidratación de la matriz cementante y en la disminución de los cambios volumétricos sin sacrificar propiedades mecánicas y de durabilidad.

También se propone que sustituir cemento Portland por materiales cementantes suplementarios (MCS) en masa, que conducirán a mejores resistencias y mayor durabilidad.

CAPÍTULO 3

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Introducción

En este capítulo se describen las propiedades físicas, químicas y microestructurales de los materiales empleados para la compatibilización cemento-aditivo y la fabricación de morteros de prueba con características típicas de concretos de alto comportamiento (CAC), incluyendo las condiciones de curado interno. El trabajo experimental se dividió en tres etapas de estudio que son:

Etapa 1.- Caracterización de los materiales empleados.

Etapa 2.- Compatibilidad cemento-aditivo.

- En pastas.
- En morteros.

Etapa 3.- Curado interno.

- En morteros.

3.2 Etapa 1.- Caracterización de los materiales empleados.

3.2.1 Definiciones de los materiales utilizados.

3.2.1.1 *Cemento Portland compuesto (CPC 30R)*

El Cemento Portland es un polvo fino compuesto principalmente de silicatos hidráulicos de calcio, que fragua y endurece por reacción química con el agua. El Cemento Portland compuesto, se compone de clínker, yeso y dos o más adiciones. Las adiciones pueden componer del 6% al 35% de escoria, del 6% al 35% de material puzolánico, del 1% al 10% de humo de sílice y del 6% al 35%

de caliza. Independientemente del tipo y la cantidad de material adicionado, la cantidad de clínker y yeso debe ser del 50% al 94% ⁽¹⁾.



Figura 3.1. *Cemento Portland (imagen 12628, editada por la PCA)* ⁽¹⁾.

3.2.1.2 Ceniza volante.

La ceniza volante es un subproducto industrial proveniente de las plantas de carbón generadoras de electricidad, que resulta de la combustión del carbón molido o pulverizado y que es transportado desde la caja de fuego de la caldera por los gases de combustión y recolectados principalmente por precipitadores electrostáticos o bolsas y, secundariamente, por sistemas de depuración ⁽⁵⁶⁾. Su recolección y almacenamiento tiene un valor económico importante que repercute en los costos de producción de la energía eléctrica.



Figura 3.2. Central Carboeléctrica "José López Portillo", de la Comisión Federal de Electricidad, en el Municipio de Nava, Coahuila, México. (Fotografía aérea proporcionada en página de internet por Gabriel Patrón).

La ceniza volante se divide y clasifica en tres tipos, según la norma ASTM C 618-01.

Clase N: puzolanas naturales crudas o calcinadas, tal como las diatomitas; tobas y cenizas volcánicas o pumicitas calcinadas o sin calcinar; y varios materiales que requieren de calcinación para inducir propiedades satisfactorias, como algunas arcillas.

Clase F: ceniza volante comúnmente producida por la calcinación de carbón antracítico o bituminoso. Estas cenizas poseen propiedades puzolánicas.

Clase C: ceniza volante comúnmente producida por la calcinación de carbón sub-bituminoso o lignito. Esta clase de ceniza además de tener propiedades puzolánicas, tiene algunas propiedades cementantes.

Tabla 3.1. Clasificación de la ceniza volante según ASTM C-618-01.

	CENIZA VOLANTE		
	CLASE		
	N	F	C
	(%)	(%)	(%)
Requerimientos químicos			
Óxido de silicio (SiO ₂), óxido de aluminio (Al ₂ O ₃), óxido de hierro (Fe ₂ O ₃), min	70.0	70.0	50.0
Trióxido de azufre (SO ₃), máx.	4.0	5.0	5.0
Contenido de humedad, máx.	3.0	3.0	3.0
Perdidas por ignición, máx.	10.0	6.0	6.0
Requerimientos físicos			
Cantidad de retenido en la malla No. 325 (45 µm), máx.	34	34	34
Expansión o contracción en autoclave, máx.	0.8	0.8	0.8
Densidad, variación máxima promedio,	5.0	5.0	5.0
Porcentaje retenido sobre la malla No. 325 (45 µm), variación máxima	5.0	50	5.0

3.2.1.3. Humo de sílice.

Es un material puzolánico artificial muy fino, compuesto principalmente de sílica amorfa producida por hornos de arco eléctrico, como subproducto de la producción de aleaciones elementales de silicio o ferrosilicio (también conocido como microsílíce ó humo de sílice condensado) ⁽⁵²⁾. El humo que resulta de la operación del horno se recoge y se vende como humo de sílice, en lugar de ser depositados en vertederos.

Para emplear humo de sílice en mezclas de concreto, éste debe cumplir los requisitos establecidos en la norma ASTM C 1240-05.

Tabla 3.2. *Requerimientos del humo de sílice según ASTM C-1240-05*

Requerimientos químicos	%
Óxido de silicio (SiO ₂), min	85.0
Contenido de humedad, máx.	3.0
Perdida por ignición, máx.	6.0
Requerimientos físicos	
Cantidad de retenido en la malla No. 325 (45 µm), máx.	10
Variación máx. en el promedio de retenidos en la malla No. 325 (45 µm)	5
Índice de actividad puzolanica acelerada con cemento Portland a 7 días, porcentaje min. de control	105
Superficie específica, min, m ² /g	15

3.2.1.4. Arena de sílice estándar.

Arena sílica compuesta en su mayoría de granos naturalmente redondeados de cuarzo casi puro utilizado para preparar morteros en pruebas de cemento hidráulico ⁽⁵⁷⁾.

3.2.1.5. Agregado calizo.

Es un agregado granular triturado que resulta del proceso de molienda, como arena, grava o piedra, que al ser utilizado con algún medio cementante produce concreto o mortero de cemento hidráulico, que no tiene ni alta ni baja densidad. El agregado utilizado en este trabajo es típico en el área de Monterrey N.L. México y el resto del estado. Son rocas formadas por carbonatos de calcio principalmente. El material empleado en esta investigación pasa la malla de 9.5mm (3/8 in.) y, además, pasa completamente la malla de 4.75mm (No. 4) y, predominantemente, es retenido en la malla de 75 μ m (No. 200) ⁽⁵⁸⁾.



Figura 3.3. Agregado calizo de 4.75 mm para la fabricación de concreto y/o mortero

3.2.1.6. Agregado de peso ligero.

Es un material granular con peso volumétrico seco suelto, menor que 1120 kg/m³, como por ejemplo: pumicita, escorias volcánicas, arcilla expandida, perlita y productos finales de carbón o combustión de coque. En este trabajo se acondicionaron dos AL comercialmente en el país a un tamaño máximo de 4.76 mm, haciendo pasar los agregados a través de la malla No.4, los que se describen a continuación:

- *Arcilla expandida.*

Es un agregado preparado por expansión térmica. Este material es una arcilla natural con alto contenido en hierro, que al calcinarlo a una temperatura cercana a los 1200 °C produce un gas y hace que se expanda y genere microporos. Es un material cerámico y refractario que permanece estable hasta alcanzar su temperatura de calcinación.

La arcilla expandida es un agregado ligero en el que la expansión en su grado máximo puede alcanzar hasta 5 veces su volumen inicial, lo que significa una densidad 5 veces menor; cuenta con una estructura reticular fina conformada por una multitud de cámaras microscópicas de aire que confieren su capacidad aislante, térmica y acústica; es un material inerte, estable a los ataques químicos y resistente a congelamiento, 100% reciclable y de buena durabilidad. Proviene de Dallas, Texas EUA.

- *Pumicita.*

Son agregados que se preparan procesando materiales a partir de productos naturales. La Pumicita es una roca ígnea que presenta una textura esponjosa y/o vesicular, compuesta principalmente por vidrio. Presenta muchos huecos o cavidades; las vesículas, en parte, están unidas y forman tubos alargados a lo largo de la roca. Este material se produce por la expansión de gases internos dentro de la lava, formándose cuando ésta llega a la superficie; se desarrolla en lavas de

riolita que suelen ser muy viscosas ⁽⁵⁹⁾.

Este agregado de origen volcánico proviene de diversos estados de la República Mexicana, principalmente de aquellos que se encuentran dentro de la zona neovolcánica.

3.2.1.7 Aditivo

Es un ingrediente del concreto que, además del cemento Portland, el agua y los agregados, se adiciona a la mezcla inmediatamente antes o durante el mezclado, modificando algunas características del concreto ⁽¹⁾.



Figura 3.4. Aditivos líquidos (Imagen 12188, editada por la PCA) ⁽¹⁾.

En esta investigación se utilizaron aditivos reductores de agua y superplastificantes de alto desempeño base policarboxilatos.

Descripción del aditivo:

- *Aditivo reductor de agua de alto rango y superplastificante de alto Desempeño (ASF).*

Es un aditivo que reduce la cantidad de agua de mezclado requerida

para producir concreto; aumentando la consistencia, como mínimo en un 12%, y que cuando se añade al concreto produce concreto fluido, sin futuras adiciones de agua y no retarda el fraguado del concreto ^{(60), (61)}.

La resistencia del concreto endurecido que contiene aditivo ASF es normalmente más alta que la predicha, tan sólo con la relación A/Cem. Al igual que con las mezclas convencionales, esto se cree que se debe al efecto de dispersión de los ASF sobre el cemento y otros MCS; además, las relaciones A/Cem de las mezclas que contienen aditivos ASF son típicamente bajas, la retracción y la permeabilidad pueden verse reducidas y, en general, la durabilidad del concreto puede incrementarse ⁽⁶²⁾.

En una publicación de la National Ready Mixed Concrete Association (NRMCA) mencionan ocho ventajas y seis limitaciones de los aditivos HRWR ⁽⁶²⁾.

Ventajas potenciales de los aditivos ASF:

1. Reducción significativa de agua.
2. Reducción de contenido de cemento.
3. Incremento de trabajabilidad.
4. Reducción del esfuerzo requerido para la colocación.
5. Mayor efectividad en el uso del cemento.
6. Mayor velocidad en el desarrollo de resistencia a edad temprana.
7. Incremento de resistencia a largo plazo.
8. Reducción de permeabilidad.

Desventajas potenciales de los aditivos ASF:

1. Costo adicional por aditivo.

2. Pérdida de revenimiento más rápida que la de un concreto convencional.
3. Modificación de la dosis de aditivo incorporador de aire.
4. Menor sensibilidad con algunos cementos.
5. Leve decoloración del concreto claro.
6. Se forman y se exponen burbujas de aire y manchas de color en el acabado.

3.3 Caracterización de los materiales empleados.

En la fabricación de CAC se requiere de un estricto control de sus ingredientes; por ello se optó primero por determinar las propiedades físicas y químicas de los cementantes, las propiedades físicas de los aditivos, y las propiedades físicas de los agregados, así como su capacidad de desorción, que se explicará más adelante. En la figura 3.5 se presenta un esquema experimental de la primera etapa en estudio.

ETAPA 1

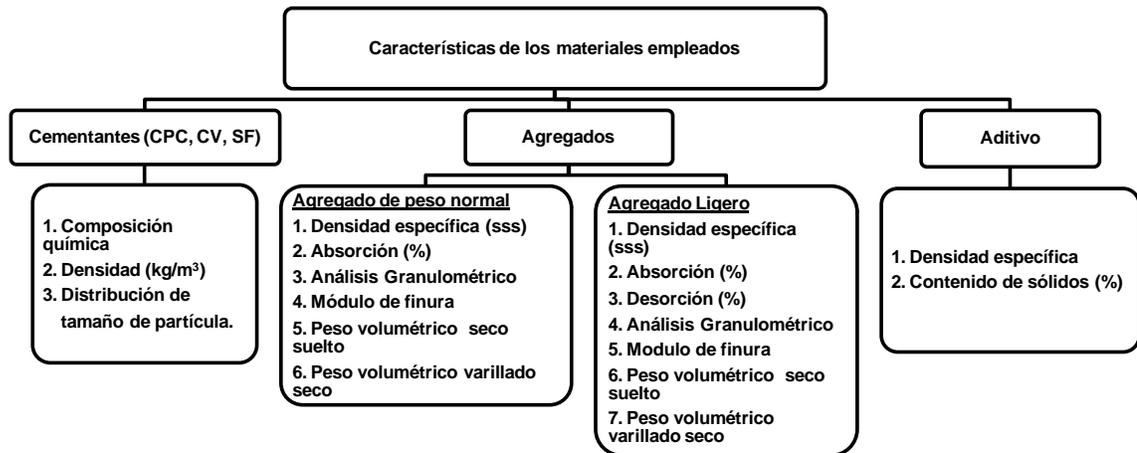


Figura 3.5. Esquema descriptivo de algunas pruebas realizadas a los materiales utilizados.

3.3.1. Cemento Portland compuesto (CPC 30R).

Los cementos utilizados para la fabricación de mezclas de pastas y morteros con arena estándar en la primera etapa de trabajo experimental fueron cementos Portland compuestos (CPC 30R), obtenidos de diferentes compañías cementeras comercialmente disponibles en el país, que cumplen la norma ASTM C-150-07 y la nacional NMX C-414-ONNCCE-2004. La composición química y la densidad de cada uno de los cementos se encuentran en la Tabla 3.3. Los cementos empleados se caracterizaron por medio de la prueba Fluorescencia de Rayos X (XRF) y la distribución del tamaño de partícula por la técnica de difracción de luz láser (LDP). Las densidades se obtuvieron de acuerdo con los procedimientos descritos en el ASTM C 188-95 (2003).

Tabla 3.3. *Composición química y densidad de los cementos utilizados.*

ANÁLISIS QUÍMICO XRF % EN PESO				
Compuestos	A	B	C	D
SiO ₂	15.8	16	18.4	19.6
Al ₂ O ₃	4.8	3.8	3.7	4.5
Fe ₂ O ₃	3.5	2.5	2.8	4
Suma (SiO₂+ Al₂O₃+ Al₂O₃)	24.1	22.3	24.9	28.1
CaO	61.5	63.1	63.8	58.8
MgO	0	0	1.2	1.6
SO ₃	4	3.5	2.9	3
K ₂ O	0.8	0.9	1.1	1.4
Na ₂ O	0.5	0.7	0.3	0.4
Pérdida por Ignición	9.1	9.5	5.8	6.7
Suma	100.0	100.0	100.0	100.0
Densidad (g/cm³)	3.00	3.01	3.05	3.05

3.3.2. Ceniza volante.

La ceniza utilizada en este trabajo provino de la central carboeléctrica de la Comisión Federal de Electricidad (C.F.E.) "José López Portillo", ubicada en el municipio de Nava, Coahuila. La composición química y densidad de esta ceniza se encuentran en la tabla 3.4. Esta ceniza cumple la cantidad mínima de $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ establecida por la especificación ASTM C-618-05 ⁽⁶²⁾ (tabla 3.1), ya que tiene una concentración de 90.3% respecto al 70% como mínimo. Esta ceniza se llama ceniza volante "integral", por el hecho de estar constituida por tres diferentes tamaños de partículas, de acuerdo con el proveedor. En la figura 3.6 se observa la distribución de tamaño de partícula de la CV integral. El análisis químico se determinó por el método de Fluorescencia de Rayos X (FRX). Es importante mencionar que para esta tesis el tipo de ceniza utilizada es clase F, ya que proviene de la quema de carbón bituminoso y su contenido de óxido de calcio es bajo.

La densidad se obtuvo de acuerdo con los procedimientos descritos por ASTM C-188-95 (2003).

Tabla 3.4. Composición química y densidad de la ceniza volante.

ANÁLISIS QUÍMICO	
Compuestos	Ceniza volante Integral Clase F (% en peso)
SiO ₂	62.3
Al ₂ O ₃	22
Fe ₂ O ₃	6
Suma (SiO₂+ Al₂O₃+ Fe₂O₃)	90.3
CaO	3.4
MgO	1
SO ₃	0.2
K ₂ O	1.6
Na ₂ O	0.8
Pérdida por Ignición	2.7
Suma	100.0
Densidad (g/cm³)	2,20

3.3.3. Humo de sílice.

La composición química se realizó mediante FRX y se reporta en la tabla 3.5. El humo de sílice cumple la cantidad mínima de SiO₂ establecida por la especificación ASTM C1240-05 ⁽⁵³⁾ para la fabricación de mezclas de concreto (tabla 3.2), ya que tiene una concentración de 96.9%, respecto al 85%, como mínimo, que establece la norma. En la figura 3.6 se observa la distribución de tamaño de partícula del humo de sílice, mediante la difracción de luz laser. La densidad se obtuvo de acuerdo con los procedimientos descritos por ASTM C-188-95 (2003).

Tabla 3.5. *Composición química y densidad del humo de sílice.*

ANÁLISIS QUÍMICO	
Compuestos	Humo de sílice (%)
SiO ₂	96.9
Al ₂ O ₃	0.2
Fe ₂ O ₃	0.1
Suma (SiO₂+ Al₂O₃+ Fe₂O₃)	97.2
CaO	0.8
MgO	0.5
SO ₃	0.3
K ₂ O	0.7
Na ₂ O	0.2
Pérdida por Ignición	0.3
Suma	100.0
Densidad (g/cm³)	2.20

3.3.3.1. Distribución de tamaño de partículas de los materiales cementantes.

En la figura 3.6, se presentan las distribuciones de tamaños de partículas para todos los cementos Portland utilizados en la segunda etapa del programa experimental, así como para la ceniza volante y el humo de sílice utilizados en la tercera etapa. Esta figura muestra que los cementos Portland tienen tamaño de partículas promedio muy similares entre sí, entre 10µm a 15µm y congruentes con los tamaños promedio típicos de los cementos; mientras que la ceniza volante y el humo de sílice presentan tamaños de 90µm y 7µm, respectivamente. Los tamaños de las partícula de humo de sílice, por lo

general, son extremadamente pequeños, con más del 95% de partículas menores que 1 μm , y las mediciones realizadas mediante difracción láser pueden verse afectadas por la preparación de las muestras que no alcanzan a romper las fuerzas de aglomeración. El tamaño de partícula es importante para las contribuciones físicas y químicas dentro de la masa de concreto, de igual manera que el agregado fino llena los espacios entre los agregados gruesos, el humo de sílice llena los espacios entre los granos de cemento, incluso si el uso de humo de sílice no reacciona químicamente, el efecto micro-filler podría traer importantes beneficios para el concreto⁽⁷¹⁾. En el caso de la ceniza volante se pudiera considerar que es una ceniza gruesa, ya que diversas cenizas utilizadas en los Estados Unidos y Canadá presentan distribuciones de tamaños de partículas con el 75 % del material menor que 45 μm y la utilizada en este proyecto presenta tamaños mayores que 170 μm , para el 75 % del material⁽⁷⁰⁾

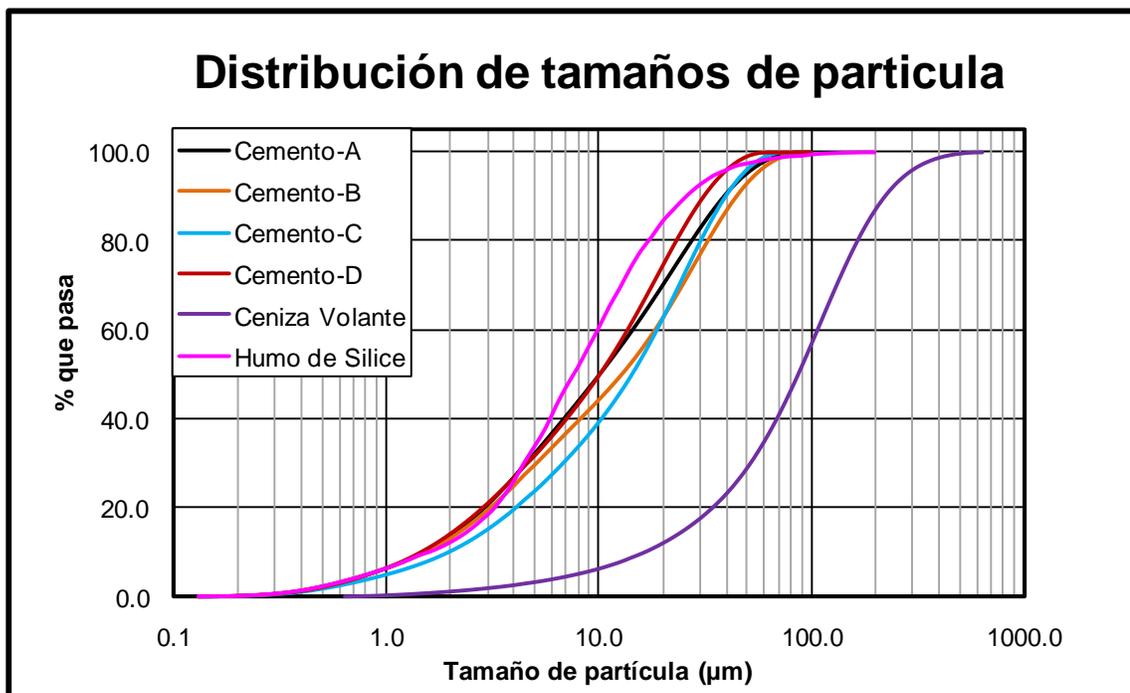


Figura 3.6. Distribución de tamaño de partícula para los cementos obtenida mediante difracción de luz láser.

3.3.4. Arena de sílice estándar.

Se habla de arena de sílice estándar, comercialmente disponible en el país para la fabricación de mezclas de mortero y que cumple la norma ASTM C 778. Esta arena se utilizó en la primera etapa experimental, para evaluar la eficiencia en las pruebas de compatibilidad cemento-aditivo. Las propiedades físicas se presentan en la tabla 3.6. Los resultados de densidad obtenidos se realizaron con la ayuda del frasco de Chapman, siguiendo los procedimientos descritos en ASTM C-188-95 (2003). El porcentaje de absorción se determinó por secado a 110°C, a partir de la condición de saturado superficialmente seca.

Tabla 3.6. *Propiedades físicas de la arena de sílice (arena estándar).*

Propiedad	Arena estándar
Densidad (g/cm ³)	2.60
Absorción (%)	0.00

3.3.5. Agregado calizo.

Se empleó agregado calizo fino, del área metropolitana de Monterrey N.L., cuyas propiedades físicas fueron determinadas en el departamento de tecnología del concreto de la UANL, y que se presentan en la tabla 3.7. Este agregado cumple la norma ASTM C-33 ⁽⁶³⁾. El tamaño máximo nominal fue de 5mm (arena # 4), que se definió tomando como referencia el mismo tamaño máximo de agregado ligero utilizado en el resto de las mezclas de mortero. Los resultados del análisis granulométrico se muestran en la figura 3.7. Las propiedades físicas se obtuvieron de acuerdo con las siguientes normas ASTM: densidad C 127-07, absorción C 128-07, peso volumétrico C 138/C 138M-08 y análisis granulométrico C 136-06.

Tabla 3.7. *Propiedades físicas del agregado fino calizo.*

Propiedad	Agregado fino calizo
Densidad (kg/m ³)	2652.50
Módulo de finura	3.90
Absorción (%)	1.32
Peso volumétrico seco suelto (kg/m ³)	1634.40
Peso volumétrico varillado seco (kg/m ³)	1902.50

3.3.6 Agregado ligero.

Las propiedades de los agregados ligeros a utilizarse en la etapa 2 son:

- *Arcilla expandida.*- tamaño máximo nominal de 5mm (pasa la malla # 4), para emplearse como agente de curado interno en las mezclas de mortero.
- *Pumicita.*- *agregado* de origen volcánico, con tamaño máximo nominal de 5mm (pasa la malla # 4), empleado como agente de curado interno en mezclas de mortero.

Las propiedades físicas de los agregados ligeros se presentan en la tabla 3.8. Los resultados de los análisis granulométricos y la tasa de desorción aparecen en las figuras 3.7 y 3.8 respectivamente. Las propiedades físicas se obtuvieron de acuerdo con las siguientes normas ASTM: densidad C 127-07, absorción C 128-07, peso volumétrico C 138/C 138M-08 y análisis granulométrico C 136-06.

Tabla 3.8. *Propiedades físicas de los agregados ligeros.*

Propiedad	Arcilla expandida	Pumicita
Densidad (kg/m ³)	1851.0	1476.0
Módulo de finura	4.4	5.3
Absorción (%)	25.4	31.5
Peso volumétrico seco suelto (kg/m ³)	996.5	470.7
Peso volumétrico varillado seco (kg/m ³)	1178.5	509.6

3.3.6.1 Análisis granulométrico de los agregados utilizados en las mezclas de mortero.

El análisis granulométrico de los agregados empleados para la fabricación de los morteros utilizados en la etapa 3 se muestra en la figura 3.7.

Los agregados se utilizaron en los morteros con la distribución granulométrica tal y como se recibieron del proveedor, desechando sólo aquellas partículas con tamaños superiores a 4.75mm (malla #4), por el hecho de que partículas más finas de agregado ligero dentro de una matriz cementante utilizadas como agentes de curado interno proporcionan mayor eficiencia para la hidratación del cemento. Se observó que sólo el agregado calizo cumplió lo establecido en la norma ASTM C 33, y que los agregados de arcilla expandida y pumicita quedaron fuera del límite inferior establecido por dicha norma; por consecuencia, esto representa un aumento en el módulo de finura del material, ya que incrementa el número de partículas gruesas. Se aprecia que el módulo de finura es mayor para el agregado pumicita que para la arcilla expandida. Cuatro aspectos importantes del agregado ligero que contribuyen al curado interno son: el tamaño de partícula, la distribución granulométrica, la absorción

y la desorción. Estas propiedades serán importantes para optimizar el efecto del curado interno.

Tabla 3.9. Resumen numérico en porciento del análisis granulométrico de los agregados utilizados en la etapa tres.

Peso del Material (muestra) = 3000 g

Tamiz	Pasa Caliza (%)	Pasa Arcilla (%)	Pasa Pumicita (%)	ASTM C-33	
				Límite	
				Sup.	Inf.
# 4	100.0	100.0	100.0	100	95
# 8	80.0	76.3	56.0	100	80
# 16	55.6	38.2	29.2	85	50
# 30	35.2	21.1	17.9	60	25
# 50	21.1	14.4	13.5	30	10
# 100	10.0	11.0	11.6	10	2
P # 100	0.0	0.0	0.0	0	0

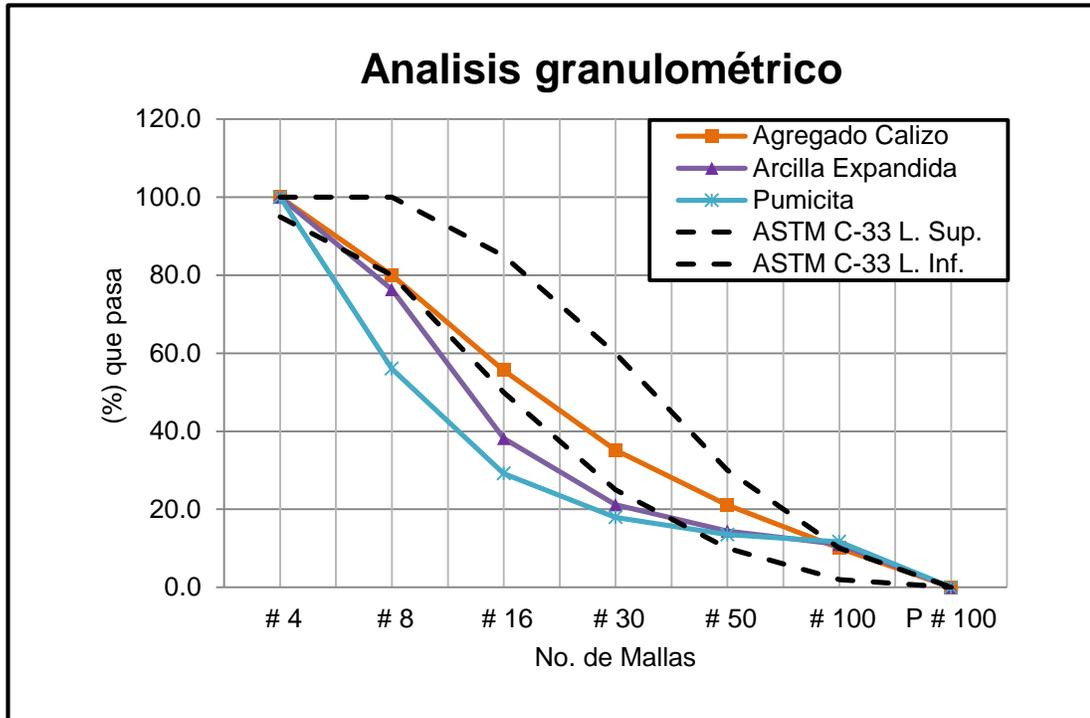


Figura 3.7. Análisis granulométrico de los agregados utilizados en las mezclas de mortero en la etapa tres.

Partiendo de un agregado con la misma masa, se puede lograr una hidratación más eficiente al utilizar agentes de curado interno más finos ^{(46), (47)}. Para optimizar el desempeño del agente de curado interno en relación con la retracción autógena, la capacidad de absorción de agua del agregado debe ser lo más alta posible. La fineza ⁽⁶⁰⁾, la resistencia al desgaste por impacto y abrasión y su capacidad de desorción también son propiedades importantes para la efectividad del material.

3.3.7 Desorción de los agregados ligeros utilizados en las mezclas de mortero.

A partir del gráfico expuesto en la figura 3.8, es posible determinar la desorción de cada agregado ligero, cuando se somete a diferentes condiciones de humedad relativa. La cantidad de agua que retiene el agregado como

porcentaje de su peso seco, es una relación directa de la desorción del material.

