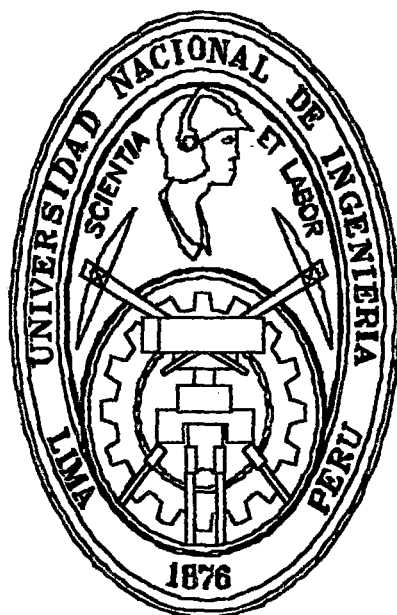


**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**



**ADITIVOS Y ADICIONES MINERALES PARA EL
CONCRETO**

TESIS

Para Optar el Título Profesional de:

INGENIERO CIVIL

Berta Wendy Gomero Cervantes

LIMA - PERÚ

2006

Digitalizado por:

Consortio Digital del
Conocimiento MebLatam,
Hemisferio y Dalse

*A Dios y la Virgen por sobre todas
las cosas; a mis Padres Dora y
Octavio por su apoyo y amor
incondicional, a Vanessa mi hermana.
Y a Juan José por estar
siempre a mi lado.*

AGRADECIMIENTOS

A Dios y la Virgen, por haberme dado la vida y por darme fortaleza para continuar alcanzando mis metas.

A mis padres, mi eterno agradecimiento por la confianza y el apoyo que me brindaron en ésta y todas las etapas de mi vida.

Al Ingeniero Enrique Rivva López asesor y amigo, mi agradecimiento por su acertada orientación en el desarrollo del presente trabajo.

A la Ingeniera Ana Torre por su asesoramiento, colaboración y ayuda desinteresada.

A mis amigos y compañeros, y en especial a Juan José con quienes he compartido momentos de alegría y que conjuntamente conmigo, han luchado empeñosamente por convertirse en buenos ingenieros civiles; y a mis profesores de todas las épocas por compartir sus experiencias y conocimientos.

A la Universidad Nacional de Ingeniería por la formación profesional y humana recibidas.

***ADITIVOS Y ADICIONES
MINERALES PARA EL CONCRETO***

ÍNDICE

PRESENTACIÓN	2
RESUMEN	3
CAPITULO 1 : INFORMACIÓN GENERAL	
I.- OBJETIVO	6
II.- PRIMERA PARTE: ADITIVOS	6
1.- INTRODUCCIÓN	6
2.- CONDICIONES DE EMPLEO	8
3.- CONSIDERACIONES EN EL EMPLEO DE ADITIVOS	8
4.- INCORPORACIÓN	9
5.- SELECCIÓN DE LAS CANTIDADES	9
6.- IGUALDAD DE ADITIVOS	10
7.- ALMACENAMIENTO	10
8.- COSTO	10
III.- SEGUNDA PARTE: ADICIONES MINERALES	11
1.- INTRODUCCIÓN	11
2.- CONDICIONES DE EMPLEO	12
3.- EFECTO SOBRE LAS PROPIEDADES DEL CONCRETO	13
3.1.- CONCEPTOS GENERALES	13
3.2.- EFECTOS SOBRE LA EXUDACIÓN	14
3.3.- EFECTOS SOBRE LA RESISTENCIA	15
3.4.- EFECTOS SOBRE LA RESISTENCIA A LOS SULFATOS	15
3.5.- EFECTOS SOBRE LA ELEVACIÓN DE TEMPERATURA	16
3.6.- EFECTOS SOBRE LA REACCIÓN ÁLCALI-AGREGADO	16
3.7.- EFECTOS SOBRE LA CONGELACIÓN	16
3.8.- EFECTOS SOBRE LA PERMEABILIDAD	17
4.- PROPORCIONAMIENTO	17
5.- PROCESAMIENTO	18
5.1.- ALMACENAMIENTO, MANEJO Y DOSIFICACIÓN	19
5.2.- CONTAMINACIÓN	19
5.3.- CONTROL DEL CONCRETO	20

CAPITULO 2 : INCORPORADORES DE AIRE

1.- INTRODUCCIÓN	23
2.- SISTEMA DE BURBUJAS	23
3.- EFECTOS SOBRE EL CONCRETO FRESCO	25
4.- EFECTOS SOBRE EL CONCRETO ENDURECIDO	25
5.- MATERIALES PARA LA INCORPORACIÓN DE AIRE	25
5.1.- AGENTES LÍQUIDOS O SOLUBLES EN AGUA	26
5.2.- ADITIVOS INCORPORADORES DE AIRE	26
6.- FENÓMENO DEL CONGELAMIENTO Y DESHIELO EN CLIMA FRÍO Y SU MECANISMO.	27
7.- APLICACIONES	28
8.- EVALUACIÓN, SELECCIÓN Y CONTROL DEL COMPRADOR	28
9.- DOSIFICACIÓN, EMPLEO Y ALMACENAMIENTO	29
10.- PROPORCIONAMIENTO DEL CONCRETO	30
11.- FACTORES QUE INFLUYEN EN LA CANTIDAD DE AIRE	30
11.1.- EFECTO DE LOS MATERIALES Y PROPORCIONES	30
11.2.- EFECTOS DEL PROCESO DE PUESTA EN OBRA	31
12.- CONTROL DEL CONTENIDO DE AIRE	32

CAPITULO 3 : ADITIVOS ACELERANTES

1.- ASPECTOS GENERALES	35
2.- CLASIFICACIÓN	36
2.1.- SALES SOLUBLES INORGÁNICAS	37
2.2.- COMPUESTOS ORGÁNICOS SOLUBLES	37
2.3.- ADITIVOS SÓLIDOS DIVERSOS	39
2.4.- ADITIVOS DE FRAGUA INSTANTÁNEA	40
3.- CONSIDERACIONES DE EMPLEO	40
4.- EFECTOS SOBRE EL CONCRETO	41
4.1.- TIEMPO DE FRAGUADO	41
4.2.- INCORPORACIÓN DE AIRE	42
4.3.- CALOR DE HIDRATACIÓN	42
4.4.- RESISTENCIA	42
4.5.- DURABILIDAD	43
4.6.- DOSIFICACIÓN Y USO	45
4.7.- EFECTOS DEL CLORURO DE SODIO	45
5.- PROPORCIONES DEL CONCRETO	47
6.- CONTROL DE CALIDAD	47

CAPITULO 4 : ADITIVOS REDUCTORES DE AGUA

1.- INTRODUCCIÓN	50
2.- CLASIFICACIÓN Y COMPOSICIÓN	50
3.- EFECTOS SOBRE EL CONCRETO FRESCO	52
3.1.- REDUCCIÓN DE AGUA	52
3.2.- TIEMPO DE FRAGUADO	52
3.3.- CONTENIDO DE AIRE	52
3.4.- TRABAJABILIDAD	53
3.5.- EXUDACIÓN	53
3.6.- CALOR DE HIDRATACIÓN	53
3.7.- MAGNITUD DE LA PÉRDIDA DE ASENTAMIENTO	54
3.8.- ACABADO	54
4.- EFECTOS SOBRE EL CONCRETO ENDURECIDO	54
4.1.- RESISTENCIA	54
4.2.- CONTRACCIÓN Y ESCURRIMIENTO	55
4.3.- DURABILIDAD	55
5.- PREPARACIÓN Y DOSIFICACIÓN	56
6.- PROPORCIONAMIENTO	56
7.- CONTROL DE CALIDAD	57
8.- PRECAUCIONES	57

CAPITULO 5 : ADITIVOS FLOCULANTES

1.- GENERALIDADES	61
2.- MATERIALES	61
3.- EFECTOS SOBRE EL CONCRETO FRESCO	62
3.1.- TIEMPO DE FRAGUADO	62
3.2.- TRABAJABILIDAD Y ACABADO	62
3.3.- EXUDACIÓN Y SEGREGACIÓN	63
3.4.- PÉRDIDA DE ASENTAMIENTO	63
4.- EFECTOS SOBRE EL CONCRETO ENDURECIDO	63
4.1.- CALOR DE HIDRATACIÓN	63
4.2.- RESISTENCIA	64
4.3.- CONTRACCIÓN POR SECADO Y ESCURRIMIENTO PLÁSTICO	64
4.4.- CONTENIDO DE AIRE	64
4.5.- RESISTENCIA A LA CONGELACIÓN Y DESHIELO	64
4.6.- PERMEABILIDAD	65
4.7.- ADHERENCIA	65

5.- CALIDAD	66
6.- CONTROL DEL CONCRETO	66

CAPITULO 6: ADITIVOS DIVERSOS

1.- INTRODUCCIÓN	70
2.- ADITIVOS SUPERPLASTIFICANTES	71
2.1.- CONCEPTOS GENERALES	71
2.2.- USOS	74
2.3.- EFECTO SOBRE LAS PASTAS	78
2.4.- EFECTOS SOBRE EL CONCRETO FRESCO	85
2.5.- EFECTOS SOBRE EL CONCRETO ENDURECIDO	92
3.- ADITIVOS LIGANTES	96
3.1.- INTRODUCCIÓN	96
3.2.- MATERIALES	97
3.3.- FUNCIÓN	98
3.4.- LIMITACIONES	99
4.- ADITIVOS COLORANTES	100
4.1.- INTRODUCCIÓN	100
4.2.- MATERIALES	101
4.3.- EFECTOS SOBRE LAS PROPIEDADES	102
4.4.- REQUISITOS GENERALES	106
5.- ADITIVOS INHIBIDORES DE LA CORROSIÓN	107
5.1.- INTRODUCCIÓN	107
5.2.- MATERIALES	109
5.3.- LIMITACIONES	111
5.4.- EFECTOS	112

CAPITULO 7 : PUZOLANAS

1.- ASPECTOS GENERALES	115
1.1.- HISTORIA	115
1.2.- DEFINICIÓN	115
1.3.- COMPOSICIÓN QUÍMICA Y MINERALÓGICA	116
1.4.- CLASIFICACIÓN	117
1.5.- PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS	118
1.6.- USOS	119
1.7.- EFECTOS SOBRE LAS PROPORCIONES DE MEZCLA	120
2.- EFECTO SOBRE LAS PROPIEDADES DEL CONCRETO FRESCO	121

3.- EFECTO SOBRE LAS PROPIEDADES DEL CONCRETO ENDURECIDO	122
3.1.- RESISTENCIA	122
3.2.- RESISTENCIA A LOS SULFATOS	126
3.3.- ELEVACIÓN DE TEMPERATURA	126
3.4.- EXPANSIÓN DEBIDA A LA REACCIÓN ÁLCALI-AGREGADO	127
3.5.- PERMEABILIDAD	128
3.6.- RESISTENCIA A LA CONGELACIÓN Y DESHIELO	129
3.7.- CONTRACCIÓN POR SECADO	130
4.- APLICACIONES	130

CAPITULO 8: ESCORIAS DE ALTO HORNO

1.- INFORMACIÓN GENERAL	133
1.1.- HISTORIA	133
1.2.- DEFINICIONES	133
1.3.- PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS	134
1.4.- ESPECIFICACIONES	135
1.5.- ACTIVIDAD HIDRÁULICA	135
1.6.- FACTORES QUE DETERMINAN LAS PROPIEDADES CEMENTANTES	137
2.- ALMACENAMIENTO; MANEJO Y DOSIFICACIÓN	137
3.- PROPORCIONAMIENTO DEL CONCRETO	138
3.1.- PROPORCIONAMIENTO CON ESCORIAS	138
3.2.- SISTEMAS TERNARIOS	139
3.3.- EMPLEO CON ADITIVOS QUÍMICOS	139
4.- EFECTO SOBRE LAS PROPIEDADES DEL CONCRETO FRESCO	140
4.1.- TRABAJABILIDAD	140
4.2.- TIEMPO DE FRAGUADO	141
4.3.- EXUDACIÓN	141
4.4.- MAGNITUD DE LA PERDIDA DE ASENTAMIENTO	142
5.- EFECTO SOBRE LAS PROPIEDADES DEL CONCRETO ENDURECIDO	142
5.1.- RESISTENCIA	142
5.2.- MODULO DE ELASTICIDAD	145
5.3.- ESCURRIMIENTO Y CONTRACCIÓN	145
5.4.- INFLUENCIA DE CURADO	145
5.5.- COLOR	145
5.6.- EFECTO DE LA TEMPERATURA	146
5.7.- PERMEABILIDAD	147

5.8.- RESISTENCIA AL ATAQUE DE SULFATOS	148
5.9.- REDUCCIÓN DE LA EXPANSIÓN ÁLCALI-SÍLICE	148
5.10.- RESISTENCIA A LA CONGELACIÓN Y DESHIELO	149
5.11.- RESISTENCIA A LA CORROSIÓN	149
6.- USO DE LAS ESCORIAS EN MORTEROS Y CONCRETO	150
6.1.- INTRODUCCIÓN	150
6.2.- CONCRETO PREMEZCLADO	150
6.3.- PRODUCTOS PREFABRICADOS	151
6.4.- MORTEROS Y LECHADAS	151

CAPITULO 9 : CENIZAS

1.- CONCEPTO GENERAL	154
1.1.- INTRODUCCIÓN	154
1.2.- FUENTES DE CENIZAS	155
2.- COMPOSICIÓN DE LAS CENIZAS	156
3.- EFECTOS SOBRE LAS PROPIEDADES DEL CONCRETO FRESCO	156
3.1.- TRABAJABILIDAD	156
3.2.- EXUDACIÓN	157
3.3.- BOMBEABILIDAD	157
3.4.- TIEMPO DE FRAGUADO	158
3.5.- ACABADOS	158
3.6.- AIRE INCORPORADO	158
4.- EFECTOS SOBRE LAS PROPIEDADES EN LA MEZCLA ENDURECIDA	159
4.1.- RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN Y GANANCIA DE RESISTENCIA	159
4.2.- MÓDULO DE ELASTICIDAD	161
4.3.- DEFORMACIÓN	162
4.4.- ADHERENCIA DEL CONCRETO	163
4.5.- RESISTENCIA AL IMPACTO	164
4.6.- RESISTENCIA A LA ABRASIÓN	164
4.7.- ELEVACIÓN DE TEMPERATURA	164
4.8.- RESISTENCIA A LAS ALTAS TEMPERATURAS	165
4.9.- RESISTENCIA A LA CONGELACIÓN Y DESHIELO	165
4.10.- PERMEABILIDAD Y PROTECCIÓN CONTRA LA CORROSIÓN	166
4.11.- REDUCCIÓN DE LA EXPANSIÓN ÁLCALI-SÍLICE (ASR)	166
4.12.- RESISTENCIA A LOS SULFATOS	168
4.13.- CONTRACCIÓN POR SECADO	169
4.14.- EFLORESCENCIA	170

5.- PROPORCIONAMIENTO DE LAS MEZCLAS	170
6.- ESPECIFICACIONES PARA LAS CENIZAS	172
6.1.- INTRODUCCIÓN	172
6.2.- REQUISITOS QUÍMICOS	172
6.3.- REQUERIMIENTOS FÍSICOS	173
7.- CONTROL DE CALIDAD	175
8.- EMPLEO DE LAS CENIZAS EN LAS CONSTRUCCIONES	178

CAPITULO 10 : MICROSÍLICES

1.- INTRODUCCIÓN	184
1.1.- CONCEPTO	184
1.2.- CARACTERÍSTICAS	185
1.3.- OTRAS FORMAS DE MICROSÍLICES	185
2.- PROPIEDADES FÍSICAS	186
2.1.- COLOR	186
2.2.- DENSIDAD	186
2.3.- VOLUMEN DE LA PASTA	187
2.4.- PESO UNITARIO	187
2.5.- SUPERFICIE ESPECIFICA	187
3.- PROPIEDADES QUÍMICAS	188
3.1.- COMPOSICIÓN QUÍMICA	188
3.2.- pH	189
3.3.- CRISTALINIDAD	189
3.4.- COMPORTAMIENTO EN EL CONCRETO	189
3.5.- CONTROL DE CALIDAD	190
4.- MECANISMOS DE ACCIÓN	190
4.1.- ASPECTOS GENERALES	190
4.2.- MORTEROS CON MICROSÍLICE	192
4.3.- REACCIÓN PUZOLÁNICA	193
4.4.- REACCIÓN CON OTRAS ADICIONES MINERALES	194
4.5.- CALOR DE HIDRATACIÓN	195
4.6.- REACCIÓN CON ADITIVOS QUÍMICOS	195
5.- EFECTO SOBRE LAS PROPIEDADES DEL CONCRETO FRESCO	196
6.- EFECTO SOBRE LAS PROPIEDADES DEL CONCRETO ENDURECIDO	198
6.1.- POROSIDAD	198
6.2.- PERMEABILIDAD	199
6.3.- ABSORCIÓN DE AGUA	199

6.4.- TRANSICIÓN PASTA-AGREGADO	200
6.5.- MÓDULO DE ELASTICIDAD Y RELACIÓN DE POISSON	201
6.6.- ESCURRIMIENTO PLÁSTICO	201
6.7.- CONTRACCIÓN POR SECADO	202
6.8.- RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN	202
6.9.- RESISTENCIA A LA FLEXIÓN Y TENSIÓN	205
6.10.- RESISTENCIA POR ADHERENCIA	205
6.11.- RESISTENCIA A LA CONGELACIÓN	206
6.12.- RESISTENCIA A LOS ATAQUES QUÍMICOS	207
6.13.- RESISTENCIA A LA PENETRACIÓN DEL ION CLORURO	207
6.14.- RESISTENCIA A LA ABRASIÓN EROSIÓN	207
6.15.- RESISTENCIA AL FUEGO	208
6.16.- RESISTENCIA AL EXPANSIÓN ÁLCALI-AGREGADO	208
6.17.- RESISTENCIA A LOS SULFATOS	209
6.18.- RESISTIVIDAD ELÉCTRICA	209
7.- APLICACIONES	209
7.1.- ASPECTOS GENERALES	209
7.2.- CONCRETOS DE ALTA RESISTENCIA	210
7.3.- EDIFICIOS	211
7.4.- CONCRETO LANZADO	212
7.5.- PUENTES	213
7.6.- APLICACIONES EN EL PERU	214
CAPITULO 11 : GUÍA PRACTICA PARA USO DE ADITIVOS Y ADICIONES	
I.- ADITIVOS	217
II.- ADICIONES MINERALES	226
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	232
BIBLIOGRAFIA	
ANEXOS	

ÍNDICE DE TABLAS

- Tabla 2.1:** Porcentajes de aire incorporado que se recomiendan en función del Tamaño máximo de los agregados. (Pág. 33)
- Tabla 3.1** Máximo contenido del ion cloruro para la protección contra la corrosión del refuerzo. (Pág. 48)
- Tabla 4.1:** Requerimientos Físicos para los aditivos reductores de agua. (Pág. 59)
- Tabla 5.1:** Requerimientos Físicos para los aditivos floculantes. (Pág.68)
- Tabla 7.1:** Análisis típico químico y mineralógico de algunas puzolanas naturales. (Pág. 131)
- Tabla 8.1:** Rango de composición química de las Escorias de alto horno finamente granuladas en los Estados Unidos y Canadá. (Pág. 152)
- Tabla 8.2:** Índice de actividad estándar de las escorias para diversos grados preescritos en la Norma ASTM C 989. (Pág. 152)
- Tabla 9.1:** Ejemplo de la composición en volumen de Cenizas provenientes del carbón. (Pág. 181)
- Tabla 9.2:** Fases mineralógicas en las Cenizas. (Pág. 181)
- Tabla 9.3:** Requisitos Químicos Básicos para las Cenizas. (Pág. 182)
- Tabla 9.4:** Requerimientos físicos para las cenizas. (Pág. 182)
- Tabla 10.1:** Composición química de la microsílíce Hornos de sílice de Noruega y Canadá. (Pág. 215)
- Tabla 10.2** Permeabilidad de los cloruros de acuerdo a la Norma AASHTO T 277 ó ASTM C 1202. (Pág. 215)

ÍNDICE DE FIGURAS E IMÁGENES

- Imagen 1.1:** Esquema para la forma de acción de las Adiciones Minerales (Pág. 21)
- Imagen 2.1:** Las burbujas de aire incorporado. (Pág. 24)
- Imagen 3.1:** Estabilización de roca. El concreto lanzado acelerado es utilizado para proporcionar a las rocas un soporte rápido. (Pág. 40)
- Imagen 6.2.1:** Formaldehído melamina sulfonado y Formaldehído naftaleno sulfonado. (Pág. 72)
- Imagen 6.2.2:** Monómero de carboxilato (PC). (Pág. 73)
- Imagen 6.2.3:** Concreto altamente fluido gracias a la adición de un superplastificante. (Pág. 79)
- Imagen 6.2.4:** Cono de Marsh y sus medidas. (Pág. 80)
- Imagen 6.4.1:** Mc Donald's, concreto coloreado. (Pág. 101)
- Imagen 6.4.2:** Formas de presentación de los pigmentos. (Pág. 102)
- Imagen 6.4.3:** Dosificación del pigmento para aditivo colorante. (Pág. 102)
- Imagen 6.4.4:** El Puente Clear Creek en el parque nacional Zion, EE.UU. (Pág. 103)
- Imagen 6.4.5:** Comparación de colores con cemento blanco y cemento gris. (Pág. 105)
- Imagen 6.4.6:** Intercambio vial de la Aguacatala – Colombia. (Pág. 106)
- Imagen 6.4.7:** El concreto coloreado fraguado en autoclave. (Pág. 107)
- Imagen 6.5.1:** Un pilote afectado seriamente por el proceso corrosión. (Pág. 109)
- Imagen 6.5.2:** Inhibidores de Corrosión. (Pág. 111)
- Imagen 6.5.3:** Proceso de Corrosión. (Pág. 112)
- Imagen 6.5.4:** Proceso corrosivo del acero de refuerzo en una columna de concreto en las cuales no se utilizo inhibidores de corrosión ni protección catódica. (Pág. 113)
- Figura 7.1:** Comparación de la resistencia a la compresión de metacaolinitas altamente reactiva y concretos con microsilices al 5% del reemplazo del cemento. (Pág. 123)
- Figura 7.2:** Comparación de la resistencia a la compresión de concretos con metacaolinitas altamente reactivas y microsilices al 10% del reemplazo del cemento. (Pág. 124)
- Figura 7.3:** Desarrollo de la Resistencia a la Compresión del concreto con diferentes porcentajes de RHA como reemplazo de cemento ($a/mc=0.40$). (Pág. 124)
- Figura 7.4:** Efecto del tiempo de curado sobre la resistencia en compresión de cubos de mortero a los 28 días, preparados con cemento Portland puzolánico que contiene tierra de Santorín. (Pág. 125)
- Figura 7.5:** Efectos del tiempo de curado sobre la resistencia en compresión de cubos de mortero de 12 meses preparados con cemento Portland puzolánico que contienen tierra de Santorín. (Pág. 126)

Figura 7.6: Efecto de la puzolana sobre la elevación de temperatura del concreto. (Pág. 127)

Figura 7.7: Control de la expansión álcali-sílice empleando tierra de Santorín. (Pág. 128)

Imagen 7.1: "Water Towers". (Pág. 129)

Imagen 7.2: "Puente Golden Gate". (Pág. 130)

Imagen 8.1: Composición química de las escorias en el Perú. (Pág. 135)

Figura 8.1: Diagrama Ternario que indica la composición de cemento Pórtland y escoria de altos hornos en el sistema $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$. (Pág. 136)

Figura 8.2: Efecto del contenido de agua sobre el asentamiento de mezclas de concreto con y sin escoria GGBF. (Pág. 141)

Figura 8.3: Relaciones de resistencia de morteros conteniendo una escoria típica GGBF que cumple con la norma ASTM C 989, comparada con un mortero de cemento portland (1 ksi = 6.89 MPa). (Pág. 143)

Figura 8.4: Influencia del reemplazo de escoria GGBF sobre la resistencia en compresión de cubos de mortero (1 ksi = 6.89 MPa). (Pág. 144)

Figura 8.5: Resistencia a la Compresión del concreto que contiene diversas mezclas de escorias GGBF, comparado con concretos en que se usa únicamente cemento portland como material cementante (1 ksi = 6.89 MPa). (Pág. 144)

Figura 8.6: Comparación de la distribución de poros por tamaños de pastas que contienen cemento Pórtland y pastas que contienen 40% de escorias y 60% de cemento Pórtland, ensayado por incorporación de mercurio. (Pág. 147)

Figura 9.1: Magnitud de la ganancia de resistencia para diferentes materiales cementantes: cenizas de la clase F. (Pág. 161)

Figura 9.2: Reacción Esfuerzo-deformación a los 90 días. (Pág. 162)

Figura 9.3: Variación de la temperatura con el tiempo en el centro de bloques de concreto de 15m^3 . (Pág. 165)

Figura 9.4: Expansión de barra de mortero contra porcentajes de reemplazo del cemento para todas los agregados altamente reactivos que contienen cenizas con mas de 1.5% de álcalis. (Pág. 167)

Imagen 9.1: Presa Hungry Horse en Montana, EE.UU. (Pág. 172)

Imagen 9.2: Cenizas ampliadas con microscopio electrónico. (Pág. 173)

Imagen 9.3 : Presa de Las Tres Gargantas en China. (Pág. 180)

Imagen 9.4: Presa de Las Tres Gargantas, el concreto contiene aproximadamente el 40% de cenizas como adición. (Pág. 180)

Imagen 10.1: Microfotografía de microsílices ampliada al microscopio electrónico. (Pág. 185)

Imagen 10.2: Estructura típica de la zona de transición entre la matriz de la pasta de cemento y el agregado. (Pág. 201)

Figura 10.1: Resistencia a la compresión de pastas y concretos con y sin microsílices para la misma relación agua material cementante. (Pág. 203)

Figura 10.2: Cuadro resumen y grafico de resultados de resistencia a la compresión obtenidos para concretos con aditivo superplastificante y microsílíce obtenidos en el LEM –UNI. (Pág. 204)

Imagen 10.3: "Petronas Towers". Malasia. (Pág. 210)

Imagen 10.4: "Taipei 101", Taiwán. (Pág. 211)

Imagen 10.5: "Burj Dubai", Emiratos Árabes Unidos. (Pág. 212)

***ADITIVOS Y ADICIONES MINERALES
PARA EL CONCRETO***

PRESENTACIÓN

Esta tesis de investigación sobre aditivos y adiciones y su influencia sobre el comportamiento del concreto en el tiempo ha sido elaborada teniendo en consideración la definición sobre investigación del sabio peruano Julio C. Tello.

"La investigación no pertenece al dominio de las ciencias ocultas; no es privilegio de las inteligencias superiores o geniales; no exige necesariamente ingentes sumas de dinero, como se cree a menudo; ella es función, casi siempre, de las inteligencias comunes, pero bien equilibradas y de los caracteres enérgicos que, en cualquier momento, pueden adaptarse a las circunstancias del medio en el cual actúan; vencer los obstáculos, las resistencias y prejuicios y avanzar resueltamente hacia adelante, hasta lograr el éxito de sus aspiraciones"

Julio C. Tello.

La Facultad de Ingeniería Civil de la UNI nos enseñó a pensar, analizar, buscar y ampliar el conocimiento y, sobre todo, no guardarlo para nosotros sino darlo para que pueda servir y seguirlo ampliando.

Wendy Gomero C.

RESUMEN

Un aditivo es definido por la Norma ASTM C 125 como "un material que no siendo agua, agregados, cemento hidráulico, o fibra de refuerzo" reacciona químicamente con el agua para modificar las propiedades de los concretos o morteros; y se agrega por razones de economía de producción; o para ahorrar energía.

En algunos casos el aditivo puede ser el único medio para lograr los resultados deseados. En otros, los objetivos pueden lograrse con cambios en la composición o en las propiedades de la mezcla, pudiendo obtenerse una mayor economía que si se utilizasen aditivos.

A diferencia de los aditivos, que permiten obtener las propiedades deseadas, las "adiciones" son productos de origen mineral finamente divididas, cuya incorporación a la mezcla tiene por finalidad reaccionar químicamente con el hidróxido de calcio resultante de la hidratación del cemento, para formar tobermorita adicional, disminuyendo o eliminando los poros capilares e incrementando las resistencias mecánicas de la pasta y la durabilidad del concreto, cumpliéndose con ello la Teoría de Feret sobre "la relación inversa entre la porosidad y la resistencia del concreto".

Los aditivos, sustancias de origen químico, pueden modificar una o muchas de las propiedades del concreto. Las adiciones están referidas fundamentales al incremento de las resistencias, por aumento del gel, y al incremento de la durabilidad, por disminución significativa de la capilaridad.

La presente Tesis Profesional tiene como objetivo establecer las diferencias más importantes, las mejores condiciones de uso, y las principales razones de empleo en función del esperado comportamiento final del concreto y de su permanencia en el tiempo.

Tanto los aditivos como las adiciones tienen ventajas e inconvenientes en su empleo. El objetivo de esta Tesis es lograr que un conocimiento profundo de la composición y efectos de los aditivos y las adiciones sobre la mezcla impida que el ingeniero las emplee en forma indebida y a un costo que puede ser muy alto en relación con las ventajas relativas que podrían ser obtenidas a partir de un correcto aprovechamiento. En nuestro medio ello ha de permitir un mayor y mejor uso de las mismas y un incremento en la resistencia y durabilidad del concreto, contribuyendo así no solo a la mejora en la calidad de la estructura, sino también a la eliminación de los riesgos que pueden derivarse de la sismicidad propia de la mayoría de nuestro territorio.

En la presente Tesis, los aditivos han sido agrupados en 6 grupos, cuyas características, forma de acción y razones de empleo son diferentes. Las adiciones conocidas se han agrupado en cuatro grupos, cada uno de los cuales se analiza en su origen, su forma de acción y sus efectos sobre el concreto.

Como resultado se espera contar con un documento que permita establecer las diferencias existentes entre Aditivos y Adiciones, y se esté en condiciones de definir las mejores condiciones de empleo, se conozca como utilizarlas, y se sepa cuales son las principales ventajas y desventajas que puede esperar del adecuado uso de ellas.

CAPITULO I

INFORMACION GENERAL

CAPITULO I

INFORMACIÓN GENERAL

I.- OBJETIVO

El objetivo fundamental de esta tesis es estudiar las aplicaciones y diferencias entre los aditivos y las adiciones usualmente empleados en nuestro país.

En definición, los aditivos son compuestos químicos que reaccionan químicamente con el cemento para modificar las propiedades del concreto, mientras que las adiciones son compuestos minerales de alta fineza y actividad puzolánica que reaccionan con el hidróxido de calcio en presencia de humedad para formar tobermorita adicional.

El empleo de aditivos y/o adiciones tiene ventajas e inconvenientes para el concreto. El conocimiento profundo de su composición, así como de sus efectos sobre la mezcla de concreto, permitirán que los ingenieros los empleemos en forma adecuada, cuando ello sea necesario, y a un costo que pueda ser conveniente en relación con las ventajas a ser obtenidas a partir de un correcto aprovechamiento.

II.- PRIMERA PARTE: ADITIVOS

1.- INTRODUCCIÓN

Los aditivos son productos o sustancias químicas que agregados en pequeña proporción en pastas, morteros y concretos en el momento de su

fabricación, mejoran o modifican una o varias de sus propiedades. A través de sus acciones químicas y/o físicas, estas sustancias modifican determinadas características del concreto fresco y del endurecido, como el fraguado, la trabajabilidad, el endurecimiento, etc. Aún cuando los aditivos son un componente eventual del concreto, existen ciertas condiciones o tipos de obras que los hacen indispensables.

El aditivo es definido por las recomendaciones ACI 116 R y la Norma ASTM C 125 como “un material que no siendo cemento hidráulico, agua, agregado, o fibra, es añadido a la mezcla inmediatamente antes o durante el mezclado” con la finalidad de:

- a) Modificar una o algunas de sus propiedades, a fin de permitir que sean más adecuados al trabajo que se está efectuando.
- b) Facilitar la colocación del concreto o mortero.
- c) Reducir los costos de operación.

De esta manera su uso estará condicionado por:

- a) Que se obtenga el resultado deseado sin tener que variar sustancialmente la dosificación básica.
- b) Que el producto no tenga efectos negativos en otras propiedades del concreto.
- c) Que un análisis de costo justifique su empleo.

Entre las razones que lleven a considerar la conveniencia del empleo de aditivos, puede mencionarse adecuada trabajabilidad, mayor facilidad de bombeo de las mezclas, facilidad de colocación y acabado, desarrollo de resistencias iniciales altas, reuso de encofrados, incremento de la durabilidad, etc. Siempre que se contemple el empleo de aditivos se debe considerar la incidencia del costo de los mismos sobre la unidad cúbica de concreto, así como la economía en los costos de producción.

2.- CONDICIONES DE EMPLEO

Los aditivos utilizados deberán cumplir con los requisitos de las Normas ASTM o NTP correspondientes. Deberá seguirse las instrucciones proporcionadas por el fabricante. El efecto de un aditivo deberá ser evaluado conjuntamente con su uso con materiales determinados y en las condiciones en que se piense emplear.

El empleo de aditivos incorporadores de aire es obligatorio en concretos que, en cualquier época de su vida, pueden estar expuestos a temperaturas ambiente menores de 4°C. En otros casos, el empleo de estos u otros aditivos sólo es obligatorio cuando pueden ser la única alternativa para lograr los resultados deseados. El empleo de aditivos no autoriza a disminuir el contenido de cemento seleccionado para la unidad cúbica de concreto.

3.- CONSIDERACIONES EN EL EMPLEO DE ADITIVOS

Una consideración importante en el empleo de aditivos está relacionada con aquellos casos en los que hay un límite en relación con la cantidad de ión cloruro que es permitida en el concreto cuando es fabricado. Tales límites se dan en la Tabla 3.1 del Capítulo de Aditivos acelerantes. Generalmente estos límites son expresados como un máximo porcentaje de ión cloruro por peso de cemento. Sin embargo, algunas veces se expresan en ión cloruro por peso unitario de concreto, y otras como ión cloruro soluble en agua por unidad de masa del cemento o concreto.

Independientemente de como los límites son dados, es obvio que para evaluar la posibilidad de emplear un aditivo determinado, es necesario conocer el ión cloruro del aditivo que está siendo considerado para su uso, expresado en términos relevantes para aquellos en los que los límites de la especificación están dados. Si se emplea la información disponible sobre el aditivo y la magnitud del dosaje propuesto es calculada de manera tal que se excedan los

requerimientos de las especificaciones, deberá considerarse aditivos alternativos o procedimientos que permitan alcanzar los resultados que el empleo de aditivos en las mezclas iniciales no se ha logrado.

El usuario debe recordar que, independientemente de frases tales como "libre de cloruros", no existe ningún aditivo totalmente libre de cloruros desde que los aditivos son a menudo preparados con agua que contiene pequeños pero mensurables porcentajes de ión cloruro.

4.- INCORPORACIÓN

Para la incorporación del aditivo a la mezcla se deberá emplear dispositivos mecánicos de agitado a fin de garantizar una cuidadosa distribución de los ingredientes. Los aditivos que van a ser empleados en la forma de solución no estable o de suspensión, deberán ser incorporados a la mezcla empleando un equipo dispersante a fin de garantizar una cuidadosa distribución de los ingredientes.

5.- SELECCIÓN DE LAS CANTIDADES

En la selección de la cantidad de aditivo por unidad cúbica de concreto se tendrá en consideración las recomendaciones del fabricante, si mas de un aditivo va a ser empleado, las propiedades del concreto en estado fresco y endurecido, las características del agregado, la resistencia a la compresión especificada, las condiciones del clima, durante el mezclado y colocación, el procedimiento de colocación, y los resultados de las pruebas de Laboratorio.

En Obra es el Contratista quien proporcionará a la Supervisión la dosificación recomendable del aditivo seleccionado e indicará los efectos perjudiciales debidos a variaciones en la misma; la composición química del aditivo; el contenido de cloruros expresado como porcentaje en peso del ion

cloruro; y las recomendaciones del fabricante para la dosificación si se emplea aditivos incorporadores de aire.

6.- IGUALDAD DE ADITIVOS

Los aditivos empleados en la obra deberán ser de la misma composición, concentración, comportamiento, tipo y marca que los empleados para la selección de las proporciones de la mezcla de concreto.

7.- ALMACENAMIENTO

Los aditivos serán almacenados siguiendo las recomendaciones del fabricante, debiéndose prevenir la contaminación, evaporación, o deterioro de los mismos. Los aditivos líquidos serán protegidos de la congelación o de cambios de temperatura que puedan afectar sus características. Los aditivos no serán almacenados por un período mayor de seis meses, debiéndose efectuar ensayos para evaluar su calidad antes de su empleo. Los aditivos cuya fecha de vencimiento se ha cumplido no serán utilizados.

8.- COSTO

La evaluación económica del uso de un aditivo debe basarse sobre los resultados obtenidos con el concreto en cuestión bajo condiciones que simulen aquellas que se espera en el trabajo, desde que los resultados obtenidos están influenciados por las características del cemento y agregado y sus proporciones relativas, así como por la temperatura, humedad y condiciones de curado.

En la evaluación de un aditivo, su efecto sobre el volumen de una tanda determinada deberá ser tomado en cuenta. Si se analizan los cambios en el rendimiento, los cambios en las propiedades del concreto deberán ser debidos

no solamente a los efectos directos del aditivo, sino también a cambios en el rendimiento de los ingredientes originales.

Si el empleo de un aditivo incrementa el volumen de la tanda, deberá ser considerado como efectivo en su desplazamiento ya sea sobre parte de la mezcla original o de uno u otro de los ingredientes básicos. Tales cambios en la composición de un volumen unitario de concreto deberán ser tomados en cuenta cuando se estima el efecto directo de un aditivo en la estimación de los beneficios resultantes de su uso, y en la modificación del costo de la unidad cúbica de concreto.

El incremento en el costo debido al manejo de un ingrediente adicional deberá ser tomado en cuenta, así como los efectos económicos que el empleo de aditivos pueda tener sobre los costos de transporte, colocación y acabado del concreto.

Adicionalmente a las ventajas económicas logradas en la colocación de concreto con aditivos, se ha mejorado la habilidad para bombear grandes cantidades, así como para la economía de los costos de concreto contra los materiales de construcción competitivos. Los reductores de agua y los retardadores de fragua permiten colocar grandes volúmenes de concreto sobre áreas extensas, minimizando la necesidad de encofrados, separación y las juntas. Los aditivos acelerantes reducen los costos de acabados y encofrados.

III.- SEGUNDA PARTE: ADICIONES MINERALES

1.- INTRODUCCIÓN

Los materiales clasificados como adiciones minerales, ya sean cementantes o puzolánicas, son polvos muy finos., que tienen por finalidad mejorar el comportamiento al estado fresco de las mezclas deficientes en

partículas muy finas y que al actuar por reacción química con el hidróxido de calcio resultante de la hidratación del cemento, producen silicato de calcio hidratado en forma de tobermorita incrementando la resistencia al disminuir en forma importante la permeabilidad, al mismo tiempo que incrementan la durabilidad. En algunos casos se les emplea para aumentar el contenido de cementante en mezclas deficientes en partículas muy finas.

Las adiciones contribuyen al incremento de la resistencia del concreto, requiriéndose menos cemento para una resistencia dada. Igualmente contribuyen a importantes modificaciones en el comportamiento de la pasta fresca y a la modificación positiva de las propiedades físicas y químicas del producto final endurecido.

Las mezclas que tienen deficiencias en algún aspecto pueden ser mejoradas por la incorporación de una adición mineral como un producto adicional sin alterar las proporciones relativas de los otros ingredientes

Dentro del grupo de las adiciones al concreto se considerará las puzolanas y las cenizas, las cuales deberán cumplir los requisitos de la Norma ASTM C 618; y las escorias de alto horno finamente molidas y las microsílices, las cuales deberán cumplir con los requisitos de la Norma ASTM C 989.

Las adiciones se utilizarán fundamentalmente en concretos de alta resistencia y, preferentemente, en combinación con cementos cuyo contenido de C3A sea menor del 5%. Dados los importantes cambios que se producen en el concreto por el empleo de adiciones, su uso debe ser aprobado por el Ingeniero Proyectista y empleadas bajo estricta supervisión.

2.- CONDICIONES DE EMPLEO

Las adiciones pueden ser empleadas para:

- a) Aumentar el cementante y corregir una deficiencia en el concreto en mezclas pobres en partículas muy finas, al influir en el comportamiento de la pasta fresca de la misma manera que el cemento, evitando problemas de trabajabilidad y acabado.
- b) Evitar el empleo de cemento adicional al requerido para obtener una resistencia determinada.
- c) Contribuir al desarrollo de la resistencia del concreto, permitiendo utilizar menos cemento para alcanzar una resistencia determinada.
- d) Modificar las propiedades de la pasta fresca y las del concreto endurecido y, al mismo tiempo, reducir el costo de la unidad cúbica de concreto.
- e) Mejorar las deficiencias del concreto por la incorporación de un aditivo mineral sin alterar las proporciones relativas de los otros ingredientes
- f) Mejorar la calidad final del concreto, con incremento en sus propiedades en los estados fresco y endurecido, sin incrementos en los requisitos de cemento y agua.

Las adiciones se deben manejar y almacenar esencialmente en la misma forma que el cemento. Muchas adiciones pueden requerir dispositivos de almacenamiento más herméticos para impedir la filtración, pero no son tan susceptibles al deterioro como el cemento.

3.- EFECTO SOBRE LAS PROPIEDADES DEL CONCRETO

3.1.- CONCEPTOS GENERALES

Las adiciones, debido a su alta fineza, reducen la exudación y segregación e incrementan la resistencia del concreto al proporcionar aquellos finos de los que carece el agregado, sin requerir incremento en el contenido total de agua y sin afectar en forma importante a la contracción por secado y a la absorción del concreto endurecido. Se estima como cualidades un perfil

favorable y una satisfactoria fineza de la adición si se desea emplear una baja relación agua/material cementante. Se puede obtener importantes beneficios económicos con su utilización en la medida que su empleo permite una reducción en la cantidad de cemento portland de la mezcla.

3.2.- EFECTOS SOBRE LA EXUDACIÓN

La magnitud del área superficial de los sólidos por unidad de volumen del agua es el mas importante de los varios factores que determinan las características de exudación y el grado de plasticidad del concreto fresco. Si la relación del área superficial de sólidos al volumen es baja, la pasta es delgada y aguada, las partículas de agregado están sólo ligeramente separadas por la pasta y la mezcla pierde plasticidad y tiende a segregar.

Adicionalmente, cuando la relación del área superficial de sólidos al volumen de agua es baja, la velocidad de exudación es relativamente alta y adicionalmente, las partículas de agregado se asientan hasta que ellas forman contactos o puntos que evitan futuros asentamientos. En este caso, la pasta aguada continua exudando dentro de los huecos definidos por las partículas de agregado, permitiendo la acumulación de agua en los insterticios de las partículas y la exudación tiende a reducir la homogeneidad del concreto. En casos extremos, la falta de homogeneidad se manifiesta por fisuras abiertas bajo las partículas de agregado, no siendo estas fisuras lo suficientemente grandes como para ser visibles en un corte transversal del concreto, pero si lo suficientemente importantes para dar perdida de adherencia entre la pasta y el agregado y reducir la resistencia potencial del concreto.

El efecto indicado puede ser reducido incrementando la relación del área superficial de sólidos al volumen de agua de la pasta y, para un asentamiento dado, una mayor separación de las partículas de agregado en el concreto. La relación del área superficial de sólidos al volumen de agua de la mezcla puede ser incrementada ya sea por aumento de la cantidad de cemento, con lo que se

consigue una disminución en la relación agua/material cementante de la mezcla, o por incorporación de una adición adecuada.

La incorporación de adiciones no debe considerarse como un elemento adecuado para rellenar vacíos. Una de las funciones de las adiciones es el incrementar el contenido de pasta plástica y maleable, permitiendo una mejor cobertura y una adecuada separación de las partículas de agregado.

En el control de la exudación y segregación es recomendable la selección de adiciones cuyas características físicas permitan que la pasta contenga una máxima proporción de materia sólida y una mínima proporción de agua. El empleo de adiciones con demanda de agua muy alta limita el empleo de ellas a muy pequeños porcentajes si se quiere lograr características del concreto imposibles de obtener con diseños de mezcla convencionales. El creciente empleo de aditivos superplastificantes parece ser una solución adecuada cuando se utiliza adiciones de alta fineza.

3.3.- EFECTOS SOBRE LA RESISTENCIA MECÁNICA

El efecto de una adición sobre la resistencia varia con las propiedades de la adición empleada y con las características de la mezcla de concreto en la cual ella va a ser empleada. Generalmente la resistencia de mezclas pobres se incrementa, dependiendo de su capacidad de reacción con el hidróxido de calcio para formar silicato de calcio hidratado (tobermorita).

3.4.- EFECTOS SOBRE LA RESISTENCIA A LOS SULFATOS

El empleo de adiciones en concretos preparados con cemento portland generalmente incrementa la resistencia a ataques agresivos, ya sea de agua de mar, soluciones de sulfatos presentes en el suelo, y aguas ácidas naturales. La mejora puede ser mejor para concretos de bajo contenido de cemento. El empleo de las adiciones con cemento portland resistentes a los sulfatos, puede no incrementar la resistencia a estos y si están presentes en la adición

compuestos de alúmina químicamente activos, puede resultar una reducción en la resistencia a los sulfatos.

Las cenizas han demostrado ser muy efectivas frente a este tipo de ataque. El Comité 318 del ACI recomienda el empleo de puzolanas en combinación con cemento Tipo V para ataques con contenidos de sulfato mayores de 10,000 ppm.

3.5.- EFECTOS SOBRE LA ELEVACIÓN DE TEMPERATURA

Para un contenido de cemento dado, el empleo de materiales químicamente inertes tiene muy poco o ningún efecto sobre la elevación de la temperatura del concreto en obra. Se ha empleado adiciones en concretos masivos de bajo contenido de cemento para reducir la temperatura de estos concretos.

3.6.- EFECTOS SOBRE LA REACCIÓN ÁLCALI-AGREGADO

Las adiciones, empleadas en la cantidad adecuada, son capaces de prevenir la expansión excesiva resultante de la reacción álcali/ agregado. El empleo de una cantidad demasiado pequeña de adición puede incrementar los efectos destructivos de la reacción indicada.

3.7.- EFECTOS SOBRE LA CONGELACIÓN

Las cenizas y puzolanas han sido las adiciones más estudiadas en relación con los procesos de congelación y deshielo del concreto. Su efecto depende de la dosificación del concreto, la resistencia de éste, la condición de humedad del mismo, y de la eficiencia del sistema de burbujas de aire al momento de la exposición. Los concretos con adiciones muestran la misma durabilidad que aquellos que no la tienen siempre que ambos concretos tengan el mismo contenido de aire, y ambas mezclas tengan la misma resistencia en

compresión. El empleo de adiciones requiere una proporción más alta de aditivo incorporador de aire para producir un contenido de aire dado, que aquella que se requeriría si no se emplease. Esta proporción varía entre las diferentes fuentes de abastecimiento y tipos de adiciones.

3.8.- EFECTOS SOBRE LA PERMEABILIDAD

Bajo condiciones de humedad en servicio, la permeabilidad del concreto que contiene cualquier adición se reduce significativamente en edades posteriores. En concretos masivos el empleo de adiciones en proporciones moderada a alta da por resultado un alto grado de impermeabilidad. Las cenizas pueden reducir la permeabilidad a un séptimo de concretos equivalentes sin cenizas. La acción puede ser atribuida a la disminución de la segregación y exudación, y a una reducción en los requerimientos de agua, pero también puede ser atribuida al incremento de gel que sella los poros capilares.

4.- PROPORCIONAMIENTO

Generalmente, el volumen de adición empleado puede ser alto si el concreto es diseñado para óptimas propiedades y máxima economía. Las adiciones deben ser consideradas como un ingrediente mas del concreto y no como un reemplazo del cemento. Las técnicas de diseño de mezclas que incluyen adiciones no difieren de las utilizadas en el diseño de mezclas sin adiciones. Un método puede ser el indicado en la recomendación ACI 211. Cuando las adiciones son empleadas en proporciones significativas su volumen absoluto debe ser tenido en cuenta en las proporciones de la mezcla. Las adiciones, por su fineza, deben ser consideradas como parte de la matriz cementante al determinar los porcentajes de agregados fino y grueso.

El efecto de las adiciones seleccionadas sobre los requisitos de agua de la mezcla debe ser conocido. Algunas causan un incremento en los requisitos de agua, otras tienen poco o ningún efecto, y finalmente otras reducen los

requisitos de agua del concreto en el cual son empleadas.

En general las adiciones no tienen efecto directo sobre los requerimientos del cemento portland en el concreto, que no sea el hecho que ellas pueden incrementar o disminuir los requisitos totales de agua del concreto, haciendo necesario un ajuste en el contenido de cemento. Las adiciones siempre deben ser consideradas como parte del material cementante.

Las adiciones se emplean en rangos que varían del 7% al 35% en peso del medio cementante total del concreto, dependiendo del uso y especificaciones. Pueden ser empleadas para compensar la deficiencia de finos, o ser consideradas como parte del agregado fino y su presencia no debería tener efecto sobre el contenido de cemento a menos que se modifiquen los requisitos de agua de la mezcla. Siempre deben prepararse mezclas de prueba y ensayarse para verificar la validez de las proporciones del concreto seleccionadas que contienen aditivo.

5.- PROCESAMIENTO

La decisión de emplear adiciones debe tener siempre en consideración la posibilidad de utilizar productos alternativos, considerando el efecto sobre las propiedades y economía del concreto. Debe siempre determinarse el costo del concreto empleando una adición, dado que algunas pueden incrementar significativamente el costo en razón de distancias de transporte, incremento en la demanda de agua con el consiguiente incremento en el cemento para satisfacer determinadas propiedades.

El efecto de las adiciones sobre cualidades esenciales del concreto debe ser evaluado. Su empleo puede ser útil en la reducción del calor de hidratación y en el incremento de la resistencia a agentes agresivos. Debe recordarse que la variación en calidad y cualidades de adición de lote a lote o entre embarques puede ser un factor crítico que influya en la elección de productos alternativos.

5.1.- ALMACENAMIENTO, MANEJO Y DOSIFICACIÓN

Las adiciones deben ser almacenadas en silos metálicos a fin de darles protección contra el humedecimiento y la contaminación. Debe asegurarse que no se mezclen con el cemento durante el almacenamiento. La supervisión debe ser frecuente para procurar que ello no ocurra. Las adiciones pueden ser manipuladas con el mismo tipo de equipo que se emplea para transportar el cemento Portland. Las cenizas, debido a su perfil redondeado y ser fluidas, pueden ser difíciles de almacenar. Para el almacenamiento de las adiciones pueden considerarse las mismas prácticas y recomendaciones utilizadas para el cemento en silo.

La dosificación en obra de las adiciones debe ser en peso y siguiendo las recomendaciones del Comité ACI 304. Se recomienda pesar el cemento primero y a continuación la adición. Este procedimiento es obligatorio, de acuerdo a ASTM C 94, cuando el cemento y la adición son pesados en forma acumulativa en la misma balanza. Son recomendables dosificadoras con control automático.

Las adiciones deben ser introducidas a la mezcladora conjuntamente con el cemento y los otros componentes de la mezcla. Las adiciones no deben ser cargadas en una mezcladora húmeda independientemente de los otros materiales, ya que se pegaría a las paletas y pared del tambor, tampoco deben ser introducidas conjuntamente con el agua de mezclado debido a su tendencia a formar grumos y lentes bajo tales condiciones.

5.2.- CONTAMINACIÓN

En el proceso de producción pueden incorporarse a las adiciones materiales tales como compuestos de sodio, amonio o azufre. Algunos de ellos pueden o no tener efectos dañinos sobre las propiedades del concreto en el cual se emplea la adición. Otros productos químicos pueden causar fuerte eflorescencia y cambios de volumen destructivos. El fabricante debe tener un

programa de control de calidad que garantice el producto.

5.3.- CONTROL DEL CONCRETO

El concreto que contiene una adición deberá ser medido, mezclado y colocado de acuerdo a lo indicado en la Recomendación ACI 314. En el cargado de la mezcladora deberán tomarse precauciones para evitar pérdida de adición, dado que ellas son de muy alta superficie específica y pudiendo ser de bajo peso específico pueden escapar como polvo. El tiempo de mezclado puede diferir de aquel de concretos equivalentes sin adición. El tiempo mínimo de mezclado deberá ser determinado por ensayos de uniformidad del concreto.

Las variaciones en las propiedades físicas y químicas de la adición, pueden originar apreciable variación en las propiedades del concreto, tales como cambios en el contenido de agua para una consistencia dada; requerimientos de aditivo incorporador de aire para un contenido de aire dado: tiempo de fraguado: desarrollo temprano de resistencia: y color del concreto en su punto de ubicación final. Ensayos adecuados antes del empleo en el concreto, pueden minimizar las circunstancias indicadas.

La calidad y variabilidad del concreto que contiene una adición puede ser comprobada por ensayos de resistencia del concreto, los cuales proporcionan una evaluación de la calidad y variabilidad del concreto como un material, pero no una medida de las propiedades y variabilidad del concreto en el lugar de la construcción. La información sobre el tiempo de fraguado y ganancia de resistencia del concreto en obra puede ser obtenida por ensayos de especímenes curados bajo condiciones similares a aquellas que pueden afectar el trabajo, tales como ambientes de bajas temperaturas o curado al vapor.

Un adecuado control de calidad del concreto, con o sin adición, requiere un buen programa de Supervisión, tal como lo indicado en ACI 311. Una Supervisión adecuadamente ejecutada, con la cooperación del contratista, asegurara que el concreto tenga mínima variabilidad y sea acorde con los

con los requerimientos del trabajo y cualquier problema que se presente sea fácil de resolver antes que se llegue a una situación crítica.

No es usual, pero puede ocurrir, que se tenga concretos que contienen adición en una proporción tal como para incrementar la relación agua/material cementante, pudiéndose presentar retardo en el fraguado y un inusualmente lento desarrollo de la resistencia en ambientes de baja temperatura. Las circunstancias pueden hacer recomendable un rediseño de la mezcla de concreto, calentamiento de los materiales, protección del concreto contra el enfriamiento, empleo de cementos de alta resistencia inicial, adición de un aditivo acelerante, o una combinación de estos procedimientos.

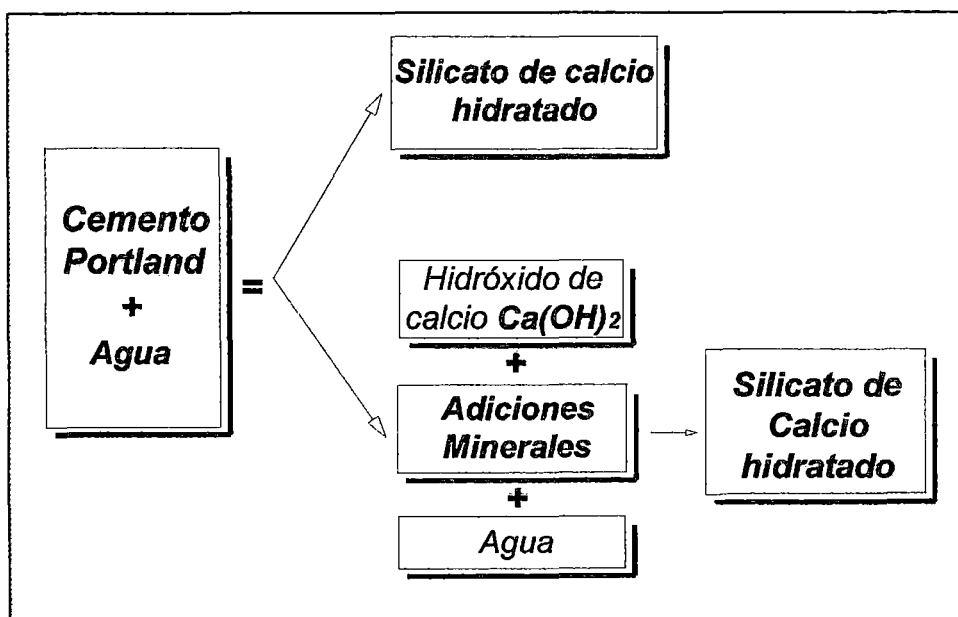


Imagen 1.1: Esquema para la forma de acción de las Adiciones minerales.

CAPITULO II

ADITIVOS INCORPORADORES DE AIRE

CAPITULO II

ADITIVOS INCORPORADORES DE AIRE

1.- INTRODUCCIÓN

El rol de los aditivos incorporadores de aire es introducir en el concreto millones de pequeñas burbujas de aire. De esta manera se mejora sensiblemente la resistencia al hielo y a las sales anticongelantes. Como resultado además se obtiene el mejoramiento de la trabajabilidad y la disminución de la segregación.

La Recomendación ACI 116 define a un aditivo incorporador de aire como "un aditivo para concreto o mortero, el cual da lugar a la incorporación de aire en estos durante el mezclado, con el propósito de incrementar su trabajabilidad y su resistencia a las heladas". Se acepta que el concreto debe tener aire incorporado si se desea que resista las acciones propias del proceso de congelación. Es importante indicar que además de la marca del producto, la resistencia del concreto a los procesos de congelación es también afectada por los procedimientos de colocación, acabado y curado, recomendándose seguir lo indicado en ACI 304R y ACI 308.

2.- SISTEMA DE BURBUJAS

La resistencia a las heladas es favorecida por la presencia de microscópicas burbujas de aire dispersadas uniformemente a través de la porción pasta. Por su tamaño y número hay billones de tales burbujas en cada metro cúbico de concreto con aire incorporado. El diámetro de las burbujas proporciona protección adecuada con un relativamente bajo volumen total de espacios vacíos.

Si el factor de espaciamiento es de 20 mm o menor, determinado de acuerdo a ASTM C 457, la pasta está normalmente protegida. Requisito adicional es que la superficie total de las burbujas de aire sea mayor de $24 \text{ mm}^2/\text{mm}^3$, y que el numero de burbujas por pulgada sea significativamente mayor que el valor numérico del porcentaje de aire en el concreto. El factor de espaciamiento, el contenido de aire y la distribución por tamaño de las burbujas de aire incorporado están influenciados por:

- a) Naturaleza y cantidad del aditivo.
- b) Naturaleza y cantidad de los constituyentes de la mezcla.
- c) Tiempo y duración del sistema de mezclado.
- d) Asentamiento.
- e) Clase y grado de consolidación aplicada en la colocación del concreto.

La resistencia del concreto a los procesos de congelación no se reduce por un proceso de vibración moderado.

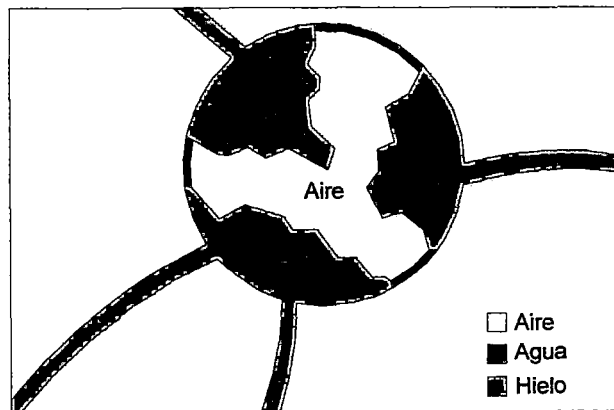


Imagen 2.1: Las burbujas introducidas en el concreto fresco persisten en el concreto endurecido. En caso de hielo, éstas acumulan parcialmente el agua en movimiento en los poros capilares, reduciendo así el riesgo de rotura por tensión por incrementarse el volumen al pasar de agua a hielo.

3.- EFECTOS SOBRE EL CONCRETO FRESCO

La incorporación de aire altera las propiedades del concreto fresco, pudiendo modificar el proporcionamiento de las mezclas. A igualdad de asentamiento los concretos con aire incorporado son mas trabajables y cohesivos que los concretos sin él, excepto cuando tienen alto contenido de cemento, La segregación y exudación se reducen.

Se evita la formación de bolsones de agua debajo del agregado grueso y se contribuye a revestir con pasta al acero de refuerzo. Igualmente se previene la formación y acumulación de lechada de material débil en la superficie de los elementos. En altos contenidos de cemento, los concretos con aire incorporado serán más ásperos y difíciles de acabar.

4.- EFECTOS SOBRE EL CONCRETO ENDURECIDO

Se reduce la resistencia en compresión, en un orden del 5% por cada 1% de aire incorporado. Ello especialmente ocurre en concretos con moderado a alto contenido de cemento. La magnitud de la reducción se incrementa con los porcentajes más altos de aire. La Recomendación ACI 211.1 da una detallada discusión sobre los requisitos de aire. Cuando el contenido de cemento y el asentamiento son mantenidos constantes, la reducción en la resistencia es parcial o totalmente compensada por la reducción resultante en la relación agua-cemento y el contenido de agregado fino. Esto es especialmente cierto para mezclas pobres o aquellas que contienen agregado grueso de tamaño grande. Tales concretos pueden no ver su resistencia reducida, y por el contrario la resistencia podría incrementarse por el empleo de aire incorporado.

5.- MATERIALES PARA LA INCORPORACIÓN DE AIRE

El peróxido de hidrógeno o el aluminio en polvo pueden ser empleados para

incorporar burbujas de gas en mezclas cementosas pero no son considerados como aditivos incorporadores de aire aceptables, desde que no producen un sistema de burbujas de aire que proporciones resistencia a la congelación.

5.1.- AGENTES LÍQUIDOS O SOLUBLES EN AGUA

Estos agentes están compuestos de sales de resinas de madera, detergentes sintéticos, sales de lignitos sulfonados, sales de ácidos de petróleo, sales de materiales proteínicos, ácidos grasos y resinosos y sus sales, y sales orgánicas de hidrocarburos sulfonados. Ninguno de los materiales indicados podrá producir un sistema de vacíos deseable.

Un material para ser considerado incorporador de aire deberá cumplir con los requisitos de la Norma ASTM C 260, debiendo comprobarse que el aditivo, como agente incorporador de aire, causará una mejora sustancial en la resistencia del concreto a la congelación y que ninguna de las propiedades del concreto será seriamente dañada.

5.2.- ADITIVOS INCORPORADORES DE AIRE

Cuando se emplea materiales en base a partículas inorgánicas, el tamaño óptimo de las partículas deberá variar entre 290 y 850 μm , la porosidad total de las partículas deberá ser de por lo menos 30% por volumen, y la distribución de poros deberá estar en el rango de 0.05 a 3 μm . La incorporación de tales partículas, en la proporción adecuada, produce concretos con excelente resistencia a los procesos de congelación, de acuerdo a ASTM C 666.

Los aditivos incorporadores de aire tienen la ventaja de una completa estabilidad del sistema de burbujas de aire. Ya sea el momento en que se adicionen al concreto fresco, cambios en el procedimiento o tiempo de mezcla, cambios en la temperatura, trabajabilidad o proceso de acabado, o la incorporación de adiciones, no se producirán cambios en el contenido de aire, como podría ser el caso con el empleo de aditivos convencionales incorporadores de aire.

6.- FENÓMENO DEL CONGELAMIENTO Y DESHIELO EN CLIMA FRIO Y SU MECANISMO.

Antes de plantear las recomendaciones básicas para el manejo del concreto a baja temperatura, es importante entender un aspecto particular de su comportamiento en relación con el congelamiento.

Alrededor del 25% del tiempo se dan condiciones ambientales en la altura correspondientes a clima frío con temperaturas por debajo de 0°C, lo que puede producir el congelamiento del agua contenida en los poros capilares del concreto, haciendo que se expanda hasta un 9% e induciendo esfuerzos internos de tracción que pueden provocar su fisuración inmediata o por fatiga al repetirse varias veces el ciclo congelamiento-deshielo.

En términos muy simples, al congelarse el agua internamente y expandirse, va desplazando el agua aún en estado líquido que al no tener espacio adicional soporta las presiones de la expansión y las transmite al concreto, hasta que superan la capacidad resistente de éste y lo fisuran, o lo dejan tensionado hasta que se liberan con el deshielo. Si la fisuración no ocurre en el primer ciclo, la fatiga por repetición de los ciclos acaba produciéndola.

En la década de los 50, se desarrollan los incorporadores de aire que son aditivos implementados para contrarrestar este efecto, y cuya acción consiste en introducir una estructura adicional de vacíos no interconectados, que permiten asimilar los desplazamientos del agua generados por el congelamiento eliminando las tensiones.

Si bien los incorporadores de aire controlan el fenómeno del congelamiento, hay que tener en cuenta que mientras más poroso sea el concreto, retendrá mas agua y será más susceptible a sus efectos, así como a cualquier agresividad mecánica o química que atente contra su durabilidad, por lo que existe mucha evidencia científica que demuestra que esto se evita controlando además su

permeabilidad limitando la relación agua/cemento a un máximo del orden de 0.50. Debe recordarse, que cuando se emplean incorporadores de aire, de acuerdo a Feret la resistencia en compresión disminuye en un 5 % por cada 1% de aire incorporado debido al aumento en la porosidad.

Los porcentajes de aire incorporado que se recomiendan en función del Tamaño máximo de los agregados son los que se indican en la Tabla 2.1.

7.- APLICACIONES

Los concretos con aire incorporado deberán ser empleados siempre que exista la posibilidad que elementos de concreto estén expuestos a congelación, así como cuando se desee incrementar la impermeabilidad. Igualmente el aire es efectivo en mezclas pobres que, de otra manera, serían ásperas, duras y difíciles de trabajar. No existe acuerdo sobre los beneficios en la fabricación de bloques de concreto, pero si en la fabricación de tuberías de concreto.

8.- EVALUACIÓN, SELECCIÓN Y CONTROL DEL COMPRADOR

Es importante no solo el volumen total de aire sino que, mas importante puede ser la eficiencia de la protección que da a la pasta. Para asegurar que un determinado aditivo incorporador de aire produce el sistema de burbujas deseado, el deberá cumplir con los requerimientos de la Norma ASTM C 260 que se refieren a los efectos del aditivo sobre la exudación, tiempo de fraguado, resistencias en compresión y flexión, resistencia a la congelación, y cambios de longitud en una mezcla de concreto endurecida en comparación con una mezcla de concreto similar que contiene un aditivo estándar de referencia, tal como una resina vinsol neutralizada.

Los ensayos y la experiencia muestran que un concreto que tiene un contenido de aire total en el rango de los valores recomendados por ACI 211.1,

generalmente deberá tener la distribución y tamaño adecuados, en la distribución de burbujas, cuando se emplea un aditivo incorporador de aire que cumple con los requerimientos de la Norma ASTM 260. El empleo de la Norma ASTM C 457 para determinar las características del sistema de burbujas en el concreto endurecido da una mayor seguridad de que se ha obtenido un concreto de resistencia satisfactoria a los procesos de congelación.