La desorción es una medida para evaluar la velocidad y la cantidad de agua que liberan los agregados ligeros saturados al estar sometidos a diferentes humedades relativas. Para medir esta propiedad se utilizaron las siguientes sales: sulfato de potasio, (K_2SO_4 – 97.23% HR), nitrato de potasio (KNO_3 – 91.92% HR), cloruro de potasio (KCl – 84.17% HR) y cloruro de sodio (NaCl – 75.25% HR). El primer paso a seguir en el estudio de desorción de los agregados ligeros fue la saturación en un frasco al 100% de humedad relativa (HR), similar a las condiciones del concreto fresco cuando se coloca en la obra. Para intentar representar el grado de humedad que actúa sobre el agregado, una vez que comienza la hidratación del cemento, conforme se reduce la humedad relativa local se utilizó una serie de sales que fijaron la humedad relativa del ambiente cerrado en el que se colocó el agregado. La justificación para la utilización de estas humedades relativas se basa en que para humedades inferiores que el 80%, en los capilares, la hidratación del concreto se detiene (Powers, 1947). A pesar de que ambos agregados presentan tasas de desorción similares, la pumicita retiene mayor cantidad de agua al inicio del estudio, aspecto que se reflejó de manera favorable en los resultados de retracción autógena.

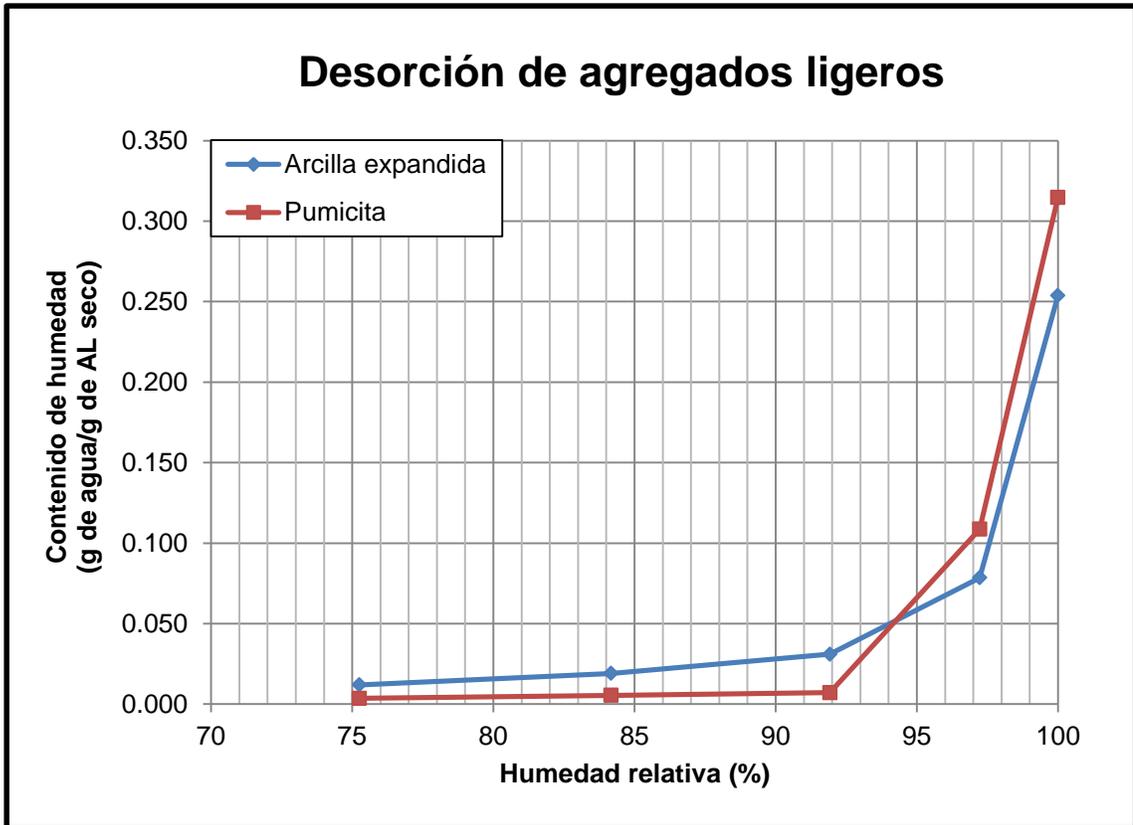


Figura 3.8. Desorción de los agregados ligeros utilizados en las mezclas de mortero en la etapa tres.

3.3.8. Aditivo reductor de agua de alto rango y plastificante de alto desempeño

Los aditivos utilizados para mejorar las características de las mezclas en la segunda etapa del trabajo experimental fueron:

- Aditivos reductores de agua de alto rango y plastificante de alto desempeño base policarboxilatos modificados, obtenidos de diferentes compañías y comercialmente disponibles en el país, que cumplen la norma ASTM C-494 ⁽⁶⁰⁾. La densidad y el porcentaje de sólidos contenidos en los aditivos se encuentran en la tabla 3.10. Para determinar la densidad se empleó una probeta graduada, en la que se introdujo aditivo hasta la marca de 10 mL; después se pesó para

determinar su densidad. Para determinar el porcentaje de sólidos contenidos en el aditivo se sometió una muestra de este material a una temperatura de 105 °C por 24 horas, con el fin de evaporar el agua en su contenido.

Se ha demostrado en estudios previos que la incorporación de aditivos reductores de agua, de alto rango base policarboxilatos, afecta ligeramente la retracción por secado y no tiene ninguna influencia sobre la expansión o retracción autógena^{(64), (65)}. Para la fabricación de los morteros, en condiciones de curado interno, se utilizó un solo aditivo (aditivo IV) y la dosificación fue similar en todas las mezclas; por lo tanto, se considera que el comportamiento es similar para todas las mezclas con curado interno.

Tabla 3.10. *Propiedades físicas de los aditivos.*

Propiedad	ADITIVOS			
	I	II	III	IV
Densidad (kg/m ³)	1030	1060	1050	1070
% de sólidos	22	29	77	41

3.3.9. Agua para las mezclas de pastas y morteros

Se utilizó agua destilada en todas las mezclas, a una temperatura de 21 ± 1°C.

CAPÍTULO 4

MÉTODO EXPERIMENTAL

4.1 Introducción.

En este capítulo se describen las pruebas necesarias para determinar el mejor cemento y el mejor aditivo, que se utilizarán posteriormente en la evaluación de los agregados ligeros, bajo condiciones de curado interno. Después de concluir la etapa 2 y al haber obtenido el cemento y el aditivo que presentaron mejor eficiencia en compatibilidad, se elaboraron mezclas de mortero teniendo una relación $A/Cem = 0.35$ con y sin puzolanas (CV y HS), utilizando agregado fino de peso normal (caliza) y agregados finos de peso ligero saturados (arcilla expandida y pumicita). El uso de agregados finos ligeros en el mortero fue con el fin de evaluar su desempeño como agente de curado interno y mitigar la retracción autógena. Los agregados ligeros fueron saturados antes de ser introducidos al mortero durante la etapa de mezclado y representaron el 20% del total de volumen de agregados en la mezcla.

El diseño de las mezclas de mortero se realizó respetando un volumen constante de pasta, conforme a lo establecido en ASTM C-109 y tomando en cuenta el agua en el aditivo como agua de reacción. Se realizó la corrección necesaria en la relación A/Cem , y los sólidos en el aditivo se compensaron en el agregado, para mantener constantes las cantidades de agua y cementante.

4.2 ETAPA 2 Compatibilidad cemento – aditivo

En esta etapa, “etapa 2”, se determinó la eficiencia en compatibilidad de cuatro aditivos y cuatro cementos Portland propuestos; esto con base en pruebas en estado fresco y endurecido sobre pastas y morteros fabricados con arena estándar y con relaciones agua cementante bajas ($A/Cem = 0.35$). Cada

cemento se combinó con cada uno de los aditivos en estudio. En la figura 4.1 se ilustra el programa experimental utilizado en las pastas, en la Etapa 2.

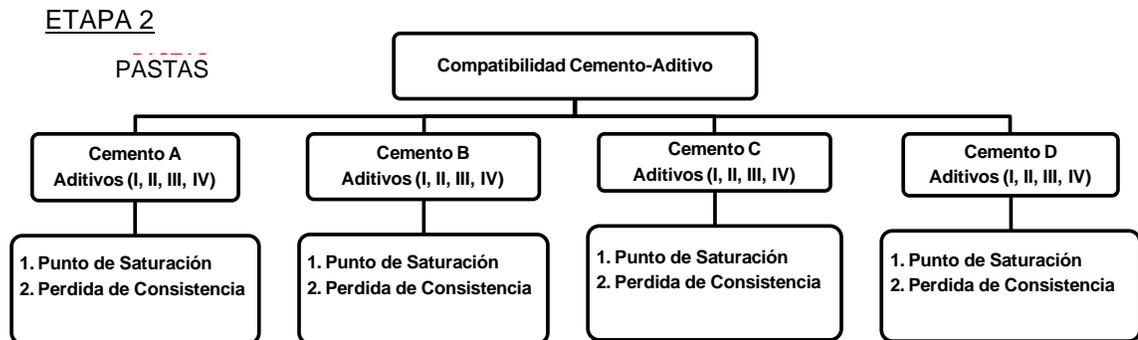


Figura 4.1. Esquema descriptivo de pruebas realizadas a las pastas de cemento Portland.

El uso de aditivos reductores de agua de alto rango base policarboxilatos es necesario en mezclas de concretos con características de alto comportamiento. La evaluación de los mismos debe hacerse en función de sus propiedades reológicas y mecánicas, utilizando mezclas de pastas y morteros con el fin de determinar aquellos que presenten la mejor eficiencia en compatibilidad.

Las mezclas en la etapa 2 se fabricaron en una revolvedora con capacidad de 4 L, de acuerdo con ASTM C 203, fijando una relación a/c = 0.35 y tomando en cuenta el agua del aditivo como agua de reacción. Se realizó la corrección necesaria en la relación A/C, y los sólidos en el aditivo se compensaron en el agregado para mantener constantes la relación A/C.

4.2.1 Pruebas en pastas.

4.2.1.1 Puntos de saturación.

El punto de saturación de los aditivos en pastas, está definido⁽⁶³⁾ como la dosificación óptima del aditivo en la pasta, para la cual ya no presenta un aumento significativo en su fluidez. Gomes et al.⁽⁶³⁾ Propusieron un método para determinar la dosificación óptima de aditivo (punto de saturación) basado en el tiempo de fluidez, empleando el cono de Marsh con una abertura de 8mm, para pastas de cemento, el cual se ilustra en la figura 4.2. En este método se determina el ángulo interno de la curva de tiempo de fluidez Vs el consumo de aditivo. El punto correspondiente a un ángulo interno de $140^\circ \pm 10^\circ$ es tomado como punto de saturación.

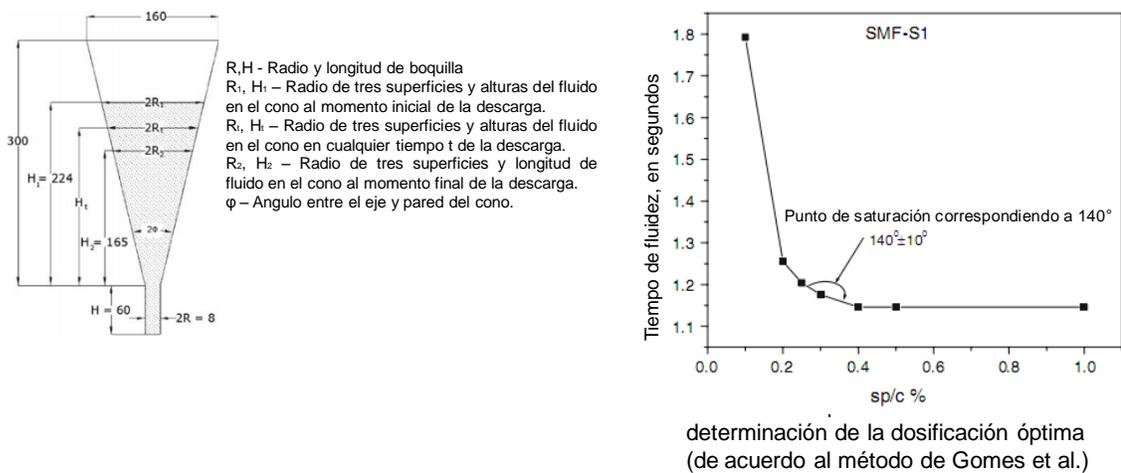


Fig. 4.2 Geometría y dimensiones del cono de Marsh en milímetros⁽⁶³⁾.

Las mezclas de pastas se elaboraron con CPC 30R y aditivos reductores de agua de alto rango base policarboxilatos, de acuerdo con la tabla 4.1.

Para cada una de las combinaciones o SC, se realizaron un mínimo de 6 mezclas, para obtener el punto de saturación. Las dosificaciones de aditivo en cada una de las mezclas fueron: 2.5, 5.0, 7.5, 10.0, 12.5, 15.0 mililitros por cada

kilo de cemento (mL/kgC). En aquellas combinaciones que demandaron más aditivo, para fluir a través del cono de Marsh, los consumos fueron del orden de 25, 30, 35, 40, 45, 50 y 55 mL/kgC (figura 4.3).

El cono de Marsh, además, puede utilizarse para el estudio de pérdida de fluidez con el paso del tiempo, fluidez sobre morteros, optimización de la pasta de cemento con aditivos minerales y la compatibilidad de cemento y superplastificante.

4.2.1.2 Procedimiento de mezclado para la obtención de puntos de saturación.

Se diseñaron y calcularon las cantidades necesarias de los componentes para producir un volumen de 1.8 L de pasta, de acuerdo con la capacidad del cono de Marsh. Las mezclas se realizaron a una temperatura de laboratorio de $23 \pm 1^\circ\text{C}$, considerando:

- Relación agua cemento (A/C) = 0.35
- Densidades de los componentes
- Agua contenida en el aditivo (%)
- Diferentes dosificaciones de aditivos.

Para la fabricación de las pastas de cemento se utilizó un equipo de mezclado que cumple con lo señalado en ASTM C 203

El cono de Marsh utilizado cumple la geometría señalada por Gómez et al.⁽⁶³⁾

Antes de dar inicio con el mezclado se realizaron los siguientes pasos:

1. Homogenizado del aditivo y agua de reacción en recipiente con capacidad de 1L.
2. Se vertió el cemento dentro del tazón que contiene la solución agua-aditivo (señalado en el paso 1) y se comenzó con el proceso de mezclado.

Tabla 4.1. *Tiempos de mezclado para las bachadas de pastas conforme a uniformidad presentada durante el mezclado.*

TIEMPOS INDIVIDUALES	DESCRIPCIÓN	TIEMPO ACUMULADO
2:00	Mezclado en velocidad baja (1)	2:00
0:30	Raspado de paredes del tazón	2:30
2:30	Mezclado en velocidad media (2)	5:00
0:30	Raspado de paredes del tazón	5:30
2:30	Mezclado en velocidad alta (3)	8:00

El tiempo máximo para transportar la pasta fabricada al cono de Marsh y comenzar a cronometrar el tiempo que tarda en fluir a través del mismo por acción de caída libre, fue de 45 segundos.

El tiempo se registró con ayuda de un cronómetro, al momento en que la pasta llenaba una probeta en los niveles de: 250mL, 500mL, 750mL, y 1000mL.

Con los puntos de saturación obtenidos se realizó una evaluación para definir el sistema cementante más apropiado en términos de fluidez y dosificación de aditivo de cada una de las combinaciones del sistema, optimizando propiedades en estado fresco y endurecido además de mejorar el aspecto de costo-beneficio. Para ello se realizó pérdida de consistencia en pastas y pruebas en morteros de Cemento Portland.



Figura 4.3. *Pasta de CPC 30R con con aditivo*

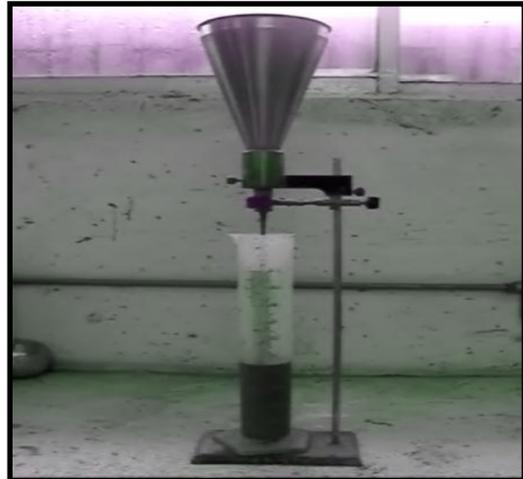


Figura 4.4. *Fluidez de la pasta a través del cono de Marsh.*

4.2.1.3. Pérdida de consistencia.

Con los puntos de saturación que se obtuvieron a partir de máxima fluidez y mínima dosificación de aditivo, se fabricaron mezclas de pasta de cemento Portland, de cada una de las combinaciones presentadas en la figura 4.1. El ensayo consistió en introducir estas mezclas de pastas en recipientes cilíndricos de 15 centímetros de diámetro y colocarlos sobre un equipo de rodillos giratorios que le imprimían una rotación de 80 rpm a los recipientes utilizados (figura 4.5). Con la ayuda del cono de Marsh (figura 4.4) y un cronometro se registró el tiempo de fluidez a intervalos de 30 min, a partir de la hora de contacto cemento-agua-aditivo (pérdida de consistencia), hasta que la mezcla de pasta dejó de fluir a través del cono (figura 4.4).



Figura 4.5. Rodillos giratorios.

4.2.2. Pruebas en morteros.

En todo estudio sobre SC base cemento Portland, es importante considerar la resistencia a la compresión, ya que ésta es una de las principales razones por la que el cemento Portland ha convertido al concreto en el principal material de construcción del mundo. Para determinar esta propiedad y evaluar la compatibilidad de los diferentes SC con base en esta propiedad se fabricaron morteros manteniendo fijo el volumen de pasta, que fue establecido de acuerdo con las proporciones, en volumen, especificadas en ASTM C-109-07. Las mezclas de mortero con las diferentes marcas de CPC 30 R, arena estándar y aditivos se fabricaron conforme a las combinaciones presentadas en la figura 4.1, y teniendo una relación $A/C = 0.35$. Las dosificaciones de aditivo se basaron de acuerdo con los puntos de saturación previamente obtenidos en pastas y el agua contenida en ellos se consideró como agua de reacción, con el fin de evaluar su comportamiento en las propiedades de contenido de aire, fluidez, peso volumétrico, desarrollo de resistencia, tiempos de fraguado, pérdida de consistencia y temperatura. El número de especímenes mínimo en cada prueba de resistencia a la compresión fue de 2. Las proporciones de los ingredientes se ilustran en la tabla 4.2.

Tabla 4.2. Proporciones de ingredientes en la fabricación de morteros dentro de la etapa de compatibilidad cemento-aditivo.

Materiales secos, sin agua de absorción.

Diseño de morteros "Compatibilidad cemento-aditivo"				
Mezcla	Componentes (kg/m³)			
	CPC	Agua	A.Sílica.	Aditivo
A - I	622.2	212.3	1535.4	7.022
A - II	621.7	212.7	1535.4	6.508
A - III	607.3	208.9	1535.4	15.280
A- IV	622.2	215.4	1535.4	3.687
B - I	623.3	212.6	1535.4	7.034
B - II	623.0	213.9	1535.4	5.59
B - III	605.0	207.3	1535.4	18.266
B -IV	622.3	214.4	1535.4	5.224
C - I	628.5	217.7	1535.4	2.902
C - II	627.2	215.5	1535.4	5.314
C - III	604.8	206.4	1535.4	21.912
C- IV	627.2	217.2	1535.4	3.716
D - I	627.6	215.2	1535.4	5.795
D - II	625.7	212.4	1535.4	8.733
D - III	593.8	200.3	1535.4	31.672
D - IV	626.1	215.6	1535.4	5.565

Donde CPC y A.Sílica, son los pesos de cemento Portland compuesto 30 y arena de sílice estándar, respectivamente.

4.2.2.1. Procedimiento de mezclado de morteros.

El procedimiento de mezclado para los morteros en la etapa de compatibilidad cemento-aditivo, se realizó conforme a la norma ASTM C-305.

4.2.2.2. Contenido de aire.

Se determinó conforme a la norma AASHTO T199 ⁽⁶⁴⁾ (Figura 4.6).



Figura 4.6. Equipo para la medición del contenido de aire AASHTO T199

4.2.2.3. Fluidez.

Ésta se determinó de acuerdo al método de prueba de ASTM C-1437-07 ⁽⁶⁵⁾ (Figura 4.7).



Figura 4.7. Fluidez del mortero

4.2.2.4. *Peso volumétrico de morteros.*

Para determinar el peso volumétrico se partió del volumen de los moldes cúbicos. Después del llenado de los moldes con mortero, se enrasó para obtener el peso del material contenido y se determinó su peso volumétrico, utilizando la relación peso del mortero, entre el volumen del cubo.

4.2.2.5. *Tiempos de fraguado.*

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 el que la mezcla pierde 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 se pierde por completo; este estado es denominado fraguado final. Para determinar estos parámetros en las mezclas estudiadas (tiempo de fraguado inicial y final), se utilizó un penetrómetro con 6 agujas de penetración, utilizando agujas con área de $1, 1/2, 1/4, 1/10, 1/20$ y $1/40$ in², de acuerdo con el método de prueba de resistencia por penetración ASTM C 403-06 (figura 4.8).



Figura 4.8 *Tiempos de fraguado por penetración.*

4.2.2.6. Pérdida de consistencia.

Esta propiedad se determinó tomando como referencia el momento de contacto agua-cemento y empleando la mesa de fluidez descrita en ASTM C-1437-07. Se determinaron mediciones de fluidez del mortero a diferentes tiempos, después de la hora de contacto. Con el tiempo transcurrido desde la hora de contacto agua-cemento y siguiendo los procedimientos de fluidez para morteros, de acuerdo con la norma ASTM C-1437-07, se evaluó cómo, en la medida en que trascurría el tiempo, se perdía fluidez en el mortero (figura 4.9).



Figura 4.9 Pérdida de consistencia en los morteros.

4.2.2.7. Temperatura.

La temperatura en la mezcla de mortero se determinó inmediatamente después de su fabricación, con la ayuda de un termómetro con precisión de 0.5 °C, de acuerdo con la norma ASTM C-1064.

4.2.2.8 Fabricación de especímenes cúbicos.

Las mezclas de mortero se elaboraron en una revolvedora de 4 litros de capacidad, como las descritas en ASTM C 305, para posteriormente fabricar 3 especímenes cúbicos por edad del mortero en estudio, de acuerdo con la norma ASTM C-109-07 (ver figura 4.10).



Figura 4.10. *Desarrollo de resistencia a la compresión.*

4.2.2.9. Curado de especímenes cúbicos.

Algunos especímenes (48) se mantuvieron 12 horas en el molde, a temperatura ambiente del laboratorio $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$, después de su fabricación y posteriormente fueron ensayados para determinar su resistencia a la compresión. El resto de los especímenes se desmoldó a las 24 horas después de su fabricación y fueron sumergidos en agua, a una temperatura de $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$, donde permanecieron por un periodo de 1,3,7, 14 y 28 días de edad, según el método de prueba para la resistencia a la compresión de cubos de mortero ASTM C-109-07 (figura 4.10). Todos los especímenes fueron protegidos del intercambio de humedad durante el tiempo que permanecieron en sus moldes, cubriéndolos con bolsas de plástico.

4.2.2.10 Desarrollo de resistencia a la compresión

El ensayo de resistencia a la compresión sobre cubos de morteros se realizó a una velocidad 120 kg/s utilizando la máquina universal INSTRON con capacidad para 200 toneladas.

4.3 ETAPA 3.- Curado interno.

4.3.1 Diseño de mezclas de mortero para evaluar los agregados ligeros como agentes de curado interno con y sin puzolanas.

Con el cemento y el aditivo que presentaron mejor eficiencia en cuanto a propiedades mecánicas y reológicas, en la etapa de compatibilidad, se diseñó la fracción de pasta, y aplicando el método de volúmenes absolutos, de acuerdo con el ACI 211.1 se diseñaron y fabricaron 9 mezclas de mortero, con y sin agregados ligeros, y con y sin puzolanas (figura 4.11) con una relación $A/Cem = 0.35$ respetando los volúmenes de pasta y agregados conforme a la norma ASTM C- 109. Se evaluó el desempeño de los agregados ligeros como agentes de curado interno en sus propiedades de estado fresco y endurecido, mediante pruebas de retracción química y autógena principalmente. El porcentaje de agregado ligero utilizado en las mezclas fue del 20%, en sustitución, en volumen, por la arena caliza. Los agregados en estudio fueron arcilla expandida y pumicita, ambos saturados e introducidos durante el mezclado. En el diseño de las mezclas, los volúmenes en cada uno de los ingredientes utilizados (agua, cementante, aditivo, agregados) se redujeron cuando se incorporaron puzolanas en sustitución por masa del cemento Portland, con el fin de compensar el aumento en volumen provocado por dicho material cementante suplementario (MCS) para mantener los porcentajes de pasta y agregados originales. La cantidad de MCS utilizada fue la que normalmente se utiliza en la industrial del concreto y está dada en un 15% y un 8% de CV y HS, respectivamente, en sustitución por masa de cemento Portland.

El agua en el aditivo se consideró como agua de reacción para hacer la corrección necesaria en la relación A/Cem, y los sólidos en el aditivo fueron compensados en el agregado, para mantener constantes los consumos de cementante, agua y aditivo.

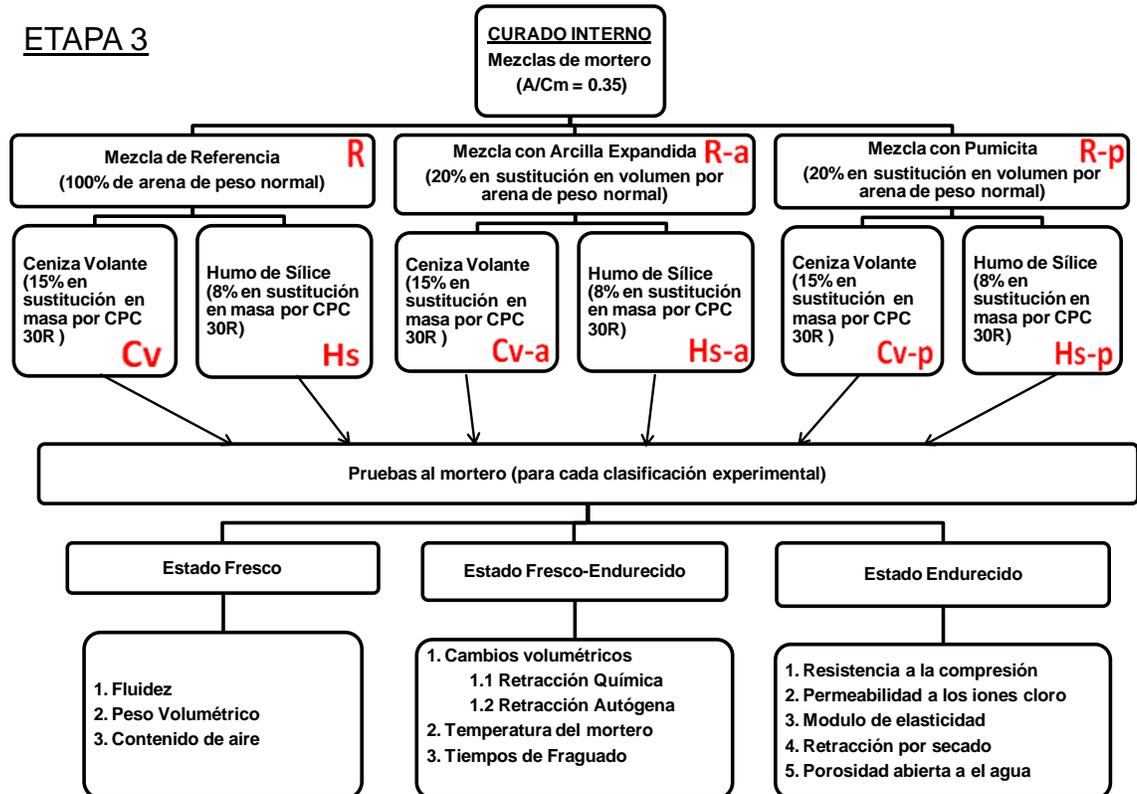


Figura 4.11. Esquema descriptivo de pruebas realizadas a morteros en la etapa de curado interno. Donde R, Cv, Hs, R-a, Cv-a, Hs-a, R-p, Cv-p, Hs-p es la nomenclatura empleada para describir la mezcla de referencia, mezcla de referencia con ceniza volante, mezcla de referencia con humo de sílice, mezcla con arcilla, mezcla con arcilla y ceniza volante, mezcla con arcilla y humo de sílice, mezcla con pumicita, mezcla con pumicita y ceniza volante, mezcla con pumicita y humo de sílice, respectivamente.

4.3.2. Fabricación de mezclas de mortero.

Al establecer las proporciones de los ingredientes definitivos se fabricaron las mezclas de mortero y se determinaron sus propiedades en estado fresco y endurecido. Las proporciones de las mezclas de mortero elaboradas se presentan en la tabla 4.3. Para cada una de las mezclas se elaboraron bachadas de 50 L en una mezcladora tipo trompo, de 32 revoluciones por minuto y capacidad para 80 L.

Tabla 4.3. Proporciones de los componentes de las mezclas de morteros, materiales secos sin agua de absorción

Mezcla	Componentes (kg/m ³)							
	CPC	C.V.	H.S.	Aditivo	A.F. C	A. LIG. 1	A. LIG. 2	Agua
R	619.0	0.0	0.0	4.0	1445.6	0.0	0.0	214.6
CV	513.4	90.6	0.0	3.9	1445.6	0.0	0.0	209.2
HS	561.7	0.0	48.8	3.9	1445.6	0.0	0.0	211.6
R-A	619.0	0.0	0.0	4.0	1156.5	201.7	0.0	214.6
CV-A	513.4	90.6	0.0	3.9	1156.5	201.7	0.0	209.2
HS-A	561.7	0.0	48.8	3.9	1156.5	201.7	0.0	211.6
R-P	619.0	0.0	0.0	4.0	1156.5	0.0	160.9	214.6
CV-P	513.4	90.6	0.0	3.9	1156.5	0.0	160.9	209.2
HS-P	561.7	0.0	48.8	3.9	1156.5	0.0	160.9	211.6

Donde CPC, C.V., H.S., A.F. C., A. LIG 1., A. LIG 2., son los pesos de cemento Portland compuesto 30R, ceniza volante, humo de sílice, agregado fino calizo, arcilla expandida y pumicita respectivamente.