La mayoría de los aditivos comerciales se venden en forma líquida. El nombre y la cantidad deben estar indicados en el recipiente de entrega, aceptándose valores mínimos de variabilidad dentro de cada lote y en embarques, de acuerdo a ASTM C 260 y cumplir con los ensayos de aceptación indicados en la Norma ASTM C 233.

9.- DOSIFICACIÓN, EMPLEO Y ALMACENAMIENTO

Para obtener la mayor uniformidad en la mezcla es recomendable que el aditivo soluble en agua sea añadido en forma de solución. Si el aditivo está en forma de polvo, escamas, o semisólido, se deberá preparar una solución antes de emplearlo, siguiendo las recomendaciones del fabricante. Si no se obtiene el resultado deseado será necesario efectuar ajustes en la cantidad de aditivo añadida. Para un conjunto de materiales y condiciones dado, la cantidad de aire incorporado es proporcional a la de agente empleado.

En algunos casos puede requerirse un cambio en el tipo de material fundamental empleado en hacer el aditivo, o un cambio en el cemento o en el agregado fino, o un incremento en el asentamiento, para obtener el contenido de aire deseado.

En el almacenamiento se seguirán las recomendaciones del fabricante. Estos aditivos no son afectados por la congelación, pero las instrucciones del fabricante deberán seguirse. Si el aditivo está almacenado por más de seis meses después de la terminación de los ensayos previos al embarque, o está en poder del

vendedor o contratista por mas de seis meses, deberá ser vuelto a ensayar y rechazado si no cumple con la Norma ASTM C 260.

10.- PROPORCIONAMIENTO DEL CONCRETO

La selección de las proporciones de un concreto con aire incorporado es similar a la de un concreto sin él. Se debe seguir el procedimiento indicado en la recomendación ACI 211.

11.- FACTORES QUE INFLUYEN EN LA CANTIDAD DE AIRE

11.1.- EFECTO DE LOS MATERIALES Y PROPORCIONES

La cantidad de aditivo deberá variar para obtener un contenido de aire dado deberá variar dependiendo de la granulometría y perfil de las partículas de agregado. La presencia de impurezas orgánicas disminuye los requerimientos de aditivo, un incremento en la dureza del agua incrementará los requisitos del aditivo. Si el contenido o fineza del cemento se incrementan, el aire incorporado potencial de una cantidad dada de aditivo tenderá a disminuir. Los concretos de resistencias iniciales altas pueden requerir mayores cantidades de aditivo. Los cementos de alto contenido de álcalis generalmente requieren una menor cantidad de aditivo para obtener un contenido de aire dado cuando se los refiere a un cemento de bajo contenido de álcalis.

Incrementos en el concreto de la cantidad de material finamente dividido (puzolanas, negro de carbón, o bentonita) usualmente disminuyen la cantidad de aire incorporado por un aditivo. Conforme la temperatura del concreto se incrementa, deberá requerirse un dosaje más alto de aditivo para mantener un contenido de aire adecuado. Una cantidad dada de un aditivo generalmente producirá ligeramente mas aire cuando se emplea cloruro de calcio como acelerante.

La cantidad de aditivo requerida para producir un contenido de aire dado puede ser reducida un tercio o mas cuando se emplea aditivos reductores de agua. Diversos tipos de aditivos pueden influir en el contenido de aire y la calidad de las burbujas, debiéndose tener especial cuidado cuando tales aditivos son empleados en conjunción con aditivos incorporadores de aire para asegurar su compatibilidad. Incrementos en el contenido de aire incrementan el asentamiento. Aunque mezclas con relativamente alto asentamiento pueden tener un mayor factor de asentamiento y son menos deseables que las mezclas de bajo asentamiento. Un incremento en la relación agua/cemento resultará en un incremento en el contenido de aire y en burbujas de aire mayores.

11.2.- EFECTOS DEL PROCESO DE PUESTA EN OBRA

La cantidad de aire incorporado varia con el tipo y condición de la mezcladora, la cantidad de concreto que está siendo mezclado, y la rapidez y tiempo de mezclado. Para una mezcladora dada puede haber cambios en el contenido de aire si hay variaciones significativas en el tamaño de la tanda, especialmente si el tamaño de la tanda es muy diferente de la capacidad de la mezcladora. Un nivel del 4% puede pasar al 8%, si la mezcladora se incrementa ligeramente por encima de su capacidad.

La cantidad de aire incorporado se incrementa con el tiempo de mezclado pudiendo un exceso ocasionar disminución lenta. El agitado prolongado no es peligroso si el sistema de burbujas mantiene su superficie específica y factor de espaciamiento. Adiciones de agua para obtener el asentamiento deseado obligan a comprobar el contenido de aire. La adición de agua sin tener un completo mezclado puede dar una distribución no uniforme del aire y del agua en la tanda.

Los procedimientos para transportar el concreto después del mezclado pueden reducir el contenido de aire, el concreto bombeado es uno de ellos. La forma y grado de consolidación empleados en la colocación pueden reducir el contenido de aire, debido a la pérdida de las grandes burbujas de aire atrapado que contribuyen muy poco a los efectos positivos del aire incorporado.

12.- CONTROL DEL CONTENIDO DE AIRE

Es necesario un control permanente del contenido de aire en muestras obtenidas en el punto de colocación. Los ensayos deberán hacerse a intervalos regulares, o si existen razones para sospechar de cambios en su contenido. El contenido importante es el presente después de la consolidación. En todos los casos es importante que el contenido de aire de la muestra sea comprobado en el punto de descarga de los encofrados.

El contenido de aire del concreto fresco puede determinarse por el Método Gravimétrico de acuerdo a ASTM C 138, el Método Volumétrico de acuerdo a ASTM C 173, y el Método de Presión de acuerdo a ASTM C 231. Estos métodos miden el contenido de aire y no sus características. Los parámetros significativos del sistema de burbujas en el concreto endurecido pueden ser determinados por métodos microscópicos, tales como los descritos en la Norma ASTM C 457.

Las propiedades de los materiales empleados en la preparación del concreto, el proporcionamiento de la mezcla, y todos los aspectos del mezclado, manipulación y colocación deberán ser mantenidos tan constantes como sea posible, a fin de que el contenido de aire sea uniforme y esté dentro del rango especificado para el trabajo. Recuérdese que demasiado aire puede reducir la resistencia sin una mejora de la durabilidad, en tanto que muy poco aire impedirá lograr la trabajabilidad y durabilidad necesarias.

La supervisión deberá asegurar que los aditivos incorporadores de aire cumplen con las especificaciones, que pueden ser almacenados sin contaminación o deterioro, y que son capaces de ser mezclados tal como ha sido especificado. El contenido de aire deberá ser verificado y controlado durante el transcurso del trabajo. Las practicas que causan pérdida deberán ser corregidas o un contenido de aire adicional incorporado inicialmente.

TABLA 2.1: Porcentajes de aire incorporado que se recomiendan en función del Tamaño máximo de los agregados

Tamaño máximo nominal en pulgadas	Exposición severa con humedad constante en porcentaje	Exposición moderada con humedad ocasional en porcentaje
3/8	7.5	6.0
1/2	7.0	5.5
3/4	6.0	5.0
1	6.0	4.5
1 1/2	5.5	4.5
3	4.5	3.5

(Fuente: ACI 318R-05, "Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary", Tabla 4.2.1, pág. 52).

CAPITULO III

ADITIVOS ACELERANTES

CAPITULO III

ADITIVOS ACELERANTES

1.- ASPECTOS GENERALES

Los acelerantes reducen el tiempo de fraguado y aceleran el desarrollo inicial de resistencia, reduciendo los periodos de curado y protección, y permiten que las mezclas trabajen mejor durante las bajas temperaturas. Los acelerantes incrementan la velocidad de desarrollo de ciertas propiedades del cemento y/o el concreto, sin afectar a cada una de la misma forma simultanea.

La aceleración puede ser considerada en el sentido químico como un incremento en la velocidad de reacción, en el sentido físico como un incremento en la velocidad de fraguado o en los cambios de volumen, en el sentido mecánico como un incremento en la velocidad de desarrollo de resistencia. Los cambios pueden no ocurrir a la misma velocidad y en igual magnitud en la totalidad del periodo de hidratación. El mismo aditivo puede tener efectos opuestos, dependiendo del tiempo y condiciones de ensayo, así como del volumen y composición del material.

La aceleración en la hidratación del cemento debería significar una correspondiente ganancia de resistencia. No siempre es así y los estudios indican que durante el proceso de hidratación inicial se obtiene una ganancia del 3.5% sin la correspondiente ganancia en el desarrollo de resistencia que, para dicho porcentaje, tiene los menores valores.

Es importante recordar que no siempre actúa como acelerante el aditivo cuando es añadido a los componentes individuales del cemento. Así el cloruro de calcio retarda la hidratación de la fase C3A (aluminato tricalcico), aunque

actúa como acelerante de la hidratación de la fase sílice. En el periodo inicial de hidratación de la fase C3S, en mezclas con agua/cemento de 0.30, la máxima aceleración de la resistencia ocurre con una adición de 2% de cloruro de calcio. Entre los 7 y 28 días, las pastas con 5% de cloruro de calcio obtienen mayores resistencias.

El cloruro de calcio considerado como un acelerante del fraguado puede actuar como retardador cuando se lo utiliza en cementos con alto contenido de alumina, cementos a base de calcio-alumino-fluorita y cementos de escorias. Deben ser excluidos de la clasificación de acelerantes el fluorsilicato de calcio, silicatos alcalinos, aluminatos y carbonatos, todos los cuales producen fraguado acelerado del concreto, pero cuya acción comprende la formación de compuestos insolubles por reacción química del hidróxido de calcio formado por la hidratación del cemento.

El cloruro de calcio, no es recomendado en concreto pretensado, en concreto con metales embebidos disímiles, o en concreto armado en un ambiente húmedo debido a su tendencia a promover la corrosión del acero. Elementos que no son a base de cloruros y no son corrosivos, los cuales incluyen determinados nitratos, formiatos y nitritos, son empleados alternativamente aunque pueden ser menos efectivos que el cloruro de calcio. Otros productos químicos que aceleran la magnitud de endurecimiento del concreto incluyen la trietanolamida y una variedad de sales solubles tales como otros cloruros, bromuros, fluoruros, carbonatos, silicatos y tiocianatos.

2.- CLASIFICACIÓN

Los aditivos que aceleran el endurecimiento de las mezclas de concreto pueden ser divididos en cuatro grupos:

1. Sales inorgánicas solubles
2. Compuestos orgánicos solubles

3. Aditivos de fraguado rápido
4. Aditivos sólidos variados

Los acelerantes deberán cumplir con los requerimientos de los Tipos C o E de la Norma ASTM C 494. El cloruro de calcio deberá cumplir con los requisitos de la Norma D 98.

2.1.- SALES SOLUBLES INORGÁNICAS

Una variedad de sales solubles inorgánicas, tales como cloruros, bromuros, fluoruros, carbonatos, tiocinatos, nitritos, nitratos, tiosulfatos, silicatos, aluminatos, e hidróxidos alcalinos, deberán acelerar el fraguado del cemento portland. Los acelerantes inorgánicos actúan por hidratación del C3S. Las investigaciones con calorímetro han confirmado esta afirmación.

En las mezclas de concreto conteniendo cloruro de calcio, el yeso se combina con el aluminato de calcio para formar etringita (trisulfoaluminato de calcio y el cloruro de calcio se combina con el aluminato de calcio para formar cloroaluminato de calcio. El empleo de cloruro de calcio reduce el tiempo de fraguado al acelerar la hidratación inicial. Como efectos complementarios se tiene un incremento en el calor durante el primer día, con incrementos o reducciones posteriores de acuerdo al tipo de cemento, y un incremento en la resistencia inicial con disminución a los 28 días.

La incorporación de sulfatos de amonio o de potasio a la mezcla acelera el proceso de hidratación en las primeras horas, disminuyéndolo posteriormente. Puede acelerarse la hidratación durante las dos primeras horas si se adiciona hidróxido de sodio a la mezcla.

2.2.- COMPUESTOS ORGÁNICOS SOLUBLES

Los más comunes son la trietanolamida y el formiato de calcio, los cuales tienen efecto retardante sobre los aditivos reductores de agua o proporcionan

aditivos no corrosivos. Se han encontrado propiedades acelerantes en el acetato de calcio, el propionato de calcio y el butirato de calcio; y propiedades retardantes a las sales de los ácidos hidroxilar carboxilo. Los compuestos orgánicos considerados como acelerantes incluyen la urea, el ácido oxálico, el ácido láctico, y compuestos de condensación de aminas y formaldehído. Se puede experimentar severo retardo cuando la cantidad de estos compuestos es empleada en forma excesiva.

La trietanolamida es un catalizador que acelera la hidratación del C3A, pero retarda la del C3S. Así, la trietanolamida puede actuar como un retardador de la hidratación del cemento y también como un acelerante. Es empleada como constituyente de determinados aditivos debido a que reduce la excesiva acción retardante de los reductores de agua. Ello no significa que empleada sola deberá acelerar la reacción total del cemento. De acuerdo a la cantidad empleada puede actuar como un retardador o acelerante en la hidratación del cemento. En porcentajes de 0.01% a 0.05% no tiene efecto sobre el tiempo de fraguado. En el rango de 0.1% a 0.5% puede ocurrir un fraguado muy rápido debido a la formación acelerada de la fase etringita. Las pastas y morteros que la contienen en porcentajes de 0.1% a 1% presentan una resistencia en compresión mucho menor que aquellas muestras que no contienen este aditivo. Su empleo es muy pequeño debido a su alto costo, aun cuando ella no promueva o favorezca la corrosión del acero de refuerzo.

La producción de etringita es mayor en mezclas que contienen formiato de calcio. La efectividad de los formiatos depende del contenido de sulfatos del cemento y de la relación $C3A/SO_3$. Aunque actúa como un acelerador de la hidratación del silicato de calcio, no se le considera tan eficiente como el cloruro de calcio. A iguales porcentajes de adición y periodo inicial de hidratación, el cloruro de calcio desarrolla mas calor de hidratación que el formiato de calcio. Igualmente se ha encontrado que, para igual porcentaje de hidratación, la adición de 1% de cloruro de calcio es tan efectiva como la de 2% de formiato de calcio.

2.3.- ADITIVOS SÓLIDOS DIVERSOS

Las mezclas de cemento portland normal y cemento calcio aluminoso, en porcentajes del 5% al 20%, reducen el tiempo normal de fraguado del concreto. La resistencia al día disminuye, la contracción por secado y la expansión bajo agua son mayores, y la durabilidad del concreto puede ser seriamente afectada.

Se ha investigado empleando cementos ya hidratados finamente molidos, en porcentajes del 2% en peso del cemento. Los resultados equivalen al empleo de 2% de cloruro de calcio, con la ventaja de eliminar el riesgo de corrosión, son que incrementan la resistencia a los 90 días y no aumentan la contracción. Se piensa que el incremento es debido a que se distribuye en la pasta minúsculos cristales ya hidratados, los cuales forman núcleos alrededor de los cuales el proceso de cristalización es más rápido.

El sílica gel finamente dividido y el silicato de amonio aceleran el desarrollo de resistencia debido a la aceleración de la hidratación del silicato tricálcico. El carbonato de magnesio finamente dividido acelera el tiempo de fraguado al igual que el carbonato de calcio.

El cloruro de calcio no deberá ser empleado con cementos calcio-aluminosos ya que se retarda la hidratación de los aluminatos. El cloruro de calcio y el carbonato de potasio incrementan el tiempo de fraguado y disminuyen el desarrollo de la resistencia inicial de los cementos de endurecimiento rápido basados en fluoroaluminato de calcio. Después del día la resistencia es mejorada. El efecto del cloruro de calcio sobre los cementos mezclados es similar al que se produce en el cemento portland, siendo mayor con el empleo de escorias que con el empleo de puzolanas.

Los ensayos usuales deben ser hechos para el control del concreto, tales como asentamiento, peso unitario y contenido de aire. Si el concreto se atiesa rápidamente y se presenta dificultades para alcanzar consolidación o acabado adecuados deberá investigarse el acelerante empleado.

2.4.- ADITIVOS DE FRAGUA INSTANTÁNEA

Los aditivos de fragua instantánea promueven una fragua muy rápida del C3A y son empleados para producir morteros de fraguado instantáneo o concretos adecuados para operaciones de concreto lanzado o shotcrete, sellado de grietas u otros fines. En el caso de concretos lanzados, los acelerantes empleados se basan en aluminatos, silicatos y carbonatos solubles. Estos materiales son muy cáusticos y pueden ser dañinos para la salud de los trabajadores.



Imagen 3.1: Estabilización de roca. El concreto lanzado acelerado es utilizado para proporcionar a las rocas un soporte rápido.

3.- CONSIDERACIONES DE EMPLEO

Los acelerantes son útiles para modificar las propiedades del concreto, especialmente en climas fríos, así:

- a) Facilitan el comienzo de las operaciones de acabado.
- b) Facilitan la aplicación del aislamiento para protección
- c) Incrementan la resistencia inicial, permitiendo un desencofrado más rápido.

- d) Permiten una puesta más rápida de la estructura en servicio.
- e) Permiten un control más eficiente de pérdidas debidas a la presión hidrostática.
- f) Aceleran el tiempo de fraguado del concreto lanzado.

El empleo de acelerantes en concretos colocados en climas de baja temperatura usualmente no es suficiente en si mismo para controlar los efectos de estas. Los aditivos acelerantes no deberán ser empleados como agentes anticongelantes del concreto. Igualmente, deberán ser empleados con precaución en climas cálidos. Algunos de sus efectos negativos pueden ser una rápida evolución del calor debido a la hidratación, fraguado rápido, y un incremento en el agrietamiento por contracción.

4.- EFECTOS SOBRE EL CONCRETO

Los efectos de los acelerantes sobre algunas de las propiedades del concreto incluyen:

4.1.- TIEMPO DE FRAGUADO

Los tiempos de fraguado inicial y final se reducen. La magnitud de la reducción varía con la cantidad de aditivo acelerante empleado, la temperatura del concreto, la temperatura ambiente, y las características de los otros materiales empleados en el concreto. Una cantidad excesiva de un acelerante puede causar un fraguado muy rápido, igualmente, un dosaje excesivo de determinados acelerantes puede causar retardo.

Se puede obtener tiempos de fraguado tan cortos como 15 a 30 segundos. Existen mezclas ya preparadas de cemento, arena y acelerante que tienen una fragua inicial de 1 a 4 minutos y una fragua final de 3 a 10 minutos. Los morteros preparados con estas mezclas son empleados para parchados o para reparaciones de emergencia. La resistencia final de tales morteros deberá

ser mucho menor que si no se añade un acelerante. La concentración del aditivo puede determinar su comportamiento. Por ejemplo el cloruro férrico es un retardador en adición de 2% a 3% en peso, pero actúa como un acelerante en adiciones del 5%. El empleo de cemento calcio aluminoso como aditivo puede causar fragua instantánea dependiendo del dosaje empleado. La temperatura también es un parámetro importante desde que el cloruro de calcio tiene un mayor efecto acelerante a temperaturas de 0 °C a 5 °C que a 25 °C.

4.2.- INCORPORACIÓN DE AIRE

Si se emplea acelerantes puede requerirse una menor cantidad de aditivo incorporador de aire para producir el contenido de aire requerido. En algunos casos se puede obtener grandes burbujas y un alto factor de espaciamiento, reduciendo los efectos positivos del aire incorporado. La evaluación de concretos que contienen el aditivo especificado puede ser mejorada si se efectúan ensayos tales como los indicados en las Normas ASTM C 457 y ASTM C 666 respectivamente.

4.3.- CALOR DE HIDRATACIÓN

Un desarrollo inicial de calor puede obtenerse cuando se emplea acelerantes, pero no tiene un efecto apreciable sobre el calor de hidratación total.

4.4.- RESISTENCIA

Con cloruro de calcio la resistencia en compresión puede incrementarse significativamente en las edades iniciales, mas tarde puede reducirse ligeramente. El porcentaje de incremento en la resistencia a la flexión generalmente es menor que el de la resistencia en compresión.

El efecto de otros aditivos acelerantes sobre el desarrollo de la resistencia no está aun claramente conocido, aunque un número importante de

sales que aceleran el fraguado pueden disminuir la resistencia del concreto tan pronto como al día siguiente. Algunos acelerantes orgánicos, tales como la trietilonamida y el formiato de calcio, aparecen como sensitivos en su acción acelerante en la mezcla de concreto. La adición del 2% de cloruro de calcio en peso del cemento, incrementan la resistencia al día en un rango del 199% al 200%, dependiendo del cemento empleado.

La resistencia a la compresión al día para una mezcla de cemento portland y calcio-aluminoso, generalmente deberá ser mas baja que la que se obtendría trabajando con los dos cementos independientemente. Se ha reportado el comportamiento de mezclas de cemento portland con 2% en peso de un cemento hidratado finamente molido, habiéndose apreciado incrementos en la resistencia a la compresión a los 90 días del 20% al 25%.

4.5.- DURABILIDAD

4.5.1.- Cambios de Volumen

Los acelerantes incrementan los cambios de volumen que ocurren bajo condiciones de curado húmedo y seco. Igualmente, el cloruro de calcio incrementa el escurrimiento plástico y la contracción por secado del concreto. Tales cambios dependen del tiempo de curado y de la composición del cemento usado, siendo los cambios en la magnitud de la deformación mayores que los cambios en la cantidad total de deformación. La influencia del cloruro de calcio en contracción por secado puede ser el resultado del cambio en la distribución por tamaños de los poros capilares debido al efecto del cloruro sobre la hidratación del cemento.

La contracción por secado y la expansión en agua son mas altos para mezclas que contienen tanto cemento portland como cemento calcio-aluminoso, y su durabilidad puede ser afectada en forma negativa por el empleo de aditivos acelerantes.

La resistencia al deterioro debido a ciclos de congelación y al descascaramiento causado por el empleo de sales descongelantes puede ser incrementada en las edades iniciales por el empleo de un acelerante, pero puede disminuir en edades posteriores.

La resistencia al ataque de sulfatos disminuye cuando el concreto contiene cloruro de calcio. La expansión producida por la reacción álcali-sílice es mayor cuando el cloruro de calcio es empleado. Esta acción puede ser controlada por el empleo de agregados no reactivos, cemento de bajo contenido de álcalis, o determinadas puzolanas.

4.5.2.- Corrosión de Metales

El cloruro de calcio favorece la corrosión de metales en contacto con el concreto debido a la presencia de iones cloro húmedo y oxígeno. Las características de esta reacción y las precauciones a ser tomadas deben ser tenidas en consideración al seleccionar el aditivo acelerante.

De acuerdo a ACI 222, el contenido máximo de ion cloruro soluble en ácido es de 0.08% para concreto pretensado y 0.20% para concreto armado, medidos de acuerdo a ASTM C 114 y expresados en peso del cemento. Estos valores minimizan el riesgo de corrosión inducida por cloruros. Valores para el ion cloruro soluble en agua son dados como máximo en La Tabla 3.1 del ACI 318. Se debe tener juicio en la aplicación de estos límites, teniendo presente que factores como humedad y oxígeno siempre son necesarios para corrosión electroquímica.

Todos los acelerantes que no contienen cloruros no son necesariamente no corrosivos y la información deberá incluir resultados de corrosión asociados con niveles de dosaje.

4.5.3.- Decoloración

La decoloración del concreto se ha asociado con el empleo de cloruro de calcio y su interacción con los álcalis del cemento, siendo la decoloración función de la relación álcali/cloruro. La magnitud y permanencia de la decoloración se incrementan conforme la concentración de cloruro de calcio pasa de 0 a 2% en peso del cemento

4.6.- DOSIFICACIÓN Y USO

La cantidad de acelerante necesaria para obtener el tiempo de fraguado y desarrollo de resistencia esperados, depende de las condiciones ambientales locales y materiales empleados.

El cloruro de calcio debe ser incorporado en forma de solución, debiendo las formas sólidas ser disueltas en agua antes de su empleo. La concentración de la solución puede ser controlada comprobando la densidad, la densidad correcta debe darla el vendedor.

Todas las formas de cloruro de calcio deberán cumplir con la Norma ASTM D 98. Los aditivos acelerantes basados en el cloruro de calcio deberán cumplir con la Norma ASTM C 494. El volumen de agua en la solución deberá ser deducido de los requisitos de agua requeridos para la relación agua-cemento deseada. Si se dispone de sistemas de dosificación se recomienda su empleo para garantizar una adición uniforme de cloruro de calcio en forma líquida.

4.7.- EFECTOS DEL CLORURO DE SODIO

En el grupo de clasificación de los aditivos acelerantes que corresponden a las sales solubles inorgánicas se encuentra el cloruro de sodio. Este aditivo actúa por aceleración de la hidratación del silicato tricálcico y por combinación con el aluminato de calcio para formar cloroaluminato de sodio el cual tiende a acelerar el tiempo de fraguado.

El empleo de cloruro de sodio como acelerante reduce el tiempo de fraguado al acelerar la hidratación inicial. Como efectos complementarios se indican un incremento en el calor inicial en el primer día y un incremento en la resistencia inicial del concreto con tendencia a una disminución de la misma alrededor de los 28 días y edades posteriores. En Rusia, el cloruro de sodio se ha utilizado, conjuntamente con el cloruro de calcio, para temperaturas por debajo de -10 °C.

Vera Ortiz, en el LEM-UNI, ha estudiado en 1999, los efectos del cloruro de sodio, cuando se lo emplea con acelerante, sobre las propiedades del concreto cuando se lo incorpora en proporciones de 1% y 2% en mezclas de consistencia plástica preparadas con cementos Tipo I. Las principales conclusiones de los estudios de Vera Ortiz fueron

- a) La presencia de cloruro de sodio en la mezcla no influye directamente sobre la trabajabilidad del concreto.
- b) La presencia de cloruro de sodio en las mezclas no influye ni modifica la consistencia de las mismas la cual se mantiene dentro del mismo rango ya se trate de mezclas con o sin aditivo.
- c) La incorporación de cloruro de sodio no favorece la segregación del agregado grueso.
- d) La presencia de cloruro de sodio no modifica la exudación en relación con la que corresponde a las mezclas sin aditivo.
- e) La presencia de cloruro de sodio no tiene influencia sobre el contenido de aire de las mezclas.
- f) Para cementos de diferentes marcas se observa modificaciones en el tiempo de fraguado inicial y final de acuerdo al porcentaje de cloruro de sodio, en relación con las de los concretos sin aditivos.
- g) No se registran diferencias en el peso del concreto debido a la presencia de cloruro de sodio en la mezcla.
- h) Las mezclas con y sin cloruro de sodio han sido de fácil manipulación y acomodo, con adecuada trabajabilidad y clasificables como cohesivas.
- i) La presencia de cloruro de sodio en la mezcla acelera la

hidratación del C3S y contribuye a la reducción en el tiempo de fragua.

- j) La resistencia al día aumenta en 27%, a los 3 días en 15% y a los 7 días en 7% cuando se emplea 1% de cloruro de sodio. Si se emplea 2% de cloruro de sodio aumenta 35% al día, 16% a los 3 días y 8% a los 7 días.

5.- PROPORCIONES DEL CONCRETO

Las proporciones de las mezclas que contienen un acelerante generalmente son las mismas que aquellos sin el. El dosaje máximo de ion cloruro no deberá exceder de los valores mencionados en este Capítulo.

6.- CONTROL DE CALIDAD

Los acelerantes deberán cumplir con los requisitos de la Norma ASTM C 494 para los tipos C o E. El cloruro de calcio también deberá cumplir los requerimientos de la Norma ASTM D 98, ya se encuentren en estado sólido o líquido.

Se deberá efectuar ensayos de comprobación si no existe información adecuada disponible para evaluar los efectos de un aditivo determinado sobre las proporciones del concreto, empleando los materiales de obra y la temperatura y procedimientos de construcción esperados.

Se deberá determinar cual de los aditivos bajo consideración contiene una cantidad significativa de cloruros y, de ser así, el porcentaje por peso de cemento que deberá ser incorporado al concreto. De acuerdo a ello se evaluará el potencial para corrosión.

TABLA 3.1: Máximo contenido del ion cloruro para la protección contra la corrosión del refuerzo.

Tipo de elemento	Máximo ion cloruro (Cl⁻) soluble en agua en el concreto, % por peso del cemento
Concreto pretensado	0.06
Concreto armado expuesto a cloruros en servicio	0.15
Concreto armado que va a estar seco o protegido de la humedad en servicio	1.00
Otras construcciones de concreto armado	0.30

(Fuente: ACI 318R-05 "Building Code Requirements For Structural Concrete And Commentary", Tabla 4.4.1, pág. 45)

CAPITULO IV

ADITIVOS REDUCTORES DE AGUA

CAPITULO IV

ADITIVOS REDUCTORES DE AGUA

1.- INTRODUCCIÓN

Con el notable desarrollo experimentado por los Superplastificantes, los aditivos reductores de agua controladores de fragua han ido perdiendo importancia como aditivos a ser empleados en el concreto. A continuación se presenta un detalle de su clasificación y composición, los efectos sobre el concreto tanto fresco como endurecido, recordando que la mayoría de los mismos puede ser alcanzada por aditivos del grupo de los superplastificantes.

2.- CLASIFICACIÓN Y COMPOSICIÓN

Los aditivos reductores de agua deben cumplir con los requisitos de la Norma ASTM C 494, la cual los clasifica en los siguientes siete tipos.

- 1.- Tipo A: Reductores de agua
- 2.- Tipo B: Retardadores de fragua
- 3.- Tipo C: Acelerantes de fragua
- 4.- Tipo D: Reductores de agua y retardantes
- 5.- Tipo E: Reductores de agua y acelerantes
- 6.- Tipo F: Reductores de agua de alto rango
- 7.- Tipo G: Reductores de agua de alto rango y retardantes

La Norma ASTM C 494 da requerimientos detallados con respecto a los requisitos del agua, el tiempo de fraguado, resistencias en compresión y flexión, contracción por secado, y resistencia a la congelación y deshielo, ver Tabla 4.1.

Los materiales que generalmente son disponibles para ser empleados como reductores de agua y controladores de fragua pueden estar comprendidos dentro de una de las ocho clases generales:

- 1.- Ácido lignosulfónico y sus sales
- 2.- Modificaciones y derivados del ácido lignosulfónico y sus sales.
- 3.- Ácido hidroxilar carboxílico y sus sales.
- 4.- Modificaciones y derivados del ácido hidroxilar carboxílico y sus sales.
- 5.- Sales de los productos de la policondensación de la melamina sulfonada.
- 6.- Sales de la condensación de los productos de alto peso molecular del ácido sulfónico naftaleno.
- 7.- Mezclas de los condensados de la melamina o el naftaleno con otros materiales reductores de agua o retardadores de fragua, o ambos.
- 8.- Otros materiales, los cuales incluyen:
 - (a) Materiales inorgánicos tales como las sales de zinc, boratos, fosfatos, cloruros
 - (b) Aminas y sus derivados
 - (c) Carbohidratos, polisacáridos, y ácidos del azúcar
 - (d) Determinados polímeros compuestos, tales como esteres de la celulosa, derivados de la melamina, derivados del naftaleno, siliconas, y hidrocarburos sulfonados.

Estos materiales pueden ser usados independientemente o en combinación con otras sustancias orgánicas o inorgánicas, activas o esencialmente inertes.

3.- EFECTOS SOBRE EL CONCRETO FRESCO

3.1.- REDUCCIÓN DE AGUA

Los aditivos reductores de agua del Tipo A de la Norma ASTM C 494, reducen los requerimientos de agua para el mismo asentamiento de concreto en, por lo menos 5%, y en algunos casos hasta el 12%. Aquellos a base de lignosulfonatos o ácido hidroxilar carboxilo generalmente reducen el contenido de agua 5% a 10% para un asentamiento dado y un contenido de cemento determinado. Los reductores de agua de alto rango pueden reducir los requerimientos de agua hasta en un 30% para un asentamiento dado. Pueden ser empleados para lograr un incremento de asentamiento con una reducción en el contenido de agua.

3.2.- TIEMPO DE FRAGUADO

Estos aditivos retardan el tiempo de fraguado de una a cuatro horas cuando son empleados a temperaturas del orden de 18°C. Los ácidos, los carbohidratos, las sales de zinc, los boratos y los fosfatos en su forma no modificada retardan el tiempo de fraguado del cemento portland en formas diferentes. Estos aditivos generalmente no son recomendados para controlar la falsa fragua.

3.3.- CONTENIDO DE AIRE

Los lignosulfonatos son agentes incorporadores de aire. La cantidad de aire incorporado generalmente está en el rango de 2% a 6%, aunque se ha determinado cantidades más altas. La incorporación de aire puede consistir en grandes burbujas inestables que contribuyen muy poco a la resistencia a la congelación. En general este tipo de aditivos puede afectar la capacidad de incorporar aire en el caso de los aditivos incorporadores de aire. Se estima que diferentes combinaciones de aditivos incorporadores de aire y aditivos reductores de agua de alto rango deberán ser evaluadas para lograr un concreto

que sea resistente a la congelación y deshielo. Se considera prudente incluir ensayos de resistencia a la congelación en la evaluación del aditivo reductor de agua, dado que en algunos casos el factor de espaciamiento puede exceder los límites generalmente aceptados.