4.3.3. Procedimiento de mezclado.

4.3.3.1. *Procedimiento de mezclado para morteros en la etapa de curado interno:*

Procedimiento para mezclas sin agregado ligero.

- a) Previo al inicio del mezclado:
- 1 Se separó aproximadamente un 5% del agua total a utilizar en la mezcla y se homogenizó aproximadamente un 2% del total ésta con el aditivo superfluidificante en un recipiente con capacidad suficiente para contenerlos. El 3% de agua restante se utilizó para enjuagar el recipiente que contenía la solución agua-aditivo. Posterior a esto, se añadió esa agua a la mezcla.
 - 2 Se humedeció todo el equipo a utilizar en la fabricación de la mezcla, incluyendo las paredes internas del tambor de la mezcladora.
 - 3 Se depositó la arena dentro del tambor de la mezcladora y se añadió un poco de agua del 95% restante total de la mezcla, para que la arena quedara aproximadamente en la condición de saturado superficialmente seco (sss). Inmediatamente después se mezcló durante 30 segundos y se detuvo el mezclado.

b) Inicio del mezclado:

Tabla 4.4. Tiempos de mezclado para las bachadas de mortero sin agregado ligero.

TIEMPOS INDIVIDUALES	DESCRIPCIÓN	TIEMPO ACUMULADO
3:00	Depositar el cementante dentro de la mezcladora y mezclar.	3:00
1:00	Sin detener el mezclado verter el 95% del agua restante total.	4:00
2:30	Detener el mezclado, dejar en reposo, raspar las paredes interiores del tambor para despegar la posible aglomeración del mortero.	6:30
0:30	Adicionar la solución agua-aditivo y enjuagar el recipiente que contenía la solución con el 3% de agua mencionada en el paso 1.	7:00
4:00	Encender la mezcladora y continuar el mezclado.	11:00

Procedimiento para mezclas con agregado ligero

a) Previo al inicio de mezclado:

1. Se repiten los pasos del 1 al 3 señalados en el inciso (a) del punto 4.3.3.1., además:
2. Verter el agregado ligero saturado y mezclar durante 45 s. Al finalizar este lapso detener nuevamente el mezclado.

b) Inicio de mezclado:

Los tiempos de mezclado de los morteros con agregado ligero son los mismos que los que no incluyen agregado ligero (ver tabla 4.4).

4.3.4. Descripción de pruebas desarrolladas al mortero en la etapa de fresco.

4.3.4.1. *Fluidez.*

Este método de prueba se realizó en cada una de las mezclas (R, Cv, Hs, R-a, Cv-a, Hs-a, R-p, Cv-p Y Hs-p, descritas en la figura 4.11) tomando como referencia lo establecido en ASTM C 1437-07. Se modificó la placa circular rígida de acero con medidas originales de 255 ± 2.5 mm, como la descrita en ASTM C-230, por una tabla circular rígida de poliestireno de alta densidad con medidas de 500 ± 2.5 mm, debido a que la fluidez de algunas mezclas sobrepasaban las dimensiones del plato original. Esta placa modificada presenta una pequeña rugosidad al tacto, y comparada con la tabla descrita en ASTM C 230, existe una diferencia en reducción, entre un 8% y un 10% en morteros con fluidez de 140%.

4.3.4.2. *Peso volumétrico.*

El peso volumétrico se determinó utilizando el equipo y procedimiento de llenado, conforme a lo establecido en la norma ASTM C-185 ⁽⁵⁸⁾. El volumen y el peso del recipiente que contenía la muestra fueron parámetros que se utilizaron para obtener la masa unitaria del mortero en estado fresco en kg/m^3 . La masa de la muestra se obtuvo por diferencia de peso entre el recipiente lleno con mortero y el recipiente vacío.

4.3.4.3. *Contenido de aire en % AASTHO T-199.*

Éste se determinó conforme a lo establecido en la norma AASTHO T-199.

4.3.4.4. *Contenido de aire en % ASTM C-185-02.*

Siguiendo los procedimientos establecidos en la Norma ASTM C-185, se determinó el contenido de aire en las mezclas de mortero.



Figura 4.12. *Contenido de aire ASTM C-185-02* ⁽⁵⁸⁾

4.3.5. Pruebas al mortero en estado fresco-endurecido.

4.3.5.1. *Retracción química.*

Existen dos métodos para determinar la retracción química, según ASTM C-1608-07. Ambos métodos incluyen una fuente de agua externa en contacto con la muestra de la pasta de cemento, a diferencia de las pruebas de retracción

autógena donde las muestras se sellan para evitar el intercambio de humedad con el medio ambiente. Para este estudio, en particular, la retracción química del mortero se determinó mediante el método de prueba tipo A, descrito en ASTM C-1608-07, ajustando el ensayo de pasta a mortero. Para dicho ensaye fue necesario determinar el consumo de cementante en g, contenido en la muestra de prueba.



Figura 4.13. *Medición de retracción química mediante la diferencia de niveles de agua inicial y final consumido en una muestra de mortero contenida dentro de un frasco en baño maría (ASTM C-1608-07 prueba tipo A)*

4.3.5.2. *Retracción autógena.*

En la actualidad la retracción autógena sobre pastas de cemento y morteros puede determinarse mediante el método de prueba ASTM C 1698-09. Para este estudio, en particular, y debido a que durante la elaboración del proyecto no existía un método estandarizado para medir los cambios de longitud, a edades tempranas, se optó por utilizar dos transductores de deformación, con aproximación a microdeformaciones, como se ilustra en la fig. 4.14. La retracción autógena se midió inmediatamente después del mezclado del mortero (aproximadamente 5 minutos y continuando por 24 horas ó más) dentro

de los moldes de Nylamid, con dimensiones de 100 mm de diámetro por 200 mm de altura, registrando lecturas constantes a cada 5 segundos. Los moldes de Nylamid se colocaron dentro de un marco rígido de metal (figura 4.14). A cada molde se le colocó un plástico en su interior, después se llenó en 2 capas de aproximadamente igual volumen y compactando cada capa con 25 apisonamientos, mediante un neopreno con área de 6 cm². Una vez elaborado el cilindro, se colocó sobre la superficie superior de éste un plástico muy delgado, que hacía contacto directo con la mezcla de mortero, esto con el fin de que el mortero quedara completamente rodeado con material aislante y protegerlo contra la evaporación. A cada marco rígido se le acopló un indicador fijo de medición (transductor de deformación) que haría contacto con el plástico colocado previamente sobre la muestra de mortero, para determinar los cambios volumétricos lineales que sufre a edades tempranas. Los especímenes de prueba se colocaron dentro de un cuarto controlado por temperatura y humedad relativa en el rango de 20 ± 0.1 °C y $75 \pm 1\%$ respectivamente durante un período de tiempo de 36 horas.

Las posibles fuentes de error en la medición de la retracción autogéna incluyen:

- La fricción de las paredes del molde con el mortero, inhibiendo la retracción vertical (se utilizó un molde de material Nylamid con paredes internas aparentemente lisas y utilizando bolsas de plástico para disminuir la fricción).
- La posible expansión horizontal del molde, debida a las fuerzas ejercidas por el mortero.



Figura 4.14. *Medición de retracción autógena*

4.3.5.3. Temperatura del mortero, método del coffee cup.

Los cambios de temperatura en los especímenes pueden causar expansión y contracción térmica, la cual puede tener significantes efectos sobre las medidas de retracción autógena⁽⁶³⁾, por esta razón las variaciones de temperaturas producto del calor de hidratación generado en el mortero dentro de las primeras 36 horas de edad se midieron a cada 5 segundos, las mediciones se realizaron al centro de especímenes de mortero fresco colados inmediatamente después de su fabricación en moldes aislantes, con dimensiones internas de 15cm de diámetro y 7.5 de altura, mediante la ayuda de un aparato DATALOGGING de la marca SPER SCIENTIFIC, utilizando un termopar tipo K, como se observa en la figura 4.15. Las medidas para la evaluación de esta prueba se realizaron en condiciones ambientales controladas y similares para todas las pruebas.



Figura 4.15. *Análisis térmico del mortero, utilizando equipo marca SperScientific datalogging Thermometers.*

4.3.5.4. *Tiempos de Fraguado.*

Los tiempos de fraguado se determinaron por el método de resistencia a la penetración conforme a lo descrito en ASTM C-403. Para cada una de las mezclas se fabricaron 2 especímenes testigo (ver figura 4.8).

4.3.6. *Fabricación de especímenes.*

A continuación se presenta una lista de especímenes fabricados y sus dimensiones, que fueron utilizados para valorar el trabajo experimental desarrollado en la etapa 2. El número de especímenes mínimo de cada prueba fue de 2.

Tabla 4.5. Especímenes fabricados y sus dimensiones

Espécimen de prueba y dimensiones				
Sometido a prueba de:	Forma del espécimen	Material del molde	Dimensiones de probetas testigo, cm	Unidades de medición
Resistencia a la compresión y módulo de elasticidad	Cubicas	Bronce	5.08 X 5.08 X 5.08	MPa
Retracción química	Cilíndrica	Cristal	d = 2.5 ; h = 5	ml/g de cemento
Retracción autógena	Cilíndrica	Nylamin	d = 10 ; h = 20	µm
Temperatura	Cilíndrica	Poliestireno	d = 15 ; h = 7.5	°C
Tiempos de fraguado	Cilíndrica	Metálico	d = 15.5 ; h = 20	psi
Permeabilidad a los iones cloro	Cilíndrica	Metálico	d = 10 ; h = 20	Coloumb
Porosidad abierta a el agua	Cilíndrica	Metálico	d = 10 ; h = 20	%
Retracción por secado	Prismas	Metálico	2.5 X 2.5 X 28.0	µm
Pérdida de humedad	Cubicas	Metálico	2.5 X 2.5 X 2.5	%

Donde d y h, son el diámetro y altura del molde respectivamente.

4.3.7. Condiciones de curado.

a) Para especímenes de mortero en la etapa de fresco-endurecido.

Se mantuvieron los especímenes dentro de sus moldes, a una temperatura de laboratorio de 23 ± 1 °C y una humedad relativa (H.R.) del 60%.

b) Para especímenes de mortero en la etapa de endurecido

Se mantuvieron los especímenes en sus moldes por 24 horas y se protegieron del intercambio de humedad; posteriormente fueron desmoldados y curados en un cuarto de curado que cumple las especificaciones de ASTM C-531 (humedad relativa superior al 95% y temperatura de 23 ± 2 °C), donde permanecieron por un período de 1,3,7,14,28,56,90 y 180 días, según la prueba en estado endurecido correspondiente (figura 4.16)

4.3.8. Pruebas desarrolladas al mortero en estado endurecido.

4.3.8.1. Desarrollo de resistencia.

Los especímenes de mortero fueron ensayados en la máquina universal marca INSTRON, siguiendo los procedimientos descritos en ASTM C-109.



Figura 4.16. Máquina Universal INSTRON.

4.3.8.2. Permeabilidad a los iones cloro.

Se elaboraron cilindros de mortero de dimensiones de 10cm x 20cm de diámetro y altura respectivamente en moldes de metálicos (ver tabla 4.5), siguiendo los procedimientos de fabricación establecidos en ASTM C 31. Una vez que se elaboraron los especímenes y se desmoldaron, se siguió el procedimiento de curado descrito en ASTM C 511, donde permanecieron por un período de 28, 56, 90 y 180 días, según la prueba en estado endurecido correspondiente. Después de cumplir la edad establecida para cada prueba se realizaron cortes en los cilindros para obtener especímenes con dimensiones de 10 cm de diámetro y 5 cm de altura. Posteriormente fueron ensayados de acuerdo con la norma ASTM C 1202, para estimar la resistencia del mortero a

la penetración de cloruros. En la Figura 4.17 se muestra la manera como las rodajas del cilindro de concreto se montaron, de tal manera que la celda quedara sellada. Por un lado de la celda se vertió un 3.0% en peso de solución de NaCl y del otro lado una solución de 0.3 N de NaOH, hasta cubrir totalmente la superficie del espécimen. Se le aplicó corriente directa durante 6 h y se registraron los valores de carga aplicada. En la tabla 4.6 se presentan los parámetros de comparación.

Tabla 4.6. Estimación de la permeabilidad de cloruros, con base en la carga inducida, de acuerdo con la norma ASTM C-1202.

Carga inducida, C	Permeabilidad Iones Cl⁻
> 4000	Alto
2000 – 4000	Moderado
1000 – 2000	Bajo
100 – 1000	Muy Bajo
< 100	Despreciable

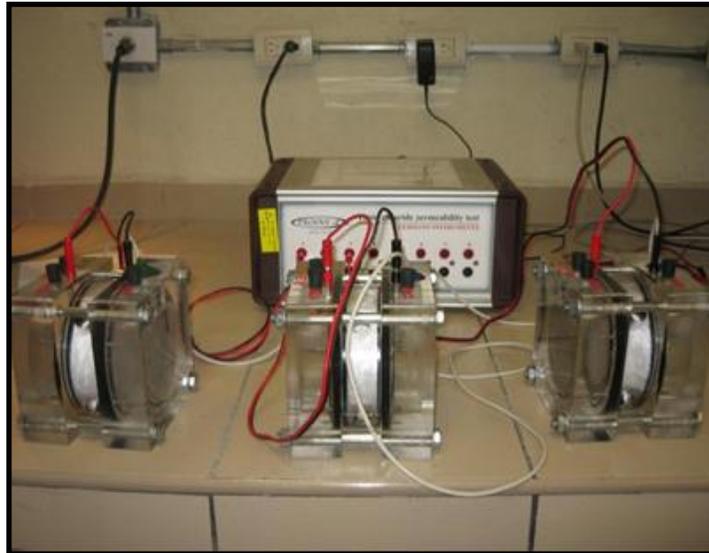


Figura 4.17. Prueba de permeabilidad a los iones cloro.

4.3.8.3. Porosidad abierta al agua.

Se elaboraron cilindros de mortero de dimensiones de 10cm x 20cm de diámetro y altura respectivamente, en moldes de metálicos (ver tabla 4.5), siguiendo los procedimientos de fabricación establecidos en ASTM C 31. Una vez que se elaboraron los especímenes y se desmoldaron, se siguió el procedimiento de curado descrito anteriormente, conforme a lo mencionado en ASTM C 511, en donde permanecieron por un periodo de 28, 56, 90 y 180 días, según la prueba en estado endurecido correspondiente. Después de cumplir la edad establecida para cada prueba, se realizaron cortes en los cilindros para obtener especímenes con dimensiones de 10 cm de diámetro y 5 cm de altura. Una vez elaborados los especímenes, se sometieron a vacío durante un lapso de 3 horas, y 1 hora en vacío sumergido en agua; se dejaron reposar al menos 24 horas en saturación y después se determinó su peso sumergido, saturado superficialmente seco, de acuerdo con lo establecido en ASTM C-830-00 (2011), se determinó el porcentaje de porosidad abierta al agua, lo que dio un índice de porosidad conectada al exterior.



Figura 4.18. *Determinación de la porosidad del mortero conectada al exterior.*

4.3.8.4. *Retracción por secado.*

Las mediciones de retracción por secado se hicieron en todas las mezclas fabricadas en la etapa 2. La retracción por secado de 3 barras con dimensiones de 285 x 25 x 25 mm se midieron hasta la edad de 90 días después de su curado inicial de 1 día en el molde y 27 días en agua saturada con cal, de acuerdo con ASTM C-157, para todas las mezclas. Los especímenes sometidos a mediciones de retracción por secado se almacenaron en un cuarto de secado, a una temperatura de 23 ± 2 °C y 50 ± 4 % de humedad relativa por un periodo de tiempo de 4, 7, 14, 28, 56, 112, 224 días, de acuerdo con la fecha de ensaye programado.



Figura 4.19. *Medición de retracción por secado*

CAPÍTULO 5

RESULTADOS EXPERIMENTALES

5.1 Introducción

En este capítulo se presentan los resultados de las pruebas consideradas en el programa experimental de la presente investigación:

5.2 Etapa 2.- Compatibilidad cemento-aditivo.

5.2.1 Pruebas en pastas.

La elaboración de las pastas se llevó a cabo de acuerdo con el punto 4.2.1, descrito en el capítulo anterior.

5.2.1.1. Punto de Saturación.

La fluidez en el concreto es un factor directamente relacionado con el comportamiento de la pasta de cemento ⁽⁹⁶⁾. Para optimizar el desempeño de la pasta en el concreto y sus propiedades, resulta de suma utilidad realizar un estudio de la pasta antes de la fabricación del concreto para obtener información relevante sobre la compatibilidad del cemento y aditivos. Estos estudios se pueden realizar a través del cono de Marsh, determinando el punto de saturación y el tiempo durante el cual el sistema cementante mantiene una consistencia apropiada.

Para obtener el punto de saturación del aditivo superplastificante, el procedimiento consiste en graficar para diferentes dosificaciones de aditivo el tiempo en segundos, en el eje de las ordenadas, contra la dosificación de aditivo en mililitros por kg de cementante total (mL/kgCT), en el eje de las abscisas. En este estudio se presentaron dos tipos de comportamientos en la compatibilidad cemento-aditivo, las que se reportaron como tipo A y tipo B. El criterio utilizado para definir el punto de saturación en cada una de estas

gráficas se determinó fijando un volumen de pasta de 750 ml para las mediciones en el cono de Marsh, y trazando una recta sobrepuesta en la mayoría de los puntos de la región III. A partir de esto, el punto de saturación será donde se pierda la coincidencia de esta recta, con respecto a la curva en la menor dosificación de aditivo.

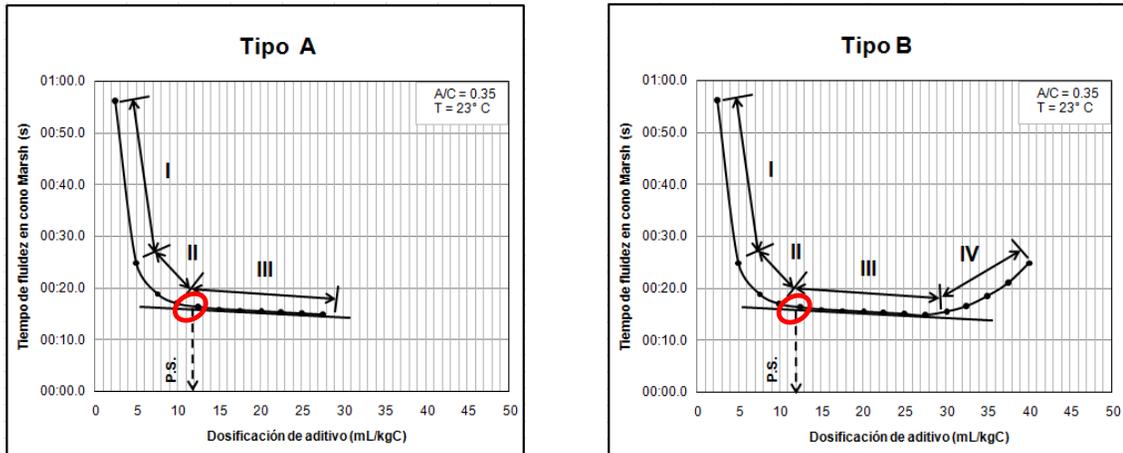


Fig. 5.1 Tipos de comportamiento reológicos en pastas presentados en este estudio.

Curva tipo A (fig. 5.1): En esta figura se representa un aumento continuo de la fluidez con relación a la dosificación de aditivo. Se observa que la característica típica de esta curva es que en la región III la fluidez es prácticamente constante.

Tipo B (figura 5.1): En esta figura se representa un aumento de la fluidez con relación a la dosificación de aditivo hasta un punto en donde esta comienza a disminuir (región IV).

Desde un punto de vista económico y ecológico, el punto de saturación tiene como propósito establecer la dosificación óptima para maximizar la fluidez. Para todas las pastas involucradas en esta etapa del estudio y para diferentes dosificaciones de aditivo por kilogramo de cemento, en las figuras de la 5.2 a la 5.5 se presenta el comportamiento reológico determinado a través del cono de Marsh.

Los comportamientos de las diferentes combinaciones cemento-aditivo fueron similares: muestran que la fluidez aumenta con el incremento en la dosificación del aditivo superplastificante, hasta el punto de saturación; después de esto, la curva casi se mantiene estable sin incremento de fluidez; sin embargo, existen diferencias en la eficiencia del aditivo cuando se combina con diferentes cementos, tal es el caso de las combinaciones A - I y C - I. El comportamiento de estos dos sistemas cementantes se ilustra en las gráficas 5.2 y 5.4 respectivamente. Comparando el comportamiento de estos dos sistemas se observa que para un mismo aditivo, el comportamiento reológico puede resultar muy diferente; esto se atribuye exclusivamente a las características del cemento como son: fineza, distribución de tamaños de partícula, composición química, composición de fases y estructura química de las fases presentes.

El superplastificante a utilizar será el que presente el punto de saturación más rentable, en términos de tiempo de fluidez y dosificación de aditivo, con base en las curvas, como las que se muestran en las figuras 5.2 a 5.5⁽⁶⁸⁾.

Otro aspecto importante que puede observarse en las figuras de la 5.2 a la 5.5 es la disminución en fluidez cuando se utiliza una dosificación de aditivo más allá del punto de saturación. Esto indica que para algunas combinaciones cemento-aditivo, las altas dosificaciones de aditivo pudieran reducir la fluidez de las pastas. En el pasado este efecto negativo relacionado con el contenido excesivo de superplastificante también fue observado por Aitcin *et al.*⁽³⁾.

En un sistema cementante con un aditivo superfluidificante, la fluidez de la pasta dependerá principalmente del aditivo, y puede variar de un producto a otro.

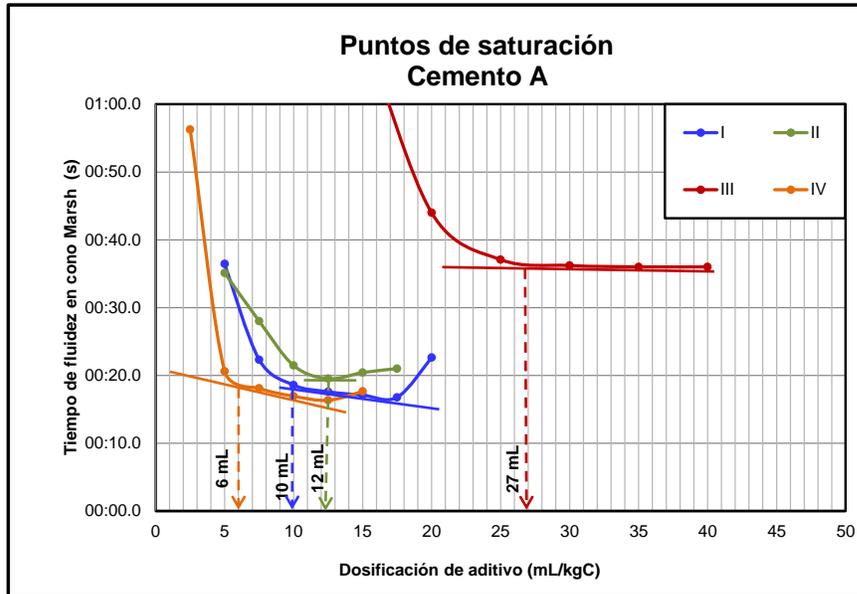


Fig. 5.2 *Determinación de puntos de saturación en los aditivos (I, II, III, IV), cuando se combinan con el cemento A.*

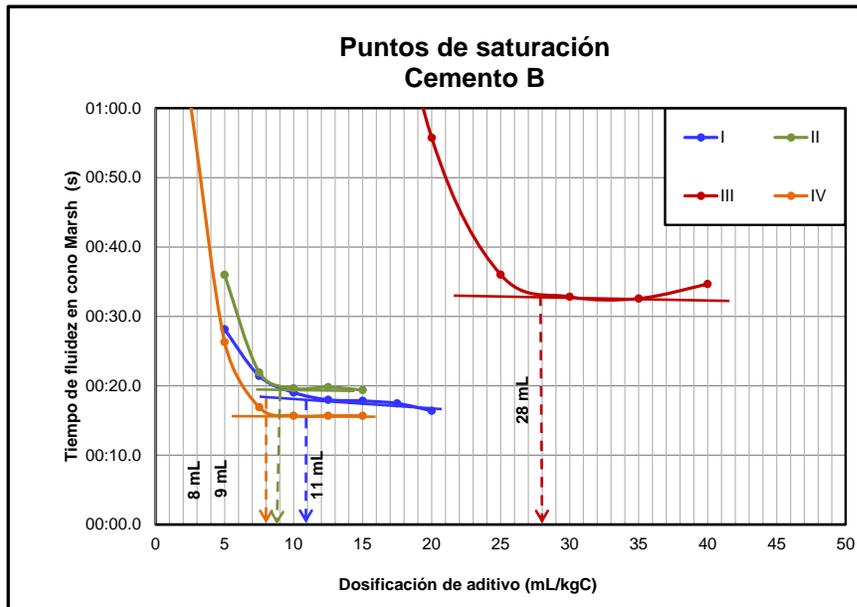


Fig. 5.3 *Determinación de puntos de saturación en los aditivos (I, II, III, IV), cuando se combinan con el cemento B.*

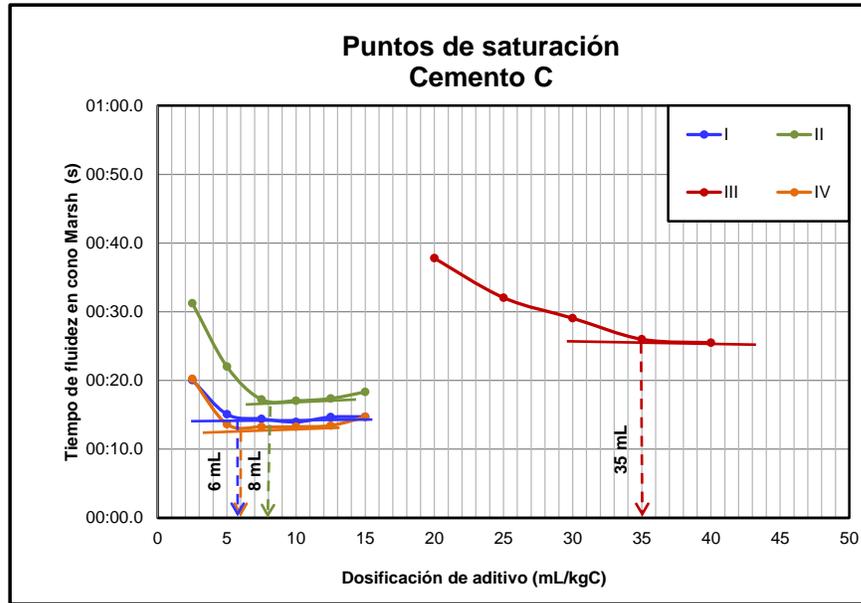


Fig. 5.4 Determinación de puntos de saturación en los aditivos (I, II, III, IV), cuando se combinan con el cemento C.

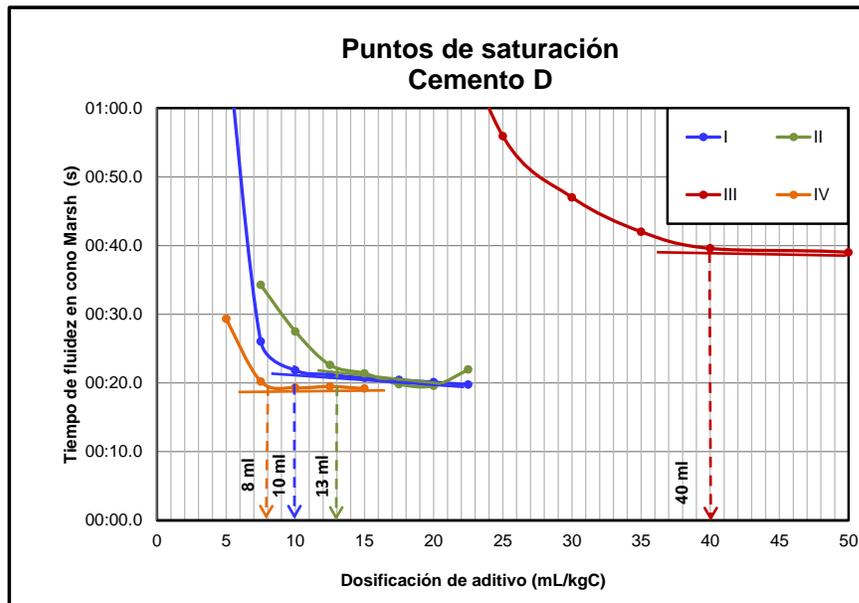


Fig. 5.5 Determinación de puntos de saturación en los aditivos (I, II, III, IV), cuando se combinan con el cemento D.

En las figuras de la 5.2 a la 5.5 se observa que para los cuatro cementos estudiados, el aditivo IV fue el que presentó el menor tiempo en el cono de

Marsh (mayor fluidez) con el menor consumo de aditivo (PS). Para cada uno de los cuatro cementos, los desarrollos de las curvas de fluidez con los aditivos I, II y IV son muy similares entre sí; sin embargo, se ilustran diferencias importantes en las dosificaciones de aditivo por kilogramo de cemento. Para estos tres aditivos, todos los cementos presentaron una fluidez en un nivel de 13 a 22 s, siendo el mayor cuando se combinaron con el cemento C y, en contraparte, los menores flujos se presentaron con el cemento A. Los resultados de los puntos de saturación para los 16 diferentes SC pueden ser fácilmente comparados con el resumen que aparece en la tabla 5.1.

Para algunas combinaciones cemento-aditivo, se pudo observar que cuando el aditivo se sobre-dosifica por arriba del PS, el tiempo en el cono de Marsh aumenta o, en otras palabras, la fluidez disminuye, como en el caso de las combinaciones A-I, B-III y D-II, que presentan los incrementos a partir de una dosificación de 17.5, 35 y 20 mL/kg deC. Esta información es de relevante importancia, porque algunos aditivos presentan este comportamiento con pequeñas dosificaciones por arriba del PS, como es el caso del SC A-II.

Una característica importante a resaltar, cuando se combinan los aditivos con el cemento C, es el aumento de fluidez en un 25%, en comparación con el resto de los cementos utilizados.

Tabla 5.1. *Dosificaciones óptimas de aditivo (Punto de saturación) en solución y en polvo para cada uno de los sistemas cementantes estudiados.*

PUNTO DE SATURACIÓN								
Cementos	Aditivo I		Aditivo II		Aditivo III		Aditivo IV	
	Solución (mL/kgC)	Polvo (g/kgC)						
A	10	2.2	12	3.6	27	20.8	6	2.5
B	11	2.4	9	2.6	28	21.6	8	3.3
C	6	1.3	8	2.3	35	27.0	6	2.5
D	10	2.2	13	3.8	40	30.8	8	3.3

Se observa que las velocidades más rápidas en fluidez con mínima dosificación de aditivo las presentó el cemento C, en combinación con el aditivo I y IV. Para estas velocidades, la dosificación de aditivo I y IV resultó 25% menor (en mL/kgC) con relación al aditivo II. Este comportamiento se atribuye a que este cemento es el que presenta la distribución granulométrica más gruesa.

Con el protocolo de prueba establecido para determinar los puntos de saturación con el cono de Marsh, el aditivo III fue el que presentó el desempeño más pobre, ya que para los cuatro cementos se obtuvieron dosificaciones muy altas; también redujo de manera significativa la fluidez a través del cono de Marsh. Con base en este comportamiento, este aditivo resulta incompatible con estos cementos y en términos tanto ecológicos como económicos no resultaría viable su utilización, sin embargo, este aditivo, en la mayoría de los casos, es el que mantiene la consistencia por mayor tiempo, como se ilustra en las gráficas de pérdida de consistencia que aparecen en las figuras de la 5.6 a la 5.9.

5.1.2. Pérdida de consistencia.

La efectividad de los aditivos base policarboxilatos como dispersantes y la retención de la fluidez con relación al tiempo pueden verse afectados por las propiedades de los ingredientes utilizados para la fabricación de los concretos, así como por las condiciones de mezclado⁽⁹¹⁾.

Por ello, una característica importante a considerar para escoger el tipo de superplastificante, su dosificación y el momento en que se incorpora a la mezcla (en planta o previo al colado), es la pérdida de fluidez de la pasta de cemento Portland con relación al tiempo. Esta propiedad depende mucho del segmento de la construcción en el que se vaya a utilizar el concreto (concreto premezclado o concreto para elementos prefabricados), ya que las propiedades reológicas de la pasta de cemento pueden cambiar significativamente con el paso del tiempo. Este cambio se atribuye a la hidratación del cemento, a la degradación química del polímero debido al alto Ph de la solución acuosa y a la relajación física o al cambio en la estructura molecular del polímero, al ser

adsorbido por el cemento^(77,78,79). Con el fin de evaluar este parámetro para los cuatro cementos y los cuatro aditivos, los tiempos de fluidez de pastas se midieron con ayuda del cono de Marsh durante un periodo de tiempo de 8 horas de la siguiente manera: las primeras mediciones se realizaron a los 5, 15 y 30 minutos después del mezclado y las mediciones posteriores a cada 30 min. Los resultados se muestran en las figuras de la 5.6 a la 5.9. En estas gráficas, el tiempo de pérdida de consistencia se consideró como aquel a partir del cual la fluidez comienza a disminuir de manera significativa. Para todos los SC considerados en esta investigación (16), se fabricaron mezclas de pastas con cemento Portland, tomando en cuenta los puntos de saturación correspondientes obtenidos en el estudio de la sección 5.2.1.1. En la tabla 5.2 se presenta un resumen de los tiempos de pérdida de consistencia para cada una de las mezclas elaboradas.

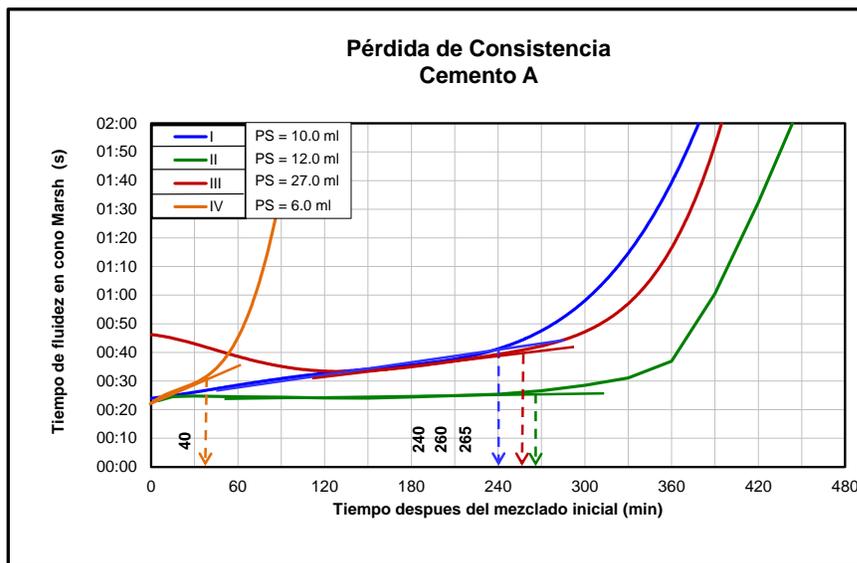


Fig. 5.6 *Determinación de pérdida de consistencia en pastas de cemento Portland "A", donde P.S. es el punto de saturación.*

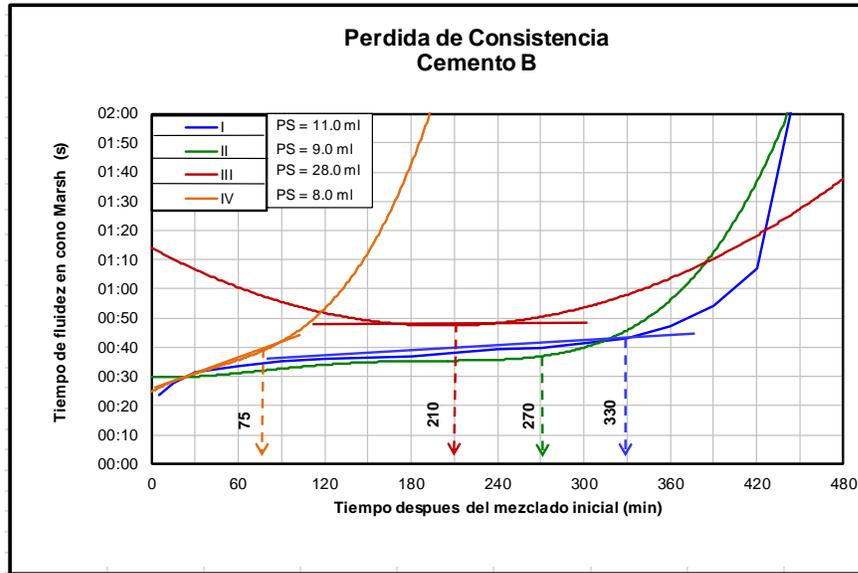


Fig. 5.7 Determinación de pérdida de consistencia en pastas de cemento Pórtland “B”, donde P.S. es el punto de saturación.

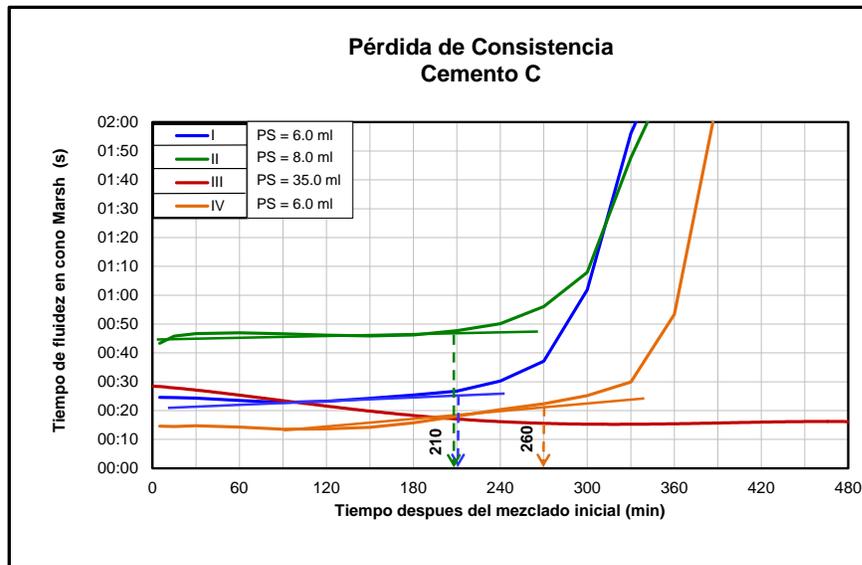


Fig. 5.8 Determinación de pérdida de consistencia en pastas de cemento Pórtland “C”, donde P.S. es el punto de saturación.

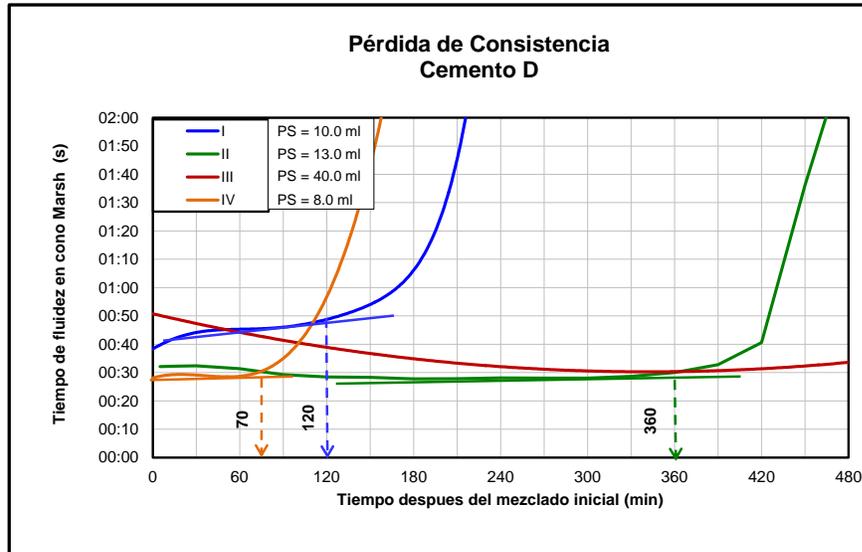


Fig. 5.9 *Determinación de pérdida de consistencia en pastas de cemento Portland “D”, donde P.S. es el punto de saturación.*

En las figuras de la 5.6 a la 5.9 se ilustran los comportamientos que presentaron los diferentes SC en cuanto a pérdida de consistencia, con relación al tiempo. En estas gráficas se observa que algunos de los SC evaluados presentan pérdidas de consistencia significativas en períodos muy cortos, como es el caso de SC A-IV (fig. 5.6), B-IV (fig. 5.7) y D-IV (fig. 5.9). Analizando el desempeño del aditivo IV, en términos de pérdida de consistencia, es posible observar que el cemento A presentó la pérdida de consistencia más rápida (40 min) y que al cemento C fue al que le tomó el mayor tiempo perderla (270 min), lo que significa que al utilizar este aditivo, en conjunto con el cemento C, se incrementa 6 veces el período de tiempo en el que este sistema cementante mantiene una consistencia apropiada, en comparación con el SC con el cemento A. Basados en los resultados obtenidos para los 16 SC estudiados, se propone una clasificación para agruparlos en tres niveles diferentes de pérdida de consistencia: baja ($PC \geq 240$ min), media ($60 < PC < 240$) y alta ($30 < PC \leq 60$). Esta clasificación se presenta en la tabla 5.3 y, de manera general, se asocia con diferentes aplicaciones en la industria de la construcción con concreto.

En la figura 5.6 y 5.7 se observa que los aditivos combinados con el cemento A y B tienen un comportamiento similar. Los tiempos de pérdida de consistencia no son muy variables y se encuentran en un nivel de 210 a 330 minutos.

En la tabla 5.1 se puede observar que los sistemas cementantes C-III, DII y D-III demandaron altas dosificaciones de aditivo. Analizando estos resultados, en conjunto con las pérdidas de consistencia que presentaron estos SC y que aparecen en la tabla 5.2, se observa que también son los que presentan los tiempos de pérdidas más prolongados (360, > 480 y > 480 respectivamente), lo cual es atribuible a las altas dosificaciones de aditivo⁽⁹⁵⁾.

Tabla 5.2. *Tiempos de pérdida de consistencia para los 16 sistemas cementantes evaluados.*

PÉRDIDA DE CONSISTENCIA (en minutos)				
Cementos	Aditivos			
	I	II	III	IV
A	240	260	250	40
B	330	270	210	75
C	210	210	> 480	270
D	120	360	>480	75

Las pruebas de pérdida de consistencia también ilustran que al utilizar el aditivo III, en combinación con cada uno de los diferentes cementos evaluados, la fluidez en el cono de Marsh tiende a incrementar conforme pasa el tiempo, alcanzándose tiempos mínimos de flujo a los 120, 210, 390 y 360 minutos para los cementos A, B, C y D respectivamente. Este fenómeno significó una mejora en la fluidez de estos cuatro SC, de 31%, 36%, 35% y 40%, en relación con los tiempos en cono de Marsh que se obtuvieron para los puntos de saturación correspondientes respectivamente. Para todos los SC estudiados con este aditivo (III), la máxima fluidez no se presentó después del mezclado inicial, como en los otros SC con los aditivos I, II y IV, presentándose en tiempos posteriores que en todos los casos resultaron muy prolongados. Esto podría

resultar de interés para la industria del concreto premezclado en proyectos que requieran transportar el concreto por periodos de tiempo moderados (60-240 minutos), ver tabla 5.3. Se observa que la máxima fluidez se logra después de un determinado tiempo y no inmediatamente después de la incorporación del aditivo, como en el caso del resto de los aditivos utilizados en esta investigación.

Los resultados ilustran que no todos los superplastificantes disponibles en el mercado funcionan de manera eficaz con los cementos Portland. Es importante evaluar esta característica en un SC ya que puede ser un factor crítico para el desempeño del concreto o mortero en estado fresco. Con base en los resultados obtenidos en esta etapa de la investigación, en la tabla 5.3 se proponen diferentes aplicaciones en función de la pérdida de consistencia.

Tabla 5.3. *Clasificación de pérdida de consistencia en pastas y su relación con diferentes aplicaciones en la industria de la construcción con concreto.*

Aplicaciones	Clasificación	Pérdida de consistencia en minutos (PC)	SC
Proyectos donde se requiera mantener la consistencia por periodos prolongados como concretos bombeados a larga distancia	Baja	$PC \geq 240$	A - I A - II A - III B - I B - II C - III C - IV D - II D - III
Concreto premezclado para la producción de elementos prefabricados y construcción en general	Media	$60 < PC < 240$	B - III B - IV C - I C - II D - I D - IV
Concreto premezclado para la producción de elementos prefabricados	Alta	$30 < PC \leq 60$	A - IV

5.2.2. Pruebas en morteros.

A todos los morteros involucrados en esta etapa también se les hizo una caracterización general que incluía: pruebas de fluidez, contenido de aire, peso volumétrico y resistencia a compresión. A los morteros que mostraron mejor compatibilidad en cuanto a resistencia a la compresión y menor dosificación de aditivo, también se les determinaron los tiempos de fraguado. Para todos los SC considerados en esta investigación (16), se fabricaron mezclas de mortero con cemento Portland y arena estándar (ASTM C-109) tomando en consideración los puntos de saturación correspondientes obtenidos para cada una de las combinaciones cemento-aditivo, como ya se describió en la sección 5.2.1.1.

5.2.2.1. Contenido de aire

Para determinar el contenido de aire a los morteros estudiados en esta etapa se empleó el método AASTHO T199. Para los 16 combinaciones cemento-aditivo estudiadas, en la figura 5.10 se ilustra el contenido de aire. En esta gráfica, cada valor representa un promedio de tres pruebas de contenido de aire. Se observa que las mezclas fabricadas con los aditivos I, II y IV mantuvieron un contenido de aire atrapado entre 2% y 3%, siendo el I el que mostró mayor uniformidad en los resultados, con valores de 3% en todas las combinaciones, a diferencia del III que resultó con valores entre 5% y 7% ($6 \pm 1\%$); en las cuatro combinaciones que se estudiaron con este aditivo los incrementos en contenido de aire se atribuyen a las altas dosificaciones de aditivo.

Para concretos sin inductor de aire, la especificación ASTM C 494 (sección 10.5), limita como efecto colateral el porcentaje de aire atrapado en un concreto con aditivo superplastificante a no más de 3.5 % para concretos sin aditivo inductor de aire. Analizando los resultados reportados en la figura 5.10 se observa que el aditivo III no cumple con esta limitación. Los aditivos superplastificantes, por lo general, pueden reducir el contenido de aire y esto puede dar lugar a una mezcla menos cohesiva, que puede ser más propensa al sangrado, y a la segregación⁽⁹⁶⁾.

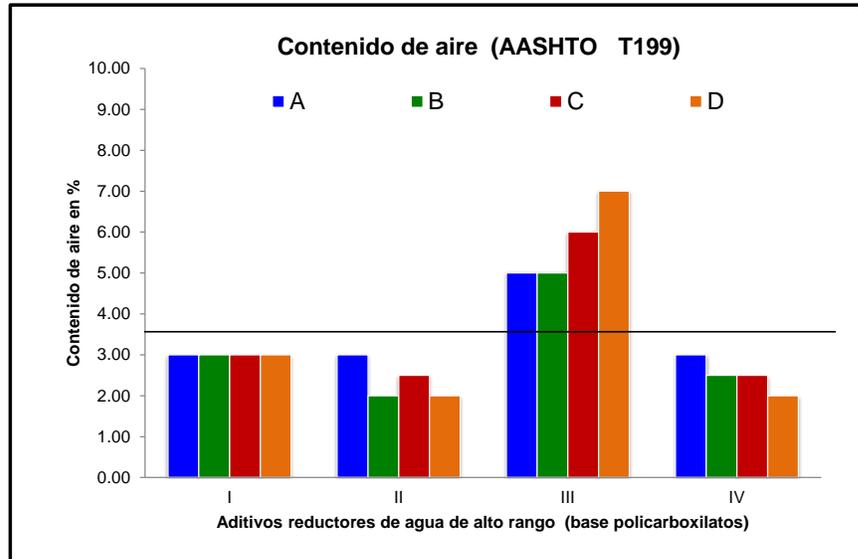


Fig. 5.10 Contenido de aire en las mezclas de mortero fabricadas para la etapa “compatibilidad cemento-aditivo”.

5.2.2.2. Fluidez.

En la figura 5.11 se observa la fluidez de cada mezcla de mortero en la etapa “compatibilidad cemento-aditivo”. El método de ensaye empleado fue el descrito en ASTM C 1437-07.

Se observa que no existe un comportamiento similar entre las diferentes combinaciones y todo indica que el cambio de un producto a otro repercute directamente en las propiedades reológicas del mortero. Las fluideces medidas en las pastas no resultaron proporcionales a las medidas en los morteros, con la misma fracción de pasta; sin embargo, esta característica sólo se alcanza a apreciar en aquellas combinaciones de cemento-aditivo donde la fluidez fue alta, como es el caso de los SC que contienen cemento C. Esta particularidad se le atribuye a la finura del cemento, que es ligeramente más gruesa que la del resto de los cementos utilizados. Figura 3.6. En el pasado, este efecto lo demostró Aïtcin et al. en 1998, concluyendo que la finura del cemento tiene gran influencia sobre el tiempo de flujo. A mayor finura del cemento, mayor tiempo de flujo para dosis bajas de superplastificante.

El método de mezclado puede originar la ganancia o pérdida de fluidez del mortero, repercutiendo directamente en la dosis requerida para obtener el punto de saturación.

Un efecto de algunos aditivos superplastificantes de alto rango en el concreto es que mantienen el revenimiento por un lapso de 30 a 60 min, periodo en el que el concreto tenderá a disminuir su fluidez. El tiempo que el concreto mantiene el revenimiento dependerá del tipo y propiedades del cemento, la temperatura del concreto, el tipo de aditivo, la dosificación utilizada y de lo detallado del programa de mezclado⁽⁷⁸⁾.

Cabe mencionar que con algunos aditivos reductores de agua de alto rango es posible redosificar el concreto para restituir el incremento de trabajabilidad⁽⁸¹⁾. Estos aditivos ayudan a prolongar la permanencia y típicamente se añaden en planta, al momento de la fabricación del mortero y/o el concreto⁽⁸¹⁾. La figura 5.11 muestra los resultados obtenidos para los diferentes sistemas cemento-aditivo estudiados, en lo que la fracción de pasta se mantuvo constante.

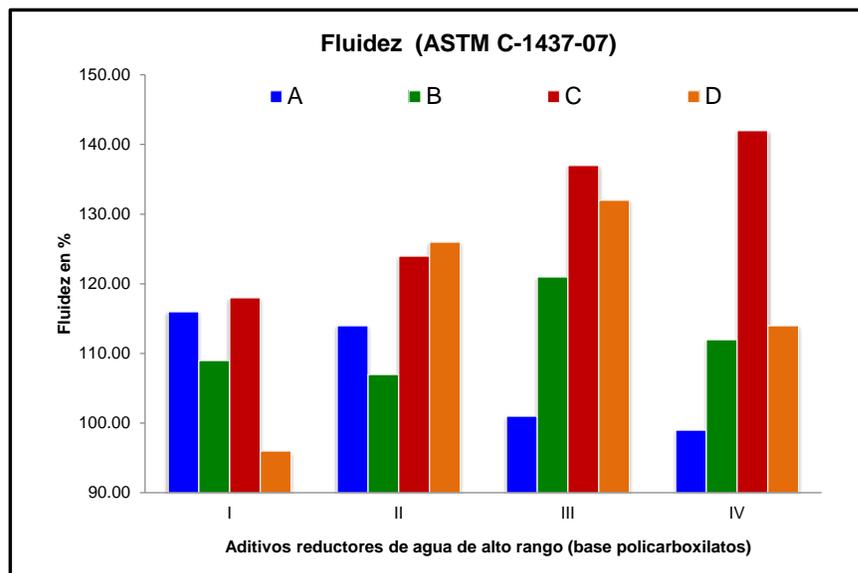


Fig. 5.11 *Fluidez en las mezclas de mortero fabricadas con cemento Pórtland y arena estándar en la etapa “compatibilidad cemento-aditivo”.*

5.2.2.3. *Peso volumétrico.*

En la figura 5.12 se reportan los pesos volumétricos de los morteros estudiados en esta etapa. En estos resultados se observa que los morteros fabricados con el aditivo III fueron los que presentaron los pesos más bajos, lo cual es congruente con los resultados de contenido de aire atrapado, ya que estos morteros fueron los que presentaron los mayores contenidos. Por otro lado, los morteros fabricados con los aditivos I, II y IV no presentaron variaciones significativas en los pesos volumétricos, lo que también resulta congruente con los contenidos de aire obtenidos para los morteros con estos aditivos.

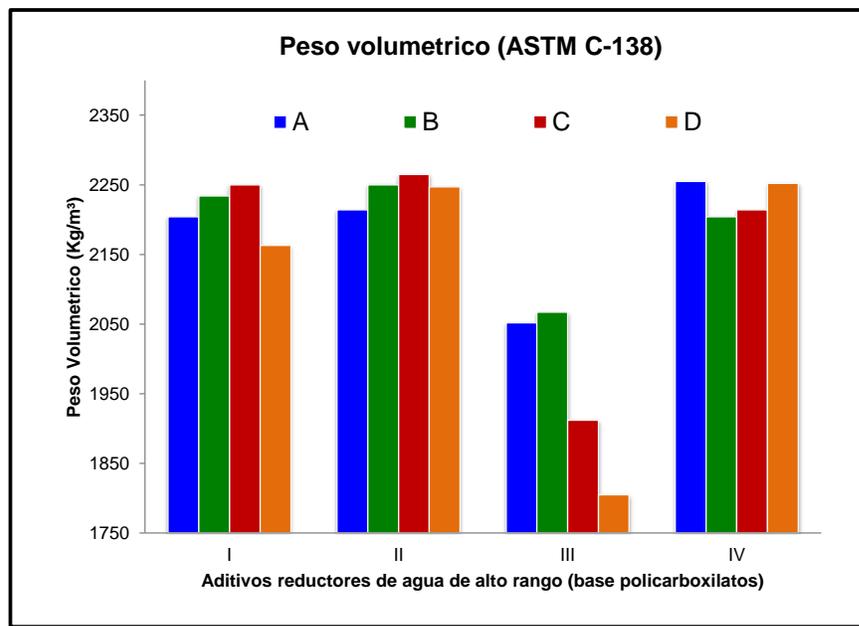


Fig. 5.12 Pesos Volumétricos en mezclas de mortero fabricadas con cemento Pórtland y arena estándar en la etapa “compatibilidad cemento-aditivo”.

5.2.2.4. *Resultados de pruebas de tiempos de fraguado.*

Esta propiedad depende de la aplicación en la que se utilizará la mezcla. En las tablas de la 5.4 a la 5.8 se observan los tiempos de fraguado inicial “F.I.” y final “F.F” de acuerdo a la norma ASTM C 403 para las mezclas de mortero que resultaron tener mejor resistencia a la compresión con menor consumo de aditivo por kg de cemento (mezclas de interés), en la figura 5.13 se ilustra el

resumen gráfico de las mismas. Actualmente la tendencia de nuevas construcciones está muy enfocada al uso de materiales prefabricados, de los que se vislumbra que en el corto plazo pudiesen llegar a tener gran demanda en la industria de la construcción, es por ello que en este trabajo se optó por utilizar la combinación A-IV para la elaboración de los morteros con características típicas de concretos de alto comportamiento, con relaciones a/cem bajas, y en los que se utilizarán agregados ligeros saturados como agentes de curado interno. Esta combinación de cemento-aditivo (A-IV) demuestra una resistencia alta a la compresión a la edad de 28 días, buena fluidez y no presenta segregación ni sangrado. Casi tienen el mismo tiempo de fraguado inicial que la mezcla D-IV, pero con 33% menos de consumo de aditivo por kg de cemento.

Tabla 5.4. Resultados de tiempos de fraguado del sistema cementante A-I (etapa 2).

Tiempo de fraguado de morteros mediante la prueba de resistencia a la penetración ASTM C 403-06															
Fraguado Inicial (F.I) = 35.1 kgf/cm ²															
Fraguado Final (F.F) = 281.2 kgf/cm ²															
Hora de contacto (agua con el cemento) 8:50:00		Duracion de prueba:		11:40:00											
				<table border="1"> <tr> <th colspan="2">Nomenclatura</th> <td rowspan="3" style="text-align: center; vertical-align: middle;">A-I</td> </tr> <tr> <td>0 - 40</td> <td>kgf</td> </tr> <tr> <td>40 - 45</td> <td>kgf</td> </tr> <tr> <td>46 - 91</td> <td>kgf</td> <td></td> </tr> </table>		Nomenclatura		A-I	0 - 40	kgf	40 - 45	kgf	46 - 91	kgf	
Nomenclatura		A-I													
0 - 40	kgf														
40 - 45	kgf														
46 - 91	kgf														
Carga (kgf/cm ²)	Hora de penetracion	Aguja	Tiempo Trans. (min)	Tiempo Acum. (min)	Area de presion de la aguja (cm ²)	RESISTENCIA A LA PENETRACION (kgf/cm ²)									
46	14:00:00	1	310	310	6.45	7									
46	14:00:00	1	0	310	6.45	7									
46	14:00:00	1	0	310	6.45	7									
27	15:00:00	2	60	370	3.23	8									
64	16:50:00	2	110	480	3.23	20									
64	16:50:00	2	0	480	3.23	20									
100	17:50:00	3	60	540	1.61	62									
100	17:50:00	3	0	540	1.61	62									
100	17:50:00	3	0	540	1.61	62									
23	17:50:00	4	0	540	0.65	35									
44	18:40:00	4	50	590	0.65	68									
46	18:50:00	4	10	600	0.65	71									
52	19:50:00	5	60	660	0.32	163									
52	19:50:00	5	0	660	0.32	163									
52	19:50:00	5	0	660	0.32	163									
81	20:30:00	6	40	700	0.16	506									
81	20:30:00	6	0	700	0.16	506									
81	20:30:00	6	0	700	0.16	506									

Tabla 5.5. Resultados de tiempos de fraguado del sistema cementante A-II (etapa 2).

Tiempo de fraguado de morteros mediante la prueba de resistencia a la penetración ASTM C 403-06															
Fraguado Inicial (F.I) = 35.1 kgf/cm ²															
Fraguado Final (F.F) = 281.2 kgf/cm ²															
Hora de contacto (agua con el cemento)		10:00:00	Duracion de prueba:		11:00:00										
				<table border="1"> <tr> <th colspan="2">Nomenclatura</th> <td rowspan="3" style="text-align: center; vertical-align: middle;">A-II</td> </tr> <tr> <td>0 - 40</td> <td>kgf</td> </tr> <tr> <td>40 - 45</td> <td>kgf</td> </tr> <tr> <td>46 - 91</td> <td>kgf</td> <td></td> </tr> </table>		Nomenclatura		A-II	0 - 40	kgf	40 - 45	kgf	46 - 91	kgf	
Nomenclatura		A-II													
0 - 40	kgf														
40 - 45	kgf														
46 - 91	kgf														
Carga (kgf/cm ²)	Hora de penetracion	Aguja	Tiempo Trans. (min)	Tiempo Acum. (min)	Area de presion de la aguja (cm ²)	RESISTENCIA A LA PENETRACION (kgf/cm ²)									
46	16:30:00	1	390	390	6.45	7									
46	16:30:00	1	0	390	6.45	7									
46	16:30:00	1	0	390	6.45	7									
24	17:05:00	2	35	425	3.23	7									
46	18:00:00	2	55	480	3.23	14									
46	18:00:00	2	0	480	3.23	14									
72	19:10:00	3	70	550	1.61	45									
72	19:10:00	3	0	550	1.61	45									
72	19:10:00	3	0	550	1.61	45									
32	19:40:00	4	30	580	0.65	49									
32	19:40:00	4	0	580	0.65	49									
32	19:40:00	4	0	580	0.65	49									
91	21:00:00	5	80	660	0.32	284									
91	21:00:00	5	0	660	0.32	284									
91	21:00:00	5	0	660	0.32	284									
53	21:00:00	6	0	660	0.16	329									
53	21:00:00	6	0	660	0.16	329									
53	21:00:00	6	0	660	0.16	329									

Tabla 5.6. Resultados de tiempos de fraguado del sistema cementante A-IV (etapa 2).