3.4.- TRABAJABILIDAD

Concretos con y sin aditivo reductor de agua que tienen el mismo asentamiento y contenido de aire son difíciles de detectar en sus diferencias en trabajabilidad, desde que no existen ensayos estándar para medir esta. Sin embargo los concretos con el aditivo son menos propicios a segregar. Los obreros detectan mayor facilidad de colocación para los concretos que contienen el aditivo. Los concretos diseñados para alta resistencia empleando reductores de agua de alto rango generalmente tienen un contenido de cemento lo suficientemente alto para suplir la fineza requerida. El reproporcionamiento de tales concretos puede ser acompañado por una reducción del volumen de agua o un incremento en los volúmenes de agregados fino y grueso.

3.5.- EXUDACIÓN

El efecto sobre la exudación es muy variado. Algunos tienden a incrementarla, otros no. Unos reducen exudación y segregación en mezclas frescas debido a la incorporación de aire.

3.6.- CALOR DE HIDRATACIÓN

Dentro del rango normal de relaciones agua/cemento, la temperatura y el calor de hidratación no son reducidos para igual contenido de cemento con el empleo de un aditivo controlador de fragua. La aceleración o retardo pueden alterar la elevación de temperatura bajo condiciones de trabajo, si el empleo del aditivo permite una reducción en el contenido de cemento, el calor generado es proporcionalmente reducible.

3.7.- MAGNITUD DE LA PÉRDIDA DE ASENTAMIENTO

La magnitud de la pérdida de asentamiento puede no ser reducida y a menudo se incrementa. Para las bajas relaciones agua/cemento obtenibles con reductores de agua de alto rango, el concreto puede mostrar una pérdida de asentamiento mayor que la normal. Debido a ello, los reductores de agua de alto rango generalmente son añadidos en la obra. El tiempo de trabajo depende de muchos factores, incluyendo el dosaje de los reductores de agua de alto rango, el empleo de otros aditivos químicos, las características del cemento, la temperatura del concreto, el asentamiento y la edad del concreto cuando el aditivo reductor es incorporado.

3.8.- ACABADO

Las características de acabado son mejoradas. Cuando se trata de reductores de agua de alto rango, el acabado puede ser mas difícil debido a la disminución en la exudación, y la superficie puede tender a agrietarse por contracción plástica. La superficie puede ser mantenida húmeda por regado, empleo de retardador de evaporación, u otros procedimientos indicados en la Recomendación ACI 318. Esto deberá efectuarse con precaución para evitar que la durabilidad de la superficie no sea afectada adversamente.

4.- EFECTOS SOBRE EL CONCRETO ENDURECIDO

4.1.- RESISTENCIA

La reducción en la relación agua/cemento da lugar a un incremento en la resistencia. Puede haber futuros incrementos ya sea por la modificación de la reacción de hidratación o de la microestructura. Salvo que se emplee contenidos muy altos, los retardadores producirán incrementos en la resistencia en 24 horas. Los aditivos retardadores pueden reducir las resistencias iniciales en tanto que los tipos de acelerantes y fragua normal incrementan la resistencia inicial.

La resistencia final puede ser incrementada en un 20% o mas para el mismo contenido de cemento. Por ello, el contenido de cemento puede ser disminuido sin reducir la resistencia a los 28 días. Puede, con estos aditivos, incrementarse la resistencia en compresión a los 28 días en un 25% o mas. Los incrementos en la resistencia a la flexión también se obtienen, pero no son proporcionalmente tan altos como los incrementos en la resistencia en compresión.

4.2.- CONTRACCIÓN Y ESCURRIMIENTO

La información sobre los efectos en la contracción y escurrimiento plástico es contradictoria. La contracción en el largo plazo puede ser menor, dependiendo de la magnitud en la cual el contenido de agua del concreto se reduce. El escurrimiento plástico deberá reducirse proporcionalmente al incremento en la resistencia del concreto. La magnitud en la cual el empleo de un aditivo, en una proporción determinada afecta a la contracción y el escurrimiento plástico puede ser diferente si se emplea cementos de diferente composición.

4.3.- DURABILIDAD

El efecto de estos aditivos sobre la resistencia a la congelación es pequeño desde que la resistencia a este efecto es casi siempre una función del sistema de burbujas de aire en el concreto endurecido. Una mejora puede resultar si se disminuye la relación agua/cemento y se incrementa la resistencia. Algunos aditivos de este tipo dan lugar a un espaciado de las burbujas mayor que el necesario para producir concretos capaces de resistir los procesos de congelación cuando se encuentran críticamente saturados. Un factor de espaciado de 0.20 mm o menos es necesario para asegurar la resistencia a la congelación. Factores mayores indican una reducción en la permeabilidad, lo cual permite al concreto permanecer en una condición menor que la de críticamente saturado en presencia del agua cuando está siendo ensayado. Los pequeños incrementos en la resistencia a la congelación, así como a suelos y

aguas agresivos, resultan de la reducción de agua que permite una disminución de la permeabilidad y un incremento en la resistencia.

5.- PREPARACIÓN Y DOSIFICACIÓN

Estos aditivos deberán ser dosificados e incorporados a la mezcla como líquidos, a una concentración adecuada de acuerdo a las recomendaciones del fabricante. La densidad de la mezcla de aditivos en obra, o las soluciones aplicadas como tales, deberán ser determinadas y comparadas con los estándar del fabricante. Los tanques de almacenamiento para soluciones deberán ser claramente identificados y las soluciones protegidas de la contaminación, dilución, evaporación, y congelación.

Dos o mas aditivos de diferentes tipos pueden no ser compatibles cuando son mezclados juntos, ellos deberán ser añadidos a la tanda separadamente de manera tal que ellos puedan ser adecuadamente diluidos antes de ponerse en contacto unos con otros. El vendedor deberá recomendar el procedimiento adecuado.

6.- PROPORCIONAMIENTO

Una mezcla puede necesitar ser reproporcionada cuando se emplea un aditivo si el contenido de agua, el de cemento, o el de aire son cambiados. Los requerimientos de agua de una mezcla, para una consistencia dada, se reducen 5% o mas con la introducción de un aditivo reductor de agua.

Si se añade a una mezcla un aditivo, la relación de la proporción volumétrica de mortero a agregado grueso deberá permanecer igual. Los cambios en los contenidos de agua, cemento, y aire son compensados por los cambios en el contenido de agregado fino, todo ello sobre la base del volumen absoluto de sólidos, de tal manera que el volumen de mortero no varíe.

La mayoría de los aditivos reductores de agua son solubles en esta. La que ellos contienen es una parte del agua de mezclado en el concreto y usualmente se considera en el cálculo de la relación agua/cemento.

7.- CONTROL DE CALIDAD

Puede ser necesario o deseable, determinar que un aditivo es el mismo que aquel que ha sido previamente ensayado, o que sucesivos lotes o embarques son los mismos. Los ensayos incluyen: contenido de sólidos, densidad, espectro de fotometría infrarroja para materias orgánicas, contenido de cloruros, pH, y otros. La Norma ASTM 494 presenta una guía para la determinación de la uniformidad de los aditivos químicos. Los trabajos de inspección pueden ser organizados para la toma de muestras del aditivo como parte del control de calidad de la obra.

8.- PRECAUCIONES

Si la información adecuada no es disponible, deberá efectuarse ensayos para evaluar el efecto del aditivo sobre las propiedades del concreto preparado con materiales de obra bajo las condiciones ambientes anticipadas y los procedimientos de construcción seleccionados. Los ensayos de los aditivos reductores de agua y controladores de fragua deberán indicar su efecto sobre las siguientes propiedades del concreto, independientemente que ellas sean pertinentes a la obra que se está efectuando:

- a) Requerimientos de agua.
- b) Contenido de aire.
- c) Asentamiento.
- d) Exudación y pérdida de aire del concreto fresco.
- e) Tiempo de fraguado.
- f) Resistencias en compresión y flexión.

- g) Resistencia a la congelación.
- h) Contracción por secado.
- i) Características de fraguado.

Quando los aditivos son evaluados antes de su uso en obra, la serie de mezclas deberá ser programada para proporcionar la información necesaria. La Norma ASTM C 494 puede ser una excelente guía aunque su empleo no es obligatorio. Las mezclas de prueba deberán ser preparadas con los mismos materiales a emplearse en obra y tan cerca a las condiciones de obra como sea posible. La temperatura es especialmente importante para el tiempo de fraguado y el desarrollo inicial de resistencia.

Las mezclas de prueba deberán ser hechas con los asentamientos y contenido de aire promedio esperados o especificados para la obra. El contenido de cemento o la relación agua/cemento deberán ser los requeridos para la resistencia de diseño especificada y los requerimientos de durabilidad de la obra. También puede hacerse mezclas de prueba con un rango de contenido de cemento o agua/cemento, u otras propiedades que sobrepasen los requerimientos de obra.

El contenido de aire y el tiempo de fraguado del concreto en obra pueden diferir considerablemente de los del concreto del laboratorio, para los mismos materiales y proporciones de mezcla. La supervisión y el residente deberán estar en capacidad de efectuar ajustes en la adición de materiales para alcanzar las propiedades especificadas para el concreto en el sitio del proyecto.

Tabla 4.1: Requerimientos Físicos para los aditivos reductores de agua

	TIPO A Reductor de agua	TIPO B Retardador de fragua	TIPO C Acelerantes de fragua	TIPO D Reductores de agua y retardantes	TIPO E Reductores de agua y acelerantes	TIPO F Reductores de agua de alto rango	TIPO G Reductores de agua de alto rango y retardantes
Contenido de agua, máx, % de control	95	...	...	95	95	88	88
Tiempo de colocación, considerable desviación de control, h:min Inicial: al menos no mas de	... 1:00 antes ni 1:30 después	1:00 después 3:30 después	1:00 antes 3:30 antes	1:00 después 3:30 después	1:00 antes 3:30 antes	... 1:00 antes ni 1:30 después	1:00 después 3:30 después
Final: al menos no mas de	... 1:00 antes ni 1:30 después	... 3:30 después	1:00 antes ...	... 3:30 después	1:00 antes ...	... 1:00 antes ni 1:30 después	... 3:30 después
Resistencia a la compresión, max, % de control							
1 día	...	...	...	...	...	140	125
3 días	110	90	125	110	125	125	125
7 días	110	90	100	110	110	115	115
28 días	110	90	100	110	110	110	110
6 meses	110	90	90	100	100	100	100
1 año	110	90	90	100	100	100	100
Resistencia a flexión, min, % de control							
3 días	100	90	110	100	110	110	110
7 días	100	90	100	100	100	100	100
28 días	100	90	90	100	100	100	100
Long. de cambio, max contracción (requerimientos alternativos):							
Porcentaje de Control	135	135	135	135	135	135	135
Incremento sobre el control	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010
Factor de durabilidad relativa, min	80	80	80	80	80	80	80

(Fuente: ASTM C 494-99 "Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete", Tabla 1, pág. 2)

CAPITULO V

ADITIVOS FLOCULANTES

CAPITULO V

ADITIVOS FLOCULANTES

1.- GENERALIDADES

Los concretos con aditivo floculante son aquellos que se caracterizan por tener un asentamiento mayor de 7.5" (190 mm) manteniendo una naturaleza cohesiva. Los concretos con floculantes se auto-acomodan mientras mantienen cohesividad sin excesiva exudación, segregación, o retardo de fragua anormal. Desde que la adición de agua permitiría obtener los asentamientos indicados dando concretos de muy baja calidad, el empleo de aditivos plastificantes permiten obtener concretos floculantes. El empleo de los aditivos superplastificantes permite obtener todas las propiedades de los floculantes y es debido a ello que su empleo ha ido decreciendo.

El aditivo floculante, conocido también como plastificante, es absorbido por las partículas de cemento hidratado y causa una repulsión entre ellas. El concreto pierde asentamiento mucho más rápido que el mismo concreto sin el aditivo floculante.

2.- MATERIALES

Los aditivos que son empleados para lograr concretos que fluyan deberán cumplir con los requerimientos de la Norma ASTM C 1017, Tipo I (plastificante) ó Tipo II (plastificante y retardador), ver Tabla 5.1. Los materiales comúnmente empleados son:

- 1.- Naftaleno condensado sulfonatado, Tipos I ó II
- 2.- Melamina sulfonatada, Tipos I ó II
- 3.- Lignosulfonatos modificados.
- 4.- Una combinación de esos tipos más un aditivo reductor de agua, Tipo A; o un reductor de agua retardador del Tipo D; o un aditivo reductor de agua acelerante, del Tipo E.
- 5.- Un alto dosaje de un aditivo reductor de agua, Tipo A, más un aditivo acelerante reductor de agua, Tipo E.

Esta última combinación requiere un contenido de agua, similar al requerido cuando se emplea un aditivo reductor de agua de alto rango.

3.- EFECTOS SOBRE EL CONCRETO FRESCO

3.1.- TIEMPO DE FRAGUADO

Los aditivos del Tipo I de la Norma ASTM C 1017 no tienen mucho efecto sobre el tiempo de fraguado y por ello los concretos fluidos con asentamiento de 4" deberán fraguar como si el aditivo no se empleara. Los aditivos del Tipo II pueden reducir el asentamiento significativamente y retardar el tiempo inicial de fraguado del concreto. A temperaturas del concreto por debajo de 15°C, el tiempo de fraguado de concretos que contienen aditivo del Tipo I puede incrementarse.

3.2.- TRABAJABILIDAD Y ACABADO

Los concretos fluidos son muy trabajables sin exudación ni segregación. La relación fino-grosso debe ser ajustada mediante un incremento en el agregado fino para prevenir la segregación en altos asentamientos. Los concretos fluidos deben ser vibrados para lograr una apropiada consolidación. Las características de los concretos fluidos cuando ellos están siendo frotachados deberán ser iguales a las de los concretos convencionales con los mismos ingredientes. Los concretos fluidos adecuadamente proporcionados no

deberán presentar exudación objetable aun con alta asentamiento. Un tiempo adecuado es imperativo en las operaciones de acabado.

3.3.- EXUDACIÓN Y SEGREGACIÓN

Las mezclas adecuadamente dosificadas no deberán exudar ni segregar. Ambas pueden ser reducidas por incremento de la relación fino-grueso o por la adición de otros materiales finos.

3.4.- PÉRDIDA DE ASENTAMIENTO

La magnitud de la pérdida de asentamiento puede ser alterada por factores tales como la temperatura del concreto, el tipo y cantidad de cemento, el contenido de agua, el momento de adición del aditivo, y la cantidad de aditivo empleada. Puede alcanzarse una aceptable magnitud de pérdida de asentamiento supervisando estas condiciones y cambiando el tiempo inicial del fraguado del concreto. El dosaje adicional de los floculantes puede emplearse cuando ocurran demoras y el asentamiento deseado no se mantenga. En general, cuando se modifica el dosaje el nivel de resistencia del concreto se mantiene o se incrementa y el contenido de aire disminuye. Por lo tanto, en lo que al aire incorporado se refiere, deberá ser comprobado después que el concreto ha sido modificado en su dosaje y se ha retornado al asentamiento inicial.

4.- EFECTOS SOBRE EL CONCRETO ENDURECIDO

4.1.- CALOR DE HIDRATACIÓN

Ni el calor de hidratación ni el contenido de cemento se reducen cuando se emplea floculantes. Si la magnitud de la hidratación no cambia, la elevación de temperatura no deberá cambiar si el contenido de cemento no es reducido.

4.2.- RESISTENCIA

Siendo la relación agua/cemento menor se obtiene una mejora en la resistencia. Los concretos con floculante y sin reducción de agua a menudo presentan incrementos en la resistencia. Cuando se desea resistencias del orden de 40 MPa a los 28 días, ellas pueden ser alcanzadas mediante el empleo de un floculante que baja significativamente la relación agua/cemento e incrementa el asentamiento para obtener el concreto fluido requerido para las condiciones de colocación. La resistencia en flexión no cambia.

4.3.- CONTRACCIÓN POR SECADO Y ESCURRIMIENTO PLÁSTICO

La contracción por secado debe ser aproximadamente la misma si el contenido de agua no varía, Puede ser reducida si en conjunto con el concreto fluido, el contenido de agua de la mezcla, para igual contenido de cemento, es disminuido. Se han apreciado pequeños cambios en las características de escurrimiento plástico del concreto con el empleo de aditivos floculantes.

4.4.- CONTENIDO DE AIRE

Usualmente se requiere altos dosajes de incorporador de aire en los concretos fluidos a fin de mantener un contenido de aire comparable al de los concretos convencionales. El contenido de aire en obra debe ser comprobado a fin que el dosaje de aditivo incorporador de aire pueda ser modificado si se requiere mantener el contenido de aire en el rango especificado.

4.5.- RESISTENCIA A LA CONGELACIÓN Y DESHIELO

Los concretos floculantes presentan grados de resistencia a la congelación similares a los de los concretos convencionales con similar agua/cemento y sistema de burbujas. La estructura del sistema puede tener un mayor factor de espaciamiento y una disminución de vacíos por centímetro si se la compara con el concreto de control; sin embargo, una satisfactoria resistencia

a congelación y deshielo ha sido alcanzada en muchos casos.

4.6.- PERMEABILIDAD

Los concretos con floculante tienen una resistencia a la penetración de los cloruros similar a, sino ligeramente mayor que, la de los concretos convencionales con la misma relación agua/cemento. Cuando el aditivo es empleado para reducir la relación agua/cemento, la resistencia a la penetración de los cloruros es aun mayor. Los concretos fluidos tienden a tener una menor permeabilidad debido a su menor consolidación, reducción de la exudación, e incremento.

La baja permeabilidad resultante de concreto de baja relación agua/cemento no impide que puedan ser colocados y consolidados fácilmente, aun para relaciones agua/cemento de 0.40. Por lo tanto, el concreto resultante si es adecuadamente curado, puede tener extremadamente baja permeabilidad y buena resistencia a la penetración de soluciones agresivas.

4.7.- ADHERENCIA

Las investigaciones realizadas por el ACI no han proporcionado información que indique que el empleo de concreto fluido tenga efecto con la adherencia del acero de refuerzo, la cual depende de la resistencia del concreto, el grado de consolidación y el tiempo de fraguado. Investigaciones italianas indican que cuando se emplean los floculantes para incrementar el asentamiento se produce un incremento significativo en la resistencia por adherencia de los concretos fluidos. Cuando dos concretos tienen la misma resistencia en compresión, el concreto fluido tiene una menor resistencia por adherencia que el concreto de bajo asentamiento. Las fallas en la vibración del concreto fluido dan por resultado una reducción significativa en la resistencia por adherencia cuando se compara con concretos de bajo asentamiento y fluidos de la misma resistencia, que han sido adecuadamente vibrados.

5.- CALIDAD

Es deseable determinar que el floculante empleado es el mismo que los previamente ensayados, o que lotes sucesivos son los mismos. Los ensayos incluyen contenido de sólidos, densidad, espectrometría infrarroja para materias orgánicas, contenido de cloruros, pH, y otros. Los fabricantes deberán recomendar cuales de los ensayos son los mas adecuados para su aditivo y los resultados que deberán esperarse. La Norma ASTM C 1017 da una guía para determinar la uniformidad de los aditivos químicos.

6.- CONTROL DEL CONCRETO

Suficientes finos deberán estar presentes en la mezcla para permitir que el asentamiento deseado sea alcanzado sin excesiva exudación y segregación. Las mezclas de prueba son preparadas generalmente para confirmar las características del concreto. La mezcla se ajusta en obra para verificar las características de flujo.

Puede ser necesario hacer ajustes en obra para garantizar la mezcla óptima con relación al asentamiento, trabajabilidad, magnitud de la perdida de asentamiento y características de fraguado. Igualmente deberá verificarse la resistencia inicial si ello es requerido. La magnitud de la perdida de asentamiento deberá ser registrada y ajustada. El concreto fluido deberá ser colocado de acuerdo con la Recomendación ACI 304 y consolidado con la Recomendación ACI 309.

El control del concreto fluido requiere una comprobación del asentamiento inicial o del contenido de agua antes de la adición del floculante, a fin de asegurar que ambos son los requeridos. Después que el aditivo es añadido y mezclado en la tanda, el asentamiento resultante deberá estar en el rango especificado. Para concretos con aire incorporado, el contenido de aire también deberá ser comprobado en el punto de descarga en los encofrados.

La magnitud de la pérdida de asentamiento, las características iniciales de fraguado, y los resultados de las resistencias inicial y final, pueden requerir ajustes en las mezclas. Ello puede lograrse por modificaciones en el dosaje del aditivo floculante o por el empleo adicional de aditivos acelerantes o retardadores. Cuando la colocación del concreto es anormalmente lenta o la temperatura es alta o ambas, puede emplearse un aditivo floculante.

Cambios en la composición del cemento o en la granulometría del agregado, o ambas pueden causar variaciones significativas en las características de los concretos fluidos. Por lo tanto estos cambios deberán ser minimizados.

Tabla 5.1: Requerimientos Físicos para los aditivos floculantes

	TIPO I Plastificante	TIPO II Plastificante y Retardante
Tiempo de colocación, considerable desviación de referencia, h Inicial: al menos no mas de	... 1 antes ni 1 ½ después	1:00 después 3 1/2 después
Final: al menos no mas de	1:00 antes ni 1 ½ después	... 3 1/2 después
Incremento en el asentamiento, min	90 mm (3.5 in.)	90 mm (3.5 in.)
Resist. a la compresión, max % de referencia		
3 días	90	90
7 días	90	90
28 días	90	90
6 meses	90	90
1 año	90	90
Resist. flexión, min, % de referencia		
3 días	90	90
7 días	90	90
28 días	90	90
Long. de cambio después de 14 días de secado, max contracción (requerimientos alternativos):		
% de referencia	135	135
Incremento sobre la referencia en in.	0.010	0.010
Factor de durabilidad relativa, min	80	80

(Fuente: ASTM C 1017-98 "Standard Specification for Chemical Admixtures for Use in Producing Flowing Concrete", Tabla 1, pág. 1)

CAPITULO VI

ADITIVOS DIVERSOS

CAPITULO VI

ADITIVOS DIVERSOS

1.- INTRODUCCIÓN

En este capítulo se ha considerado los aditivos superplastificantes, ligantes, los aditivos colorantes, y los aditivos inhibidores de la corrosión, por ser los de mayor uso en nuestro medio de entre los muchos existentes a nivel comercial. De la gran cantidad de aditivos existentes en el mercado y a los cuales no se hacen referencia, o la hacen tangencialmente, en nuestra opinión los más importantes son los cuatro indicados anteriormente.

Hubiera sido imposible a nivel mundial lograr resistencias en compresión tan altas como las utilizadas en Malasia, Taiwan y Emiratos Árabes, sino hubiesen existido los superplastificantes y su capacidad de reacción química con el hidróxido de calcio para producir silicato de calcio hidratado (C-S-H).

Igualmente los aditivos inhibidores de la corrosión, cuando ellos son empleados, contribuyen en forma muy importante a mantener la pasividad del acero de refuerzo impidiendo que el cloruro de calcio o el anhídrido carbónico, al penetrar en el concreto, originen zonas de corrosión que pueden, en el tiempo, llegar a destruir el acero de refuerzo. En cuanto a los aditivos colorantes, últimamente los arquitectos han reclamado concretos que ya tengan color propio y no necesiten ser pintados.

Las razones expuestas son las que nos han llevado a elegir de entre la multitud de aditivos disponibles a los indicados en el párrafo anterior.

2.- ADITIVOS SUPERPLASTIFICANTES

2.1.- CONCEPTOS GENERALES

2.1.1.- Historia

Los aditivos superplastificantes pueden reducir el contenido de agua de la mezcla en el orden de un 30%. Originalmente fabricados en el Japón a partir de los formaldehídos naftalenos sulfonados para permitir la producción de concretos de alta resistencia por grandes reducciones en el agua de mezclado, fueron posteriormente fabricados en Alemania a partir de 1972 a partir de los formaldehídos melamina sulfonados, a fin de desarrollar concretos fluidos con asentamientos mayores de 200 mm.

A los superplastificantes, materiales consistentes principalmente de condensados sulfonados de naftalenos o melamina, y actualmente reemplazados por los policarboxilatos, se les categoriza como aditivos reductores de agua de alto rango (HRWRA) y cumplen con los requisitos F o G de la Norma ASTM C 1017.

Los superplastificantes tienden a ser adsorbidos sobre las partículas de cemento, dando lugar a que ellos sean mutuamente repulsivos como resultado de su naturaleza aniónica, lo cual da lugar a que las partículas de cemento sean negativamente cargadas. Estos efectos de adsorción y dispersión son similares a los que se producen para plastificantes con carga aniónica normal. El efecto de reducción de agua de los superplastificantes es causado principalmente por los cambios en el potencial Z como un efecto de la adsorción sobre la superficie del cemento.

Los concretos con superplastificantes son tan durables como las mezclas convencionales bajo condiciones de obra. Los superplastificantes de larga vida los cuales prolongan el periodo de trabajo del concreto, especialmente cuando se adiciona el superplastificante en la planta dosificadora y no en la obra.

2.1.2.- Clasificación y Composición

Los superplastificantes han sido clasificados en cuatro grupos:

- a) Condensados de formaldehídos melamina sulfonados (SMF). Son de origen alemán, siendo el mas conocido el Melment L 10, disponible en solución acuosa al 20%, con densidad de 1100 kg/m^3 y apariencia limpia ligeramente turbia. Su contenido de cloruros es de 0.005%.
- b) Condensados de formaldehído naftaleno sulfonados (SNF). Desarrollados en el Japón, el mas conocido es el Mighty 150, en solución acuosa al 42%, de color marrón oscuro, con una densidad de 1200 kg/m^3 . El contenido de cloruros es despreciable.
- c) Lignosulfonatos modificados (MLS). El mas conocido el Mulcoplast, de origen canadiense. En solución acuosa al 20% con un color claro y una densidad de 1100 kg/m^3 . No contiene cloruros.
- d) Los policarboxilatos, actualmente han sido investigados por Jenny Tineo en su tesis de grado "Estudio de las propiedades reológicas de diferentes Cementos con distintos Superplastificantes" en donde estudia su influencia sobre la fluidez del concreto fresco y sobre la resistencia del concreto ya endurecido.

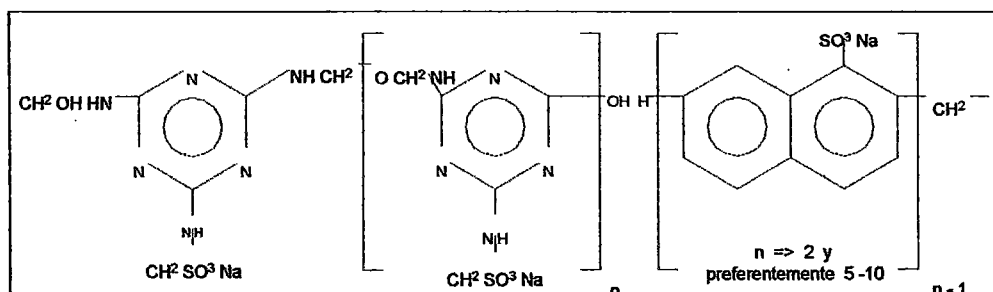
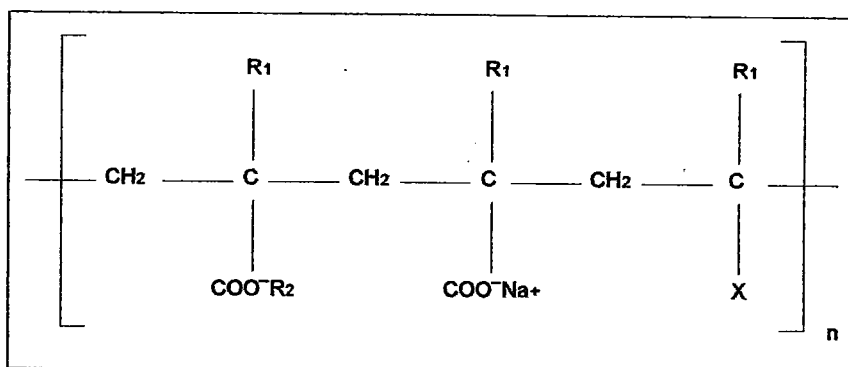


Imagen 6.2.1: Formaldehído melamina sulfonado (izquierda de corchetes) y Formaldehído naftaleno sulfonado (dentro de los corchetes).
(Fuente: "ACI JOURNAL", concreto con superplastificante)



R₁ = H o CH₃

R₂ = (-O-CH₂-CH₂-O)_e, donde e puede ser mayor a 60

X = grupo iónico o polar

n = puede llegar hasta 10

Imagen 6.2.2: "Monómero de carboxilato (PC)".
(Cortesía de Jenny Tineo)

Las unidades básicas de los lignosulfonatos, sales de sodio y formaldehídos melamina sulfonados, tienen las siguientes características:

- La molécula de lignosulfonato consiste de la sustitución de fenil propano por unidades de los grupos hidroxilo, metoxi, carboni; y ácido sulfónico. El peso molecular puede variar de unos pocos cientos a cien mil.
- Los superplastificantes del grupo SMF pueden tener un peso molecular del orden de 30 mil.

En los superplastificantes del Tipo SNF, el número de unidades moleculares puede ser tan bajo como 2. Una estructura de esta naturaleza es capaz de reducir la tensión superficial del agua de la mezcla y entrapar el aire, pero ello puede ser prevenido por el empleo de polímeros de alto peso molecular, típicamente aquellos que tienen un valor de N igual 10.

2.1.3.- Normas y Especificaciones

La Norma ASTM C 494 cubre los tipos F y G, el primero cuando se desea altas reducciones en el contenido de agua dentro de los tiempos de fraguado

normales, y el segundo cuando se desea altas reducciones en el contenido de agua conjuntamente con un retardo en el tiempo de fraguado.

Cuando se desea concretos fluidos, de alto asentamiento (mayor de 190 mm y naturaleza cohesiva), el aditivo deberá cumplir con la Norma ASTM C 1017. El Tipo 1 es apropiado para concretos fluidos en los cuales se desea un tiempo de fraguado normal. El tipo 2 es apropiado para concretos fluidos en los que se desea un retardo en el tiempo de fraguado.

2.2.- USOS

2.2.1.- Usos Generales

Los aditivos superplastificantes pueden ser empleados para:

- a) Producir concretos con muy baja relación agua/cementante. Para alcanzar muy altas resistencias en el concreto, el contenido de agua de la mezcla es reducido sin variar el contenido de cementante. La reducción en la trabajabilidad se compensa por la incorporación del superplastificante. Se puede lograr reducciones en el contenido de agua del orden del 30% con relaciones agua/cemento tan bajas como 0.28.
- b) Para producir concretos con bajo contenido de cemento siempre que la relación agua/cemento se mantenga constante. La reducción en el asentamiento se consigue por la superplastificantes.
- c) Para producir concretos fluidos, incluidos auto-compactantes, facilitando su colocación en secciones muy complicadas o altamente reforzadas.
- d) Reducir la temperatura debida a la hidratación del cemento o los cambios de volumen debidos a los procesos de humedecimiento y secado, o de contracción.

2.2.2- Incremento en el asentamiento

El asentamiento se incrementa cuando el superplastificante se añade a la mezcla y ningún otro cambio se hace en la misma. Se puede producir concretos fluidos con alto nivel de asentamiento y capacidad autonivelante. Si el asentamiento es muy alto la mezcla, como en el caso de los concretos fluidos, tiende a exudar o segregar, aunque la presencia de superplastificantes puede reducir esa tendencia. En este caso es importante que el agregado fino sea adecuadamente dosificado y con una granulometría compatible con el agregado grueso disponible.

Los concretos fluidos son adecuados para aquellas aplicaciones que involucran áreas de congestión de acero de refuerzo, o encofrados de formas especiales, o zonas en las que los elementos embebidos obstruyen la colocación del concreto. También en aquellos casos en que se requiere llenar encofrados altos, en los que el concreto tenga un contacto íntimo con el acero de refuerzo o el pretensado.

El concreto fluido pretensado es igualmente empleado en pisos y cimentaciones, con mejora en la calidad y velocidad de colocación. En general, los concretos fluidos pueden reducir en forma importante los costos de las operaciones de colocación, consolidación y acabado.

Los detalles arquitectónicos pueden requerir el empleo de concretos fluidos, con ganancia rápida de resistencia para permitir un rápido desencofrado y pronto reuso de las formas.

El empleo de superplastificantes para producir concretos fluidos con la misma relación agua/cemento que los concretos normales puede igualmente reducir los requerimientos de calor de curado para concretos prefabricados.

La velocidad de ganancia de resistencia en los concretos fluidos es similar a la de los concretos de bajo asentamiento. Las mezclas son dosificadas. Los

concretos de resistencias convencionales son empleados para losas, cimentaciones, vigas, muros o elementos estructurales apoyados sobre el terreno. Las aplicaciones que requieren concretos trabajables de alta resistencia con bajo contenido de agua incluyen elementos estructurales con áreas de alta congestión de acero, tales como reparación de puentes.

2.2.3.- Relación agua-material cementante

Los superplastificantes pueden ser empleados para reducir el contenido de agua del concreto, disminuir la relación agua/cemento y, por lo tanto, incrementar la resistencia. Ello facilita la aplicación de concretos de alta resistencia en vigas, losas pretensadas, edificios altos, estructuras resistentes al impacto, etc. Se puede alcanzar concretos con resistencias en compresión con valores superiores a los 700 kg/cm² a los 28 días y de 1500 kg/cm² a los 90 días con bajos contenidos de agua y el mismo contenido de cemento sin afectar la trabajabilidad. Se ha colocado exitosamente concretos con reducciones de agua del 30% y relaciones agua/cemento de 0.28

El empleo de una baja relación agua/cemento es positivo en concretos especiales incluyendo:

- a) Mezclas de concreto densas, de baja permeabilidad, las cuales tienen un alto contenido de cemento y baja relación agua/cemento, empleadas para losas de puentes.
- b) Concretos con microsílíce empleados para obtener muy baja permeabilidad y muy alta resistencia.
- c) Lechadas y concretos preempacado empleados para reparación y rehabilitación.