Tiempo de fraguado de morteros mediante la prueba de resistencia a la penetración ASTM C 403-06															
Fraguado Inicial (F.I) = 35.1 kgf/cm ²															
Fraguado Final (F.F) = 281.2 kgf/cm ²															
Hora de contacto (agua con el cemento) 9:00:00		Duracion de prueba: 6:30:00													
				<table border="1"> <tr> <th colspan="2">Nomenclatura</th> <td rowspan="3" style="text-align: center; vertical-align: middle;">A-IV</td> </tr> <tr> <td>0 - 40</td> <td>kgf</td> </tr> <tr> <td>40 - 45</td> <td>kgf</td> </tr> <tr> <td>46 - 91</td> <td>kgf</td> <td></td> </tr> </table>		Nomenclatura		A-IV	0 - 40	kgf	40 - 45	kgf	46 - 91	kgf	
Nomenclatura		A-IV													
0 - 40	kgf														
40 - 45	kgf														
46 - 91	kgf														
Carga (kgf/cm ²)	Hora de penetracion	Aguja	Tiempo Trans. (min)	Tiempo Acum. (min)	Area de presion de la aguja (cm ²)	RESISTENCIA A LA PENETRACION (kgf/cm ²)									
64	12:00:00	1	180	180	6.45	10									
64	12:00:00	1	0	180	6.45	10									
64	12:00:00	1	0	180	6.45	10									
42	12:25:00	2	25	205	3.23	13									
42	12:25:00	2	0	205	3.23	13									
42	12:25:00	2	0	205	3.23	13									
28	13:10:00	3	45	250	1.61	17									
50	13:45:00	3	35	285	1.61	31									
50	13:45:00	3	0	285	1.61	31									
91	14:40:00	4	55	340	0.65	140									
91	14:40:00	4	0	340	0.65	140									
91	14:40:00	4	0	340	0.65	140									
47	15:00:00	5	20	360	0.32	147									
47	15:00:00	5	0	360	0.32	147									
47	15:00:00	5	0	360	0.32	147									
47	15:30:00	6	30	390	0.16	295									
47	15:30:00	6	0	390	0.16	295									
47	15:30:00	6	0	390	0.16	295									

Tabla 5.7. Resultados de tiempos de fraguado del sistema cementante B-II (etapa 2).

Tiempo de fraguado de morteros mediante la prueba de resistencia a la penetración ASTM C 403-06															
Fraguado Inicial (F.I) = 35.1 kgf/cm ²															
Fraguado Final (F.F) = 281.2 kgf/cm ²															
Hora de contacto (agua con el cemento) 9:00:00		Duracion de prueba:		11:55:00											
				<table border="1"> <tr> <th colspan="2">Nomenclatura</th> <td rowspan="3">B-II</td> </tr> <tr> <td>0 - 40</td> <td>kgf</td> </tr> <tr> <td>40 - 45</td> <td>kgf</td> </tr> <tr> <td>46 - 91</td> <td>kgf</td> <td></td> </tr> </table>		Nomenclatura		B-II	0 - 40	kgf	40 - 45	kgf	46 - 91	kgf	
Nomenclatura		B-II													
0 - 40	kgf														
40 - 45	kgf														
46 - 91	kgf														
Carga (kgf/cm ²)	Hora de penetracion	Aguja	Tiempo Trans. (min)	Tiempo Acum. (min)	Area de presion de la aguja (cm ²)	RESISTENCIA A LA PENETRACION (kgf/cm ²)									
46	17:40:00	1	520	520	6.45	7									
46	17:40:00	1	0	520	6.45	7									
46	17:40:00	1	0	520	6.45	7									
78	18:20:00	2	40	560	3.23	24									
78	18:20:00	2	0	560	3.23	24									
78	18:20:00	2	0	560	3.23	24									
86	18:55:00	3	35	595	1.61	53									
86	18:55:00	3	0	595	1.61	53									
86	18:55:00	3	0	595	1.61	53									
40	19:10:00	4	15	610	0.65	62									
40	19:10:00	4	0	610	0.65	62									
40	19:10:00	4	0	610	0.65	62									
47	20:10:00	5	60	670	0.32	147									
47	20:10:00	5	0	670	0.32	147									
47	20:10:00	5	0	670	0.32	147									
49	20:55:00	6	45	715	0.16	306									
49	20:55:00	6	0	715	0.16	306									
49	20:55:00	6	0	715	0.16	306									

Tabla 5.8. Resultados de tiempos de fraguado del sistema cementante D-IV (etapa 2).

Tiempo de fraguado de morteros mediante la prueba de resistencia a la penetración ASTM C 403-06															
Fraguado Inicial (F.I) = 35.1 kgf/cm ²															
Fraguado Final (F.F) = 281.2 kgf/cm ²															
Hora de contacto (agua con el cemento) 10:30:00		Duracion de prueba:		8:23:00											
				<table border="1"> <tr> <th colspan="2">Nomenclatura</th> <td rowspan="3" style="text-align: center; vertical-align: middle;">D-IV</td> </tr> <tr> <td>0 - 40</td> <td>kgf</td> </tr> <tr> <td>40 - 45</td> <td>kgf</td> </tr> <tr> <td>46 - 91</td> <td>kgf</td> <td></td> </tr> </table>		Nomenclatura		D-IV	0 - 40	kgf	40 - 45	kgf	46 - 91	kgf	
Nomenclatura		D-IV													
0 - 40	kgf														
40 - 45	kgf														
46 - 91	kgf														
Carga (kgf/cm ²)	Hora de penetracion	Aguja	Tiempo Trans. (min)	Tiempo Acum. (min)	Area de presion de la aguja (cm ²)	RESISTENCIA A LA PENETRACION (kgf/cm ²)									
46	13:38:00	1	188	188	6.45	7									
46	13:38:00	1	0	188	6.45	7									
46	13:38:00	1	0	188	6.45	7									
25	14:00:00	2	22	210	3.23	8									
25	14:00:00	2	0	210	3.23	8									
25	14:00:00	2	0	210	3.23	8									
53	15:30:00	3	90	300	1.61	33									
53	15:30:00	3	0	300	1.61	33									
53	15:30:00	3	0	300	1.61	33									
30	16:25:00	4	55	355	0.65	46									
48	16:42:00	4	17	372	0.65	74									
48	16:42:00	4	0	372	0.65	74									
74	17:50:00	5	68	440	0.32	231									
74	17:50:00	5	0	440	0.32	231									
74	17:50:00	5	0	440	0.32	231									
32	18:07:00	6	17	457	0.16	199									
74	18:53:00	6	46	503	0.16	463									
74	18:53:00	6	0	503	0.16	463									

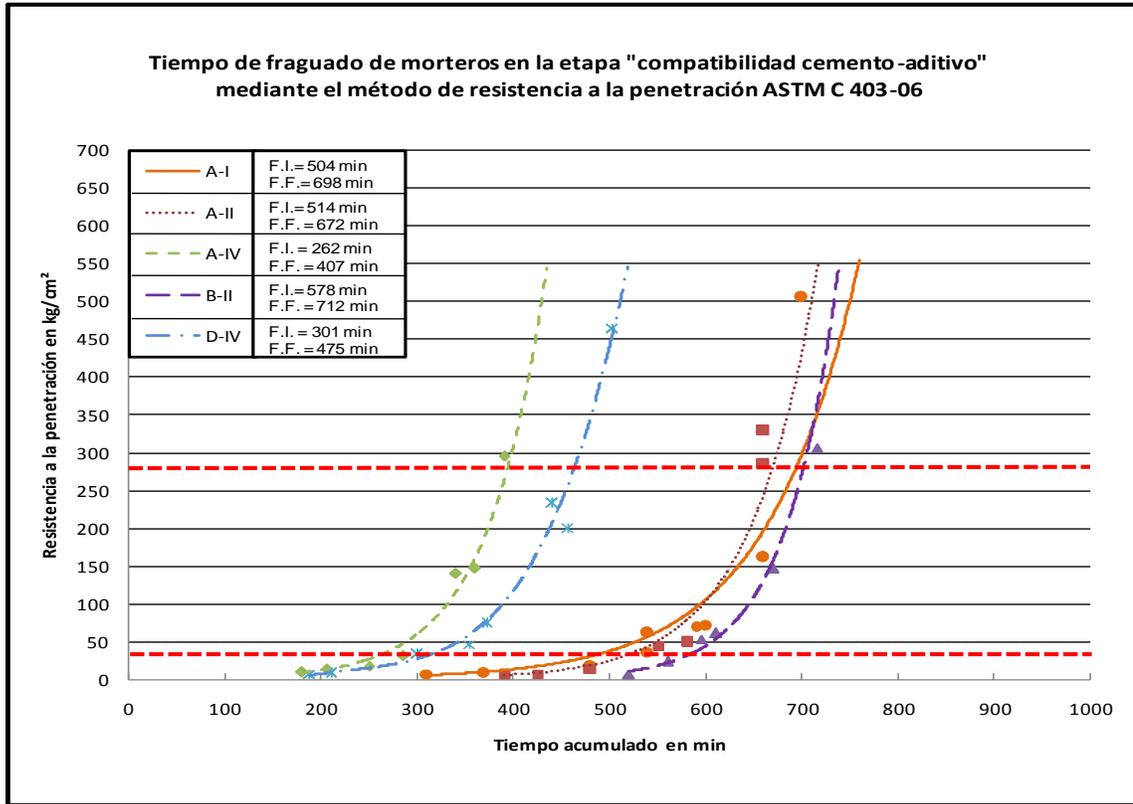


Fig. 5.13 Tiempos de fraguado de los morteros fabricados con A-I, A-II, A-IV, B-II y D-IV, y arena estándar (etapa 2), por el método ASTM C 403.

La figura 5.14 presenta una correlación entre los tiempos de pérdida de consistencia en las pastas y los tiempos de fraguado de morteros fabricados con una fracción de volumen de pasta fijo. En esta gráfica se observa que conforme a la pasta le toma más tiempo en perder su consistencia para las correlaciones establecidas entre estos dos parámetros, los tiempos de fraguado tienden a retardarse. Los coeficientes de correlación resultaron en 0.98, tanto para los tiempos de fraguado inicial, como para el final, e indican una correlación muy confiable entre estos dos parámetros. Por otro lado, las pendientes de cualquiera de las rectas pueden utilizarse para predecir la pérdida de consistencia, ya que prácticamente resultaron iguales. (1.264 para el inicial y 1.268 para el final), la separación entre ellas ilustra que la diferencia entre los tiempos de fraguado inicial y final fue la misma para los cinco sistemas cementantes considerados. Esta diferencias resultó de 2 horas con 40 minutos.

Para este caso en particular, se deduce que por cada minuto que se retarda el tiempo de fraguado (inicial o final), en promedio, la pasta tardará 1.26 minutos más en perder la consistencia. Este instrumento o herramienta puede resultar de suma utilidad para seleccionar el sistema cementante a utilizar, en función de las necesidades específicas del proyecto o proceso, en términos de pérdida de consistencia. La aplicación práctica de esta herramienta demandaría como información de entrada la pérdida de consistencia en las pastas, por medio del cono de Marsh, ya que esta prueba demanda menos tiempo que los tiempos de fraguado. Las ecuaciones 1 y 2 que se presentan a continuación representan las correlaciones lineales de los dos parámetros estudiados en la figura 5.14

$$y = 1.264x + 207.9 \quad R^2 = 0.98 \dots\dots\dots (ec.1)$$

$$y = 1.268x + 368.2 \quad R^2 = 0.98 \dots\dots\dots (ec.2)$$

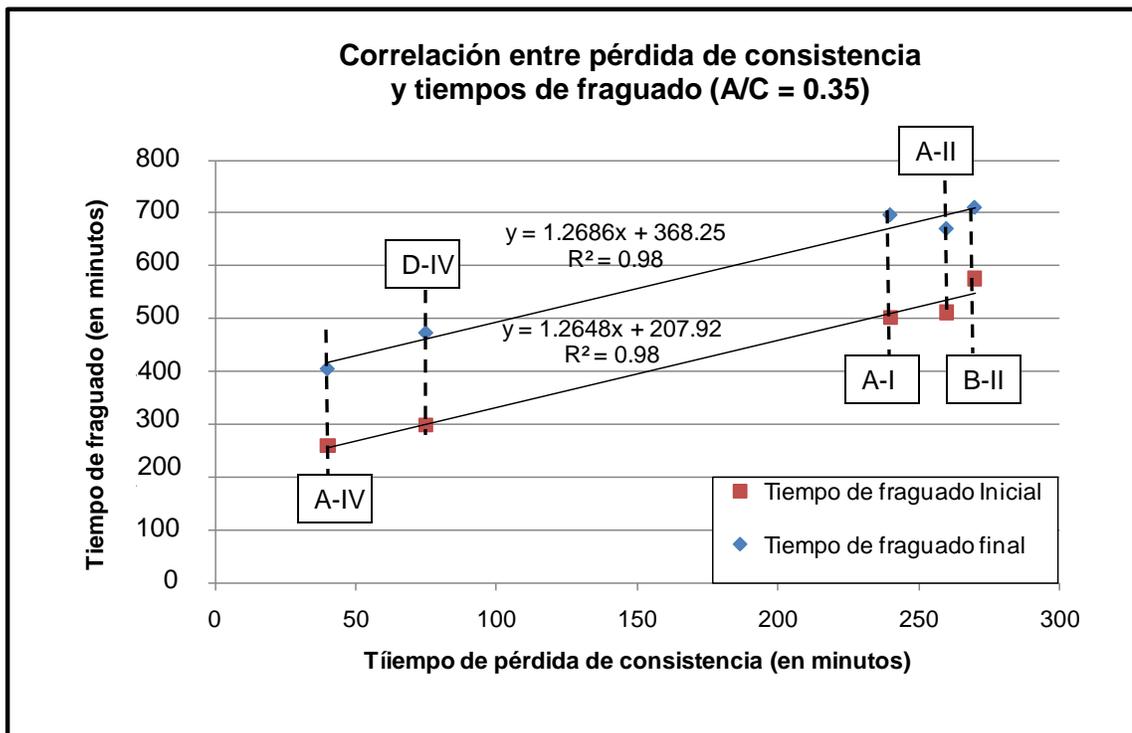


Fig. 5.14 Correlación de tiempos de fraguado de los SC A-I, A-II, A-IV, B-II y D-IV, fabricados con arena estándar en la etapa “compatibilidad cemento-aditivo” (etapa 2), por el método ASTM C 403.

5.2.2.5. Resistencia a la compresión.

En las figuras de la 5.15 a la 5.18 se muestra el desarrollo de resistencia a la compresión, hasta la edad de 28 días, para los 16 sistemas cementantes estudiados en esta investigación, que se obtuvieron por medio de cubos de mortero de 50.0 mm, de acuerdo con ASTM C 109. Cada uno de los puntos graficados representa el promedio de tres cubos y cada promedio se definió utilizando los criterios de evaluación previstos en ASTM C 109. Para los morteros fabricados con el aditivo III, la resistencia a la compresión resultó muy inferior a la del resto de los morteros, alcanzando resistencias máximas de 30 MPa a los 28 días de edad, lo que representa una disminución promedio del 50%, respecto a las obtenidas para la mayoría de los otros morteros a esa misma edad. En los concretos fabricados con este aditivo (III), el comportamiento se atribuye al aire atrapado que resultó como consecuencia de las altas dosificaciones de aditivo. Otro aspecto relevante a destacar es que a pesar de que la relación A/C se mantuvo constante, este aditivo originó un letargo en el desarrollo de resistencia, que en todos los casos se presentó a partir del tercer día y que inhibió la reacción potencial de los cementos a edades posteriores a los 7 días; ya que la pendiente de la recta después de esta edad fue prácticamente nula. También se puede observar que para la relación A/C estudiada, el aditivo III no es recomendable para usarse en plantas de elementos prefabricados, debido a que a las 12 horas de edad no fue posible determinar su resistencia a la compresión, mientras que para los morteros fabricados con los otros aditivos sí fue posible realizar el ensaye a compresión a esta edad, obteniéndose valores entre 1.8 y 16.6 MPa. Los morteros que contienen los aditivos I, II, y IV muestran ganancias de resistencia alrededor de 30MPa, a la edad de un día; mientras que los morteros fabricados con aditivo III representan tan sólo el 30% de este valor. Con base en estos resultados se encontró que la resistencia a la compresión, a la de edad un día, está muy influenciada por la combinación cemento-aditivo.

Para las combinaciones de los diferentes aditivos estudiados con el cemento C,

además de que presentaron un aumento en la fluidez, las resistencias a la compresión aumentaron en comparación con el resto de los morteros. Esto se puede atribuir al tamaño de la partícula del cemento, que entre más fino sea mayor la ganancia de resistencia y viceversa.

Los morteros que contienen los aditivos I, II y IV mostraron una tendencia muy similar en cuanto a ganancia de resistencia; sin embargo, haciendo una comparación entre ellos se observa que las resistencias de los morteros fabricados con el aditivo I fueron menores, a la edad de 28 días, representando el 95%, 93%, 81% y 69%, con respecto a las resistencias mayores obtenidas para los morteros con aditivos II ó IV, en combinación con los cementos A, B, C y D, respectivamente. En el caso del aditivo III, se aprecia que inhibe la reacción del cemento y por lo tanto, origina reducciones de hasta un 30% en la resistencia a la compresión desde el primer día de edad y prácticamente con todos los cementos utilizados la resistencia máxima alcanzada para cada uno de los SC se presenta a los 7 días, ya que a edades posteriores no se observan ganancias de resistencia. Un comportamiento similar, en relación con la resistencia máxima alcanzada, lo presentan los SC que contienen aditivo I, a excepción del SC con cemento A, que ganó un 7% de resistencia durante el periodo de tiempo de 7 a 28 días, mientras que en las combinaciones de los cementos A, B, C y D, con aditivos II y IV existen ganancias promedio de resistencia de alrededor de 12% entre los 7 a los 28 días.

Para los sistemas cementantes con cemento A, B, C y D, el aditivo I presentó resistencias a la compresión a la edad de 28 días de 4%, 7%, 17% y 30% por debajo de las resistencias obtenidas con los aditivos II o IV, respectivamente. Partiendo de estos resultados, en términos de resistencia a la compresión, los aditivos que mejor compatibilidad mostraron con los 4 cementos estudiados fueron el II y el IV.

Los resultados ilustran que, utilizando una relación agua/cemento de 0.35 y una

fluidez apropiada, producto de una buena compatibilidad cemento-aditivo con cemento CPC 30R, se pueden producir morteros con resistencias de 70MPa a los 28 días. Esto es atribuible al efecto de los aditivos reductores de agua, ya que con el uso de estos aditivos generalmente la resistencia se incrementa y el contenido de aire disminuye⁽⁸¹⁾. Muy probablemente el potencial de estos sistemas cementantes, en cuanto a resistencias mecánicas, sea mayor que el obtenido en esta investigación, siendo el compuesto limitante en este caso la arena utilizada.

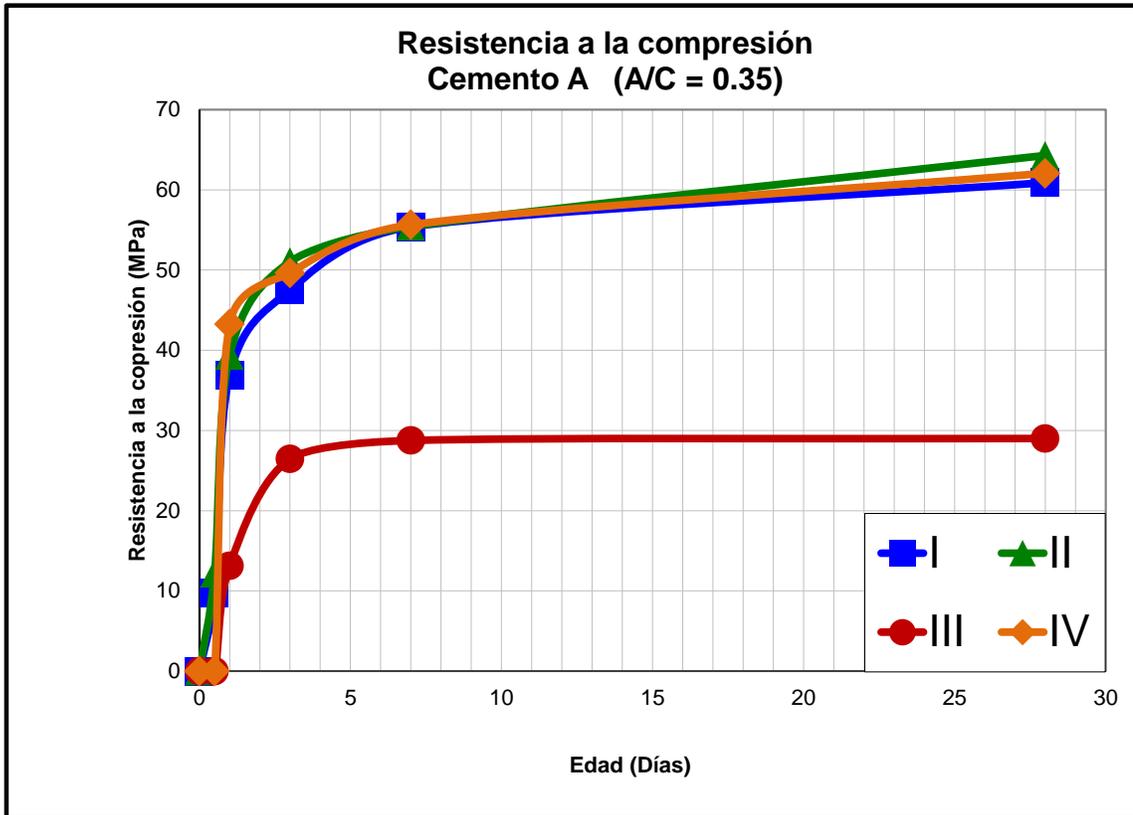


Fig. 5.15 Desarrollo de resistencia a la compresión en mezclas de mortero fabricadas con cemento Pórtland compuesto 30R, de la marca A y arena estándar en la etapa “compatibilidad cemento-aditivo”.

Tabla 5.9 Desarrollo de resistencia a la compresión en mezclas de mortero fabricadas con cemento Pórtland compuesto 30R, de la marca A y arena estándar en la etapa de “compatibilidad cemento-aditivo”.

Mezclas de mortero (Cemento A)	Resistencia a la compresión en cubos (MPa)				
	Edad en días				
	0.5	1	3	7	28
A-I	9.7	36.9	47.5	55.4	60.9
A-II	12.2	39.3	51.0	55.4	64.3
A-III	0.0	13.1	26.5	28.8	29.0
A-IV	0.0	43.3	49.6	55.6	62.1

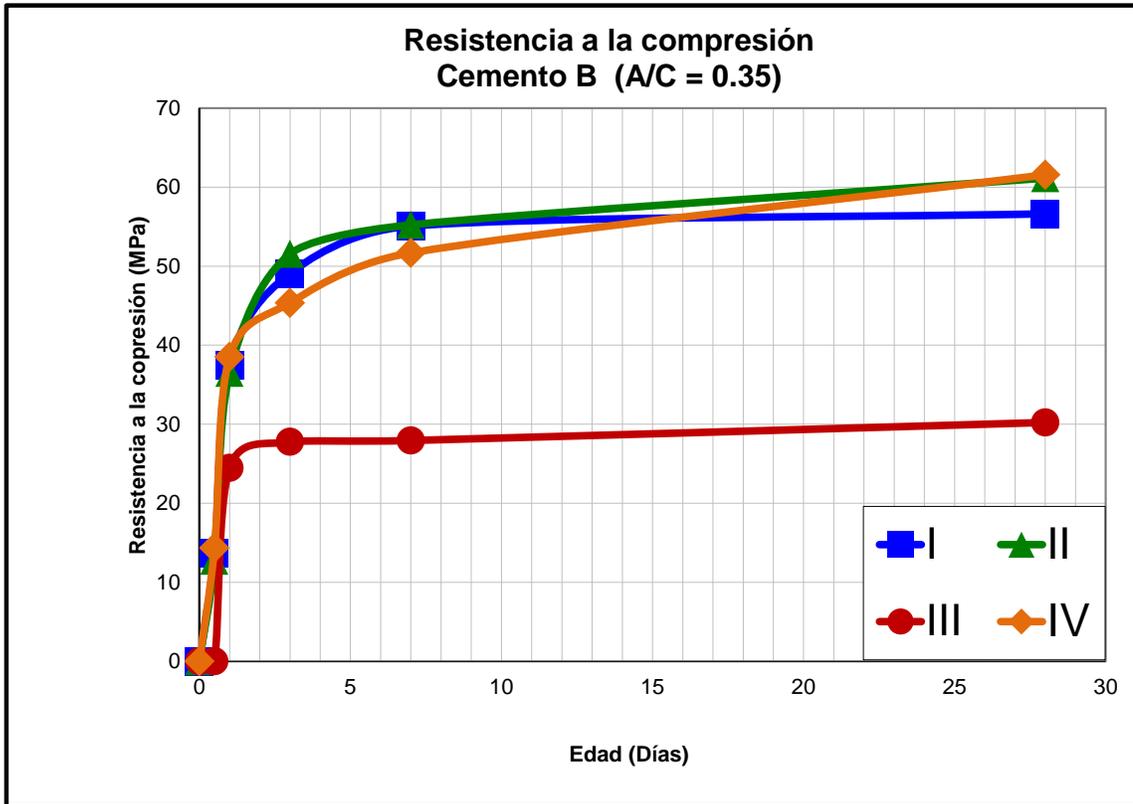


Fig. 5.16 Desarrollo de resistencia a la compresión en mezclas de mortero fabricadas con cemento Pórtland compuesto 30R, de la marca B y arena estándar en la etapa “compatibilidad cemento-aditivo”.

Tabla 5.10. Desarrollo de resistencia a la compresión en mezclas de mortero fabricadas con cemento Pórtland compuesto 30R, de la marca B y arena estándar en la etapa de “compatibilidad cemento-aditivo.”

Resistencia a la compresión en cubos (MPa)					
Mezclas de mortero (Cemento B)	Edad en días				
	0.5	1	3	7	28
B-I	13.7	37.5	49.1	55.1	56.6
B-II	12.7	36.5	51.5	55.2	61.1
B-III	0.0	24.5	27.8	27.9	30.2
B-IV	14.3	38.5	45.3	51.7	61.6

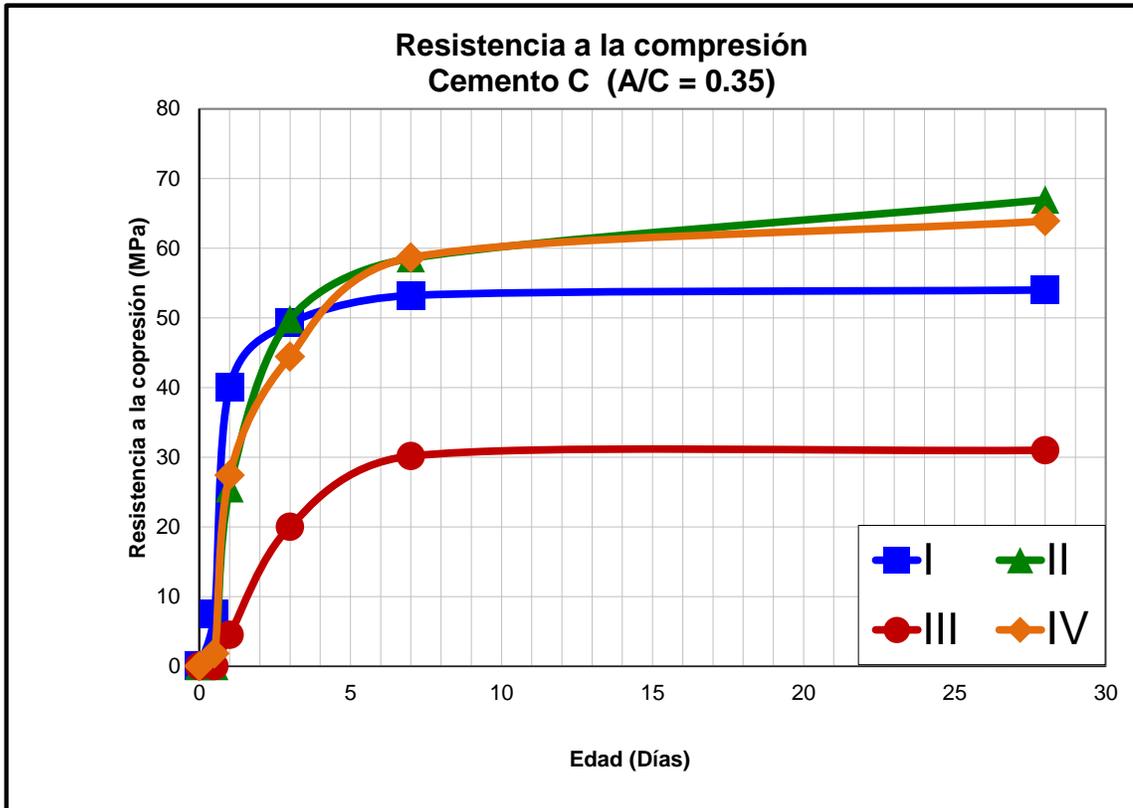


Fig. 5.17 Desarrollo de resistencia a la compresión en mezclas de mortero fabricadas con cemento Pórtland compuesto 30R, de la marca C y arena estándar en la etapa “compatibilidad cemento-aditivo”.

Tabla 5.11. Desarrollo de resistencia a la compresión en mezclas de mortero fabricadas con cemento Pórtland compuesto 30R, de la marca C y arena estándar en la etapa de “compatibilidad cemento-aditivo”.