Los concretos con superplastificantes presentan incrementos en la resistencia en todas las edades.

2.2.4.- Disminución del contenido de cemento y agua

Los superplastificantes pueden ser empleados para reducir el agua y el cemento, permitiendo reducciones del 20% al 30% en los requerimientos de cemento sin reducir la resistencia. Igualmente puede haber reducción en el cemento sin modificación de la relación agua/cemento. En algunos casos los beneficios indirectos pueden ser significativos. En un caso dado puede ser necesario un concreto de baja generación de calor o de poca contracción por secado, pero sin cambios en el asentamiento o en la relación agua/cemento y, por lo tanto, en la resistencia. Un concreto con tales características es deseable para secciones masivas debido a su menor tendencia a agrietarse cuando está frío y seco.

2.2.5.- Incremento de la Productividad

En los proyectos de construcción rápida, especialmente edificios, puede requerirse rapidez en la construcción para el éxito económico. Los concretos fluidos son empleados para este tipo de proyectos debido a que pueden ser bombeados, o colocados rápidamente. Los concretos deberán tener una relación agua/cemento lo suficientemente baja para garantizar un alto incremento en la resistencia en edades iniciales con un adecuado factor de seguridad. Ello garantiza un uso eficiente del cemento y satisfacen los requerimientos de los proyectos de rápido ciclo de trabajo. En climas fríos, un acelerante no corrosivo que no contenga cloruros puede ser adicionado para compensar los efectos de las bajas temperaturas sobre el fraguado inicial y la ganancia inicial de resistencia.

2.2.6.- Aplicaciones Generales

A continuación se presentan algunas de las aplicaciones de los superplastificantes:

- a) Facilidad de colocación del concreto en áreas de gran congestión de acero de refuerzo y en aquellas a las cuales el concreto no es fácilmente accesible
- b) Eliminación del problema de adaptación de encofrados.
- c) Rápida colocación del concreto fluido y empleo de procedimientos de vibración nominales.
- d) Mayor facilidad de bombeo de la mezcla.
- e) Empleo para aplicaciones de rociado en revestimiento de túneles.
- f) Mayor facilidad de empleo del concreto en secciones especiales y concretos arquitectónicos.
- g) Empleo en la industria de prefabricación, permitiendo obtener resistencias en compresión de 400 kg/cm² entre las 8 y 18 horas.
- h) Empleo para obtener resistencias a la compresión mayores de 1000 kg/cm² a los 28 días y 1500 kg/cm² a los 90 días.
- i) Empleo en la producción de concretos con cenizas, concretos con microsílices, concretos con escoria de alto horno, concreto con fibras, y concretos livianos. El efecto dispersante de los superplastificantes no se limita al cemento portland y puede ser empleado con otros sistemas cementantes.

2.3.- EFECTO SOBRE LAS PASTAS

2.3.1.- Dispersión

La influencia de la pasta sobre muchas de las propiedades del concreto es determinante. Un estudio adecuado de la reología, absorción, hidratación y características del potencial Z del cemento y sus componentes proporciona un mejor entendimiento del papel de los superplastificantes en el concreto fresco.

Del estudio microscópico se ha concluido que la adición de superplastificantes causa dispersión de la pasta en pequeñas partículas. Se aprecia que los cementos secos tienen un porcentaje mucho más alto de partículas finas

que aquellos tratados con agua y que contienen aglomerante. La comparación entre la suspensión de cemento sin el aditivo y aquella con éste, muestra que la primera tiene mejor dispersión y partículas mas finas. Ello indica que el cemento en contacto con el agua forma productos cuyas superficies tienden a aglomerarse.

2.3.2.- Reología

Los estudios reológicos sobre deformación de las pastas bajo la acción de los esfuerzos parten del entendimiento que las propiedades reológicas dependen de la relación agua/cemento, el tipo de cemento, la superficie específica de éste, el procedimiento de mezclado, tiempo después del mezclado, y temperatura de hidratación.

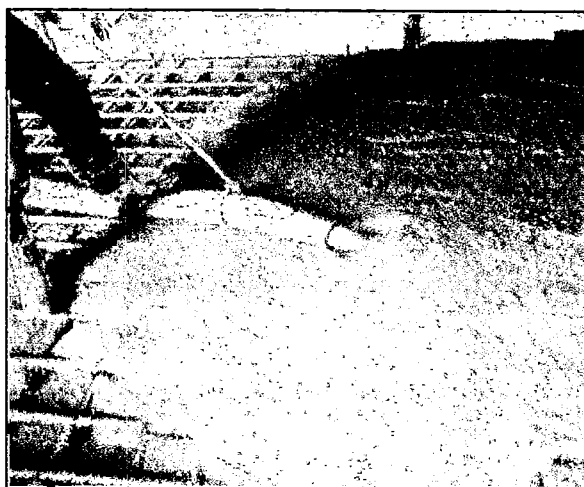


Imagen 6.2.3: Concreto altamente fluido gracias a la adición de un superplastificante que facilita las operaciones de colocación y acabado. El aditivo empleado modifica las propiedades reológicas del concreto a fin de asegurar un comportamiento adecuado para todos los tipos de aplicaciones, tales como mezclas pobres, aquellas que contienen agregado de granulometría uniforme o arena fabricada.
(Fuente: "Artistry in Concrete", Concrete International, V.25, No. 6, Junio 2003, pág. 69.)

La pasta puede ser considerada como un flujo newtoniano debido a su valor constante en la relación del esfuerzo de corte a la magnitud de corte. Los superplastificantes influyen en el comportamiento reológico de la pasta al reducir el valor de fluencia y la viscosidad plástica. Conforme la cantidad de superplastificante se incrementa el valor de la fluencia decrece, para 0.8% de superplastificantes SNF el valor es prácticamente cero.

Para una relación agua/cemento constante, la viscosidad y esfuerzo total en una magnitud de corte determinada disminuyen por la adición de superplastificantes. Los cambios en la viscosidad en pastas que contienen SNF permiten apreciar que la viscosidad es mas baja para pastas con aditivo, siendo los valores mas bajos conforme es mayor la concentración de aditivo. Una pasta con una relación agua/cemento de 0.3 y 1% de aditivo presenta los mismos efectos de fluidez que una pasta con una relación agua/cemento de 0.4 y sin aditivo.

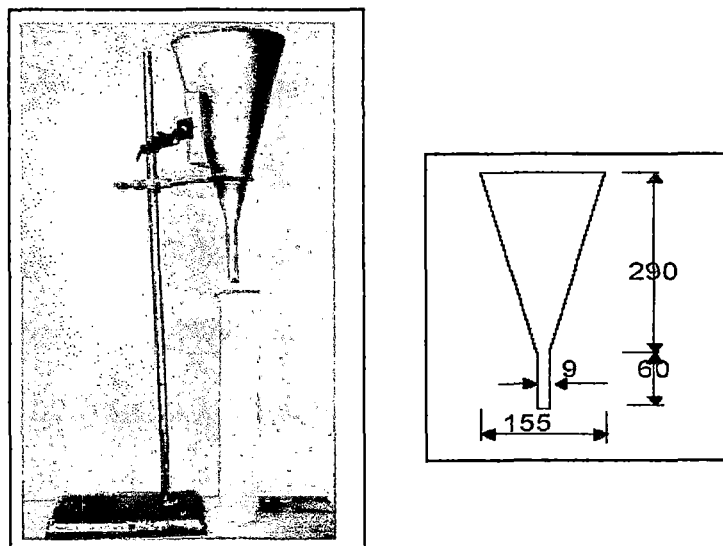


Imagen 6.2.4: Cono de Marsh y sus medidas
(Cortesía: Jenny Tineo)

La trabajabilidad del concreto es determinada en términos de los valores del asentamiento empleando el cono de Marsh (microcono), el cual puede ser empleado para estimar el efecto relativo del superplastificantes sobre la trabajabilidad de la pasta. Si se compara los valores de miniasentamientos de diversas pastas las cuales contienen un SMF, un polímero (SBR), y sus combinaciones, se aprecia que la adición de 0.3% de superplastificante (SMF) mas 2% de polímero (SBR) desarrollan un asentamiento inicial alto, con una buena retención del asentamiento a las tres horas.

2.3.3.- Absorción

La acción de dispersión de los superplastificantes está relacionada con su interacción sobre el cemento y sus compuestos. El estudio de la magnitud y cantidad de absorción de diversos superplastificantes sobre los productos de hidratación proporciona información acerca de las propiedades reológicas y de fraguado del cemento.

Las mediciones de la absorción pueden ser llevadas a cabo controlando la cantidad de superplastificantes no absorbida en un sistema que consiste en una mezcla de cemento, superplastificante y agua. La cantidad de superplastificantes añadida menos la no absorbida en la solución proporciona el porcentaje de absorción. La concentración de superplastificantes en la solución puede ser determinada mediante el método espectro fotométrico.

Los aditivos pueden estar en estado libre o absorbidos cuando son mezclados con el cemento e hidratados por diferentes periodos. La absorción de los superplastificantes en el aluminato tricálcico ocurre en cantidades importantes en pocos segundos. Esta hidratación ocurre casi inmediatamente después del contacto con el agua. El C3A influye en forma muy importante en los efectos de los superplastificantes sobre el cemento, debido a su capacidad para absorber grandes cantidades de este aditivo.

En la primera hora ocurrirá una pequeña cantidad de absorción en la superficie del C3S. No hay absorción durante el periodo de inducción, pero puede volver a ocurrir después de 5 horas debido al incremento de la dispersión e hidratación.

La cantidad de SMF absorbida por el cemento varía con el tiempo de exposición a la solución. Luego de la absorción inicial producida por el binomio C3A-SO₃, se hace casi nula durante las 4 o 5 horas siguientes, pero después continúa. La absorción después de 5 horas es debida a la hidratación del compuesto C3S del

cemento. Los experimentos de absorción-desabsorción el aditivo no se vuelve a disolver en la solución, indicando que el es absorbido en forma irreversible por el C3S hidratado.

La absorción del SMF ha sido estudiada en la combinación C3A-SO₃ en diversos periodos. La mezcla que no está prehidratada absorbe casi todo el aditivo en pocos minutos. La magnitud y absorción son menores en las mezclas prehidratadas por 5 a 30 minutos. El SMF es irreversiblemente absorbido. La interacción química ocurre entre la mezcla C3S-yeso y el SMF. Estos resultados explican el mejor efecto fluidificante de los aditivos cuando son añadidos al concreto unos pocos minutos después de mezclados con el agua.

Cuando el aditivo es incorporado conjuntamente con el agua de mezclado, es atacado en forma importante por la mezcla C3S-SO₃, quedando muy poca cantidad para dispersión de la fase sílice. Con la adición tardía, la mezcla es absorbida en menor cantidad y habrá aditivo sobrante en la solución para promover la dispersión de las fases silicato y disminuir la viscosidad del sistema. La capacidad de absorción de los superplastificantes con la pasta ha sido estudiada por radiografías electrónicas y microscopio electrónico, llegando a la conclusión que el aditivo interactúa con las fases C-S-H y C-A-H.

La cantidad de absorción de superplastificantes por el cemento puede ser reaccionada con la trabajabilidad. Con los SNF, los valores del miniasentamiento se incrementan conforme la cantidad de absorción se incrementa. Las características de absorción de los superplastificantes sobre diferentes tipos de cemento indican que la cantidad de absorción, como una función de la concentración de equilibrio, tiene un orden de cementos Tipo III mayor que el Tipo I y este mayor que el Tipo II. Se concluye que la absorción es principalmente dependiente del contenido de C3A, requiriéndose mayor cantidad de superplastificantes conforme aumenta aquel.

2.3.4.- Potencial Z

La estabilidad de las partículas coloidales se debe al desarrollo de cargas como un resultado de la absorción de iones. Al desarrollar la misma carga, las partículas se repelen unas a otras y previenen la aglomeración o precipitación. El silicato de calcio hidratado está en forma de partículas extremadamente pequeñas interconectadas y, en la presencia del superplastificantes tienden a dispersarse. Por ello, los principios de la química de los coloides son aplicables a los sistemas cemento-agua-aditivo.

La estabilidad del sistema coloidal es una función del potencial Z, siendo mas estable la solución cuanto mas alto es este. La medición del potencial Z permite un estudio del mecanismo de acción del superplastificantes en el cemento hidratado. Las fuerzas de atracción existentes entre superficies de las partículas de cemento pueden ser neutralizadas por la absorción de superficies aniónicas tales como condensados de ácido sulfónico naftaleno en un proceso que da por resultado la dispersión de las partículas.

La adición de superplastificantes a suspensiones de cemento, alita, C3A e hidróxido de calcio, da por resultado grandes potenciales negativos. Si se añade yeso se presentan potenciales mayores. La trabajabilidad depende del momento en que el superplastificante es añadido, siendo mas alta cuando el superplastificante es añadido unos pocos minutos después del agua de mezclado. Altos valores de potencial se aprecian en el sistema, no siendo mayores que aquellos que resultan de un retardo en la adición.

Se han hecho intentos de relacionar el potencial Z y la absorción con las propiedades reológicas y se ha encontrado que, tanto los valores del potencial Z como los de la absorción se incrementan conforme la cantidad de superplastificante adicionada a la pasta se incrementa.

2.3.5.- Hidratación

La magnitud de la hidratación del cemento y sus componentes es influenciada por los superplastificantes y se ha concluido que los superplastificantes de los Tipos SNF y SMF retardan la hidratación del C3A, sugiriéndose que dentro de los pocos segundos que siguen al contacto del C3A con el agua el calor se desarrolla rápidamente, alcanzando su máximo en 8 a 9 minutos para las muestras sin aditivo. En las que lo contienen, del Tipo SMF, la magnitud del calor total generado en 30 minutos es menor si se la compara con las muestras que no contienen aditivo. Hay acuerdo en que los superplastificantes retardan la conversión de la etringita a monosulfato.

La hidratación del C3S es retardada por la presencia de superplastificantes. Igualmente hay evidencia que la relación oxido de cal/oxido de sílice de los productos C-S-H es también afectada. En un porcentaje del 2% del HRWRA la mencionada relación se incrementa de 1.19 a 1.21. Los valores máximos de conducción calorimétrica, que ocurren alrededor de las 5 horas en cementos que no contiene HRWRA, se reducen en intensidad conforme el porcentaje de este se incrementa, indicando que la hidratación del C3S se retarda. La formación de etringita puede ser acelerada o retardada, dependiendo de la cantidad de sulfatos alcalinos presentes en el cemento.

Los efectos relativos de retardo de los superplastificantes o HRWRA en el proceso de hidratación del cemento dependen del tipo de cation ligado al polímero. No se conoce exactamente el mecanismo responsable de este comportamiento.

2.3.6.- Microestructura

En la hidratación del C3A se forman inicialmente láminas hexagonales, pero con la presencia de superplastificantes los productos de hidratación pueden formar un revestimiento gelatinoso que recubre la superficie del C3A. En el sistema C3A-sulfato de calcio-agua no se han sacado conclusiones definitivas respecto a

cambios en las características morfológicas. Con la presencia de superplastificante puede formarse un tejido en forma de red en lugar de grandes paquetes de fibras.

A los 6 meses el hidrato formado en presencia del superplastificante tiene una estructura mas compacta y se presenta menos poroso que los especímenes de referencia. Aunque no se han observado diferencias importantes en la morfología, en las pastas de cemento hidratadas con o sin superplastificante, se pueden formar partículas más finas y con una estructura más densa en presencia del superplastificante.

2.4.- EFECTOS SOBRE EL CONCRETO FRESCO

2.4.1.- Generalidades

Los concretos con superplastificantes pueden requerir el empleo de procedimientos de puesta en obra que usualmente no son requeridos por los concretos convencionales. Por ejemplo, un concreto fluido colocado rápidamente puede incrementar la presión sobre los encofrados. Los ensayos bajo condiciones de obra reflejan las condiciones de trabajo mejor que los ensayos de laboratorio.

2.4.2.- Selección de las Proporciones

El empleo de los HRWRA o superplastificantes como reductores de agua no requiere sistemas especiales de diseño de mezclas ni cambios significativos en las proporciones de ésta, pudiendo obtenerse reducciones de agua tan altas como el 30% empleando los procedimientos convencionales. En el caso de los concretos fluidos puede ser necesario material fino adicional para evitar la segregación. Ello puede lograrse por la adición de un material fino como cenizas o microsílices, en un 4% a 5%. Siempre debe efectuarse pruebas de laboratorio para llegar a las proporciones correctas.

2.4.3.- Diseño de la Mezcla

Para concretos no fluidos, con asentamiento entre 1 y 7 pulgadas, puede emplearse los diseños de mezcla usuales. Cuando se tiene altos valores del asentamiento debe incrementarse el volumen de agregado fino. Si se presenta segregación en los concretos fluidos, con asentamientos mayores de 7 pulgadas, el contenido de fino debe ser incrementado.

2.4.4.- Reducción de agua

Los superplastificantes pueden permitir reducir el contenido de agua de la mezcla en un 15% a 30% sin afectar la trabajabilidad, con alta resistencia y baja permeabilidad en el concreto resultante. En todos los tipos de cemento ocurre reducción de agua por el empleo de superplastificantes, pero la magnitud de la reducción no es la misma. Para igual reducción de agua puede requerirse mas aditivo del Tipo SMF que del Tipo SNF. La reducción de agua se incrementa conforme el dosaje del aditivo y el contenido de cemento se incrementan. La magnitud de la reducción de agua depende del tipo de cemento.

2.4.5.- Aire Incorporado

Los superplastificantes a base de naftaleno o melamina causan alguna pérdida de aire incorporado. Los aditivos basados en lignosulfonatos pueden dar incrementos en el contenido de aire. La pérdida de aire en los concretos fluidos puede ser explicada por la baja viscosidad de los concretos con superplastificantes, pero un fenómeno similar se observa en los concretos con reducción de agua. La correcta cantidad de aire incorporado debe ser determinada por ensayos, dado que algunos incorporadores de aire pueden no ser compatibles con determinados tipos de superplastificantes.

2.4.6.- Dosaje

Generalmente el dosaje de aditivo requerido es relativamente alto si se lo compara con el que demandan los reductores de agua convencionales y puede variar de 0.5% a 3% en peso del cemento. Los altos dosajes pueden hacerlos mas costosos que los aditivos convencionales. La adición debe ser justo antes de la descarga de la mezcla, debido a que el incremento en el asentamiento se mantiene solo por 30 minutos. Estas pérdidas de asentamiento en el tiempo pueden ser un problema para el concreto premezclado.

2.4.7.- Compatibilidad

Los aditivos retardadores, reductores de agua, acelerantes, e incorporadores de aire son compatibles con los superplastificantes. Cada combinación debe ser evaluada antes de ser utilizada. La obtención de suficiente aire con una adecuada distribución y espaciamiento de burbujas de tamaño adecuado en el concreto endurecido puede no ser fácil de obtener.

2.4.8.- Compactación

Cuando un superplastificante es adicionado al concreto en los dosajes recomendados, la resistencia a la compresión a los 28 días de los cilindros de ensayo es igual o mayor que la correspondiente resistencia de los cilindros de referencia. Ello podría implicar que los concretos de alta resistencia a los cuales se les incorpora superplastificantes podrían ser colocados en encofrados sin compactación mecánica, dando por resultado sensible ahorro de tiempo y dinero. Ello no es enteramente cierto, por lo que se recomienda la aplicación de alguna vibración en elementos de concreto armado, especialmente losas.

2.4.9.- Trabajabilidad

Uno de los factores que determinan la calidad del concreto es la facilidad y

homogeneidad con las cuales el puede ser mezclado, transportado, colocado, compactado y acabado. La calidad del concreto está relacionada al trabajo interno necesario para producir compactación total, teniendo en consideración aspectos tales como las características del encofrado, la cantidad y distribución del acero de refuerzo y elementos embebidos, y el procedimiento de compactación. La trabajabilidad puede ser incrementada por la adición a la mezcla de agua o superplastificante. En este caso los factores que afectan la trabajabilidad son el tipo, dosaje y momento de adición del superplastificante y la relación agua/cemento. La incorporación de superplastificante vuelve a la mezcla mucho mas fluida, incrementando la trabajabilidad de la misma y facilitando la colocación del concreto.

2.4.10.- Asentamiento

La adición de HRWRA produce un incremento en el asentamiento, dependiendo del dosaje requerido para obtener un valor determinado del tipo de HRWRA empleado.

2.4.11.- Tiempo de Fraguado

El tiempo de fraguado determina el endurecimiento de la pasta o mortero. Cuando el concreto ha alcanzado el estado en que no puede ser fácilmente manejado y colocado el a llegado al estado de fragua inicial. El estado de fraguado final corresponde al momento en que el endurecimiento comienza. El empleo de superplastificantes de alguna manera retarda el tiempo de fraguado inicial, dependiendo la extensión del retardo del tipo y dosaje del superplastificante empleado. Los tiempos de fraguado pueden ser acelerados o retardados cuando se emplea superplastificantes en combinación con otros aditivos.

La Norma ASTM requiere que los concretos con HRWRA del Tipo F alcancen el tiempo inicial de fraguado no mas de 1 hora antes o 1 ½ hora después que un concreto de referencia con similares asentamientos, contenido de aire y temperatura. Los concretos con HRWRA del Tipo G de la Norma deberán alcanzar

un tiempo inicial de fraguado por lo menos 1 hora después pero no mas de 3 ½ horas después que el tiempo de fraguado inicial de un concreto de referencia.

Los vendedores recomiendan un rango de dosajes determinado para su producto. El adherirse a determinado rango no significa que el producto deberá cumplir con los requisitos de los Tipos F o G a través de ese rango. Ello es especialmente cierto para el tiempo inicial de fraguado. Cuanto mas alta es la magnitud del dosaje del superplastificantes mayor es el retardo del fraguado. Es necesario que el vendedor proporcione un rango aceptable de dosajes, principalmente porque los superplastificantes son empleados en una gran variedad de situaciones y condiciones de clima.

2.4.12.- Aire Incorporado

Los estudios han mostrado que el sistema de burbujas de aire de los concretos con aire incorporado es alterado por la adición de superplastificantes. El espaciamiento entre burbujas es mayor que los valores que recomienda el ACI 201.2R del orden de 0.02 mm. Este mayor espaciamiento es causado por un incremento en el tamaño promedio de las burbujas y una disminución en la superficie especifica si se los compara con un concreto con aire incorporado sin superplastificantes.

Los aditivos del Tipo SNF, así como los lignosulfonatos, incorporan algo de aire en el concreto. Los HRWRA facilitan, en los concretos fluidos, la liberación de aire, generalmente 1% a 3% de aire se pierde. Dosajes repetidos del aditivo pueden acentuar este efecto. En una relación agua/cemento de 0.42, un aditivo del Tipo SNF puede disminuir el contenido de aire inicial de 4.9% a 3.8%, 1.7%, y 1.5%, luego del primer, segundo y tercer dosaje respectivamente. En presencia de aditivos basados en lignosulfonatos el contenido de aire puede incrementarse. Los superplastificantes en alguna extensión pueden fomentar la unión de las burbujas de aire.

En general, los concretos con superplastificantes pueden requerir mayores dosajes de un incorporador de aire con respecto a aquellos que no lo tienen. El contenido de aire del concreto debe ser determinado inmediatamente después del mezclado y antes del vaciado de las probetas de ensayo.

2.4.13.- Segregación

La segregación normalmente no ocurre en los concretos en los que se ha incorporado HRWRA para emplearlo como reductor de agua. Cuando el aditivo es usado para producir concretos fluidos, deberá presentarse segregación si no se toman las precauciones adecuadas que garanticen que el aditivo es incorporado en los dosajes recomendados por el vendedor. La segregación puede ocurrir si se emplea una cantidad excesiva de aditivo o agua, agregado de granulometría discontinua o inadecuada, o vibración prolongada. Una dosificación inadecuada de la mezcla o un mal procedimiento de mezclado pueden dar por resultado excesos de fluidez y segregación localizadas.

No hay grandes diferencias en la resistencia a la segregación durante la colocación, ni en los efectos de la segregación sobre la homogeneidad después del endurecimiento entre concreto con superplastificante y concretos convencionales con aire incorporado sin el aditivo, siempre que el asentamiento, relación agua/cemento y porcentaje de agregado fino se mantengan constantes. Igualmente, un excesivo dosaje de superplastificante promueve la segregación y tiende a incrementar la heterogeneidad del concreto endurecido con la altura de este.

Las deficiencias en la dosificación no se aprecian en concretos de bajo asentamiento, en tanto que los de alto asentamiento, incluido los fluidos, acentúan estas deficiencia y pueden causar segregación. En estos casos una forma de asegurar un adecuado proporcionamiento, es incrementar la cantidad de las partículas menores de los agregados fino y grueso, aumentando la cohesividad y

disminuyendo el riesgo de segregación, con lo que el agregado grueso estaría suspendido en un mortero cohesivo.

Las características de capacidad autonivelante de los concretos fluidos no eliminan la necesidad de vibración, debiendo los concretos con HRWRA ser adecuadamente consolidados, con ellos se evitaría la mayor posibilidad de segregación.

2.4.14.- Exudación

La exudación disminuye en los concretos con superplastificante empleados como reductor de agua. Igualmente, la exudación puede ser reducida aplicando las mismas medidas que se han recomendado para la segregación, incluida la reducción de la relación agua/cemento, o limitando el tipo de aditivos empleados en concreto a los cuales se ha adicionado el superplastificante. En concretos fluidos la exudación puede ser reducida y la cohesividad aumentada por la adición de suficientes finos, siendo importante la correcta dosificación de la mezcla. Siempre se debe preparar mezclas de prueba bajo condiciones de obra.

2.4.15.- Facilidad de Bombeo

El bombeo del concreto debe considerar pequeñas pérdidas de asentamiento, a través de la tubería de conducción. Si ocurre una importante pérdida de asentamiento en la tubería, las causas pueden deberse al mal proporcionamiento, porosidad del agregado, pérdida de aire incorporado, degradación del agregado, condiciones de clima, e inadecuado equipo de bombeo. Estos problemas pueden dar lugar a falta de facilidad de bombeo y la adición del superplastificante puede proporcionar una alternativa económica a las opciones indicadas, dado que la mezcla así obtenida disminuye los requisitos de la presión de bombeo e incrementa la eficiencia de la bomba.

2.5.- EFECTOS SOBRE EL CONCRETO ENDURECIDO

2.5.1.- Resistencia a la Compresión

La acción del superplastificante sobre la resistencia en compresión se deriva de su efecto sobre la relación agua/cemento. Cuando el superplastificante reduce los requerimientos de agua, la disminución en la relación agua/cemento da por resultado un incremento en la resistencia en compresión en todas las edades, el cual porcentualmente puede representar un incremento significativo de la resistencia total. Se recomienda que primero se debe calcular la relación agua/cemento y luego estimar la resistencia del concreto, la cual debe ser conservadora debido al efecto dispersante del cemento.

Se recomienda conocer la relación agua/cemento contra la resistencia para los materiales empleados en una obra determinada. La misma información permite determinar la influencia del aditivo sobre la velocidad y magnitud del desarrollo de la resistencia del concreto en las primeras edades. Los cambios en las resistencias iniciales no deberán ser mayores en los concretos fluidos salvo que se emplee una formulación acelerante o retardante específicamente diseñada. Siempre que se emplee un superplastificante el efecto sobre la resistencia inicial deberá ser positivo.

Para concretos fluidos, la resistencia a la compresión a los 28 días de los concretos con superplastificantes, es mayor que la de los concretos de referencia, pudiéndose lograr incrementos del orden de 36%, dependiendo del porcentaje de reducción de agua y de la modificación de la relación agua/cemento. Los superplastificantes son convenientes para producir concretos con resistencias a la compresión mayores de 700 kg/cm² a los 28 días.

2.5.2.- Resistencia a la Tensión

Los concretos con superplastificantes actúan sobre la resistencia a la tensión de la misma forma que la resistencia en compresión. El procedimiento para

estimar la resistencia a la tensión es el mismo que aquel que se emplea en concretos sin superplastificante.

2.5.3.- Módulo de Elasticidad

Los concretos con superplastificantes afectan al módulo de elasticidad de la misma forma en que actúan sobre la resistencia en compresión. La determinación es igual en ambos casos.

2.5.4.- Adherencia al Acero de Refuerzo

Los estudios de laboratorio no dan información que indique que el empleo de concretos fluidos tiene algún efecto sobre su adherencia al acero de refuerzo, la cual depende de la resistencia del concreto, grado de consolidación, exudación y segregación, y del tiempo de fraguado. Los concretos fluidos pueden no mostrar cambios en la resistencia por adherencia si se los compara con concretos de bajo asentamiento de la misma relación agua/cemento siempre que el concreto sea vibrado, fragüe rápidamente después de la consolidación, y presente una resistencia en compresión más alta que la de los concretos convencionales.

Los concretos que no son vibrados pueden tener una reducción significativa en su resistencia por adherencia si se los compara con concretos fluidos adecuadamente vibrados. La consolidación alrededor del acero de refuerzo es más fácilmente lograda con concretos fluidos. La incorporación de un superplastificante al concreto mejora la adherencia entre el acero y el concreto. Por ejemplo, la adición de un superplastificantes a un concreto normal incrementa la resistencia por adherencia a los 7 días de 12 a 35 kg/cm², y de 150 a 275 kg/cm² para barras corrugadas.

2.5.5.- Elevación de Temperatura

La elevación de temperatura de los concretos fluidos debido al calor de

hidratación no es significativamente afectada por la adición de HRWRA del Tipo F, salvo que la cantidad o composición del ligante sea cambiada. Pueden presentarse pequeños cambios en el momento en el cual la máxima temperatura por hidratación es alcanzada, pero esta diferencia por lo general puede ser despreciada. Las reducciones de agua en la mezcla debidas a la incorporación del superplastificante, pueden presentar algún incremento en la elevación de temperatura debido al menor contenido de agua.

2.5.6.- Contracción por Secado

La adición de superplastificantes a la pasta puede incrementar la contracción por secado de ésta, así como la del concreto. Generalmente, los valores de la contracción en los concretos con superplastificante son menores que los límites máximos presentes indicados por la Norma ASTM C 494. Debe considerarse que la contracción por secado de los concretos fluidos deberá ser similar a, o ligeramente mayor que la de las mismas mezclas de concretos a las cuales no se les ha adicionado el superplastificante. Se produce una reducción simultánea en el contenido de cemento y en la relación agua/cemento cuando se añade el superplastificante.

Si la contracción por secado es un factor crítico deberá ser tomada en consideración y medida antes de finalizar la selección de las proporciones de la mezcla, a fin de garantizar que el valor deseado, o el límite indicado por la Norma ASTM C 494 no sea excedido. Los valores de contracción del concreto con y sin el aditivo superplastificante deberán ser comparados en igual resistencia del concreto, no a igual edad, de tal manera que los concretos sean comparados con una porosidad similar.

2.5.7.- Ecurrimiento Plástico

La comparación del escurrimiento plástico de concretos con superplastificante es difícil debido al empleo de diferentes mezclas de concreto, así

como de condiciones de humedad y carga. Es de esperar que la adición de superplastificante a la mezcla deba afectar al escurrimiento plástico de la misma manera que lo hace con la contracción por secado.

2.5.8.- Resistencia a la Congelación

Los concretos con superplastificantes presentan las mismas características de resistencia a los procesos de congelación y deshielo que las de concreto bien consolidados a los cuales no se les ha adicionado superplastificantes, siempre que la relación agua/cemento y el sistema de burbujas de aire sean los mismos. La resistencia del concreto puede ser mejorada si se disminuye la relación agua/cemento. La secuencia adecuada puede ser determinada si se adiciona el aditivo incorporador de aire relacionándolo con los otros constituyentes de la mezcla, a fin de evitar una pérdida excesiva de aire incorporado durante los procesos de mezclado y colocación.

Se requiere que el factor de espaciamiento no exceda de 0.2 mm, valor que en los concretos con superplastificantes es generalmente excedidos, posiblemente debido a la pérdida de burbujas de aire durante el mezclado y el periodo subsiguiente y a la unión de las burbujas de aire. El incremento del factor de espaciamiento a 0.25mm o mayores puede no afectar adversamente la resistencia a los procesos de congelación y deshielo bajo condiciones de obra.

2.5.9.- Permeabilidad

La disminución en la relación agua/cemento debida al empleo del superplastificante disminuye la permeabilidad del concreto.

2.5.10.- Resistencia a los Sulfatos

La disminución en la permeabilidad por mayor densidad y menor cantidad de poros capilares, así como la más alta resistencia en compresión, gracias al empleo

del superplastificantes, mejoran la resistencia a los sulfatos del concreto.

2.5.11.- Resistencia a la Abrasión

La disminución en la permeabilidad y el incremento en la densidad por menor porosidad de los concretos con superplastificantes, al producir resistencias más altas mejoran la resistencia a la abrasión.

2.5.12.- Descascaramiento por Sales

Los concretos a los cuales se les ha incorporado superplastificantes tienen una resistencia satisfactoria al descascaramiento por acción de sales.