Resistencia a la compresión en cubos (MPa)					
Mezclas de mortero (Cemento C)	Edad en días				
	0.5	1	3	7	28
C-I	7.5	40.0	49.3	53.2	54.0
C-II	0.0	25.5	49.8	58.5	67.0
C-III	0.0	4.5	20.0	30.2	31.0
C-IV	1.8	27.4	44.4	58.7	63.9

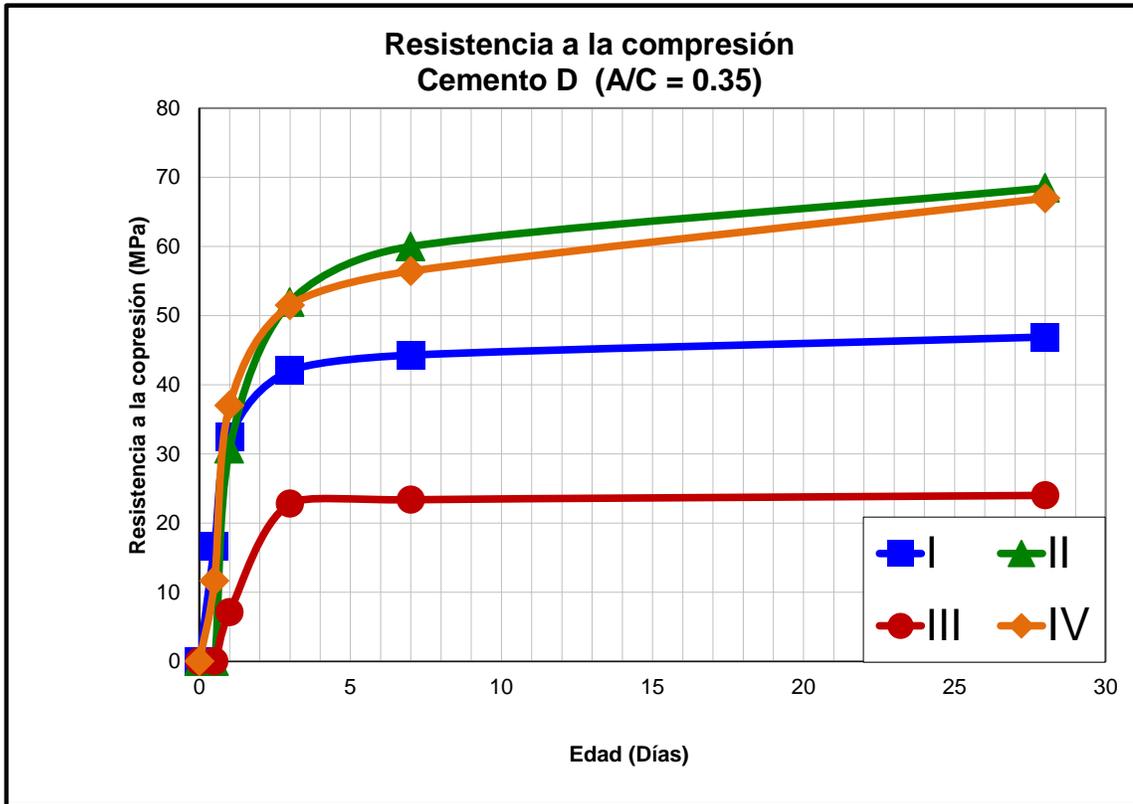


Fig. 5.18 Desarrollo de resistencia a la compresión en mezclas de mortero fabricadas con cemento Pórtland compuesto 30R, de la marca D y arena estándar en la etapa “compatibilidad cemento-aditivo”.

Tabla 5.12. Desarrollo de resistencia a la compresión en mezclas de mortero fabricadas con cemento Pórtland compuesto 30R, de la marca D y arena estándar en la etapa de “compatibilidad cemento-aditivo”.

Resistencia a la compresión en cubos (MPa)					
Mezclas de mortero (Cemento D)	Edad en días				
	0.5	1	3	7	28
D-I	16.6	32.4	42.0	44.3	46.9
D-II	0.0	30.7	51.9	60.0	68.4
D-III	0.0	7.1	22.8	23.4	24.0
D-IV	11.6	37.0	51.5	56.4	67.0

Una característica importante para definir una apropiada combinación cemento-aditivo para la producción de concretos de alto comportamiento es la resistencia a la compresión; por ello, el primer paso en este estudio estuvo orientado a descartar aquellos SC para los que los morteros fabricados con éstos presentaron las menores resistencias. Para los trabajos posteriores se seleccionaron los morteros de mayor resistencia, fijando esta en 60MPa, como mínimo a la edad de 28 días. En esta selección se descartaron también mezclas que, aunque sus morteros arrojaron resistencias superiores a los 60 MPa, presentaron sangrado excesivo y segregación al momento de fabricar los especímenes. Con base en este análisis, 5 mezclas de mortero resultaron con un desempeño sobresaliente, éstas fueron evaluadas de acuerdo con su mínima dosificación de aditivo, su máxima fluidez, pérdida de consistencia no menor que 30 minutos y tiempos de fraguado menores que 300 minutos, de acuerdo con lo recomendado en ASTM C-403, para mezclas de concreto que contienen aditivos reductores de agua. Los resultados se ilustran en tabla 5.13. Estas últimas pruebas ejecutadas condujeron a definir el cemento y el aditivo a utilizar en la etapa de “curado interno” (etapa 3), para la fabricación de concreto con tendencia a elaboración de elementos prefabricados. En la tabla 5.13 se muestra un resumen de la selección de las mezclas de mortero por resistencia a la compresión, a los 28 días de edad, máxima fluidez, punto de saturación, tiempos de fraguado y apariencia de mezcla en el momento de su fabricación.

Tabla 5.13. *Propiedades en estado fresco y endurecido de los morteros contemplados en la etapa 2.*

Mezclas de mortero (a/c=0.35)	Cto (kg/m ³)	Agua (kg/m ³)	P.S	Fluidez	Resistencia a la compresión	Obs.	Mezclas de interés	Tiempos de fraguado (en minutos)	
			Agente activo en el aditivo (kg/m ³)	(%)	28 días de edad (MPa)			F.I.	F.F
A-I	785.1	267.85	1.96	116	60	O.K.	✓	504	698
A-II	784.4	268.34	2.53	114	65	O.K.	✓	514	672
A-III	766.3	263.58	15.49						
A-IV	785.06	271.80	2.07	99	63	O.K.	✓	262	407
B-I	786.37	268.28	1.96	109	56	O.K.			
B-II	786.15	269.83	2.17	107	61	O.K.	✓	578	712
B-III	763.32	261.63	18.51						
B-IV	785.15	270.59	2.93	112	62	sangrado			
C-I	793.08	274.71	0.81	118	48	O.K.			
C-II	791.36	271.91	2.07	124	68	segregación			
C-III	763.03	260.43	22.21						
C-IV	791.36	273.98	2.08	142	64	segregación			
D-I	791.92	271.47	1.62	96	48	O.K.			
D-II	789.51	268.01	3.40	126	69	sangrado			
D-III	749.14	252.61	32.1						
D-IV	789.93	271.99	3.12	114	68	O.K.	✓	301	475

Donde Cto, P.S y Obs. son cemento, punto de saturación y Observaciones al momento de la fabricación de la mezcla, respectivamente.

Con base en los estudios realizados en la etapa 2, se eligió el cemento y el aditivo que presentaron el comportamiento óptimo para una aplicación donde se requieren tiempos de fraguado relativamente cortos, a partir de pruebas en estado fresco y estado endurecido. En la etapa de curado interno se fabricaron morteros en lugar de concretos, con el fin de magnificar las retracciones a edades tempranas y, por tanto, que en la comparación pretendida se distinguieran mejor las diferencias atribuibles a las puzolanas o al agente de curado interno.

5.3 Etapa 3.- Curado interno.

Para la evaluación del efecto del curado interno a edades tempranas, se monitorearon tanto la retracción autógena en los morteros con características típicas de un CAC, como la retracción química. Para este fin se estudiaron tres sistemas cementantes (MC) en los morteros: cemento Portland como referencia “R”, ceniza volante, en sustitución del cemento Portland, para el mortero “Cv” y humo de sílice, en sustitución del cemento Portland, para el mortero “Hs”.

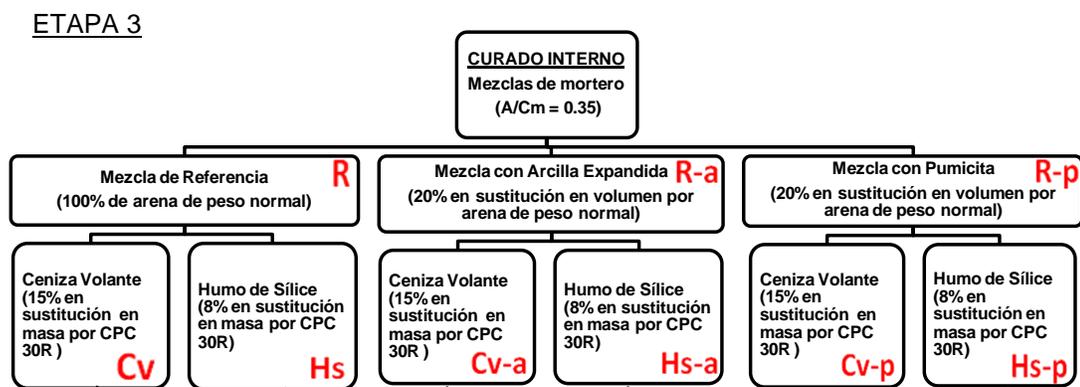


Fig. 5.19 Clasificación de los morteros fabricados para evaluar el “curado interno” y el efecto de esta tecnología en la reacción puzolanica.

5.3.1. Pruebas en morteros.

En primera instancia, las propiedades de los morteros en estado fresco se caracterizaron por medio de los procedimientos ASTM correspondientes, cuyos resultados se analizan y describen a continuación.

5.3.1.1. Fluidez en los morteros.

Para los nueve morteros estudiados en esta etapa (figura 5.19), la fluidez se determinó inmediatamente después de la fabricación mediante el método de prueba ASTM C-1437-07. Ésta resultó en un nivel de 70 a 220%, como se puede observar en la figura 5.20. En el mortero “Cv”, el uso de ceniza volante condujo a incrementar la fluidez, lo cual se atribuye a la forma esférica de sus partículas y al tamaño promedio de éstas (80 µm). Al utilizar humo de sílice la

fluidez disminuyó y, como se puede apreciar en la figura 3.6, el tamaño es menor, resultando en una área superficial específica mucho mayor.

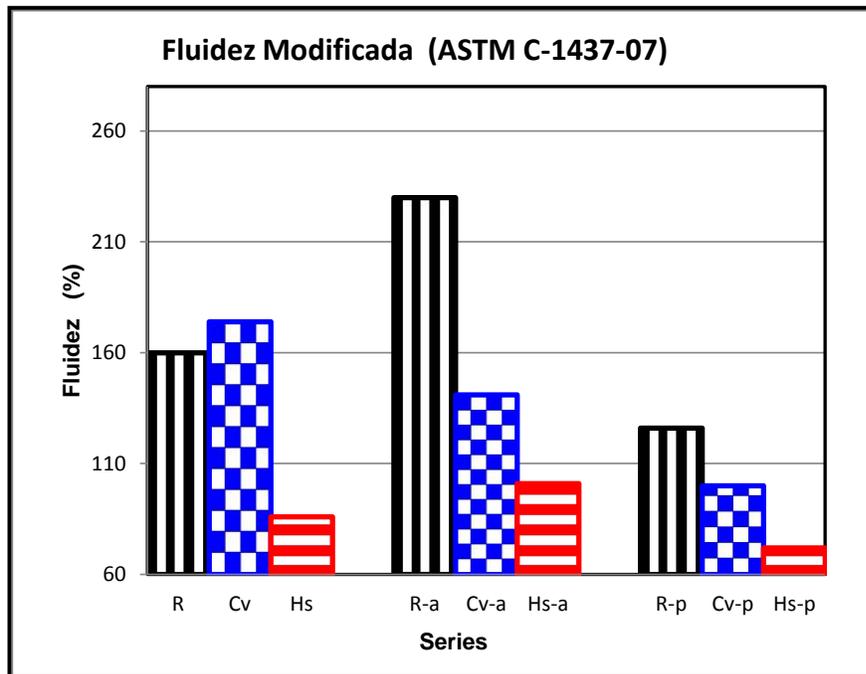


Fig. 5.20 *Fluidez de morteros fabricados con arena caliza en la etapa de “curado interno” (etapa 3) por el método ASTM C-1437-07.*

5.3.1.2. Contenido de aire.

El contenido de aire se determinó mediante el método ASTM C-185. Los resultados se muestran en la figura 5.21. Se observa que los morteros que contienen agregado de pumicita, los contenidos de aire son mayores.

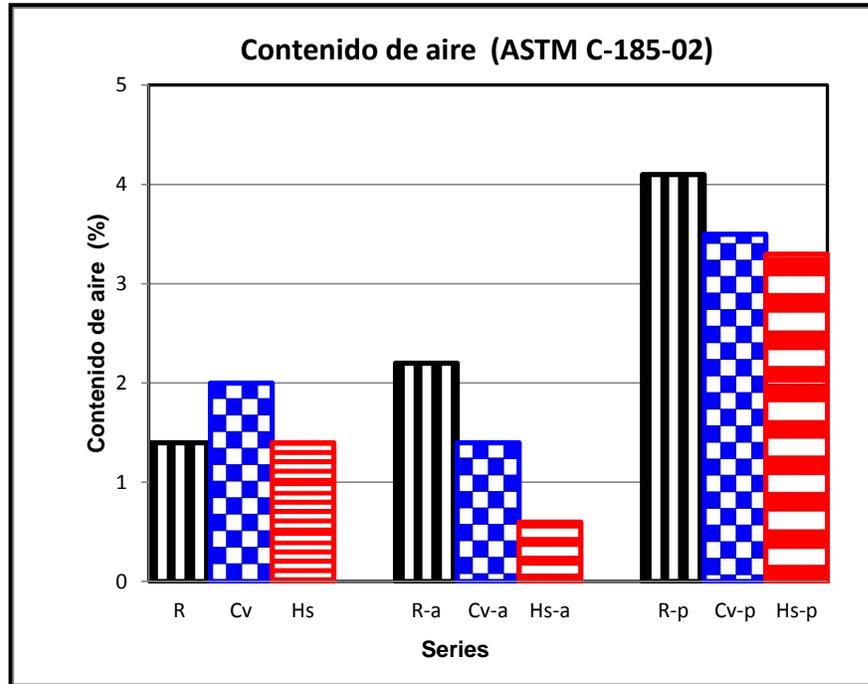


Fig. 5.21 *Contenido de aire en morteros fabricados con arena caliza mediante el método ASTM C-185-02.*

5.3.1.3. Peso volumétrico.

En la figura 5.22. se ilustran los pesos volumetricos de los morteros fabricados con arena caliza. En este gráfico se ilustran los niveles en que se reduce este parámetro, al sustituir un 20% en volumen de agregado de peso normal, por agregado ligero. La pumicita presentó una reducción mayor, atribuible principalmente a su densidad, la que es más baja que la de la arcilla.

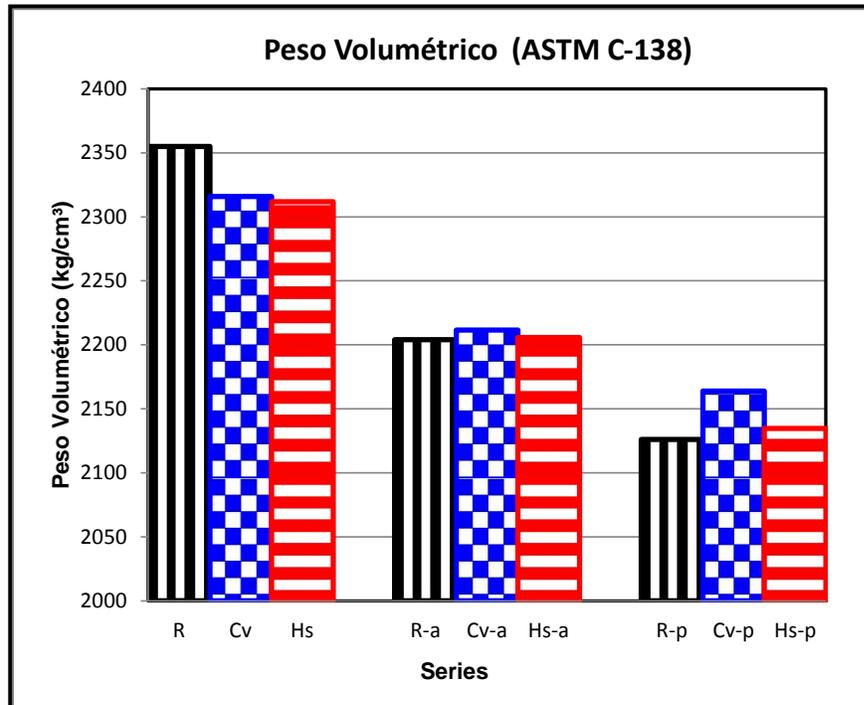


Fig. 5.22 *Peso volumétrico de los morteros fabricados con arena caliza, en la etapa de fresco.*

5.3.1.4. Retracción química.

El desarrollo de la retracción química depende en gran medida de la reacción de hidratación del cemento, de su distribución de tamaños, de su composición y de la presencia de materiales cementantes suplementarios. Es importante mencionar que el vaciado de agua de los poros en los agregados ligeros saturados debido a la desorción que se presenta a consecuencia de la reacción química, causa una disminución de la humedad relativa interna y esto puede afectar las velocidades de reacción de los materiales cementantes. Por ejemplo, la reacción puzolánica del humo de sílice puede ser mucho menos sensible a una baja humedad relativa, que las reacciones del clínker de cemento. En una relación agua-cementante baja, la auto-deseccación de la pasta de cemento y el grado de hidratación último del cemento, bajo condiciones de curado selladas, puede ser del 50%, mientras el humo de sílice puede reaccionar por completo⁽⁸⁷⁾.

Los morteros fabricados con agregados ligeros saturados mostraron un efecto favorable en la retracción química, disminuyendo la contracción en un 15% y un 25% cuando se utilizaron arcilla expandida y pumicita, respectivamente. La sustitución de los MCS por cemento no contribuyeron a mejorar este fenómeno y, en algunos casos, propiciaron el aumento de la retracción química a edades tempranas, como en el caso de la ceniza volante que contribuye a una rápida retracción química en el sistema⁽²²⁾.

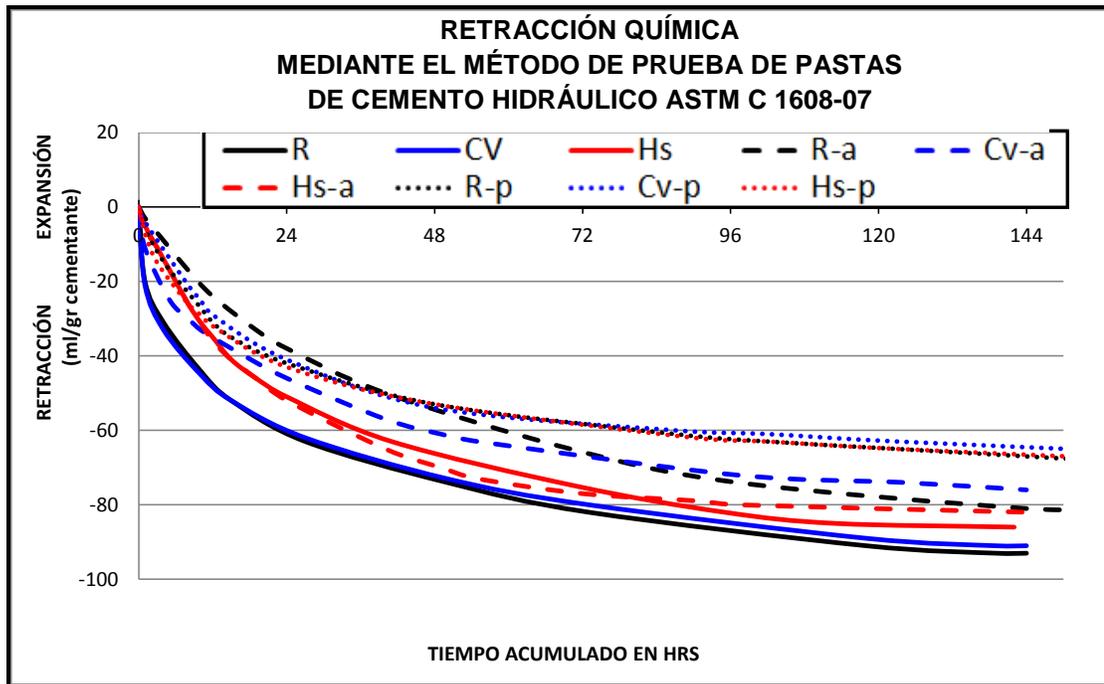


Fig. 5.23 *Retracción química de los morteros fabricados con agregado calizo y agregados ligeros saturados.*

Un aspecto importante observado durante la prueba de retracción química es la disminución de movimientos volumétricos cuando se incorporaron agregados ligeros saturados, como agentes de curado interno dentro de los morteros. Esta disminución en las retracciones se debe a un mejor curado sobre la pasta cementante resultando en una reducción del posible agrietamiento temprano, que por consecuencia puede repercutir en severos agrietamientos a edades avanzadas.

5.3.1.5. Retracción autógena.

En la figura 5.24. se ilustra la retracción autógena producto de la retracción química, a edad temprana de los morteros, desde los 5 minutos hasta las 12 horas. Por las repercusiones que tienen en el volumen de la pasta, las densidades de los MCS, los morteros fueron fabricados respetando los porcentajes de pasta, de acuerdo con ASTM C-109 y teniendo una relación A/Cem = 0.35 y consumo de cementante de $612 \pm 8 \text{ kg/m}^3$.

El comportamiento de los morteros en las etapas de fresco y endurecido puede observarse midiendo la retracción lineal. En la figura 5.24. se presentan los resultados de pruebas de retracción autógena sin restricciones, en un sistema aislado de una fuente de agua externa, hasta la edad de 12 horas después de su fabricación, ya que los cambios volumetricos de los especímenes no presentaron cambios significativos a edades posteriores. Las mediciones se realizaron a cada 5 segundos. Cada curva en la figura representa el promedio de 2 especímenes. La mayor parte de la deformación autógena ocurre entre las 2 y las 6 horas, tiempo en el que los morteros experimentan su etapa de fraguado. Las medidas de retracción autógena deben realizarse inmediatamente despues del fraguado inicial.

El uso de arcilla expandida saturada, en sustitución del 20% en volumen, por arena caliza, redujo de un 40% a un 45% la retracción autógena; mientras que el uso del agregado pumicita saturado la redujo de un 55% a un 60%. Comparando la pumicita con arcilla expandida, se observa que la pumicita fue más efectiva al arrojar entre un 10% y un 25% más reducción de la retracción autógena que la arcilla; pero se habrá de observar si no se sacrifica resistencia a la compresión. Se observa que con el uso de ceniza volante se reduce la retracción autógena, en comparación con las mezclas de referencia. El uso de un 15% en sustitución por cemento en peso, reduce un 10% las retracciones autógenas. Aunada a esta contribución, cuando se añadieron agregados ligeros saturados arcilla expandida y pumicita, en las mezclas de morteros, se disminuyó en mayor medida la retracción autógena, arrojando valores del 36%

al 43% y del 56% al 65% respectivamente a la edad de 12 horas.

Una alternativa propuesta anteriormente y que contribuye a la reducción de la retracción autógena, considera que las partículas de ceniza volante y de humo de sílice no hidratadas sirven como una inclusión inerte que obstruye el desarrollo de la deformación por retracción⁽⁷⁰⁾.

Para las mezclas que contienen puzolanas y agua de curado interno mediante agregados de pumicita en remplazo, se observa que se encuentran muy cerca de eliminar completamente la retracción autógena (menos de 130 microdeformaciones a la edad de 12 horas). Por otro lado, en mezclas que contienen un 20% de arcilla expandida, en sustitución a la arena caliza en volumen, se observa que la retracción autógena es de 180 microdeformaciones, a la edad de 12 horas. Por lo tanto, se concluye que el agua retenida en los agregados, especialmente en las mezclas con arcilla expandida, no es suficiente para llegar a eliminar por completo la retracción autógena; para esto probablemente resulta útil el ingresar un mayor volumen de agregado ligero saturado, en las mezclas de mortero que se hagan con estos mismos materiales.

Las primeras deformaciones de las mezclas y su gran rapidez de retracción suceden a la edad de 0 a 2, de 0 a 3 y de 0 a 4 horas, para las mezclas con pumicita, arcilla expandida y agregado calizo, respectivamente. Estas deformaciones tienen lugar antes del fraguado inicial y pueden atribuirse al gran contenido de cementante, que se ve acompañado por un considerable incremento de calor, producto de la hidratación del material y su retracción química. Después de estas 2, 3 y 4 horas, respectivamente, la rapidez de la retracción autógena se reduce y posteriormente comienza a expandirse.

La expansión que se presenta en todos los morteros que contienen agregados ligeros saturados está dentro del intervalo de tiempo de 2 a 10 horas, tiempo en el que el calor de hidratación en dichas mezclas es máximo (ver sección 5.3.1.7), y esta expansión se puede atribuir a la formación de nuevos productos

de hidratación, que se consideran como la principal causa de la expansión a edades tempranas^{(69),(70)}. Otro factor que puede originar expansión a edades tempranas puede ser la reabsorción del agua de sangrado⁽⁷²⁾. Para este caso en particular, el aumento de volumen (expansión) del mortero, se atribuye al agua que liberan los agregados ligeros saturados para el curado del mortero y/o a la expansión térmica producto del calor generado ó ambas.

El agua liberada desde los agregados ligeros es absorbida por el mortero mediante una succión capilar. Esta absorción causa expansión en el mortero dentro del intervalo de tiempo de 90 minutos a 3 horas. Se observa que este efecto de absorción se presenta más significativamente en mezclas que contienen pumicita, debido a que sus agregados retienen mayor cantidad de agua que la arcilla expandida. Además esta expansión puede estar influenciada por el calor de hidratación del cemento, el que con el incremento de la temperatura puede presentar una expansión térmica. Se observa que esta expansión se mantiene en los niveles de un 15% a un 20% y de un 10% a un 12%, para las mezclas fabricadas con pumicita y arcilla expandida, respectivamente. El desarrollo de la expansión para las mezclas que contienen humo de silice es más acelerado que en aquellas mezclas que contienen ceniza volante y que las de referencia, a pesar de que alcanza los mismos valores de expansión entre las 2 y las 10 horas. Después de esto, el mortero no sufre deformaciones autógenas significativas y todo parece indicar que esta estabilización sucede en el momento en el que el mortero comienza a enfriarse, después de alcanzar su máxima temperatura. En el caso de que la expansión térmica fuera igual a la retracción autógena, la retracción podría no presentarse observada. Es importante señalar que, en determinado momento del proceso de hidratación, la expansión térmica y a la contracción autógena se presentan de manera simultánea.

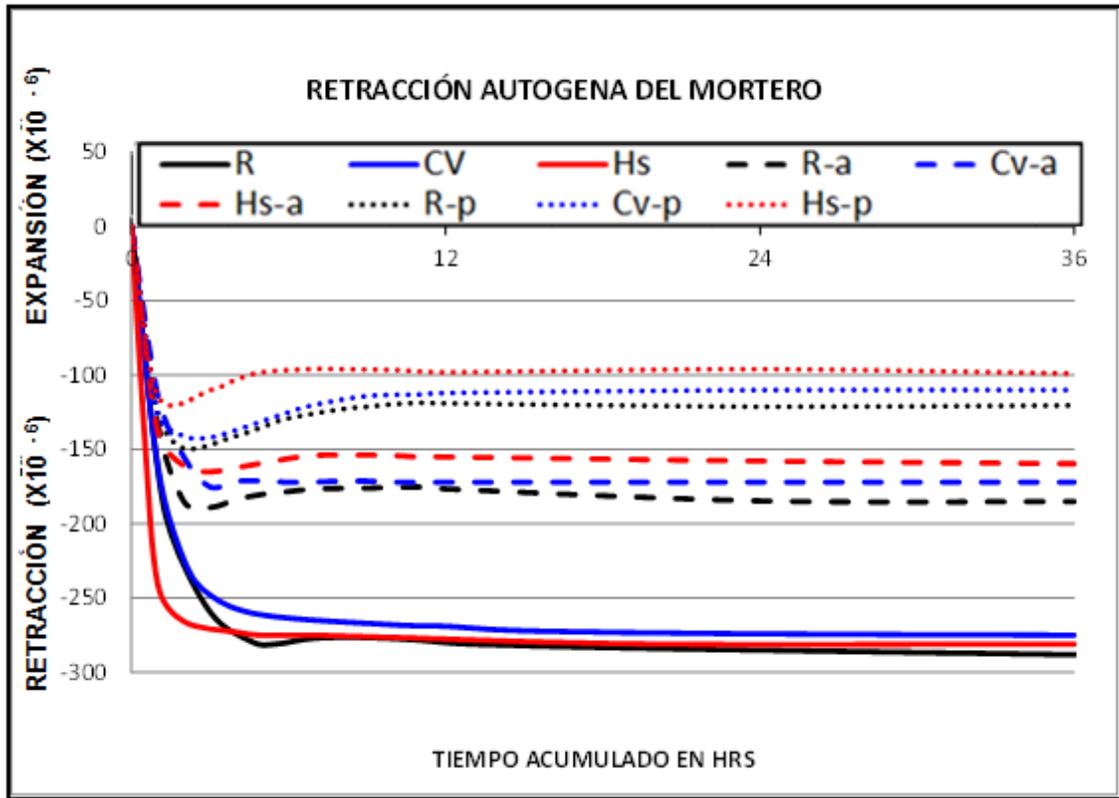


Figura 5.24. Determinación de la retracción autógena del mortero.

Los resultados que aparecen en la figura 5.24 indican que los morteros con relación A/C baja y humo de sílice inducen rápidamente la retracción autógena. En esta gráfica también se puede observar que en la mayoría de los morteros casi el total de la retracción autógena se presenta durante los primeros 4 días.

Los valores típicos de la retracción autógena de los concretos ordinarios son cerca de $40 \mu\epsilon$, a la edad de un mes y $100 \mu\epsilon$ después de 5 años, los que son relativamente bajos, comparados con los producidos por la retracción por secado⁽⁸³⁾. En una relación agua-cementante baja, de 0.17, la retracción autógena reportada fue de $700 \mu\epsilon$ ⁽⁸⁴⁾. En este trabajo se reportan retracciones autógenas máximas de $280 \mu\epsilon$. Las variaciones de la retracción autógena dependerá de la cantidad y las características de los materiales empleados.

De los resultados obtenidos se ilustra que el uso de humo de silice aumenta la tasa de velocidad de la retracción autógena, tal como fue reportado por Tazawa y Miyazawa⁽⁸³⁾.

Se observa que la mayor retracción autógena se presenta durante el fraguado del mortero (antes de las 4 horas), prácticamente durante esta etapa se desarrolla todo el cambio volumétrico.

La incorporación de humo de silice y el alto contenido de cemento en concretos de alto comportamiento contribuyen al incremento de la retracción autógena y de la tendencia al agrietamiento a edades tempranas, debido a las tensiones desarrolladas en la pasta y a la baja resistencia de la misma. Cabe señalar que no es posible obtener la retracción total del mortero sumando la retracción química, la retracción autógena y la retracción por secado directamente, por causa de las diferentes condiciones de curado en que se desarrolla cada una de ellas.

Otro factor importante en la retracción química es la estructura del poro del material cementante. Una estructura de poro gruesa (a partir de un cemento grueso), pudiera reducir la retracción por auto-deseccación, como se ha demostrado experimentalmente^(89,90,91). Debido a que el humo de silice tiene tamaños de partícula menores que los del cemento, éstos crean una estructura de poro muy fina dentro de la pasta de cemento hidratada, lo cual aumenta la tasa en que se presenta la retracción autógena.

5.3.1.6. Retracción por secado.

Los resultados de las pruebas de retracción por secado, de los morteros fabricados con arena caliza, arcilla expandida y pumicita, hasta la edad de 220 días se ilustran en las figuras 5.25, 5.26 y 5.27, respectivamente. Cada curva representa el promedio de tres especímenes.

En las figuras 5.25 a la 5.27 se observa que, a la edad de 28 días, la retracción por secado sufrió cambios significativos, producto del descontrol de temperatura y humedad del cuarto en el que se encontraban almacenados los especímenes. El nivel de la retracción por secado medido a la edad de 220 días fue de 580 μm a 800 μm . De manera general, se observa que la sustitución de ceniza volante y humo de sílice en un sistema cementante ayuda a reducir la retracción por secado. De manera contraria, a la retracción autógena, se observa que no existe ventaja al introducir agregado fino ligero saturado como agente de curado interno para reducir la retracción por secado. Se observa que tanto la arcilla expandida, como el agregado de pumicita en sustitución en estas mezclas de mortero, alcanzan valores similares de retracción por secado a la edad de 220 días. De acuerdo con Zhang et al., ⁽⁷³⁾ la retracción por secado de concretos con agregado normal y con agregados ligeros es similar, y la retracción por secado de un concreto de agregado ligero, expuesto a un ambiente seco, es más baja, que la de un concreto de peso normal, esto debido a que la retracción autógena es mas baja comparada con la de un concreto de agregado normal. Por lo tanto, el agua absorbida por el agregado ligero, contribuye internamente en el curado, incluso después de los 28 días y compensa la pérdida de agua, cuando los especímenes de retracción por secado se almacenan en un cuarto a 23 ± 2 °C y $50 \% \pm 4\%$ de humedad relativa. Se observa también que la retracción por secado de las muestras de mortero con MCS sufren cambios volumétricos significativos (retracciones menores) con base en los de referencia.

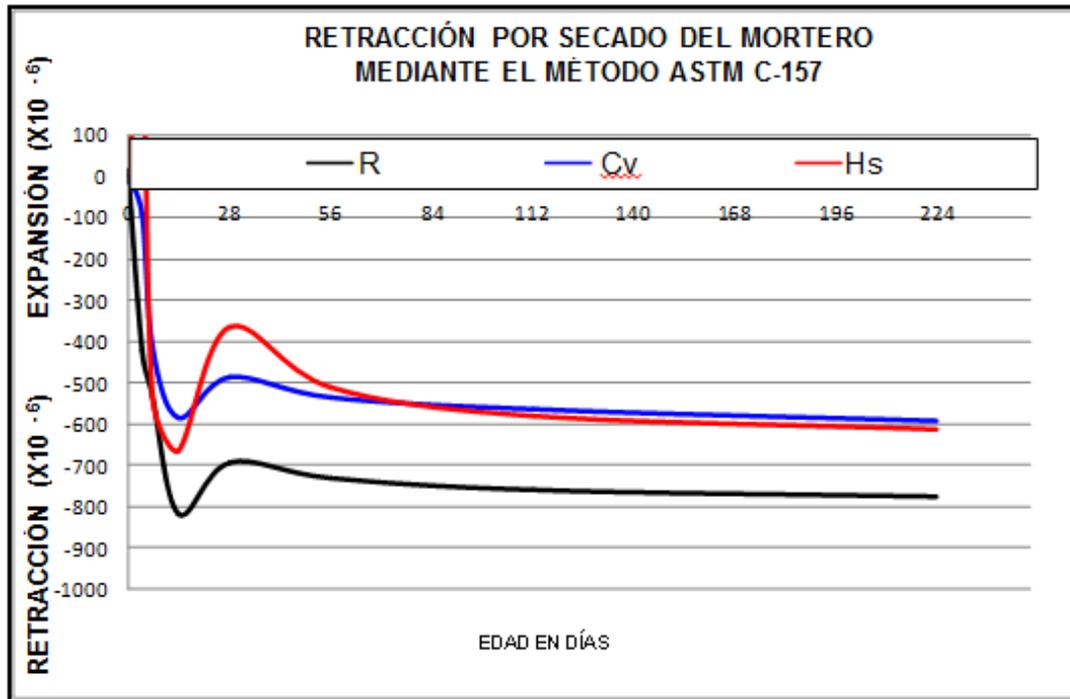


Figura 5.25. Determinación de la retracción por secado de mezclas de mortero con agregado calizo.

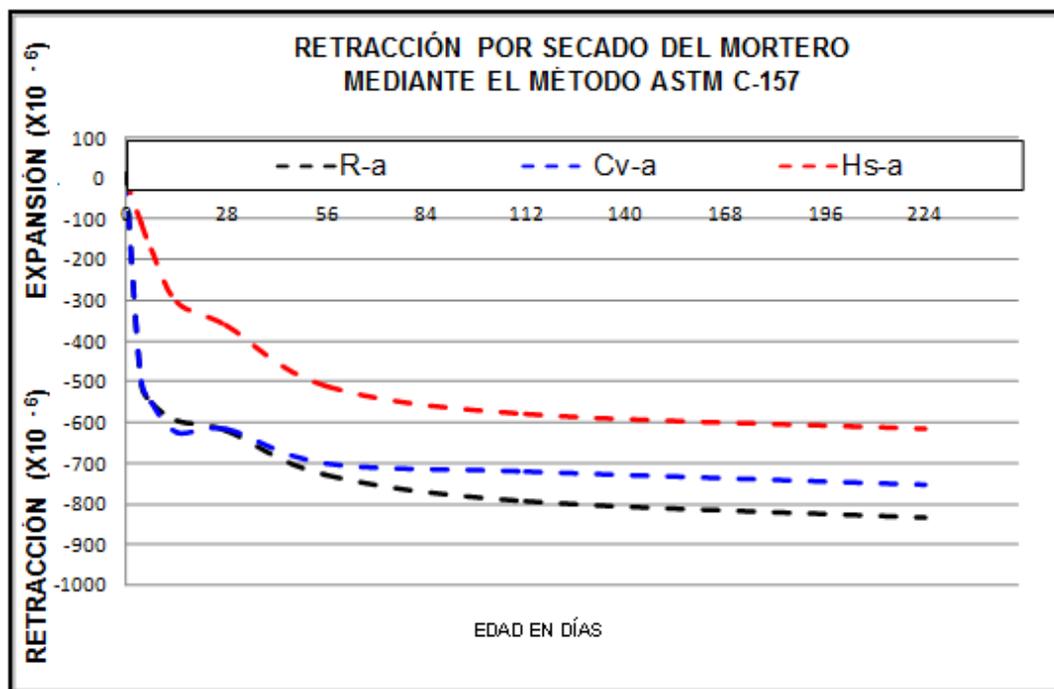


Figura 5.26. Determinación de la retracción por secado de mezclas de mortero con agregado de arcilla expandida.

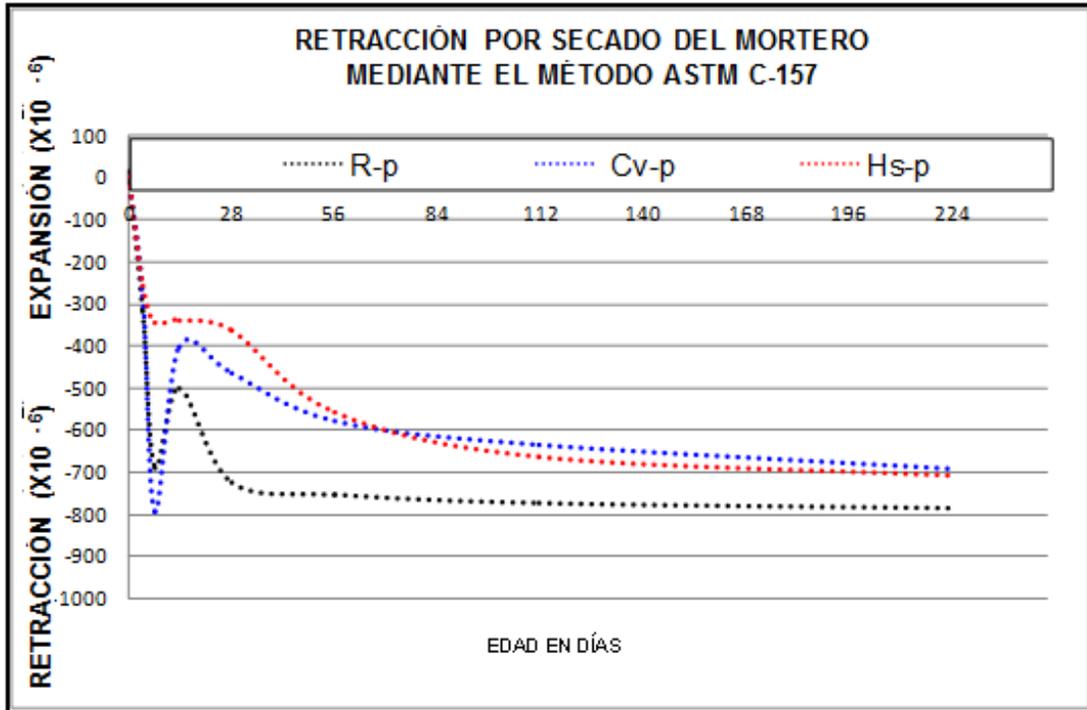


Figura 5.27. Determinación de la retracción por secado de mezclas de mortero con agregado de pumicita.

5.3.1.7. Temperatura de los morteros.

Además de la composición y relación agua-cementante del concreto, uno de los factores que afecta el punto de partida de la retracción autógena es el incremento de temperatura a edades tempranas, debido al calor de hidratación del cemento. El incremento de la temperatura puede resultar en un incremento de volumen del concreto y/o mortero. Cuando el incremento de volumen debido a la expansión térmica es igual a la retracción autógena, la retracción autógena podría no ser observada. P.C. Aïtcin⁽⁸³⁾ observó que durante las primera horas de endurecimiento, el concreto con baja relación agua-cemento se expande. esta expansión térmica es más grande que la retracción autógena, pero la retracción autógena supera la expansión térmica muy rápidamente, de manera que los concretos con relación agua-cementante baja comienzan a retraerse de manera significativa después de la fase inicial de expansión.

En la figura 5.28. se observa el calor generado producto de la hidratación del cemento, así como la influencia de las puzolanas, los agregados ligeros y la combinación de estos materiales dentro del sistema cementante. Se aprecia que las temperaturas máximas alcanzadas en los morteros van desde los 50 °C a los 65 °C en un tiempo de 6 a 10 h después de su fabricación. El hecho de introducir puzolanas y agregados ligeros al mortero redujo el calor de hidratación, y éste se redujo aún más cuando se hizo una combinación de ambos materiales. La disminución de temperatura en aquellas mezclas que contienen agregados ligeros se puede atribuir a que el agua contenida en los agregados absorbe parte del calor de hidratación. Se asume que la pumicita disminuye la temperatura con mayor facilidad que la arcilla, puesto que contiene mayor cantidad de humedad. En los morteros R y Hs se observa que el aumento de temperatura es mayor que en aquellos en los que se utilizó ceniza volante como MCS. El retraso de la ganancia de temperatura en los morteros que contienen Cv es de gran beneficio para disminuir cambios volumétricos, debido a gradientes de temperatura, reduciendo con esto los posibles agrietamientos que pudiesen presentarse a edades tempranas. Estas diferencias de temperatura demuestran el potencial de la sustitución de ceniza volante en las mezclas, para reducir la temperatura en elementos de concreto masivo.

Tabla 5.14. *Temperaturas máximas registradas en las mezclas de mortero con arena caliza, “etapa 3”.*

Temperaturas Máximas de las mezclas de mortero (°C)	
Mezcla R	65
Mezcla Cv	58
Mezcla Hs	62
Mezcla R-a	62
Mezcla Cv-a	50
Mezcla Hs-a	53
Mezcla R-p	52
Mezcla Cv-p	50
Mezcla Hs-p	52

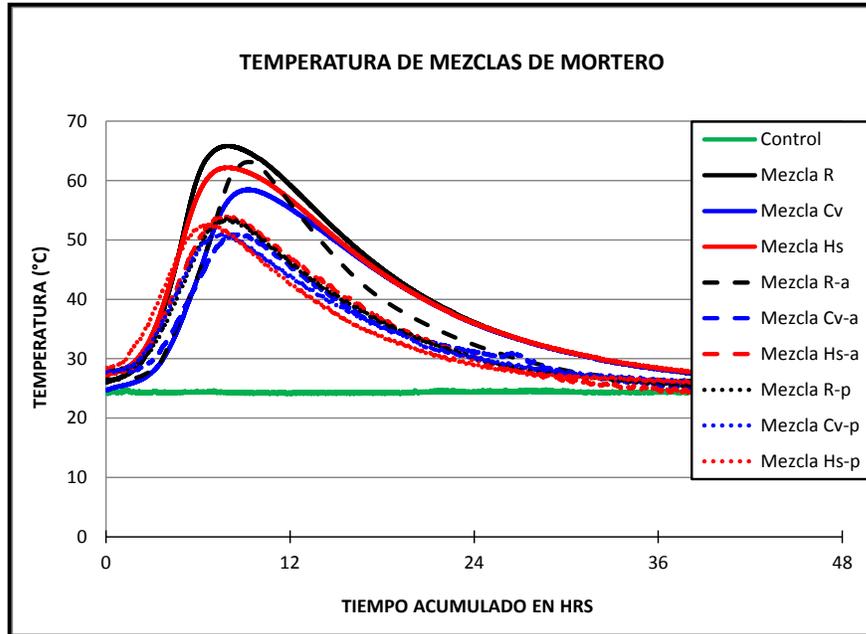


Figura 5.28. Temperatura de los morteros de la etapa “curado interno”

5.3.1.8. Tiempos de Fraguado.

Los resultados de tiempos de fraguado muestran que el uso de agregados ligeros como medio de curado interno en mezclas de mortero acelera el tiempo de fraguado inicial y final, además de que el uso de puzolanas como el humo de sílice, en combinación con este tipo de agregados, contribuye a acelerar aún más los tiempos de fraguado; de manera contraria al humo de sílice, la ceniza volante retarda los tiempos de fraguado, contribuyendo a disminuir los cambios volumétricos por temperatura y, por consiguiente, los agrietamientos a edades tempranas, además de aumentar la durabilidad del elemento.

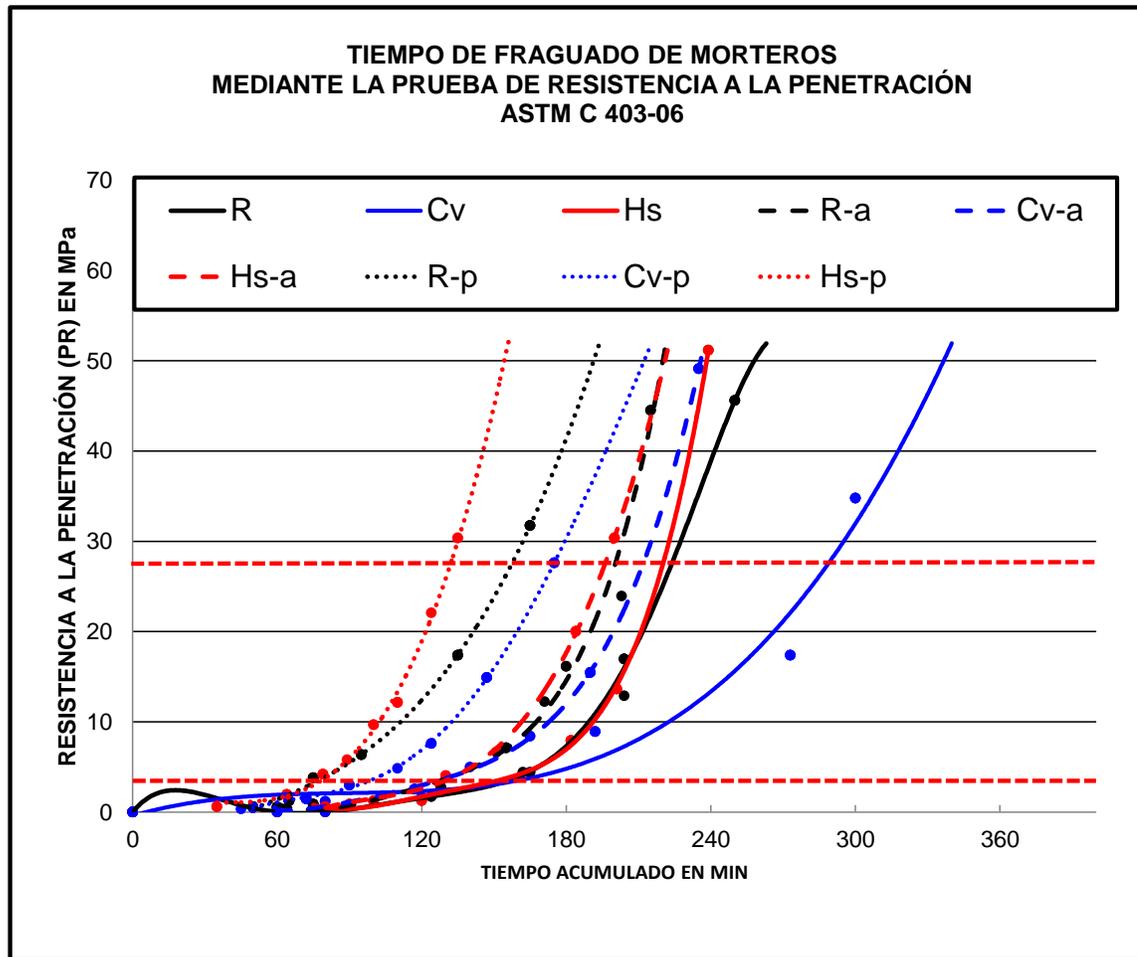


Figura 5.29. *Tiempos de fraguado de los morteros de la etapa “curado interno”*

5.3.1.9. Resistencia a la compresión.

En la figura 5.30 se observa que la resistencia a la compresión se ve influenciada directamente por la sustitución de puzolanas y agregados ligeros. El hecho de introducir agregados ligeros en las mezclas de mortero reduce la resistencia a la compresión en todas las mezclas, a excepción de la mezcla fabricada con humo de sílice y arcilla expandida, la cual mantuvo una resistencia igual a su referencia a la edad de 28 días. Para esta mezcla, después de esta edad, el incremento de resistencia a la edad de 90 días fue 5% mayor. La pérdida de resistencia en la mezcla de mortero que contiene humo de sílice y pumicita es del orden de un 35%, a la edad de 28 días y el incremento después a la edad de 90 días fue de un 8%. En los morteros sin

sustitución de puzolanas se observa que al añadir agregado ligero, “arcilla expandida” y “pumicita”, se reduce la resistencia a compresión entre un 25 % y un 45%, respectivamente, a la edad de 28 días; pero estas mezclas ganan resistencia rápidamente después de esta edad, por el hecho de contener agregado ligero que ayuda a la continua hidratación del cemento dentro de la matriz cementante. El incremento de resistencia de los morteros con agregado ligero, de los 28 a los 56 días fue de un 15%, mientras que la de los que no contenían agregado ligero aumentó tan solo un 5%. Esto demuestra que el agua contenida dentro del agregado ligero sigue contribuyendo a la formación de los silicatos de calcio hidratados. Introducir agregados ligeros en mezclas de morteros que contienen sólo como material cementante, cemento portland CPC 30R, disminuye la resistencia a la compresión en un 10 % y un 30% a la edad de 90 días al utilizar arcilla expandida y pumicita como agregados ligeros, respectivamente.

Analizando de manera paralela los morteros que contienen agregados ligeros, ceniza volante y humo de sílice, se observa que aquellos morteros que contienen ceniza volante no modifican de manera significativa las ganancias en resistencia a edades avanzadas (90 días); sin embargo, sí mejoran otras propiedades, como la permeabilidad a los iones cloro y la porosidad abierta al agua. De manera contraria, el uso de humo de sílice aumenta la resistencia a la compresión, y este aumento se manifiesta desde las primeras edades. Tal es el caso del SC que contiene humo de sílice y arcilla expandida, que registra una resistencia de 95 MPa, que es, superior al resto de las mezclas. Una característica de los morteros de resistencias elevadas es su fragilidad y la falla durante el ensaye a súbita.

El uso de ceniza volante en mezclas de mortero, reduce la resistencia a la compresión en los primeros días de edad, mientras que el uso de humo de sílice gana resistencia, fácilmente, los primeros días de edad del mortero.

En la figura 5.30 se presenta la resistencia a la compresión, determinada sobre especímenes cúbicos, a la edad de 1,3, 7, 14, 28, 56, y 90 días, según el

ensaye correspondiente, de acuerdo con el procedimiento descrito en ASTM C-39.

A pesar de que la arcilla expandida es un agregado más débil que el agregado calizo, se observa que a la edad de 90 días el mortero fabricado con arcilla expandida y humo de sílice sobrepasa la resistencia a la compresión de los morteros fabricados con cemento Portland y el resto de agregados. Esta propiedad puede atribuirse a la mejora de la zona intersticial entre la pasta y el agregado de pumicita, debido al curado interno y a la ausencia de microagrietamientos inducidos por retracción.

Otra posible explicación es que el agregado ligero tiene una mejor distribución de tamaños de partículas que el agregado calizo (módulo de finura del agregado calizo, y arcilla expandida). Los agregados ligeros actúan como defectos más grandes dentro de la matriz cementante, donde el esfuerzo podría concentrarse e inicialmente agrietarse.

La resistencia a la compresión en los morteros se ve influenciada por la adición de pumicita como agente de curado interno, al reducirla en un 20% y un 10%, cuando se utiliza arcilla expandida; sin embargo, las resistencias obtenidas han sido catalogadas por el ACI como altas (mayores de 35 MPa). En este sentido, la etapa experimental para estudiar la compatibilidad cemento-aditivo tuvo repercusiones muy favorables en el desarrollo de resistencia a la compresión.

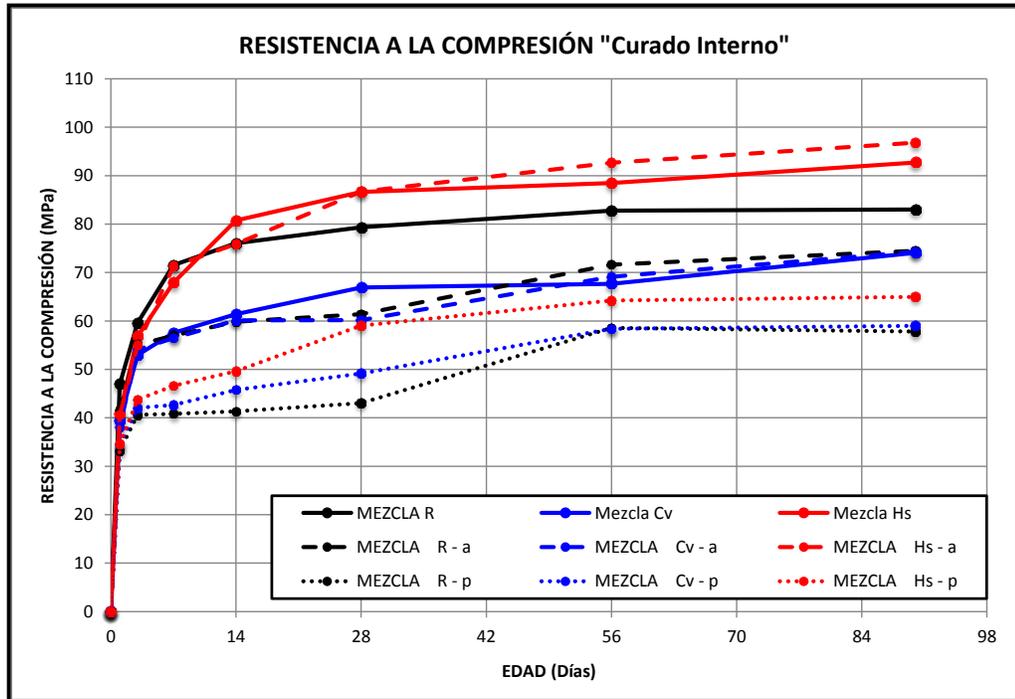


Figura 5.30. Resistencia a la compresión en cubos de mortero.

Los efectos últimos de la resistencia podrían depender ampliamente de las proporciones de la mezcla y las condiciones de curado. Actualmente se ha observado que morteros con relación agua-cementante de 0.35, con un 8% de humo de sílice en adición y curados bajo condiciones selladas de 30°C, por 28 días, mejoran la resistencia a la compresión⁽⁸⁷⁾.

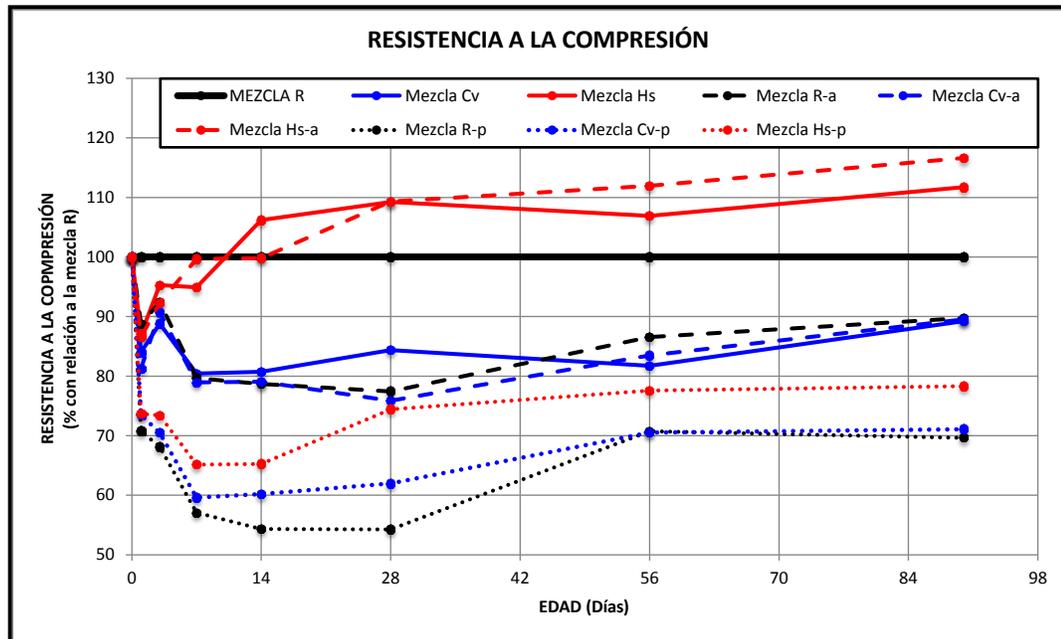


Figura 5.31. Resistencia a la compresión de morteros en % con respecto a la mezcla R (Referencia).

5.3.1.10 Permeabilidad a los iones cloro.

En la figura 5.32. se observa que el uso de un MCS dentro de un SC ayuda a reducir la permeabilidad a los iones cloro a través del tiempo, aumentando la durabilidad del elemento de concreto y/o mortero; especialmente cuando se utiliza humo de sílice. Al utilizar CV en los morteros la reducción de la permeabilidad es de manera gradual, conforme pasa el tiempo. De manera contraria, el humo de sílice presenta sus valores máximos de reducción de permeabilidad desde los 28 días edad. Además, el uso de agregado ligero dentro de una matriz cementante ayuda a disminuir aún más la permeabilidad del mortero. Esta característica se le puede atribuir a que el agua atrapada en los poros de los agregados ayuda a la continua hidratación del material cementante.

Por otro lado, se observa que las permeabilidades de los morteros fueron altas; esto pudiera atribuirse a la baja relación agua-cemento y a que los morteros demandan más pasta que, por consiguiente, contiene mayor cantidad de

cemento, que genera más calor de hidratación y más agrietamientos.