2.5.12.- Corrosión

Los superplastificantes del tipo SNF no promueven la corrosión o formación de herrumbre en la superficie del concreto.

3.- ADITIVOS LIGANTES

3.1.- INTRODUCCION

Existen aditivos especialmente formulados para ser empleados en mezclas de cemento Portland a fin de incrementar sus propiedades ligantes. Generalmente consisten en una emulsión de un polímero orgánico, comúnmente conocida como látex. En general este compuesto forma una película a través del concreto.

La función de los aditivos ligantes es incrementar la resistencia por adherencia entre concretos antiguos y concretos nuevos o, a través de las modificaciones en las propiedades del concreto nuevo, reducir los esfuerzos de adherencia desarrollados, o ambas. Igualmente se ha encontrado aplicación a

estos materiales en la fabricación de pintura de cemento; en la adherencia de estucos de cemento Portland; en el parchado del concreto erosionado; o para añadir capas relativamente delgadas de una nueva superficie.

3.2.- MATERIALES

Los aditivos ligantes son emulsiones en agua de materiales orgánicos, se mezclan con el cemento Portland o con el mortero de inyección para su aplicación, y se encuentran dentro de dos categorías: el tipo re-emulsionable y el tipo no re-emulsionable. Este último es resistente al agua y por lo tanto más adecuado para aplicaciones exteriores y empleo en zonas donde prevalece la humedad.

Los materiales comúnmente empleados como aditivos ligantes son fabricados a base de caucho natural, caucho sintético, o alguno de los polímeros orgánicos (cloruro polivinil, el acetato polivinil y los acrílicos) o copolímeros (butadieno-estirano). El látex es empleado en pinturas, papel de recubrimiento, recipientes textiles, etc., y al ser empleado como un aditivo para el concreto debe ser compatible con la naturaleza alcalina de la pasta de cemento Portland y con los diversos iones presentes.

Algunas emulsiones son inestables en medios ácidos, otras en medios alcalinos, y otras en presencia de iones calcio. Las emulsiones inestables deberán coagular en la mezcla haciéndola inadecuada para su empleo. En general las emulsiones de materiales sintéticos son más estables que aquellas preparadas a base de cauchos naturales.

La habilidad de un ligante para ligar y endurecer en contacto con el concreto húmedo, y la retención de la resistencia de curado en la presencia del agua, son factores importantes a ser considerados en la selección de materiales para este uso.

3.3.- FUNCIÓN

Cuando son empleados como aditivos en el porcentaje normalmente recomendado por el fabricante, 5% a 20% en peso del cemento, los diferentes aditivos ligantes pueden afectar en forma distinta la mezcla de concreto no endurecido, por lo que la cantidad empleada depende del tipo de mezcla ligante que se está empleando y de las condiciones de obra. Es conveniente tener presente que los aditivos ligantes generalmente originan incorporación de aire. Este tipo de aditivos son efectivos sólo sobre superficies limpias y sanas, desde que la resistencia por adherencia es solamente tan buena como la resistencia del material al cual ella está unida.

El agua es necesaria para hidratar el cemento Portland del sistema cemento-polímero. Sin embargo, el polímero será más efectivo únicamente cuando la emulsión es rota a partir de un proceso de secado. La emulsión del polímero incorpora una porción del agua de mezclado, siendo el agua liberada hacia el cemento durante el proceso de hidratación. Esta eliminación de agua contribuye al fraguado de la emulsión. Por lo tanto, después de un curado húmedo inicial en las 24 primeras horas para eliminar las posibilidades de agrietamiento, el curado húmedo adicional no es necesario y en principio es indeseable desde que no daría a la emulsión la oportunidad de secar y desarrollar la resistencia deseada. La única excepción a lo anterior es en aquellos casos en que se emplea una relación agua-cemento muy baja, en general menos de 0.3 en peso.

Después del secado o fraguado, las partículas de polímero se unen en una película, adhiriendo a las partículas de cemento y al agregado, mejorando de esta manera la adherencia entre las diversas fases. Igualmente el polímero también llena los microvacíos y microgrietas que se desarrollan durante la contracción asociada con el curado. Esta secundaria acción ligante preserva algo de la resistencia potencial que normalmente se pierde debido al microagrietamiento.

Mejores resistencia y mayor durabilidad están asociadas con las menores

relaciones agua-cemento de las mezclas con látex. Las partículas de polímero actúan como un reemplazo del agua, dando por resultado mezclas mas fluidas que aquellas sin látex pero con una relación agua-cemento similar.

La resistencia en compresión de lechadas, morteros o concretos curados en húmedo, preparados con estos materiales, pueden ser mayores o menores que las de mezclas del mismo contenido de cemento sin el aditivo, dependiendo de aquel que es empleado. Sin embargo, es evidente que los incrementos significativos en la adherencia, tensión, y resistencia a la flexión compensan la posible desventaja de una ligera reducción en la resistencia en compresión. Adicionalmente, los concretos modificados con ligantes tienen mejor resistencia a la abrasión, mejor resistencia a los procesos de congelación y deshielo, y reducen la permeabilidad.

La mejora en las propiedades debida al empleo del ligante debe ser estudiada desde el punto de vista económico, a fin de comparar las ventajas en la unidad cúbica de concreto contra el mayor costo de la misma.

Estos aditivos son especialmente recomendables en operaciones de parchado, en las que se requieren remiendos de poco espesor. Una aplicación delgada de lechada o mortero, con aditivo ligante, desarrolla mayor adherencia que una aplicación gruesa. Curada adecuadamente, se desarrolla en la unión una adherencia más fuerte que los materiales que están siendo unidos.

3.4.- LIMITACIONES

Algunos de los elementos presentes en la emulsión látex pueden entrapar aire pudiendo hacer necesario el empleo de un agente supresor de espuma. Igualmente puede afectarse el dosaje del agente incorporador de aire. Algunos tipos de polímeros deberán ablandarse en presencia del agua; por lo que estos tipos no deberán ser empleados en concretos que han de estar en contacto con el agua en servicio. El resultado final a ser obtenido con un aditivo ligante es tan bueno como la superficie a la cual es aplicado. La superficie deberá ser limpia, sana, y libre de materias inconvenientes tales como pinturas, grasa, y polvo.

4.- ADITIVOS COLORANTES

4.1.- INTRODUCCION

Durante mucho tiempo el concreto estuvo limitado a cumplir sólo una función estructural (su aspecto superficial no se tomaba en cuenta), pero los requerimientos estéticos supieron encontrar en este noble material las vetas y los colores que le han ganado un lugar privilegiado en la arquitectura y la ingeniería contemporáneas. El uso del concreto coloreado se hace cada vez más frecuente en la construcción, debido a las ventajas de todo tipo que ofrece entre las que se encuentran: el efecto estético, la durabilidad del material y la permanencia de la pigmentación.

En algunos casos, a pedido del arquitecto, se puede añadir pigmentos a la mezcla a fin de producir el color deseado en el concreto acabado. Los pigmentos específicamente preparados para ser empleados en concretos o morteros son disponibles ya sea como materiales naturales o sintéticos. Se emplean para producir en la mezcla el color deseado sin afectar las propiedades deseadas para ésta.

En el Perú se tienen algunas experiencias con concreto coloreado como es el caso de un local de Mc Donald's ubicado en la intersección de las avenidas Universitaria y La Marina en el Distrito de San Miguel - Lima, donde para su fachada se utilizó concreto coloreado color rojo, ver Imagen 6.4.1.

En el exterior son varias las investigaciones que se han realizado sobre el tema, es así que ya existen normas para los aditivos colorantes como las que mencionamos a continuación:

- Norma ASTM C 979-99 Standard Specification for Pigments for Integrally Colored Concrete.
- Recomendación ACI 212.3 R-25 Chemical Admixture for Concrete

- Recomendación ACI 303R-91 Guide to Cast-In-Place Architectural Concrete Practice



Imagen 6.4.1: Mc donald´s, Lima. Mezcla de concreto con adición de pigmento color rojo.

4.2.- MATERIALES

Los pigmentos indicados a continuación permiten obtener una variedad de colores:

COLOR	PIGMENTO
Grisés a negros	Oxido negro de hierro
	Negro mineral
	Negro carbón
Azul	Oxido de Cobalto
	Azul ultramarino
Rojo brillante a oscuro	Oxido de hierro rojo
Marrón	Oxido marrón de hierro
	Tierra parda cruda y cocida
Marfil, crema, amarillo	Oxido de hierro amarillo
Verde	Oxido de Cromo
Blanco	Dióxido de titanio

La presentación de los pigmentos puede ser en forma de polvo, granulados o líquidos, ver Imagen 6.4.2.

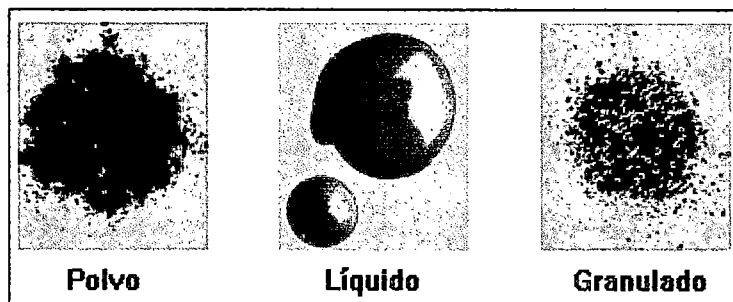


Imagen 6.4.2: Formas de presentación de los pigmentos.

4.3.- EFECTOS SOBRE LAS PROPIEDADES

La magnitud de la adición de un pigmento al concreto normalmente no deberá exceder del 10% en peso del cemento, ver Imagen 6.4.3; sin embargo, algunos pigmentos tales como el negro de carbón deberán ser empleados en cantidades menores.

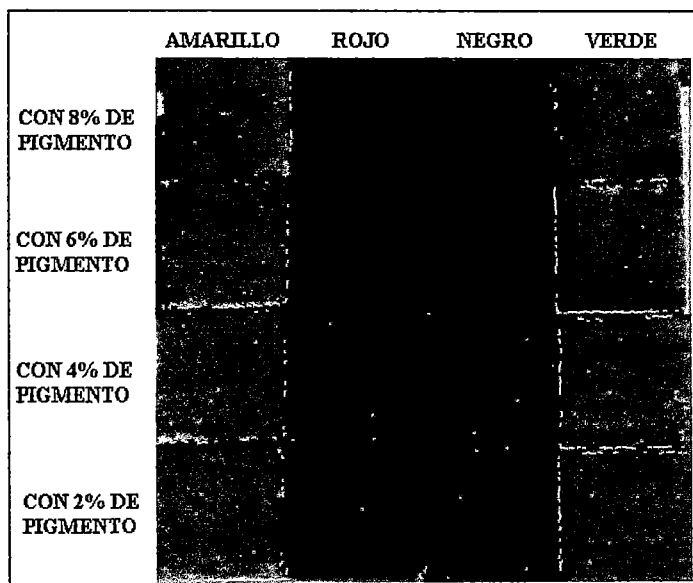


Imagen 6.4.3: A medida que se aumentan el porcentaje de pigmento, la intensidad del color aumenta, en el caso de los concretos de color amarillo, rojo, negro y verde para el caso de la dosificación del pigmento al 6% y 8% el aumento en la intensidad del color no es significativa, debido a que se está llegando al punto de saturación del color.

Conocer la concentración de pigmento óptimo aumenta nuestra relación costo beneficio, porque de esta manera añadimos a la mezcla sólo la cantidad de pigmento que es necesario y nada más.

Los pigmentos se encuentran en el mercado como colores naturales o como materiales sintéticos. Aunque el precio unitario de estos últimos puede ser más alto, los materiales sintéticos son a menudo más económicos en su uso debido a que se obtiene mejor color por su mayor fineza y pureza. Igualmente pueden ser más uniformes que los materiales naturales.

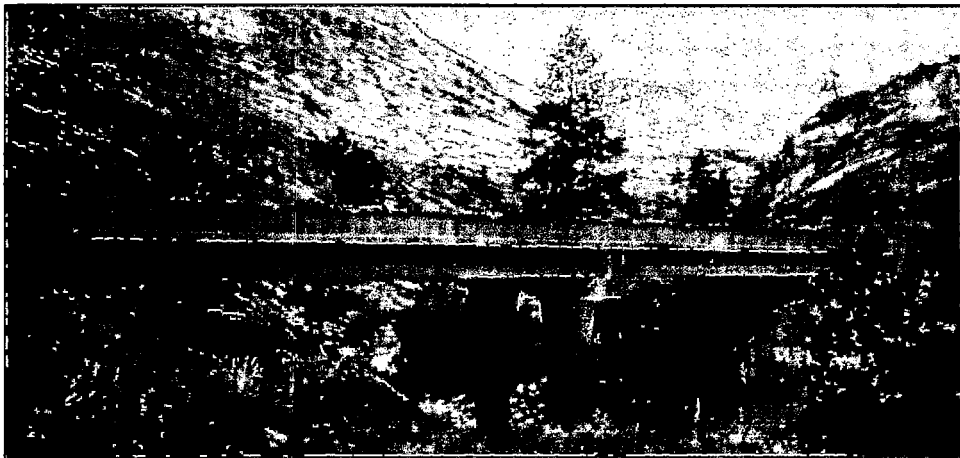


Imagen 6.4.4: El Puente Clear Creek en el parque nacional Zion, en los Estados Unidos se ha construido con concreto coloreado al mismo tono que el del ambiente que lo rodea, conservando la belleza natural del conjunto.
(Fuente: "Artistry in Concrete", Concrete International, V.25, No. 6, Junio 2003, pág. 78.)

Los pigmentos mas naturales generalmente no son molidos como, y a menudo, no son tan puros como, los materiales sintéticos y en general no producen un color tan intenso por unidad de adición. De preferencia los pigmentos deben ser cuidadosamente mezclados o molidos con el cemento seco, pero también pueden ser empleados mezclándolos con los materiales secos antes de añadir el agua a la mezcladora. Excepto para el negro de carbón, las adiciones de menos del 6% del pigmento generalmente tiene muy poco o ningún efecto sobre las propiedades del concreto fresco y endurecido. Altas cantidades pueden incrementar los requisitos de agua de la mezcla en una medida tal que la resistencia u otras propiedades, tales como la resistencia a la abrasión pueden ser adversamente afectadas.

La adición de negro de carbón no modificado es recomendable que se añada en porcentajes del 0.5% al 1% en peso del cemento dado que en mayores cantidades deberá incrementar considerablemente la cantidad de aditivo incorporador de aire necesaria para proporcionar al concreto resistencia a los procesos de congelación y deshielo. Sin embargo, la mayoría de los negros de carbón disponibles para colorear el concreto no contienen materiales incorporadores de aire en cantidad suficiente para neutralizar el efecto inhibitor del negro de carbón.

No es posible obtener concretos de colores brillantes con pigmentos, ya sean ellos naturales o sintéticos, debido al pequeño porcentaje de adición y al efecto neutralizante de los cementos y agregados. Se puede obtener colores fuertes si se emplea cemento blanco en lugar de cemento gris. Si se requiere colores brillantes, se deberá especificar un revestimiento superficial en lugar de incorporar un pigmento.

El cemento gris tiende a oscurecer la mayoría de los colores de base. Para aclarar los colores se recomienda utilizar agregados de color claro con cemento blanco. Recuérdese que es la pasta de cemento coloreado es la que dará su color al concreto final.

El cemento blanco suele ser más efectivo y económico que el pigmento blanco del tipo de dióxido de titanio. Para obtener colores claros y limpios, el empleo de agregado fino limpio y claro, así como el empleo de cemento blanco, es necesario.

Algunos pigmentos se quiebran durante el proceso de curado en el autoclave. Los óxidos de hierro amarillos, naranja y marrones pueden deshidratarse a rojos, así como la porción óxido ferroso de algunos óxidos de hierro negros puede oxidarse a un color herrumbre durante el proceso de enfriamiento.

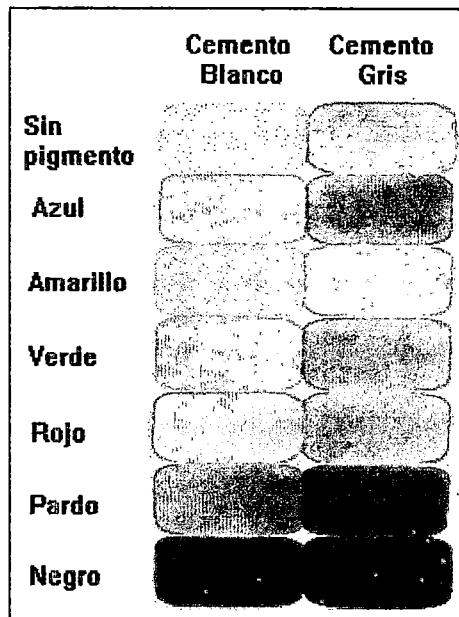


Imagen 6.4.5: El gris apaga todos los colores de cualquier lugar donde los haya. Por este motivo el concreto preparado con el cemento Pórtland gris normal nunca tendrá un colorido tan brillante como el que se prepare con cemento blanco

En productos tratados en el autoclave, los pigmentos que contienen sílice, tales como el negro mineral, pueden ser añadidos en porcentajes mayores que los del cemento, dado que pueden originar un incremento de resistencia a través de una acción puzolánica.

Siempre es recomendable preparar mezclas de prueba, a fin de determinar el porcentaje de pigmento requerido, Debe recordarse que el color producido en el concreto varía también con el equipo y procedimientos empleados en el acabado de la superficie y con las condiciones de curado.

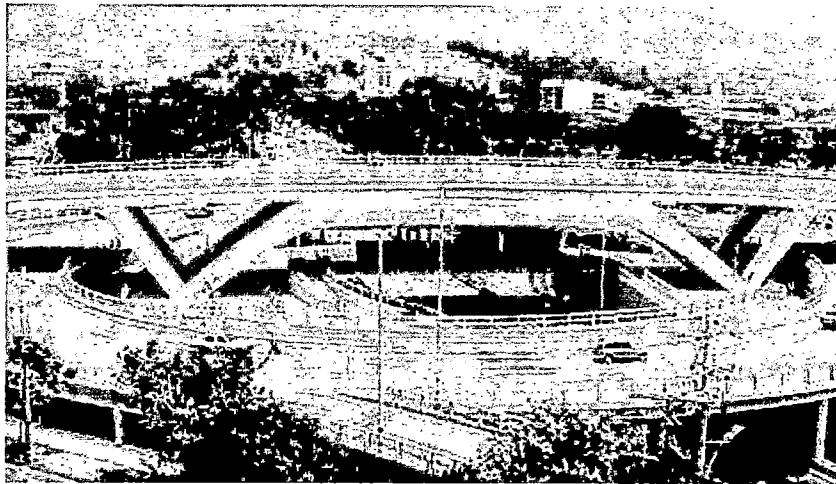


Imagen 6.4..6: Intercambio vial de la Aguacatala – Colombia, construido en concreto blanco con un volumen de 4.000m³. Para la obtención de los acabados de este proyecto se tuvo la necesidad de escoger materiales pétreos blancos que se obtuvieron de selección de calizas muy blancas de las canteras de Rioclaro.

4.4.- REQUISITOS GENERALES

Los requisitos de un aditivo colorante adecuado incluyen:

- a) Firmeza de color cuando está expuesto a la luz del sol,
- b) Estabilidad química en presencia de la alcalinidad producida en el concreto fraguado.
- c) Ausencia de efectos adversos sobre el tiempo de fraguado o el desarrollo de resistencia.
- d) Estabilidad de color en productos de concreto tratados en el autoclave, ver Imagen 6.4.6

Adicionalmente, es conveniente tomar precauciones en cuanto a la posibilidad que puedan aparecer eflorescencias en la superficie del concreto en la medida que las mismas pueden crear condiciones que favorecen la desaparición del color.

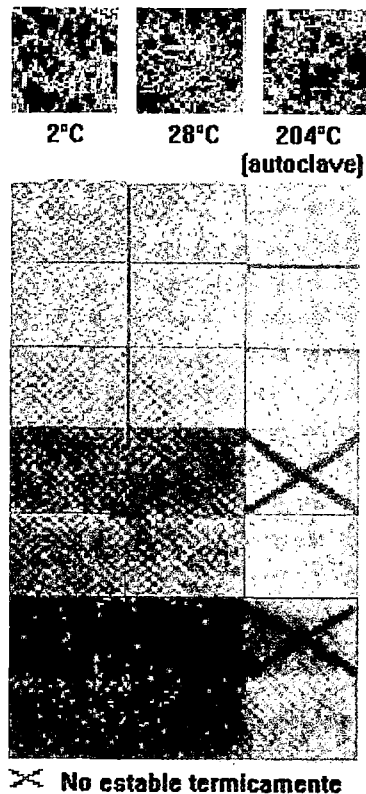


Imagen 6.4.7: El concreto fraguado en autoclave es mucho más claro o brillante. Cuanto mayor sea la temperatura de la autoclave, tanto mayor será la claridad del tono.

5.- ADITIVOS INHIBIDORES DE LA CORROSION

5.1.- INTRODUCCION

El concreto armado desempeña un papel muy importante en nuestra vida cotidiana. Se encuentra presente en la mayoría de las estructuras civiles y viales con las que se construyen las ciudades y vías de comunicación y transporte. Aunque no se encuentren a la vista, el concreto armado contiene, por definición, partes metálicas. El acero de sus armaduras es el que da refuerzo y sustento a estas estructuras. Es posible que, por hallarse ocultas, no se le otorgue a estas armaduras metálicas la relevancia que tienen, así como las consecuencias que puede acarrear su deterioro.

La corrosión en el concreto armado es un problema que no solo afecta la integridad estructural de edificios y puentes, dado que causa agrietamientos y reducción del espesor de las armaduras, sino que también compromete la seguridad de las personas que los utilizan y de terceros.

Se han efectuado muchas investigaciones en relación con la corrosión del acero de refuerzo, con referencia especial a procedimientos de protección. Se ha encontrado que el concreto proporciona adecuada protección al acero embebido en él, aunque se han reportado un número limitado de casos en los cuales las aguas que han penetrado por infiltración o por percolación han encontrado un camino a través del concreto, removiendo o carbonatando al hidróxido de calcio. Estudios efectuados han indicado que el empleo de pequeñas cantidades de bentonita en el agua de mezclado reducen la corrosión al disminuir la permeabilidad del concreto.

El principal contribuyente a la corrosión del acero de refuerzo es la presencia de cloruros en el concreto. Estos cloruros pueden proceder de condiciones tales como exposición del concreto al agua de mar, aguas salobres o brisa marina; exposición a suelos salinos en los cuales los cloruros pueden reaccionar con el acero por difusión a través del concreto; por entrada de sales descongelantes a través de grietas o poros en el concreto; o por el empleo de un aditivo tal como el cloruro de calcio.

La corrosión debida a la inclusión o infiltración de cloruros en el concreto es difícil de controlar una vez que ella ha comenzado. Se han evaluado numerosos productos químicos como potenciales aditivos inhibidores de la corrosión del acero en el concreto. Estos incluyen cromatos, fosfatos, hipofosforitos, álcalis, nitritos y fluoruros. El nitrito de calcio ha sido reportado como un efectivo inhibidor de la corrosión.



Imagen 6.5.1: Un pilote afectado seriamente por el proceso corrosión

5.2.- MATERIALES

5.2.1.- Cromatos

Los cromatos ligeramente solubles deberían, teóricamente, ser la mejor protección contra la corrosión del hierro y acero. Sin embargo, si las pinturas preparadas con pigmento de cromo contienen alguna impureza soluble que tiende a estimular la corrosión no se proporcionará suficiente protección al metal.

Si la superficie del hierro está sujeta a la acción de influencias diferentes, una que tiende a estimular la corrosión y otra que tiende a inhibirla, el resultado deberá ser una quiebra de la acción defensiva del inhibidor en los puntos débiles, localizando así la acción y conduciendo a un efecto de picaduras.

Igualmente se ha establecido que en aquellos casos en que hay ingreso de cloruros, los cromatos no proporcionan adecuada protección al concreto.

5.2.2.- Benzonato de Sodio

Dougill ha empleado el benzoato de sodio como un aditivo inhibidor de la corrosión. En este proceso se emplea una cantidad de 2% en el agua de mezclado, o de una lechada de benzoato-cemento al 10% como pintura del acero, o ambas

indican que el benzonato de sodio permanece en el concreto hasta cinco años después de la exposición, habiéndose recuperado 1.3% en concretos a los cuales se había adicionado 2%. Igualmente, este producto acelera el desarrollo de la resistencia en compresión.

5.2.3.- Lignosulfonatos

La corrosión del acero en concretos expuestos ya sea a la acción de corriente alterna o corriente directa ha sido estudiada, habiéndose encontrado muy poca corrosión en concretos que no contenían aditivos y corrosión severa en concretos que contenían cloruros. El empleo de lignosulfonato de calcio reduce la tendencia a la corrosión del acero en concretos que contienen cloruro de calcio.

5.2.4.- Nitrito de Sodio

El nitrito de sodio ha sido encontrado como un inhibidor de la corrosión del acero presente en productos tratados en el autoclave. Se sugiere que la alta alcalinidad que normalmente está presente en el concreto y que sirve para dar pasividad al acero, puede ser reducida en forma importante por el tratamiento en el autoclave, especialmente cuando están presentes aditivos a base de sílice. Se considera que 2% a 3% de nitrito de sodio en peso del cemento puede ser un inhibidor adecuado bajo las condiciones enunciadas. Igualmente, se ha encontrado que la adición del 2% de nitrito de sodio puede ser efectiva para prevenir la corrosión del acero presente en concretos que contienen cloruro de calcio, ello bajo determinadas condiciones de almacenamiento. Sales de baja solubilidad tales como determinados fosfatos o fluosilicatos y fluoaluminatos son adecuadas, debiendo el dosaje limitarse al 1% en peso del cemento.

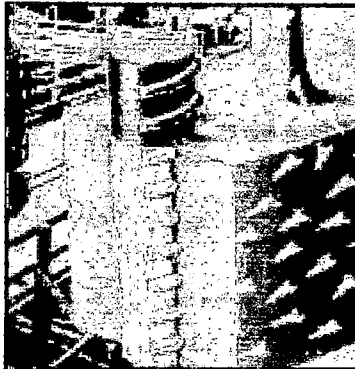


Imagen 6.5.2: Inhibidores de Corrosión, los principales son compuestos a base de cromatos, fosfatos, nitritos, etc. El nitrito de calcio parece el inhibidor más adecuado en la actualidad, dado que evita que los iones cloruro reaccionen con los iones ferrosos de los defectos del óxido férrico y así protege el acero en el concreto.

5.2.5.- Cloruro estañoso

Cuando se emplea cloruro de calcio conjuntamente con calor para acelerar el desarrollo de resistencia, se encuentra que la velocidad de corrosión del acero de refuerzo puede acelerarse, especialmente si el calor es aplicado en forma de vapor a presión atmosférica. Se han determinado que el cloruro estañoso, el cloruro férrico y el tiosulfato de sodio, actúan como acelerantes de manera similar al cloruro de calcio, pero dando una corrosión menor que este último. El cloruro estañoso parece ser el mejor de los tres productos, y un 2% de la sal, en peso del cemento, se ha determinado como el porcentaje más efectivo, tanto desde el punto de vista de la aceleración como del de la corrosión.

5.3.- LIMITACIONES

Existen evidencias que los inhibidores de corrosión no son siempre efectivos y se señala que determinados productos no pueden ser recomendados pues existe sobre ellos insuficiente evidencia de su efectividad o posibles ventajas. Como muy bien señala Evans "Un efecto benéfico de agregar inhibidores puede razonablemente ser esperado si la superficie del acero está limpia y hay ausencia de cloruros, pero bajo estas condiciones existe muy poco peligro de que ocurran

serios daños aun sin añadir del inhibidor”.

Cuando se presentan partículas de oxidación hay un riesgo muy grande que ésta, al impedir que el inhibidor alcance el metal bajo él, pueda establecer la combinación de pequeños ánodos y grandes cátodos haciendo mayor el peligro.

5.4.- EFECTOS

Se ha dicho mucho contra el empleo de inhibidores. Por ejemplo el South African National Building Research Institute indica lo siguiente: "aunque determinados materiales inertes o reactivos han mostrado ser adecuados, su uso no puede ser recomendado en esta etapa de las investigaciones dado que existe insuficiente evidencia de su efectividad si el acero está limpio y hay ausencia de cloruros, dado que bajo estas condiciones existe muy poco peligro que se produzcan serios daños aún sin añadir el inhibidor”.

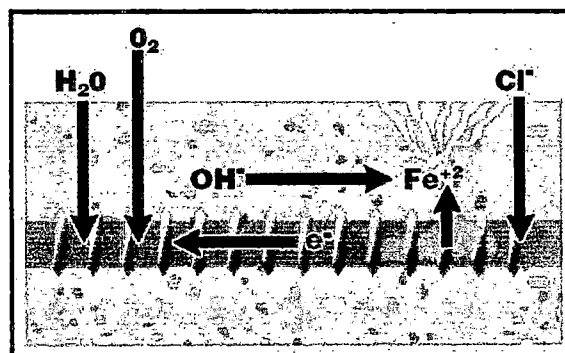


Imagen 6.5.3: Proceso de Corrosión

Toda la información disponible indica que el concreto sigue siendo el mejor inhibidor de la corrosión del acero de refuerzo. Un concreto con adecuado espesor de recubrimiento, buena formación de gel, pH adecuado, baja permeabilidad, poca carbonatación, y libre de grietas, es mejor que cualquier aditivo para proteger al acero de refuerzo de un proceso corrosivo.

Debido a que se ha considerado que el concreto es la mejor protección para el acero, así como que se conoce que los cromatos no ofrecen protección bajo condiciones en las que los cloruros pueden penetrar en el concreto, es que existe

poca literatura técnica sobre la materia. El trabajo más completo sobre el tema es "Corrosion of metals in concrete" publicado por el Comité 222 del ACI.



Imagen 6.5.4: Proceso corrosivo del acero de refuerzo en una columna de concreto en las cuales no se utilizo inhibidores de corrosión ni protección catódica.

CAPITULO VII

PUZOLANAS

CAPITULO VII

PUZOLANAS

1.- ASPECTOS GENERALES

1.1.- HISTORIA

La puzolana es una ceniza volcánica producida por erupción, entre 1600 y 1500 AC, y está compuesta por cerca del 80% de vidrios volcánicos. Los griegos descubrieron las mezclas puzolana-cal entre el 700 y 600 AC. Los romanos comenzaron a usarlas alrededor del 150 AC. El examen de los materiales empleados para las estructuras de esa época muestra que el ligante era una mezcla de cal, tierra de Santorín, arena fina menor de 2 mm y agregado silicio con tamaños variando entre 2 y 20 mm. La mezcla tenía una resistencia de 12 MPa.

Los morteros tenían una composición de 6 partes por volumen de tierra de Santorín, 2 partes por volumen de cal, y una parte por volumen de arena fina. Se emplearon en los cementos hidráulicos de acueductos, puentes, desagües y estructuras de todo tipo, algunas de las cuales actualmente se encuentran funcionando, tal es el caso del Acueducto y del Panteón construido por Adriano. Todas estas estructuras proporcionan evidencias de la durabilidad de los morteros puzolana-cal bajo condiciones de exposición a climas templados o fríos.

1.2.- DEFINICIÓN

La Recomendación ACI 116R define a las puzolanas como "Un material silicio o silicio y aluminoso, el cual en sí mismo posee pequeño o ningún valor

cementante pero que cuando está finamente dividido y en la presencia de humedad, reacciona químicamente con el hidróxido de calcio a temperatura normal para formar compuestos que poseen propiedades cementantes”

La Norma ASTM C 618 cubre a las cenizas del carbón y a las puzolanas naturales, para ser empleadas como un aditivo mineral en el concreto. Las puzolanas naturales, crudas o calcinadas, se designan como puzolanas de la Clase N y se especifican como sigue; “Puzolanas naturales crudas o calcinadas que cumplen con los requisitos aplicados de las clases dadas aquí, tales como tierras de diatomeas, esquistos opalinos y pizarras, tufas y cenizas volcánicas o piedra pómez, cualquiera de las cuales puede ser o puede no ser procesada por calcinación, así como los diversos materiales que requieren calcinación para inducir propiedades satisfactorias, tales como arcillas y escorias”

Las puzolanas se deberán incorporar al cemento por su capacidad de reaccionar en presencia del hidróxido de calcio y el agua, permitiendo un incremento de la resistencia en edades posteriores, disminución del contenido de cemento, modificación del color, incremento en la durabilidad en presencia de sulfatos, e inhibición de la reacción álcali-agregados. Las puzolanas deberán cumplir con las Recomendaciones de la Norma ASTM 618.

La Puzolanas permiten beneficios económicos al permitir una reducción del contenido de cemento portland en la mezcla. Entre las desventajas de las puzolanas deben de considerarse su menor resistencia inicial; un tiempo de curado más largo; incremento en los requerimientos de agua; y los problemas derivados del manejo de un ingrediente adicional.

1.3.- COMPOSICIÓN QUÍMICA Y MINERALÓGICA

Las propiedades de las puzolanas naturales varían dependiendo de su origen, la proporción variable de sus constituyentes y las características físicas y mineralógicas variables de los componentes activos. Muchas de las puzolanas naturales contienen cantidades importantes de constituyentes diferentes de las

sílices, tales como los óxidos de alúmina y hierro, los cuales deberán reaccionar con el hidróxido de calcio y los álcalis para formar productos complejos

La actividad puzolánica no puede ser determinada exactamente por cuantificación de la presencia de sílice, alúmina y hierro. La cantidad de material amorfo usualmente determina la reactividad de una puzolana natural. Los constituyentes de ésta pueden existir en diversas formas que varían desde material reactivo amorfo a productos cristalinos los cuales deberán reaccionar ya sea lentamente o no hacerlo. Es importante evaluar cada puzolana natural para confirmar su grado de actividad puzolánica.

No hay una distinción clara entre el material silicio que es considerado puzolana y aquel que no. En general, las sílices amorfas reaccionan con el hidróxido de calcio y los álcalis mas rápidamente que aquellas sílices que están en forma cristalina, tal como el cuarzo. Cuanto mayor es la partícula (menor el área superficial por unidad de volumen) menos rápida es la magnitud de la reacción. Por lo tanto, la composición química de una puzolana no determina claramente su habilidad para combinar con el hidróxido de calcio y los álcalis.

Las cenizas volcánicas y los tufos zeolíticos cuando se mezclan con cal, producen silicato de calcio hidratado (CSH) así como aluminato de calcio hidratado y aluminio silicato. Estos materiales deberán provenir de buenas puzolanas. Las arcillas y esquitos naturales no son puzolánicos.

El caolín de alta pureza puede ser procesado para formar una puzolana de alta pureza denominada Metacaolín altamente activo.

1.4.- CLASIFICACIÓN

Las puzolanas naturales se clasifican en cuatro categorías: vidrios volcánicos no alterados; tufas volcánicas; arcillas o esquitos calcinados; y sílices opalinas crudas o calcinadas. Esta clasificación no es fácilmente aplicable a las puzolanas de origen volcánico, debido a que las tufas volcánicas

comúnmente incluyen tanto vidrios silicios alterados como inalterados. Una clasificación de las puzolanas naturales basada sobre la identidad de los componentes puzolánicos, incluye los vidrios volcánicos, ópalo, arcilla, zeolita, y el óxido de alúmina hidratado. En la Tabla 7.1, la composición química y mineralógica está dada para algunas de las bien conocidas puzolanas.

El metacaolín es una puzolana natural producida por calentamiento de arcillas que contienen caolín a una temperatura entre 600°C y 900°C. Su reactividad depende de la cantidad de caolinita contenida en el material arcilloso original. El promedio de sus partículas es, en general de 20 µm. Las propiedades puzolánicas de la caolinita están bien estudiadas. El hidróxido de calcio que se produce durante la hidratación del cemento es consumido si la dosificación contiene una cantidad adecuada de caolinita altamente reactiva. El consumo de hidróxido de calcio da origen a la formación de silicato de calcio hidratado (CSH) y etringita. Las investigaciones con el empleo de caolinita indican excelente desarrollo de resistencia, reducción en la permeabilidad, y buena resistencia química, además de reducción en la penetración a los cloruros y buena resistencia a los procesos de congelación. Mezclas con 8% a 12% de caolinita como reemplazo en mezclas con relación agua/material cementante de 0.4 a 0.3 mejoran la resistencia en todas las edades.

1.5.- PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS

En la reacción de una mezcla cemento-puzolana, la reacción progresa como una reacción de base ácida de cal y álcalis con los óxidos de la puzolana; hay dos aspectos importantes:

- a) Una gradual disminución de la cantidad de hidróxido de cal libre con el tiempo; y
- b) Durante la reacción hay un incremento en la formación de CSH y alúmino silicato de calcio, que es similar a los productos de la hidratación del cemento portland.

El reemplazo parcial del cemento por puzolana de alta relación sílice, a la suma de alumina y hierro, se ha encontrado que incrementa la resistencia del concreto a los sulfatos y los ataques por agua de mar. Ello se debería a la remoción del hidróxido libre que se forma en la hidratación del cemento. El resultado es que la pasta endurecida contiene menos hidróxido de calcio, mas CSH, y otros productos de baja porosidad. La hidratación de mezclas de cemento hecho con puzolanas naturales de origen volcánico indica que el refinamiento de los poros resultante de la reacción puzolánica es importante para garantizar la durabilidad química y la resistencia mecánica.

El perfil, distribución de las partículas por tamaño, densidad, y composición de las partículas de puzolana natural influyen en las propiedades de la mezcla fresca de concreto no endurecido y el desarrollo de resistencia del concreto endurecido. La mayoría de las puzolanas naturales tienden a incrementar los requerimientos de agua en los ensayos de consistencia normal como un resultado de su característica de microporos y alta área superficial. Las puzolanas naturales pueden mejorar el comportamiento tanto del concreto fresco como del endurecido cuando son empleadas como un ingrediente de los cementos portland puzolánicos o como una adición a los concretos de cemento portland.

1.6.- USOS

Las puzolanas de origen natural han sido empleadas en concretos masivos, así como en construcciones de concreto y fabricación de productos de concreto. Pueden ser empleadas como reemplazo parcial del cemento portland o como una adición al mismo. Algunas puzolanas naturales han sido empleadas en la misma forma que las cenizas. Otras, como el metacaolín, se comportan en forma similar a las microsílices y son empleadas de forma similar.

La calcinación de las arcillas minerales es esencial para desarrollar actividad puzolánica satisfactoria, variando el tratamiento al calor con el tipo de arcilla mineral presente. Hoy los cementos mezclados, consistentes de cemento

portland y puzolana, cubiertos por las Normas ASTM C 595 y C 1157, son empleados en construcciones de concreto por razones económicas para ayudar a reducir el consumo de energía y alcanzar los beneficios técnicos especificados.

1.7.- EFECTOS SOBRE LAS PROPORCIONES DE MEZCLA

El método de evaluación más efectivo en la selección de las proporciones es aplicar un programa de mezclas de prueba y ensayos. Las proporciones óptimas para una combinación dada de puzolana y cemento portland no pueden ser predichas. Cuando es empleada como reemplazo la puzolana reemplaza en igual volumen o igual masa al cemento. Siendo la densidad de las puzolanas menor que la del cemento, el reemplazo por masa da por resultado un mayor volumen del material cementante total que cuando el reemplazo por volumen es empleado en un porcentaje dado. La masa de la puzolana puede ser mayor que la del cemento reemplazado si el concreto es dosificado para óptimas propiedades y máxima economía.

Las técnicas de dosificación son similares a las empleadas cuando se dosifica un concreto que no la incluya. Las adiciones minerales, en este caso puzolanas, deberán ser consideradas como parte de la pasta matriz en la determinación del óptimo porcentaje de los agregados fino y grueso. El efecto de la puzolana sobre los requerimientos de agua también deberá ser determinado. Algunas adiciones minerales finamente divididas dan lugar a un incremento en los requerimientos de agua; otras tienen poco o ningún efecto; y algunas reducen los requerimientos de agua cuando son empleadas. Las puzolanas afectan los requerimientos de agua del concreto y, por lo tanto, el contenido de cemento. Una puzolana natural debe ser considerada como parte del material cementante.

La cantidad de puzolana natural empleada varía significativamente en función de la actividad de las puzolanas. Algunas se emplean en un rango del 15% al 35%, sobre la base de la masa del material cementante total en el

concreto. Las puzolanas naturales mas reactivas pueden ser empleadas en bajas concentraciones de 5% al 15% por masa del material cementante total.

Sin embargo, tan bajas concentraciones pueden incrementar la expansión resultante de la reacción sílice alterada en presencia de algún agregado alcalino reactivo. La cantidad óptima de puzolanas naturales depende del lugar donde el concreto es empleado y de las especificaciones de trabajo.

2.- EFECTO SOBRE LAS PROPIEDADES DEL CONCRETO FRESCO

Las puzolanas producen una mezcla cohesiva que mantiene una consistencia plástica, mejorando la trabajabilidad absorben el agua de la mezcla y la mantienen en el sistema, mejorando el acabado.

Su empleo reduce la segregación y exudación, e incrementa la resistencia por reemplazo de las partículas finas que faltan en el agregado. No requieren un incremento en el contenido total de agua para lograr la consistencia deseada. La contracción por secado y la absorción del concreto endurecido no son afectadas por su empleo.

Las puzolanas gruesas con un pobre perfil de partículas pueden requerir un incremento en el contenido de agua del concreto para un asentamiento dado, con el riesgo de incrementar la exudación y segregación.

Si su relación de área superficial de sólidos a volumen de agua es baja, la magnitud de la exudación es relativamente alta. Para tales mezclas, la exudación tiende a reducir la homogeneidad del concreto. La falta de ésta se manifiesta en grandes fisuras abiertas y reducción potencial del concreto con incremento de la permeabilidad y absorción. Un incremento del volumen de una puzolana adecuada resuelve los problemas mencionados al incrementar la relación del área superficial de sólidos al volumen de agua.

Las puzolanas incrementan la cohesividad de la mezcla al producir una pasta mas plástica que permite que el concreto consolide fácilmente y fluya libremente bajo vibración. Igualmente ayuda a reducir la segregación.

El perfil deberá ser partículas suaves y redondeadas a fin de reducir la demanda de agua, permitiendo máximas proporciones de materia sólida y mínimas de agua.

Las puzolanas pueden extender el tiempo de fraguado del concreto con reducción del cemento. Las características de tiempo de fraguado son influenciadas por la temperatura ambiente y del concreto, el tipo, fuente, contenido y fineza del cemento, contenido de agua de la pasta, los álcalis solubles en agua, el uso y dosaje de otros aditivos, la cantidad de puzolana y la fineza de ésta. El efecto de la puzolana sobre el tiempo de fraguado se determina por ensayos.

La presión sobre los encofrados puede incrementarse, con el resultado de una perdida de asentamiento lenta, incremento de la trabajabilidad, o extensión de las características de tiempo de fraguado.

3.- EFECTO SOBRE LAS PROPIEDADES DEL CONCRETO ENDURECIDO

La puzolana en los concretos permite menor permeabilidad, reducción en el calor de hidratación, reducción en la reacción álcali-agregados, reducción en la expansión, incremento en la resistencia a edades tempranas, e incremento en la resistencia al ataque por sulfatos.

3.1.- RESISTENCIA

Las puzolanas contribuyen a la resistencia debido a su composición química y a sus características físicas en términos del acomodo de partículas.

Cuando se emplea puzolanas de baja actividad química para reemplazar al cemento sobre la base de iguales volúmenes, la resistencia inicial puede reducirse. Esta reducción en la resistencia puede ser incrementada por sustitución del material puzolánico por cemento. Las puzolanas que son relativamente lentas en su actividad química generalmente incrementan la resistencia de las mezclas pobres y disminuyen la de las mezclas ricas. El metacaolín puede incrementar la resistencia en las edades iniciales.

La incorporación del metacaolín en un nivel del 5% al 10% por masa de cemento permite obtener una resistencia en compresión más alta en todas las edades que los concretos de control. Las Figuras 7.1 y 7.2 muestran que para todas las edades de ensayo, el concreto conteniendo esta puzolana natural proporciona una resistencia en compresión más alta que los concretos de control.

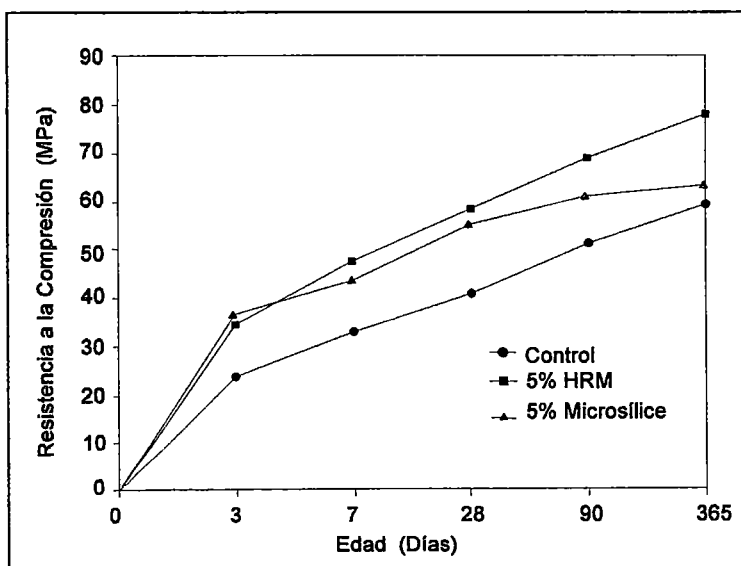


Figura 7.1: Comparación de la resistencia a la compresión de metacaolinitas altamente reactiva y concretos con microsílices al 5% del reemplazo del cemento. (Fuente: ACI 232.1R-00, "Use of Raw or Processed Natural Pozzolans in Concrete"; Fig. 2.1, pág. 10)

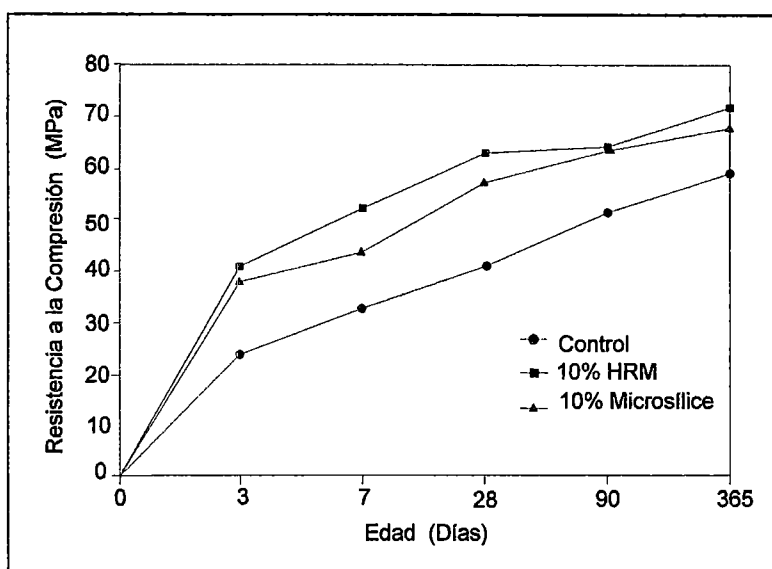


Figura 7.2: Comparación de la resistencia a la compresión de concretos con metacaolinitas altamente reactivas y microsílces al 10% del reemplazo del cemento. (Fuente: ACI 232.1R-00, "Use of Raw or Processed Natural Pozzolans in Concrete"; Fig. 2.2, pág. 10)

Aunque no son adiciones minerales, las cenizas de cáscara de arroz (RHA), tienen propiedades puzolánicas y pueden ser empleadas para producir concretos de alto rendimiento. La Figura 7.3 muestra el desarrollo de la resistencia en compresión para diferentes contenidos de RHA.

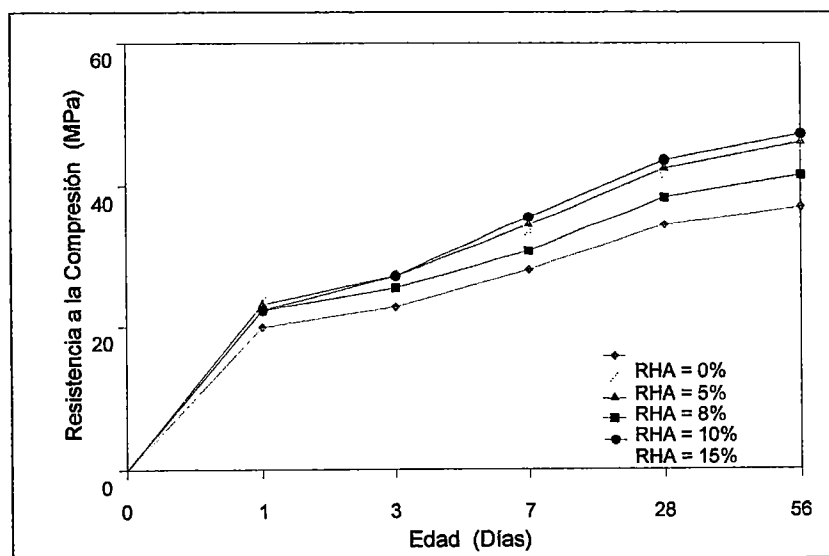


Figura 7.3: Desarrollo de la Resistencia a la Compresión del concreto con diferentes porcentajes de RHA como reemplazo de cemento ($a/mc=0.40$). (Fuente: ACI 232.1R-00, "Use of Raw or Processed Natural Pozzolans in Concrete"; Fig. 2.3, pág. 10)

La mezcla de puzolanas con clinker de cemento portland mejora la contribución a la resistencia. Los ensayos demuestran que la contribución de la puzolana al desarrollo de la resistencia en compresión ocurre después de los 7 días de hidratación. Las Figuras 7.4 y 7.5 muestran los efectos del tiempo de curado sobre la resistencia en compresión de cubos de mortero hechos con cemento Portland puzolánico conteniendo 10, 20 y 30% de tierra de Santorín.

Los ensayos permiten concluir que a los 28 días la resistencia en compresión de concretos preparados con 10% de puzolana es mayor que la de concretos sin ella. Resultados similares se obtienen a los 90 días y al año.

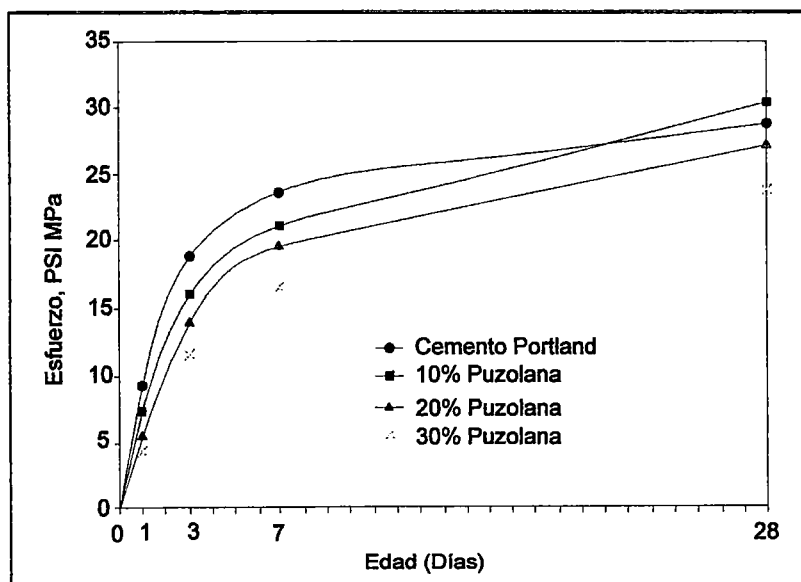


Figura 7.4: Efecto del tiempo de curado sobre la resistencia en compresión de cubos de mortero a los 28 días, preparados con cemento Portland puzolánico que contiene tierra de Santorin.

(Fuente: ACI 232.1R-00, "Use of Raw or Processed Natural Pozzolans in Concrete"; Fig. 2.6, pág. 11)

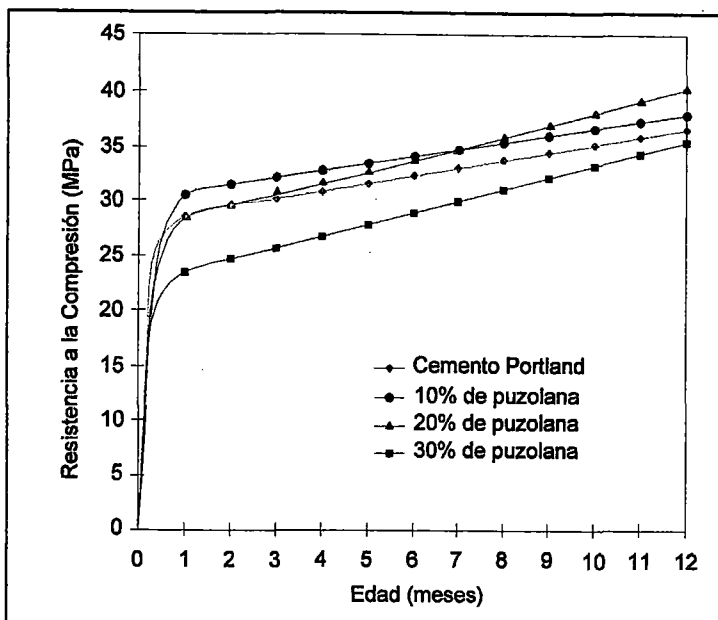


Figura 7.5: Efectos del tiempo de curado sobre la resistencia en compresión de cubos de mortero de 12 meses preparados con cemento Portland puzolánico que contienen tierra de Santorín.

(Fuente: ACI 232.1R-00, "Use of Raw or Processed Natural Pozzolans in Concrete"; Fig. 2.7, pág. 11)

3.2.- RESISTENCIA A LOS SULFATOS

El empleo de puzolanas con cemento portland en el concreto suele incrementar la resistencia a ataques agresivos por agua de mar, soluciones de sulfatos en el suelo y aguas ácidas naturales. La mejora es mayor para concretos con bajo contenido de cemento. El empleo de puzolanas con cemento portland resistente a los sulfatos puede no incrementar la resistencia a estos y si un compuesto aluminoso químicamente activo está presente en la puzolana, puede resultar una reducción en la resistencia del concreto a los sulfatos. Los cementos mezclados que contienen sílice natural o puzolanas artificiales, escorias, o microsílices, tienen mejor resistencia a los sulfatos que los cementos portland que tenían el mismo contenido de aluminato tricálcico.

3.3.- ELEVACIÓN DE TEMPERATURA

Las puzolanas han sido empleadas en concretos masivos como un reemplazo parcial del cemento portland para reducir la elevación de temperatura.

El calor de hidratación con que una puzolana puede contribuir en la hidratación es aproximadamente el 50% que el que sería desarrollado por una cantidad igual de cemento portland. La magnitud más lenta de desarrollo de calor del concreto que contiene puzolana permite disminuir la elevación de temperatura y bajar los costos cuando se lo compara con los de un concreto sin puzolana. La Figura 7.6 muestra los efectos benéficos de emplear una ceniza y una puzolana natural en la mezcla de concreto para reducir la elevación de temperatura en concretos masivos.

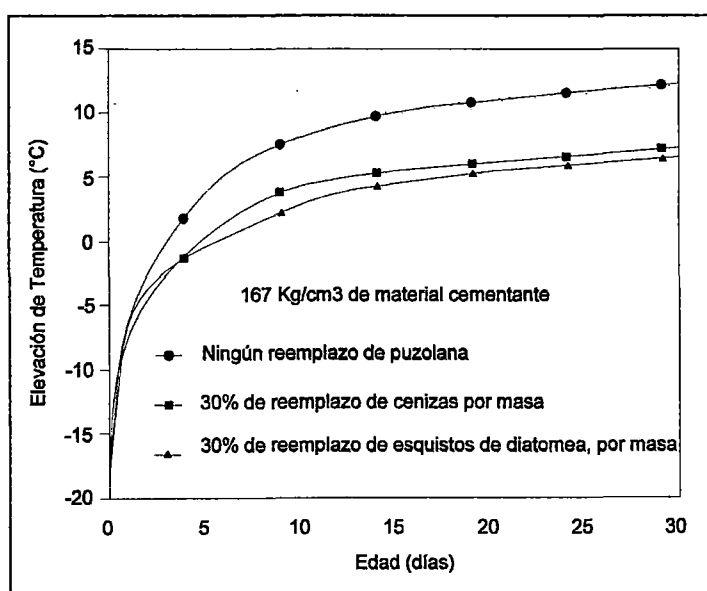


Figura 7.6: Efecto de la puzolana sobre la elevación de temperatura del concreto.
(Fuente: ACI 232.1R-00, "Use of Raw or Processed Natural Pozzolans in Concrete"; Fig. 2.14, pág. 14)

3.4.- EXPANSIÓN DEBIDA A LA REACCIÓN ÁLCALI-AGREGADO

La evaluación del comportamiento a largo plazo de los pavimentos indica que las puzolanas pueden ser positivas en reducir o eliminar el agrietamiento y expansión resultantes de la reacción álcali-agregado. Se considera que las puzolanas naturales son más eficientes que las cenizas. El orden de incorporación es del 20% al 30% como factor de reemplazo del cemento. Aunque los cementos de bajo contenido de álcalis son satisfactorios para ser empleados con la mayoría de los agregados reactivos, algunos agregados

requieren de control adicional proporcionado por puzolanas o escorias. La Figura 7.7 muestra como un cemento Pórtland con 1% de Na_2O equivalente, mezclado con 20 a 30% de tierra de Santorín actúa satisfactoriamente para controlar la expansión álcali-silice.

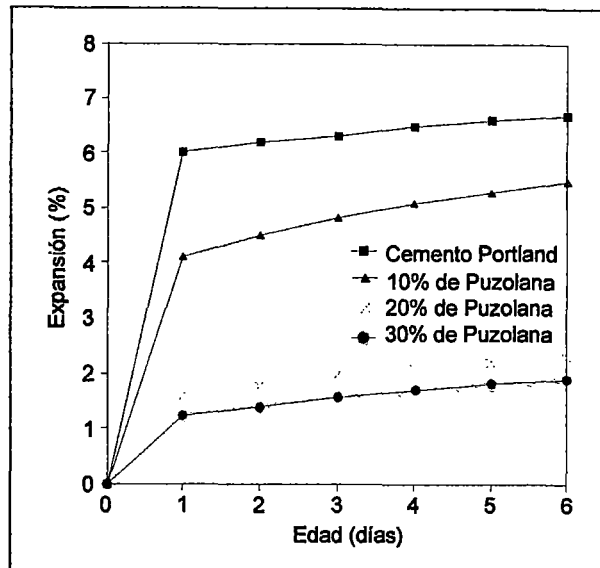


Figura 7.7: Control de la expansión álcali-silice empleando tierra de Santorín.
(Fuente: ACI 232.1R-00, "Use of Raw or Processed Natural Pozzolans in Concrete"; Fig. 2.18, pág. 15)

3.5.- PERMEABILIDAD

La permeabilidad del concreto con puzolana se reduce significativamente en edades posteriores. Ello se debe a una disminución de la segregación y exudación y a una reducción en los requerimientos de agua. La reducción de la permeabilidad, cuando se la relaciona con la resistencia a la penetración del ion cloruro, es importante para la protección de la corrosión del acero de refuerzo. Se ha demostrado que el incremento en la concentración de puzolana natural y la disminución de la relación agua-cementante disminuyen la difusión, permeabilidad y conductividad. La presencia del 12% de metacaolín mejora la resistencia a la penetración de los cloruros más que una reducción agua-cementante en una mezcla de concreto.

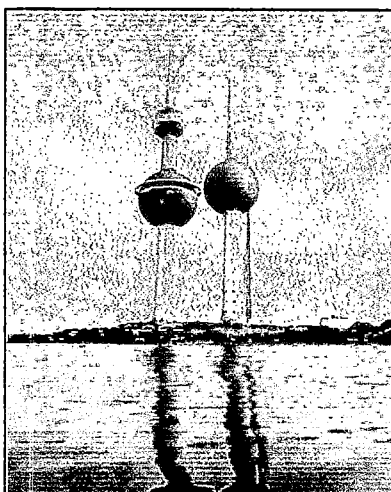


Imagen 7.1: "Water Towers". Torre de almacenamiento de agua en Kuwait en las cuales se empleo cemento con adiciones puzolánicas

Quienes están contra el empleo de puzolanas como control de la permeabilidad indican que tal empleo implica la conversión del hidróxido de calcio a CSH y ello puede ser peligroso por reducción de la basicidad de reserva permitiendo la carbonatación que causa disminución en la pasividad del acero de refuerzo. Quienes favorecen el empleo sugieren que un mayor beneficio está en el ligante en uso, la falta de lavado del CSH del soluble $\text{Ca}(\text{OH})_2$ con la consecuente reducción de la permeabilidad y la tendencia a la eflorescencia. El ACI ha encontrado que no existen evidencias que cualquiera de los fenómenos mencionados ocurra permanentemente o tenga algún grado de significación.

3.6.- RESISTENCIA A LA CONGELACIÓN Y DESHIELO

El efecto de la puzolana sobre la resistencia del concreto durante los procesos de congelación y deshielo, así como la acción de los descongelantes químicos, dependen de las proporciones, la resistencia en compresión, y condiciones de humedad del concreto, y el desarrollo del sistema de burbujas al tiempo de la exposición. Las puzolanas finamente divididas contienen residuos de carbón que tiende a reducir la cantidad de aire atrapado en la masa y, por ello, pueden requerir un mayor dosaje de aditivo incorporador de aire para obtener una cantidad de aire incorporado o el dosaje de aire deseado.

Los concretos con RHA (cenizas de cáscara de arroz) tienen buena

resistencia a la penetración de iones cloruro y buen comportamiento bajo ciclos de congelación y deshielo. Sin embargo estos concretos requieren porcentajes relativamente mayores de aditivo incorporador de aire y el dosaje se incrementa con un incremento en el porcentaje de RHA empleado como reemplazo del cemento.

3.7.- CONTRACCIÓN POR SECADO

La contracción por secado de concretos con cemento portland puzolánico depende del grado de hidratación del compuesto y de la demanda de agua de la mezcla. La tendencia al agrietamiento resultante de la contracción por secado en concretos que contienen puzolana es menor que la de concretos similares sin puzolana. Los estudios demuestran que la contracción por secado de concretos con reemplazos del 10%, 20% y 30% por puzolana no tenían diferencias significativas con la de concretos que tenían el cemento portland de referencia.

4.- APLICACIONES

Las puzolanas naturales han sido ampliamente empleadas en concretos masivos para disminuir el riesgo de agrietamiento térmico al disminuir el calor de hidratación, por ejemplo se han empleado en el Puente Golden Gate entre otras estructuras. Igualmente se aprecia mejora en la reducción en la reacción álcali-silíce.



Imagen 7.2: "Puente Golden Gate". Las puzolanas naturales se han empleado en la construcción de dicho puente entre otros; en estructuras de concretos masivos en las que el riesgo de agrietamiento térmico puede ser un problema importante.

Tabla 7.1: Análisis típico químico y mineralógico de algunas puzolanas naturales

Puzolana	%						Pérdida por calcinación estimada %	Materia no cristalina %	Principales minerales cristalinos
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Álcalis*			
Tierra de Santorin	65.1	14.5	55.5	3.0	1.1	6.5	3.5	65 a 75	Cuarzo, plagioclasa
Rhenish Trass	53.0	16.0	6.0	7.0	3.0	6.0	-	50 a 60	Cuarzo, feldespato, analcina
Fonolitas	55.7	20.2	2.0	4.2	1.1	10.8	3.6	-	Ortoclasa, albita, piroxeno, calcita
Cenizas Romanas	44.7	18.9	10.1	10.3	4.4	6.7	4.4	-	Herschellita, chabasita, filisita
Vidrios del Neopolitano	54.5	18.3	4.0	7.4	1.0	11.0	3.1	50 a 70	Cuarzo, feldespato
Esquistos opalinos	65.4	10.1	4.2	4.6	2.7	1.4	6.3	-	-
Diatomeas	86.0	2.3	1.8	-	0.6	0.4	5.2	-	-
Riolita volcánica	65.7	15.9	2.5	3.4	1.3	6.9	3.4	-	-
Jalisco Volcánico	68.7	14.8	2.3	-	0.5	9.3	5.6	90	Sanidita

* %Na₂O + 0.658%K₂O

(Fuente: ACI 232.1R-00, "Use of Raw or Processed Natural Pozzolans in Concrete",
Tabla 1.1, pág 3)

CAPITULO VIII

ESCORIAS DE ALTO HORNO

CAPITULO VIII

ESCORIAS DE ALTO HORNO

1.- INFORMACIÓN GENERAL

1.1.- HISTORIA

El empleo de escorias de alto horno finamente granulada (GGBF) como material cementante data de 1774 cuando Lorient prepara morteros empleando escorias en combinación con cal. En 1889 se emplean los cementos escoria-cal para construir el sistema de subterráneo de París. La primera producción masiva de cemento con escorias fue en Alemania en 1892 y en Estados Unidos en 1896. Hasta 1950 se emplean en dos formas; como un material cementante en la producción de cemento o como un material crudo en la fabricación del cemento portland. En el Perú los primeros estudios los efectúa el LEM-UNI en la década de los 60, por las ingenieras Ana Biondi y Pilar Rodríguez. En la actualidad se fabrican en la planta de cemento Pacasmayo, con escoria proveniente de la Siderurgica de Chimbote.

1.2.- DEFINICIONES

Las escorias de alto horno son el producto no metálico consistente esencialmente de silicatos y aluminosilicatos de calcio y de otras bases, que es desarrollado en condición de fundición en forma simultánea con el hierro en hornos de fundición. Las escorias de alto horno enfriadas al aire son el material resultante de la solidificación de las escorias de alto horno líquidas bajo condiciones atmosféricas; el subsecuente enfriamiento puede ser acelerado por aplicación de agua a la superficie solidificada. Las escorias de alto horno expandidas son el material liviano y celular obtenido por un proceso controlado

de tratamiento de la escoria fundida con agua u otros agentes tales como el vapor o aire comprimido, o ambos. Las escorias granuladas son el material granular vítreo que se forma cuando la escoria derretida es rápidamente enfriada por inmersión en agua.

Un cemento hidráulico consiste esencialmente en una mezcla íntima y uniforme de escoria de alto horno granulada y cal hidráulica; o en una mezcla íntima y uniforme de cemento portland y escoria de alto horno finamente granulada, cemento portland y puzolana, o cemento portland con escoria de alto horno y puzolana, producida por la molienda íntima de clinker de cemento portland con los otros materiales o por la mezcla de cemento portland con los otros materiales, o una combinación de molienda y mezcla.