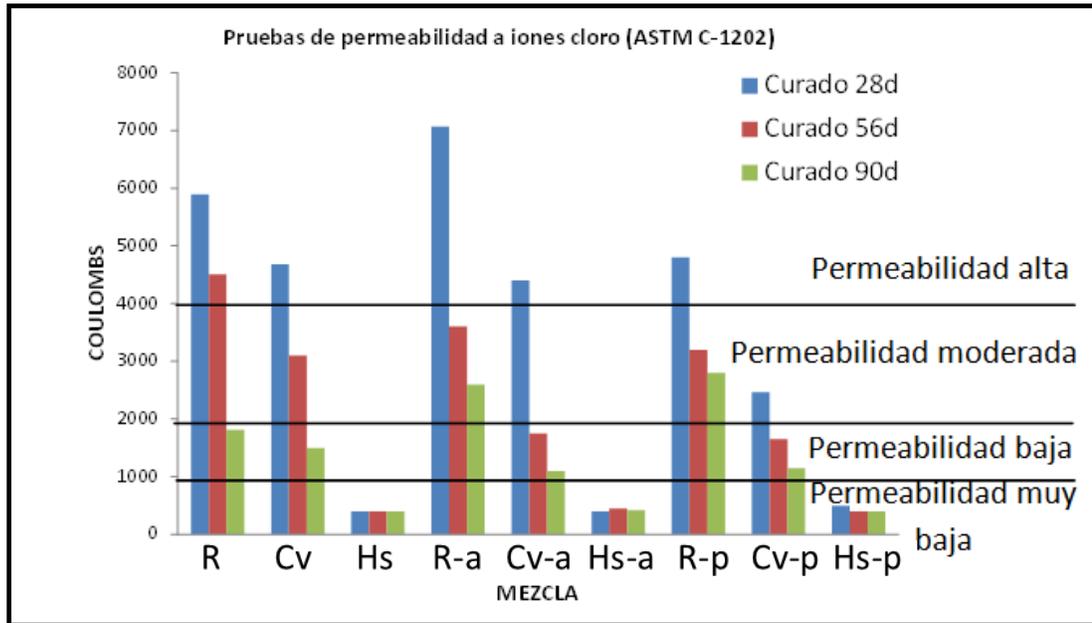


Figura 5.32. Permeabilidad a los iones cloro en mezclas de mortero “etapa curado interno”.

5.3.1.11. Porosidad abierta al agua.

Tomando en cuenta que este trabajo se realizó con morteros que tenían una relación A/Cem baja y debido a que la permeabilidad a los iones cloro en algunas muestras de mortero era elevada, se optó por determinar la porosidad abierta (porosidad conectada con en el exterior) en %. Los resultados que se ilustran en la figura 5.33 se determinaron mediante el secado total de muestras de concreto, después de estar en inmersión en agua por 24 horas. Los resultados muestran que no se sigue un patrón de porosidad en los diferentes SC y todos los morteros se hallan en un intervalo de valores entre el 14% al 17%, a la edad de 90 días.

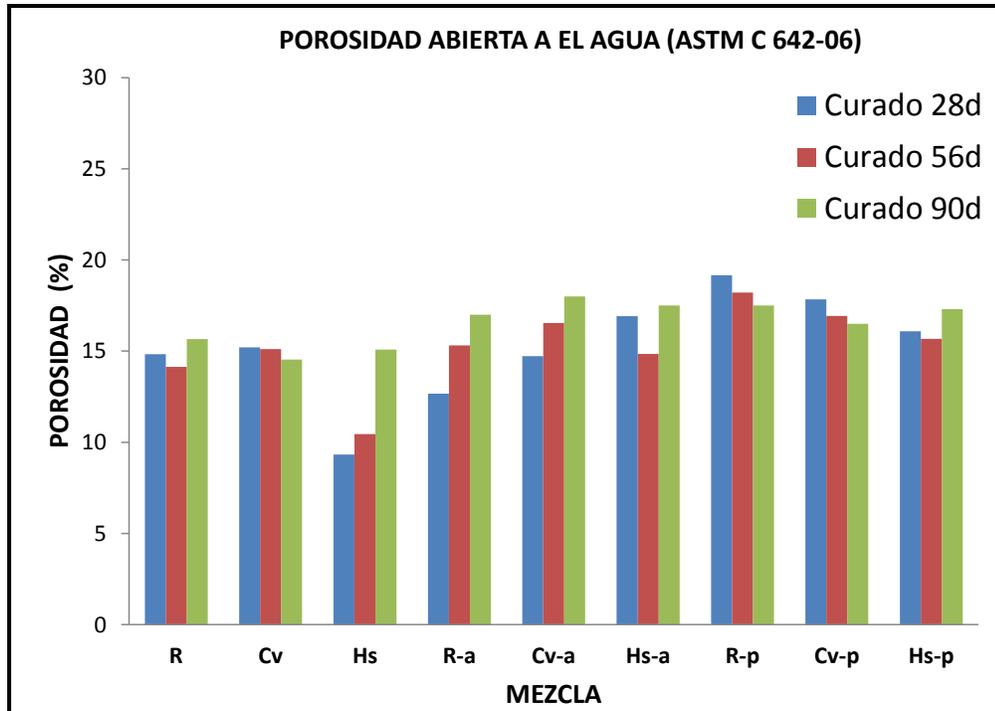


Figura 5.33 Porosidad abierta al agua en morteros: "etapa curado interno"

CONCLUSIONES

Esta investigación presenta resultados de estudio experimental muy amplio, por lo que a continuación se exponen algunas conclusiones emanadas de estos resultados, que se presentan en tres diferentes etapas de la investigación:

A) Compatibilidad cemento-aditivo.

- El cono de Marsh es un método práctico muy apropiado para evaluar, a través de las propiedades reológicas de la pasta, la dosificación óptima del aditivo y la pérdida de fluidez con relación al tiempo; así como para definir la mejor combinación cemento-aditivo cuando, se tienen disponibles varias opciones para ambos ingredientes.
- Adicionalmente al punto de saturación, determinado mediante el cono de Marsh, algunas combinaciones cemento-aditivo pueden presentar un segundo punto de inflexión negativo, en la consistencia y en la trabajabilidad del compuesto.
- Las determinaciones de pérdida de consistencia mediante el cono de Marsh, pueden resultar de gran utilidad para definir el alcance, en cuanto a la potencial aplicación para diferentes mezclas de cemento-aditivo.
- El punto de saturación es un parámetro de suma importancia, con repercusiones substanciales en las propiedades y en el costo del material.

B) Compatibilidad en los morteros.

- Los coeficientes de correlación obtenidos entre la pérdida de consistencia y los tiempos de fraguado inicial y final ($R^2 = 0.98$), pueden representar una herramienta de mucha utilidad para evaluar el tiempo potencial de trabajabilidad de los morteros o concretos, en función de sus tiempos de fraguado; así como para

definir el segmento de aplicación para una determinada combinación cemento-aditivo.

- Las resistencias obtenidas para los morteros que conjuntaron un comportamiento mecánico superior y una demanda de aditivo menor, el nivel de resistencias a la compresión osciló entre 60 y 70 MPa., a la edad de 28 días.
- Las resistencias a la compresión en los morteros mostraron que adicionalmente a las pruebas de compatibilidad cemento-aditivo en las pastas, es imprescindible determinar la resistencia para definir, mediante un análisis integral, la combinación cemento-aditivo más apropiada para la aplicación que se requiera.

C) Curado Interno y efecto de esta tecnología en la actividad puzolánica.

- La sustitución de arena de peso normal por un 20% de agregado saturado reduce la fluidez y mantiene igual o aumenta el contenido de aire.
- Tanto la arcilla expandida como la pumicita redujeron la retracción química; pero fue la pumicita la que más reducción reportó (produjo), a la edad de 144 horas, con un promedio del 27%, contra un 10% de la arcilla expandida.
- Ambos agregados ligeros condujeron a reducciones de la retracción autógena, con valores promedio del 38% para la arcilla expandida y el 60% para la pumicita.
- Para los tres diferentes sistemas cementantes estudiados, la sustitución de agregado de peso normal por agregado de peso ligero saturado incrementó la retracción por secado, en valores promedio que fueron del 3 al 25%.
- En todos los casos, la sustitución de agregado de peso normal por agregado ligero saturado, en conjunto con la sustitución de cemento por ceniza volante o humo de sílice, condujo a reducciones de la retracción por secado en valores promedio que

fueron de un 10% a un 13% para la ceniza volante y de un 13% a un 28% para humo de sílice.

- En general, el uso de agregado ligero saturado como medio de curado interno originó una reducción promedio de 10°C de temperatura del mortero fresco, en relación con las temperaturas promedio de las referencias, que registró su valor máximo alrededor de 8 horas, después de fabricados los morteros.
- Los tiempos de fraguado ilustraron que la sustitución de agregado ligero saturado fino origina un aceleramiento, que se pudiese atribuir a una mayor actividad de hidratación promovida por el agua que se encuentra en el interior del agregado. En este sentido, la pumicita originó mayor aceleramiento que la arcilla expandida.
- La arcilla expandida originó una reducción promedio en la resistencia a la compresión de 12% para la mezcla de referencia; pero las mezclas con ceniza volante y humo de sílice no sufrieron esta disminución.
- Para los tres sistemas cementantes evaluados la pumicita originó reducciones significativas en relación con las mezclas de referencia correspondientes.
- Los valores de permeabilidad a los iones cloro en los rangos de alta a moderada se atribuyen a la presencia de microagrietamientos, producto de la baja relación agua-cemento utilizada y de la alta dosificación de cementante utilizada en la fabricación de los morteros.
- Por los resultados obtenidos en la prueba de porosidad abierta al agua, se pudo concluir que esta prueba no resulta útil como indicador de durabilidad para los morteros con relaciones agua/cementante tan bajas.

D) Conclusiones Generales

- Ambos agregados (pumicita y arcilla expandida) utilizados como medio de curado interno en los concretos de alto comportamiento, muestran beneficios claros en la durabilidad, con respecto a los agrietamientos potenciales que pudiesen presentarse en el concreto por retracciones químicas, autógenas o por secado; pero también repercusiones significativas en cuanto a la resistencia a la compresión, que fue más significativa para la pumicita.
- En todos los casos, el efecto significativo del agregado ligero saturado y la puzolana (ceniza volante y humo de sílice) condujo a mejores indicadores de durabilidad, más no así en términos de resistencia mecánica.

PARTICIPANTES

TESISTA:

ING. RAUL TRUJILLO RODRIGUEZ.

Ingeniero Civil por la Facultad de Ingeniería Civil de la U.A.N.L.

Estudiante de Posgrado de la Facultad de Ingeniería Civil de la U.A.N.L.

Cuenta con reconocimientos de nivel internacional por el American Concrete Institute (ACI), en competencias académicas.

Fue empleado en la Empresa Collis de México S. de R.L. de C.V. en el área de Diseño de concretos.

Actualmente labora en la empresa Litebuilt México S.A. de C.V.

trujillo_rtr@hotmail.com.

DIRECTOR DE TESIS:

DR. ALEJANDRO DURÁN HERRERA.

Profesor investigador de tiempo completo titular B, de la Facultad de Ingeniería Civil de la U.A.N.L y Jefe del Departamento de Tecnología del Concreto del Instituto de Ingeniería Civil de la UANL..

Doctor en Ingeniería de Materiales, por la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la U. A. N. L.

con posdoctorado en Tecnología del concreto por la Universidad de Sherbrooke, Quebec, Canadá.

Miembro Fellow del ACI Internacional e investigador nacional nivel I por el CONACYT.

alejandro.duranhr@uanl.edu.mx

CO-DIRECTOR DE TESIS:

DR. JAVIER RODRIGO GONZÁLEZ LÓPEZ.

Profesor investigador de la Facultad de Ingeniería Civil de la U.A.N.L. Doctor en Ingeniería de Materiales por la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la U. A. N. L. Miembro de ACI y ASM. Cuenta con reconocimiento de perfil deseable por la SEP-PROMED e Investigador nacional por el SIN-CONACYT.

rhodio@hotmail.com

COLABORADOR:

DR. PEDRO LEOBARDO VALDEZ TAMEZ

Subdirector de Estudios de Posgrado e Investigación y Profesor investigador de tiempo completo titular B, de la Facultad de Ingeniería Civil. Doctor en Ingeniería de Materiales por la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la U. A. N. L. Miembro del ACI, y Ex-presidente de la Sección Noreste de México del ACI.

Pertenece al Sistema Nacional de Investigadores (SNI) nivel I.

pedro.valdeztz@uanl.edu.mx

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. **Steven H. Kosmatka, Beatrix Kerkhoff, and William C. Panarese., 2004** *Diseño y Control de Mezclas de Concreto*. s.l. : Portland Cement Association.
2. **Cembureau.**[http://www.cementohormigon.com/contenidPag.asp?id_rep=868]
3. **Aïtcin, P.C., 2008** *Concreto de Alto Desempeño, Ciencia y Tecnología*. 1º Edición.
4. Reglamento **ACI-318-05**
5. **Pietro Laura, Ole Mejlhede Jensen, Klaas van Breugel.** *Autogenous shrinkage in high performance cement paste: An evaluation of basic mechanisms..* 223-232, s.l. : Cement and Concrete Research, 2003, Vol. 33.
6. High Performance Concrete Technology Delivery Team, High Performance Concrete Structural Designers´ Guide, Federal Highway Administration´s. 2005.
7. **Malhotra, V.M.** 271-314, 1997., *Innovative Applications of Superplasticisers in Concrete A Review, Mario Collepardi Symposium on Advances in Concrete Science and Technology, Rome, P.K. Metha, Editor.*
8. **Sabir, S. Wild, M. O´Farrell.** *A water sorptivity test for mortar and concrete.* 568-574., s.l. : Materials and Structures , 1998, Vol. 31 (8).
9. *Standard test method for measurement of rate of absorption of water by hydraulic-cement concretes.* **International, ASTM.** C-1585, s.l. : ASTM, 2004.
10. **Neithalath, N., 2006. 209-218, s.l.** *Analysis of moisture transport in mortars and concrete using sorption-diffusion approach* : ACI Materials Journal, Vol. 103 (3).
11. **D.P. Bentz, M.A. Ehlen, C.F. Ferraris, E.J. Garboczi, 2001, 181-193, Orlando, FL** : s.n..*Sorptivity-based service life predictions for concrete pavements, Proceedings of the 7th International Conference on Concrete Pavements.*
12. **Richard Morin, Gilbert Haddad and Pierre Claude Aïtcin, Crack- Free. 2002.** *High-Performance Concrete Structures.*
13. **Lynam, C.G.** 1-139, s.l. : Oxford University Press, London, UK, 1934. *"Growth and movement in Portland Cement Concrete"*.

14. **M. Suzuki, M. Seddik Meddah, R. Sato.** *Use of porous ceramic waste aggregates for internal curing of high-performance concrete.* 373-381, s.l. : Cement and Concrete Research, Vol. 39.
15. **Holt, Erika E., 2001.** *Early age autogenous shrinkage of concrete.* 184, s.l. : Technical Research Centre of Finland, Vol. 446.
16. **Aïtcin, P.C., 1998.** *Ingeniería de los Cementantes Hidráulicos , 1° Edición,* 188-263.
17. National Ready Mixed Concrete Association. *CIPIES 04/NRMCA.* . 1978, 1990 and 1990 .
18. **Corral, José Toirac., 2004.** *Patología de la construcción grietas y fisuras en obras de hormigón; origen y prevención; Ciencia y Sociedad.* 72-114, Republica Dominicana : Instituto tecnológico de Santo Domingo, Vols. 29, número 001.
19. **Ei-ichi Tazawa, Shingo Miyazama and Tetsuruou Kasai., 1995,** “*Chemical shrinkage and autogenous shrinkage of hydrating cement paste*”. 288-292, s.l. : Cement and Concrete Research , 1995, Vol. 25 No.2.
20. Effects of internal curing methods on restrained shrinkage and permeability. By Hoam Lam Portland Cement Association Research & Development Information Serial No. 2620
21. **Tazawa Ei. Technical committee., 1999.** *Autogenous shrinkage of concrete.* report., London : s.n.
22. **T.C. Powers, T.L. Brownyard., 1948** *Studies of the physical properties of hardened Portland cement paste.* Chicago : Research Laboratories of the Portland cement Association, Vol. Bulletin 22.
23. **O.M. Jensen, P.F. Hansen., 2001.** *Water-entrained cement-based materials: I. Principle and theoretical background.* 647-654, s.l. : Cement and Concrete Research, Vol. 31.
24. **IMCYC., 2008** *Construcción y Tecnología.* 35-36, s.l. : Vol. 246.
25. **ACI 224-01.** *Control de fisuración de estructuras de concreto .* 12-13, s.l.
26. **WILEY-VCH, Jensen OM, Hansen PF., 2002** *Water-entrained cement-based materials – II. Implementation and experimental results.* 973-978, New York : Cement and Concrete Research.

27. **Nagataki, S., and Gomi, H.** *“Expansive Admixtures (Mainly Ettringite)”*. s.l. : Cement and Concrete Composites .
28. **Collepari, M., et al., 2005.** *“Effects of Shrinkage-Reducing Admixture in Shrinkage-Compensating Concrete under Non-wet Conditions”*. 704-708, s.l. : Cement and Concrete Composites, Vol. 27.
29. **A. Hori, M. Marioka, E. Sakai, M. E.I. Daimon, E.I. Tazawa (Ed.)**. *Influence of expansive additives on autogenous shrinkage..* 93-1004, London : s.n.
30. **H. Ito, I. Maruyama, M. Tanimura, R. Sato., 2004.** *Early age deformation and resultant induced stress in expansive high strength concrete.* 155-174, s.l. : Journal of Advanced Concrete Technology.
31. **Buchholz FL, Graham AT. 1998.** *Modern su- perabsorbent polymer.*
32. **S. Zhutovsky, K. Kovler, A. Bentur., 2002.** *Influence of wet lightweight aggregate on mechanical properties of concrete at early ages.* 97-101, s.l. : Materials Structure.
33. **Zhutovsky, S., Kovler, K. and Bentur, A.** *“Autogenous curing of High-Strength Concrete using pre-soaked pumice and perlite sand”*, in *“Self-desiccation and its importance in concrete technology”*. s.l. : Proceedings 3dr International Research Seminar. 161-173.
34. **Jensen, O.M. and Lura, P., 2003.** *“Techniques for internal water curing of concrete”*, in *“Advances in Cement and Concrete IX: Volume Changes, Cracking, and Durability”*. Copper Mountain, CO : Proceedings of an International Conference, 67-78.
35. . **O.M. Jensen, P.F. Hansen., 2001.** *Autogenous deformation and rh-change in perspective*1859-1865, s.l. : Cement and Concrete Research.
36. **Mohr, B.J., 2005.** *Durability of pulp fiber-cement composites, PhD Dissertation, School of Civil and Environmental Engineering, Georgia Institute of Technology.* 227, Atlanta, GA. : s.n.
37. **R. Henkensiefken, G. Sant, T. Nantung, J. Weiss., 2009.** *Detecting solidification using moisture transport from saturated lightweight aggregate, in SP-259, Technical Session on Transition from Fluid to Solid: Reexamining the Behavior of Concrete at Early Ages.* 77-88, San Antonio, TX : ACI Spring Convention.

38. **R.Henkensiefken, T. Nantung D. Bentz, J. Weiss., 2009.** *Volume change and cracking in internally cured mixtures made with saturated lightweight aggregate under sealed and unsealed conditions.* 427-437, s.l. : Cement and Concrete Composites.
39. **R. Henkensiefken, T. Nantung, J. Weiss., 2008.** *Reducing restrained shrinkage cracking in concrete: examining the behavior of self-curing concrete made using different volumes of saturated lightweight aggregate, Proceedings of the Concrete Bridge Conference.* 1-14, St. Louis MO : s.n.
40. **A. Durán Herrera, P-C Aïtcin, N Petrov., 2007** *Effect of saturated lightweight sand substitution on shrinkage in 0.35 w/b concrete.* 48-52, s.l. : ACI Materials Journal, Vol. 104 (1).
41. **Chatelier, H. La., 1990.** *Sur les changements de volume qui accompagnent le durcissement des ciments, Bulletin Societe de l'encouragement pour l'industrie nationale.* Paris, France : s.n.
42. **G. Sant, P. Lura, J. Weiss., 2006.** *Measurements of volume change in cementitious materials at early ages: review of testing protocols and interpretation of results.* 21-29, s.l. : Transportation Research Record, 1976.
43. **J.Couch, P. Lura, O.M. Jensen, J. Weiss., 2006.** *Use of acoustic emission to detect cavitation and solidification (time zero) in cement pastes, International RILEM Conference on Volume Changes of Hardening Concrete: Testing and Mitigation.* 393-400.
44. **R.E. Philleo, Concrete science and reality, in: J. Skalny, S. Mindess (Eds.), 1991.** *Materials Science of Concrete II.* 1-8, s.l. : American Ceramic Society.
45. **S Weber, H.W. Reinhardt., 1997.** *A new generation of high performance concrete: concrete with autogenous curing.* 59-68, s.l. : Advances Cement Bases Materials.
46. **196-ICC, RILEM Technical Committee.** Internal Curing of Concretes.
47. **S. Zhutovsky, K. Kovler, A. Bentur., 2004.** *Influence of cement paste matrix properties on the autogenous curing of high-performance concrete.* 499-507, s.l. : Cement and Concrete Composites, Vol. 26 (5).
48. **D.P Bentz, K.A. Snyder., 1999.** *Protected paste volume in concrete: extension to internal curing using saturated lightweight fine aggregates .* 1863-1867, s.l. : Cement and Composites Recherche, Vol. 29 (11).

49. *Environment Working Party of the Concrete Society, Materials Group, Environmental Topics Avoidance of waste: Beneficial Use of Industrial By-Products as Constituents of Concrete.* 43-45, London : s.n., 2003, Vol. 37 (5).
50. **A Bentur, S. Igarashi, K. Klover., 2001.** *Prevention of autogenous shrinkage in high strength concrete by internal curing using wet lightweight aggregate.* 1587-1591, s.l. : Cement and Concrete Research, Vol. 31.
51. *ASTM C 125 Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates.* 2001.
52. **Rachel J. Detwiler, Chris A. Fapohunda y Jennifer Natale., 1994.** *“Utilización de materiales complementarios de cementación para aumentar la resistencia a la penetración del ion cloruro de concreto curados a temperaturas elevadas”.* s.l. : Materials Journal.
53. **ASTM, C1240-05.** *Standar specification for silica fume used in cementitious mixture.*
54. **Detwiler, R.I y Metha, PK. 1989.** *Efectos químicos y físicos de la extracción de sílice en el comportamiento mecánico del concreto.*
55. **Mustafa Şahmaran a, Mohamed Lachemi b, Khandaker M.A. Hossain b , Victor C. L., 2009.** *internal curing of engineered cementitious composites for prevention of early age autogenous shrinkage cracking, cement and concrete research 39, 893-901.*
56. **ASTM, C618-05.** *Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete,*
57. **ASTM C 778-00.** *Standard specification for standard sand.*
58. **ASTM C 185-01** *Standard Test Method for Air Content of Hidraulic Cement Mortar.*
59. **S. Zhutovsky, K. Kovler, A. Bentur.** *Efficiency of lightweight aggregates for internal curing of high strength concrete to eliminate autogenous shrinkage, Mater. Struct.*
60. **ASTM C 494-05.** *Standard specification for chemical admixture for concrete.*
61. **ASTM C 1017-07.** *Standard specification for chemical admixtures for use in producing flowing concrete.*

62. **ACI Education bulletin E4-03**, “Chemical admixtures for concrete”, prepared under the direction and supervision of ACI Committee E-701 Materials for Concrete Construction.
63. **Dr. Ramón L. Carrasquillo, Dr. Bryan E. Barrgán et. al., 2008**. Tecnología del Concreto Sustentable: Retos y Tendencias, Memorias.
64. **AASHTO T 199**. Air Content of Freshly Mixed Concrete by the Chase Indicator.
65. **ASTM C- 1437-07**. Standar Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar.
66. **ASTM C33M-08**. *Standard specification for concrete aggregates*.
67. **Gomes PCC, Gettu R, Agullo L, Bernad C., 2001**. Experimental optimization of high strength self compacting concrete. In: Ozawa K, Ouchi M (eds) Proceedings of Second International Symposium on SCC, Kochi, pp 377–386.
68. **E. Tazawa, S. Miyazawa., 1995**. Influence of cement and admixture on autogenous shrinkage of cement paste, Cem. Concr. Res. 25 (2) 281–287.
69. **S.N. Lim, T.H. Wee., 2000**. Autogenous shrinkage of ground-granulated blast-furnace slag concrete, ACI Mater. J. 97 (5) 587–593
70. **D.P. Bentz, O.M. Jensen, K.K. Hansen, J.F. Olesen, H. Stang, C.J. Haecker., 2001**. Influence of cement particle-size distribution on early-age autogenous strains and stresses in cement-based materials, J. Amer. Cer. Soc. 84 (1) 129–135.
71. **D.P. Bentz, G. Sant, W.J. Weiss., 2008**. Early-age properties of cement-based materials: I. Influence of cement fineness, ASCE J. Mat. Civ. Eng. 20 (7) 502–508.
72. **D. Cusson., 2008**. Effect of blended cements on effectiveness of internal curing of HPC, Proc., Internal Curing of High-Performance Concretes: Laboratory and Field Experiences, ACI SP-256, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, pp. 105–120.
73. **M.H. Zhang, L. Li, P. Paramasivum., 2005**. Shrinkage of high-strength lightweight aggregate concrete exposed to dry environment, ACI Mater. J. 102 (2) 86–92.

74. **K. Ganesh Babu & G. Siva Nageswara., 1993.** Efficiency of fly ash in concrete, *Cement & Concrete Composites* 15, 223-229.
75. **Terence C. Holland., 2005.** Silica Fume User's Manual, Federal Highway Administration, Washington, D.
76. **Alaejos Guti&rez, M. P. and Fernfindez C~inovas, M., 1995.** 'High strength concrete: Mix design and mechanical properties' (Hormig6n de alta resistencia: Dosificaci6n y propiedades mec~nicas; Available only in Spanish), Centro de Estudios y Experimentaci6n de Obras Pfblicas, Madrid, Spain, 165 p.
77. **Hu, C. and de Larrard, F., 1996.** 'The rheology of fresh high-performance concrete', *Cem. Concr. Res.* 26 (2) 283-294.
78. **Tattersall GH, Banfill PFG., 1983.** The rheology of freshconcrete. Pitman Books Limited, London
79. **Justnes H, Dooren, MV, Gemert DV., 2003.** Reasons for workability loss in Cementitious binders. Malhotra VM (ed) Seventh CANMET/ACI International Conference on Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete, Berlin, Germany, pp 53–65
80. **Flatt RJ, Houst YF., 2001.** A simplified view on chemical effects perturbing the action of superplasticizers. *Cem Concr Res* 31:1169–1176.
81. **Roy DM, Asaga K., 1980.** Rheological properties of cement mixes: V. The effects of time on viscometric properties of mixes containing superplasticizers; conclu- sions. *Cem Concr Res* 10:389–394.
82. **ACI Education bulletin E4-03.** "Chemical admixtures for concrete", prepared under de direction and supervision of ACI Committee E-701 Materials for Concrete Construction.
83. **P.C. Aitcin., 1998.** Autogenous shrinkage measurement, in: E. Tazawa (Ed.), *Proceedings of International Workshop on Autogenous Shrinkage of Concrete*, Hiroshima, Japan, E & FN Spon, pp. 257–267.
84. **H.E. Davis,** Autogenous volume changes of concrete, *Proc. ASTM* 40 (1940) 1103–1110.
85. **E. Tazawa, S. Miyazawa., 1993.** Autogenous shrinkage of concrete and its importance in concrete technology, in: Z.P. Bazant, L. Carol (Eds.), *Creep and*

Shrinkage of Concrete, Proceedings of the 5th International RILEM Symposium, E & FN Spon, London, pp. 159–168.

86. **Bentz DP, Hansen KH, Geiker MR., 2001.** Shrinkage-reducing admixtures and early age desiccation in cement pastes and mortars. 31 (7):1075–85.

87. **Jensen OM., 1990.** The pozzolanic reaction of silica fume (in Danish). TR 229/90, Building Materials Laboratory, Technical University of Denmark.

88. **Powers TC., 1935.** Absorption of water by portland cement paste during the hardening process. Ind Eng Chem; 27(7):790–4.

89. **Justnes H, Sellevold EJ, Lundevall G., 1992.** High-strength concrete binders, Part A: Reactivity and composition of cement pastes with and without condensed silica fume. In: Fly ash, silica fume, slag and natural pozzolans in concrete, ACI SP-132. Detroit: American Concrete Institute; p. 873–89.

90. **Koenders EAB., 1997.** Simulation of volume changes in hardening cement-based materials. Ph.D. thesis, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands.

91. **Tazawa E, Miyazawa S., 1995.** Influence of cement and admixture on autogenous shrinkage of cement paste. Cem Concr Res; 25(2):281–7.

92. **Bentz DP, Jensen OM, Hansen KK, Olesen JF, Stang H, Haecker CJ., 2001.** Influence of cement particle size distribution on early age autogenous strains and stresses in cement-based materials. J Am Ceram Soc; 84(1):129–35.

93. **Houk Jr IE, Borge OE, Houghton DL., 1969.** Studies of autogenous volume change in concrete for Dworshak Dam. ACI J; 66(45):560–8.

94. **Brewer HW, Burrows RW., 1951.** Coarse-ground cement makes more durable concrete. ACI J January; 47(January):353–60.

95. **S. Hanehara, K. Yamada., 1999.** “interaction between cement and chemical admixtures from the points of the cement hydration, admixtures adsorption and paste rheology”, cement and concrete research, 29, pp1159-1165.

96. **P.C. Aitcin, C. Jolicoeur, J.G. MacGregor., 1994.** “Superplasticizers: how they work and why they occasionally don’t”, Concrete International, volume 5, pp 45-52.

97. **Johnston C.D., 1987.** “Admixture-Cement Incompatibility: A Case History”, Concrete International, Vol. 9, No. 4, pp. 51-60

98. CEMENT ADMIXTURES ASSOCIATION, Admixture Technical Sheet – ATS
2 Superplasticising / High range water reducing, SECRETARY: JOHN
DRANSFIELD, 38a Tilehouse Green Lane, Knowle, West Midlands B93 9EY
Tel/Fax: 01564 776362 www.admixtures.org.uk.