El cemento Portland de escoria es un cemento hidráulico consistente de una mezcla íntima de clinker de cemento Portland y escoria, o una mezcla íntima y uniforme de cemento Portland y escoria, en la cual la cantidad de escoria constituyente esta dentro de los límites especificados.

El cemento de escorias es un cemento hidráulico consistente de una mezcla íntima y uniforme de escoria y cal hidráulica en la cual la escoria constituye un porcentaje mínimo.

1.3.- PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS

La composición de la escoria es determinada por las impurezas presentes en el horno. La sílice, el calcio, aluminio, magnesio y oxígeno constituyen el 95% o más de la escoria de alto horno. La variabilidad es mínima en la composición del hierro y la escoria. La Tabla 8.1 indica el rango de análisis químico de los elementos, reportados como óxidos en escorias de alto horno producida en Estados Unidos y Canadá en 1988.

La acción cementante de una escoria granulada depende en gran medida del contenido de vidrio. Las escorias enfriadas lentamente son predominantemente cristalinas y por tanto no poseen propiedades cementantes significativas.

Composición química

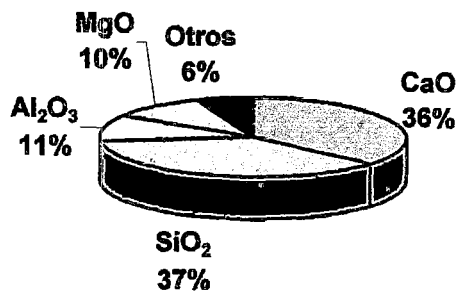


Imagen 8.1: Composición química de las escorias en el Perú

1.4.- ESPECIFICACIONES

La Norma ASTM C 989 proporciona tres grados de resistencia de las escorias, dependiendo de su respectiva resistencia de mortero cuando son mezcladas con una masa igual de cemento portland. La clasificación son los Grados 120, 100, y 80 basados sobre el índice de actividad de la escoria. La clasificación es acorde con la Tabla 8.2 adaptada a la Norma ASTM C 989.

1.5.- ACTIVIDAD HIDRÁULICA

El principal producto de hidratación que se forma cuando las escorias son mezcladas con cemento portland y agua es silicato de calcio hidratado (CSH). En el diagrama ternario de la Figura 8.1 se aprecia que el cemento portland y la escoria se encuentran en el mismo campo, aunque el del cemento portland es rico en C3S, mientras que las escorias se encuentran en el campo del C3S. Cuando las escorias son mezcladas con agua, la hidratación inicial es mucho mas lenta que el cemento portland cuando es mezclado con el agua; por lo

tanto, el cemento portland o las sales alcalinas de la cal son empleados para incrementar la magnitud de la reacción.

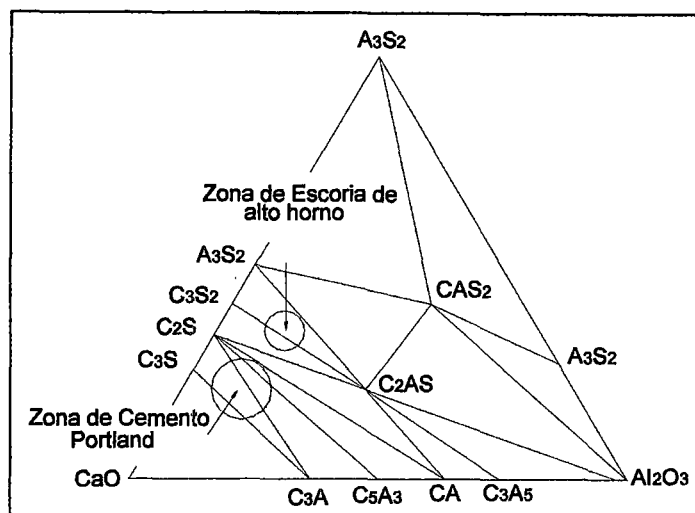


Figura 8.1: Diagrama Ternario que indica la composición de cemento portland y escoria de altos hornos en el sistema $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$.
(Fuente: ACI 2331R-95 "Ground Granulated Blast-Furnace Slag as a Cementitious Constituent in Concrete"; Fig. 1.3, pág. 5)

La hidratación de las escorias en presencia del cemento portland depende principalmente de la capacidad de rotura y disolución de la estructura vítrea de las escorias por los iones hidroxilos que se desprenden durante la hidratación del cemento portland. En la hidratación de las escorias, estas reaccionan con los álcalis y el hidróxido de calcio para producir CSH adicional. La reacción inicial es limitada, hasta que hay disponibilidad de álcalis, hidróxido de calcio o sulfatos.

La hidratación de las escorias en combinación con el cemento portland a temperatura normal tiene dos etapas. Inicialmente y durante la primera hidratación, la reacción predominante es con el hidróxido alcalino, pero la reacción siguiente es predominante con el hidróxido de calcio. Con incrementos en la temperatura, los hidróxidos alcalinos del cemento tienen mayor solubilidad; por lo tanto ellos predominan en promover la reacción inicial de las escorias, siendo este capaz de liberar grandes cantidades de álcalis en el CSH debido a que la relación del calcio a la sílice del CSH formada por la escoria es menor que la formada por el cemento portland.

1.6.- FACTORES QUE DETERMINAN LAS PROPIEDADES CEMENTANTES

Los principales factores que deberán influir en la efectividad del uso de las escorias en los cementos hidráulicos son:

- a) Composición química de las escorias.
- b) Concentración de álcalis del sistema.
- c) Contenido de vidrio de las escorias.
- d) Fineza de las escorias y del cemento Pórtland.
- e) Temperatura en la fase inicial del proceso de hidratación.

La complejidad del sistema de reacción sugiere que la evaluación de la trabajabilidad, características de resistencia, y durabilidad son las medidas mas satisfactorias de la efectividad de la escoria empleada. El índice de actividad de la escoria se emplea como un criterio de base para evaluar el potencial cementante de una escoria. El comportamiento para el cumplimiento de requisitos determinados deberá basarse en ensayos de concreto incluyendo los mismos materiales que se pretende emplear en obra.

2.- ALMACENAMIENTO; MANEJO Y DOSIFICACIÓN

Las escorias deberán ser almacenadas en silos para proporcionar protección contra daños y contaminación. Cuando se emplea silos con compartimentos, deberá efectuarse chequeos periódicos para evitar la contaminación del material almacenado.

Las escorias son manejadas con la misma clase de equipo que el cemento portland. Vaciado y limpieza periódicos son recomendables.

Las escorias deberán ser dosificadas por peso de acuerdo con los requerimientos del ACI 304R y ASTM C 94. Cuando la escoria es dosificada

acumulativamente en el mismo equipo de pesado que el cemento, la escoria deberá seguir en el pesado al cemento. Cuando las escorias son introducidas en la mezcladora, es preferible introducirlas conjuntamente con los otros componentes de la mezcla de concreto.

3.- PROPORCIONAMIENTO DEL CONCRETO

3.1.- PROPORCIONAMIENTO CON ESCORIAS

En la mayoría de los casos las escorias han sido empleadas en proporción del 25% al 75% por masa del material cementante total. Las proporciones de la escoria se eligen según los propósitos para los cuales el concreto va a ser empleado, la temperatura de curado, el grado de la escoria, y el cemento Portland u otro activador. Cuando las escorias son mezcladas con cemento Portland, la combinación de materiales cementantes dará por resultado propiedades físicas que son características del material predominante. Conforme el porcentaje de la escoria se incrementa, deberá esperarse una menor ganancia de resistencia, especialmente en las edades iniciales, salvo que la cantidad de agua sea sustancialmente reducida o se emplee un acelerante como elemento de curado.

El óptimo porcentaje de escorias que produce la mayor resistencia a los 28 días parece ser del 50% del material cementante total, aunque esta relación puede variar dependiendo del grado de la escoria. Otras consideraciones que pueden determinar la proporción de la escoria a ser empleada deberán depender de los requerimientos de control de la elevación de temperatura, tiempo de fraguado y acabado, resistencia a los sulfatos y el control de la expansión debida a la reacción álcali-sílice.

Cuando se requiere una alta resistencia a los sulfatos, el contenido de escoria deberá ser un mínimo del 50% del total de material cementante, a menos que ensayos de laboratorio con la escoria elegida demuestren que un menor porcentaje puede ser adecuado.

Las técnicas de proporcionamiento para la incorporación de escorias al concreto son similares a las empleadas para proporcionar concretos preparados con cemento portland o cementos mezclados. Los métodos de proporcionamiento se dan en la recomendación ACI 211.1. Se permite cambios en el volumen de sólidos debido a la diferencia en la gravedad específica de las escorias (2.85 a 2.94) y el cemento portland (3.15).

Las escorias tienen mayor plasticidad y facilidad de compactación, por lo tanto puede emplearse mayor volumen de agregado grueso para reducir la demanda de agua. Un incremento en el agregado grueso puede ser deseable dado que reduce la contracción de la mezcla de concreto, especialmente cuando se emplean altos contenidos de cemento. Las escorias usualmente son sustituidas por el cemento Portland en la relación uno a uno y son siempre consideradas en la determinación de la relación agua/material cementante.

La demanda de agua para un asentamiento dado puede generalmente ser 3% a 5% menor que la que se encuentra en concretos sin escorias. Las excepciones serán tenidas en consideración en las mezclas de prueba para los estudios de proporcionamiento.

3.2.- SISTEMAS TERNARIOS

El empleo de un sistema cementante ternario es por razones económicas, pero puede ser empleado para mejorar las propiedades ingenieriles. Entre los efectos de añadir microsílíce a un sistema ternario está el incremento en la resistencia y la reducción en la permeabilidad. En adición las escorias han sido empleadas en combinación con el cemento Portland y el cuarzo molido en albañilería de concreto curada en autoclave.

3.3.- EMPLEO CON ADITIVOS QUÍMICOS

Los efectos de los aditivos químicos sobre las propiedades de los concretos que contienen escorias son similares a aquellos en los concretos preparados con

cemento portland únicamente. Pequeños incrementos en el dosaje de incorporador de aire pueden ser necesarios si la fineza de la escoria es mayor que la del cemento portland. La cantidad de un aditivo reductor de agua de alto rango requerido para producir un concreto fluido es generalmente 25% menor que la empleada en concretos que no contienen escorias. Un retardador dado deberá tener mayor efecto retardante conforme la proporción de escorias en el concreto se incrementa.

4.- EFECTO SOBRE LAS PROPIEDADES DEL CONCRETO FRESCO

4.1.- TRABAJABILIDAD

Los concretos con escorias tienen mejores características en cuanto se refiere a la trabajabilidad y facilidad de colocación, siendo ello debido a las características superficiales de las escorias que crean planos muy suaves en la pasta. Ello también origina que poca o ningún agua pueda ser absorbida por éstas durante el mezclado inicial. Así, los concretos con escorias presentan mayor trabajabilidad debido al incremento de pasta y de la cohesividad de la mezcla.

Las propiedades reológicas de las pastas con escorias son mejores, indicando una mejor dispersión de las partículas y mayor fluidez de las pastas y el mortero. Los concretos con escoria pueden ser mas fácilmente consolidados por compactación mecánica que los que no la contienen. En todos los casos, la mayor facilidad de manejo de los concretos que contenían 50% de escorias fue superior a la de los concretos sin escoria.

En la figura 8.2 se observa un incremento en el asentamiento en las mezclas con escorias para el mismo contenido de agua. Conforme la escoria se incrementa, la relación agua-material cementante puede reducirse manteniendo las propiedades de trabajabilidad similares a las de los concretos con 0% de escorias. Se ha comprobado que el asentamiento se incrementa significativamente con incrementos en el reemplazo por la escoria.

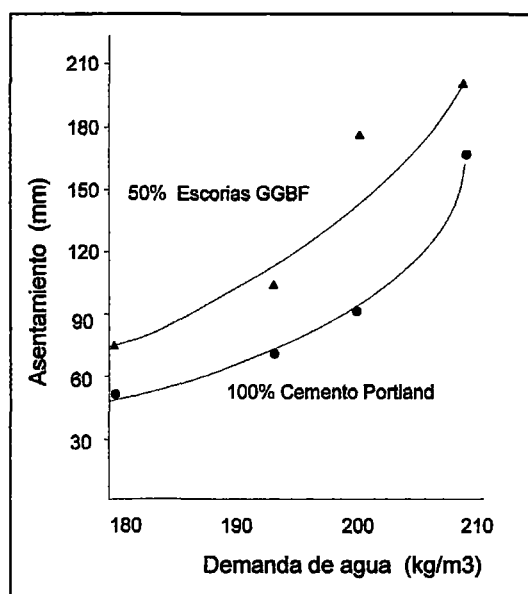


Figura 8.2: Efecto del contenido de agua sobre el asentamiento de mezclas de concreto con y sin escoria GGBF (25.4 mm = 1 in.; 1 kg/m³ = 169 lb/yd³)
(Fuente: ACI 2331R-95 "Ground Granulated Blast-Furnace Slag as a Cementitious Constituent in Concrete"; Fig. 4.2, pág. 8)

4.2.- TIEMPO DE FRAGUADO

Puede esperarse un incremento en el tiempo de fraguado cuando se emplea escorias como reemplazo del cemento en las mezclas. El incremento depende de la temperatura inicial del concreto, la proporción de mezcla empleada, la relación agua/material cementante, y las características del cemento portland. En general el tiempo de fraguado inicial se prolonga en media a una hora a temperaturas de 23°C, sin cambios a 29°C. Los acelerantes pueden reducir o eliminar estos efectos en bajas temperaturas. En altas temperaturas puede ser deseable una mas lenta longitud de fraguado, pero debe tenerse cuidado para minimizar el agrietamiento por contracción plástica.

4.3.- EXUDACIÓN

El efecto de las escorias sobre la exudación de la mezcla depende de la fineza de la escoria cuando se la compara con la del cemento, así como el efecto combinado de estos dos cementantes. Si la escoria es más fina que el cemento y es sustituida sobre la base de masas iguales, la exudación se reduce.

Inversamente, si la escoria es más gruesa, la magnitud y velocidad de la exudación pueden incrementarse. El tiempo de fraguado y la calidad no absorbente de las escorias densas pueden contribuir al incremento de la exudación.

4.4.- MAGNITUD DE LA PERDIDA DE ASENTAMIENTO

La pérdida de asentamiento debida al empleo de las escorias es muy pequeña. Los concretos con escoria al 50% rinden perdidas de asentamiento iguales a las de los concretos sin escoria. Las perdidas de asentamiento son reducidas, especialmente cuando el cemento empleado en la mezcla presenta perdidas rápidas de asentamiento tales como las que se presentan por características de falsa fragua del cemento.

5.- EFECTO SOBRE LAS PROPIEDADES DEL CONCRETO ENDURECIDO

5.1.- RESISTENCIA

Los concretos de cemento Portland en los que se ha empleado escoria de Grado 120 presentan una reducción en la resistencia inicial a 1 y 3 días y un incremento a edades mayores de 7 días. Con escorias de Grado 100 se obtiene bajas resistencias en edades tempranas (1 a 21 días), pero igual o mayor resistencia en edades posteriores. Las escorias de Grado 80 reducen la resistencia en todas las edades.

El efecto de las escorias sobre la resistencia depende de su índice de actividad y de la magnitud de su empleo en la mezcla. La resistencia de morteros al 50% depende del Grado de la escoria, ver Figura 8.3. Factores que pueden afectar el comportamiento de las escorias en el concreto son la relación agua/material cementante, las características físicas y químicas del cemento portland, y las condiciones de curado. El porcentaje de ganancia de resistencia

alcanzado con una escoria de Grado 120 es mucho mayor en mezclas que tienen una alta relación agua-material cementante que el que alcanzaría en mezclas con una baja relación agua-material cementante.

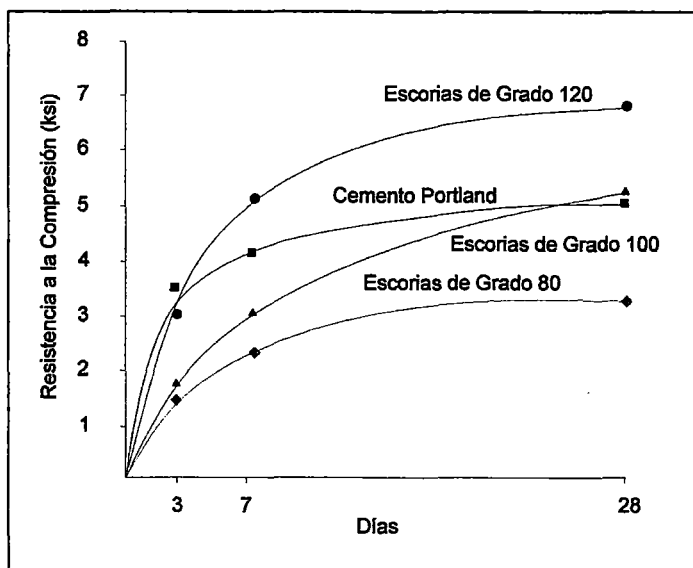


Figura 8.3: Relaciones de resistencia de morteros conteniendo una escoria típica GGBF que cumple con la norma ASTM C 989, comparada con un mortero de cemento portland (1 ksi = 6.89 MPa)

(Fuente: ACI 2331R-95 "Ground Granulated Blast-Furnace Slag as a Cementitious Constituent in Concrete"; Fig. 5.1, pág. 8)

La temperatura de curado tiene efecto importante sobre la resistencia, especialmente en edades iniciales. Los concretos con escorias tienen un excelente comportamiento en curados bajo elevadas temperaturas. Se han reportado resistencias que exceden las del concreto al día y edades posteriores para condiciones de curado acelerado. Inversamente, la reducción de la resistencia en edades iniciales puede esperarse cuando los concretos con escorias han sido curados a temperaturas normales o bajas.

La proporción de escorias también afecta la resistencia y la magnitud de su ganancia. Con escorias altamente activas, las mayores resistencias a los 28 días se encuentran para mezclas de 40% a 50%, ver Figura 8.4. Para resistencias tempranas, la magnitud de la ganancia de resistencia es inversamente proporcional a la cantidad de escoria empleada, ver Figura 8.5. En la resistencia en flexión (Módulo de Rotura) se aprecian incrementos a edades

mas allá de los 7 días, debido fundamentalmente a un incremento en la densidad de la pasta y una mejora en la adherencia en la interfase pasta-agregado.

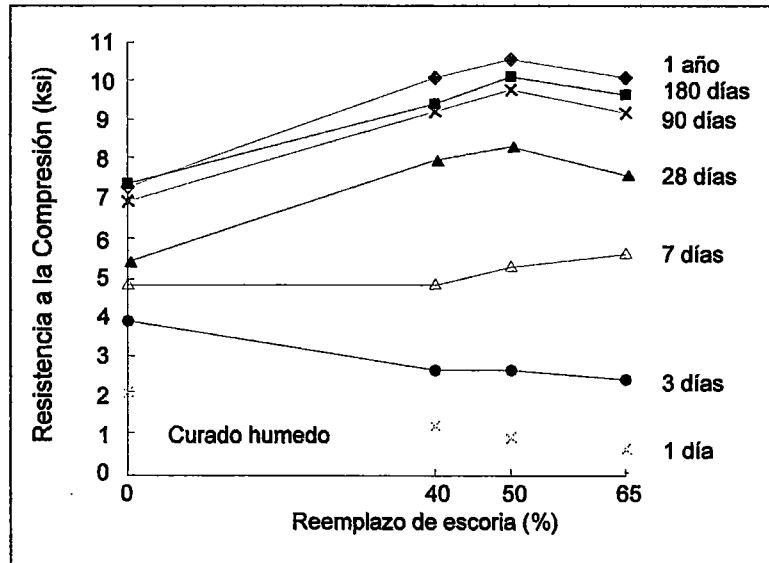


Figura 8.4: Influencia del reemplazo de escoria GGBF sobre la resistencia en compresión de cubos de mortero (Hogan y Meusel 1981) (1 ksi = 6.89 MPa).
 (Fuente: ACI 2331R-95 "Ground Granulated Blast-Furnace Slag as a Cementitious Constituent in Concrete"; Fig. 5.3, pág. 9)

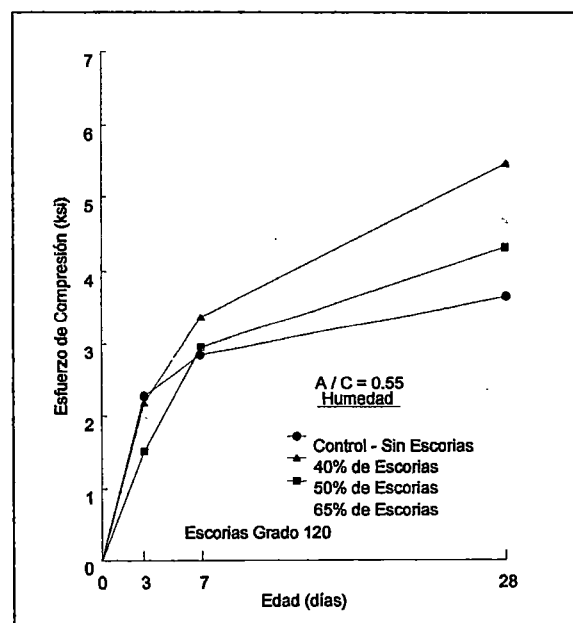


Figura 8.5: Resistencia a la Compresión del concreto que contiene diversas mezclas de escorias GGBF, comparado con concretos en que se usa únicamente cemento Portland como material cementante (Hogan y Meusel 1981) (1 ksi = 6.89 MPa).
 (Fuente: ACI 2331R-95 "Ground Granulated Blast-Furnace Slag as a Cementitious Constituent in Concrete"; Fig. 5.4, pág. 10)

5.2.- MODULO DE ELASTICIDAD

Se ha encontrado el mismo módulo de elasticidad en concretos que contenían cemento portland con escoria de alto horno cuando se comparo con concreto preparado con cemento portland Tipo I.

5.3.- ESCURRIMIENTO Y CONTRACCIÓN

En los casos de la contracción y el escurrimiento plástico del concreto, algunos investigadores han encontrado pocas diferencias cuando los cemento portland con escoria de alto horno fueron comparados con los cementos portland. Otros han informado mayor escurrimiento plástico y contracción cuando se empleó diversas mezclas de escorias. Se ha concluido que el incremento en la contracción puede ser debido al mayor volumen de pasta en el concreto cuando la escoria es sustituida sobre la base de igual masa.

5.4.- INFLUENCIA DE CURADO

El concreto con escorias deberá ser mantenido en condiciones favorables de humedad y temperatura durante su primera etapa, a fin de permitirle desarrollar su potencial de resistencia y durabilidad. El concreto, ya sea mezclado con escorias o como ingrediente separado, experimenta pérdida de resistencia de la misma magnitud cuando el curado se detiene a los 3 días. Cuando la escoria es mayor del 30% el concreto es más susceptible a las condiciones de curado pobre que los concretos sin escoria. Estos resultados se atribuyen a una reducción en la formación de hidratos y a incrementos en la pérdida de humedad. La magnitud y grado de hidratación son afectados por la pérdida de humedad a edades tempranas, con una disminución de la ganancia de resistencia. Se aconseja seguir los procedimientos de la Recomendación ACI 308.

5.5.- COLOR

Las escorias tienen un color ligeramente diferente al de los concretos de cemento portland y deberá producir un color muy liviano en el concreto después del curado. Durante el lapso del segundo al cuarto día después de vaciado,

puede aparecer una coloración con tonalidad de azul a verde la cual disminuye con la edad conforme la oxidación tiene lugar. Esta coloración es atribuida a la reacción de los sulfuros en la escoria con componentes del cemento, dependiendo su grado de la magnitud de la oxidación, el porcentaje de escoria empleado, las condiciones de curado, y la porosidad de la superficie del concreto.

Si el color es importante se puede corregir mediante el tiempo de exposición al aire, la luz del sol, o procesos de humedecimiento y secado que favorezcan la oxidación en la superficie del concreto. Si el concreto con escorias está continuamente expuesto al agua dará una coloración azul. El interior del concreto deberá retener una coloración azul verdosa por un tiempo considerable, la cual se aprecia en el ensayo de especímenes en compresión cuando ellos son rotos. Cuando sus caras son expuestas a la atmósfera, ellos oxidan a un color uniforme.

5.6.- EFECTO DE LA TEMPERATURA

La presencia de escorias en el concreto reduce la elevación de temperatura en concreto masivo. De acuerdo a los ensayos de la Norma ASTM C 186, las mezclas con escorias producen mayor acumulación de calor. La incorporación de escorias a las mezclas reduce la magnitud inicial en la generación de calor, esta reducción es directamente proporcional a la proporción de escoria empleada. El calor de hidratación depende del cemento portland empleado y de la actividad de la escoria. Se puede esperar una reducción en el calor de hidratación cuando las escorias se emplean para reemplazar igual cantidad de cemento.

Mezclas de 35% a 55% de escorias producen un calor total mayor que el de las mezclas de cemento portland, aun cuando la elevación de calor fue mas lenta. Cuando se emplea mezclas de escorias muy activas, puede ser necesaria la proporción de reemplazo del 70% de escorias para cumplir con los requerimientos de bajo calor de hidratación, cuando este se evalúa por el Método ASTM C 186.

5.7.- PERMEABILIDAD

La permeabilidad de concretos con escorias se reduce significativamente cuando se la compara con concretos que no la contienen. A mayor contenido de escorias menor permeabilidad. La estructura de poros de la matriz cementante es cambiada durante la reacción de las escorias con el hidróxido de calcio y los álcalis durante la hidratación del cemento Portland. Los poros en el concreto normalmente contienen hidróxido de calcio y son, en parte, llenados con silicato de calcio hidratado. "La permeabilidad del concreto depende de su porosidad y de la distribución de poros por tamaños"

Cuando se emplea escorias la reducción en el tamaño de los poros se nota antes de los 28 días después de mezclado, ver Figura 8.6. La reducción de la permeabilidad se aprecia cuando concretos de material cementante y proporción de escorias variables fueron evaluados por difusión de cloruros durante un periodo de 2 años.

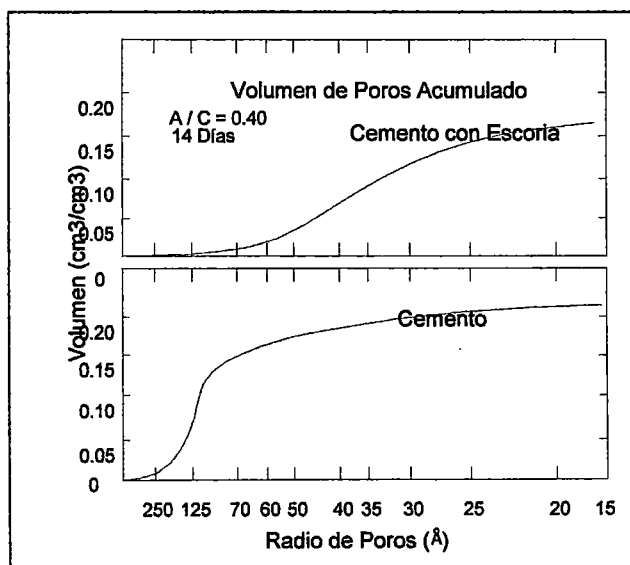


Figura 8.6: Comparación de la distribución de poros por tamaños de pastas que contienen cemento Portland y pastas que contienen 40% de escorias y 60% de cemento Portland, ensayado por incorporación de mercurio (Roy y Parker 1983)
(Fuente: ACI 2331R-95 "Ground Granulated Blast-Furnace Slag as a Cementitious Constituent in Concrete"; Fig. 5.8, pág. 13)

5.8.- RESISTENCIA AL ATAQUE DE SULFATOS

Si la proporción de escorias excede del 50% del total de material cementante se puede obtener altas resistencias a los sulfatos cuando se emplea cemento Tipo II. Las mezclas de 50% de escorias y cemento portland Tipo I, con mas del 12% de C3A, tienen una resistencia a los sulfatos equivalente a la de los cementos Tipo V. Los cambios que mejoran la resistencia a los sulfatos del concreto incluyen:

- a) Los incrementos en la resistencia a los sulfatos no solo dependen del contenido del contenido de C3A sino también del contenido de alúmina de la escoria.
- b) Cuando el contenido de alúmina de la escoria es menor del 11% se aprecia un incremento en la resistencia a los sulfatos independientemente del contenido de C3A del cemento cuando se emplea escorias entre 20% y 50%.
- c) Si se tiene una reducción del hidróxido de calcio soluble en la formación de los hidratos del silicato de calcio, las posibilidades de formación del sulfoaluminato de calcio (etringita) se reducen.
- d) La resistencia al ataque por sulfatos depende de la permeabilidad del concreto o la pasta. La formación de silicato de calcio hidratado en los poros, normalmente ocupados por álcalis e hidróxido de calcio, reduce la permeabilidad de la pasta y previene la introducción de sulfatos agresivos.

5.9.- REDUCCIÓN DE LA EXPANSIÓN ÁLCALI-SÍLICE

El empleo de escorias como reemplazo parcial del cemento reduce la expansión potencial del concreto debido a la reacción álcali-sílice en aquellos casos en que la escoria ha sido empleada en cantidades mayores del 40% del

material cementante total cuando se emplean cementos que tienen un contenido de álcalis hasta el 1%. Cuando el contenido de escoria está en el orden del 40% al 65% del material cementante total, la expansión virtualmente es eliminada cuando se ensaya de acuerdo a ASTM C 227. Resultados similares se han obtenido cuando se emplea cemento portland con escoria de alto horno.

5.10.- RESISTENCIA A LA CONGELACIÓN Y DESHIELO

La resistencia a la congelación es esencialmente la misma cuando los concretos preparados con cemento portland de escoria de altos hornos son ensayados en comparación con los cementos Tipo I y Tipo II. Como en el caso de los concretos con cemento hidráulico es necesario un contenido de aire adecuado y un espaciamiento de burbujas para obtener una buena protección en ambientes favorables a la congelación.

Los concretos con aire incorporado que contienen escoria como un 50% del total de material cementante tienen resistencias a la congelación, aunque se aprecia una diferencia mensurable en pérdida de peso cuando se los compara con los concretos hechos con cemento portland Tipo II y son ensayados de acuerdo a la Norma ASTM C 666.

5.11.- RESISTENCIA A LA CORROSIÓN

La reducción en la permeabilidad y la resistencia al ingreso de cloruros se incrementan conforme el nivel de escorias se incrementa en la mezcla de concreto. El empleo de escorias se ha encontrado que reduce la permeabilidad del concreto en un importante orden de magnitud.

Se ha considerado el peligro potencial de los efectos de los sulfatos en las escorias. Se ha demostrado que su empleo no tiene efectos negativos sobre la corrosión del acero. Igualmente se ha encontrado que una ligera reducción en el pH de la solución de poros no tiene impacto negativo sobre la pasividad del acero de refuerzo, y que el empleo de escorias en concreto de buena calidad,

reduce la permeabilidad del concreto, reduciendo así la penetración de cloruros y dióxido de carbono los cuales promueven la corrosión del acero.

6.- USO DE LAS ESCORIAS EN MORTEROS Y CONCRETO

6.1.- INTRODUCCIÓN

Los cementos IS son equivalentes al cemento Portland Tipo I y son empleados en todas las aplicaciones del concreto excepto cuando se requiere alta resistencia inicial bajo condiciones normales de curado. Las escorias mezcladas con el cemento portland pueden ser empleadas en todas las aplicaciones y procesos. El empleo de diferentes mezclas de escorias depende de la calidad deseada para el concreto y lo que es más importante para el diseñador y fabricante del concreto.

6.2.- CONCRETO PREMEZCLADO

En los concretos premezclados se puede emplear hasta el 50% del total de material cementante en tiempo caluroso y escorias altamente activas, obteniéndose mayores resistencias y costos más favorables. En climas fríos se recomienda proporciones del 20% al 30%. En resistencia a los sulfatos o elevación de bajas temperaturas puede emplearse mas del 50% de escorias son recomendables. Cuando se requiere resistencias iniciales altas para rápido retiro del encofrado, o vaciado de secciones delgadas en bajas temperaturas, se recomienda mezclas conteniendo menos del 50%.

Ventajas particulares del empleo en concreto premezclado incluyen un incremento en la flexibilidad para cumplir los requisitos del trabajo; una reducción en el costo del material cementante; un aumento de trabajabilidad; una reducción de la pérdida de la resistencia del concreto sujeto a climas cálidos; un incremento en la resistencia en compresión y flexión cuando se emplea escoria de Grado 120 ó Grado 100.

6.3.- PRODUCTOS PREFABRICADOS

En concretos prefabricados se aplican escorias en el orden del 40 a 60% de material cementante. Las escorias responden favorablemente al curado acelerado y pueden obtenerse incrementos en la resistencia al día cuando se emplea escorias de Grado 120 con temperaturas de curado que exceden los 54°C. El empleo de escorias es también beneficioso en aquellos productos hechos con mezclas de concreto sin asentamiento, en los que el incremento en la trabajabilidad durante la compactación mecánica permite una reducción en la demanda de agua, dando usualmente por resultado mayor densidad y resistencia.

6.4.- MORTEROS Y LECHADAS

El empleo de escorias mejora la resistencia, permeabilidad, flujo, y características de cohesividad de los morteros y lechadas. La proporción de escorias es similar a la empleada en la producción de concreto.

Tabla 8.1: Rango de composición química de las Escorias de alto horno finamente granuladas en los Estados Unidos y Canadá

Componentes químicos (como óxidos)*	Rango de porcentaje de composición por masa
SiO ₂	32-42
Al ₂ O ₃	7-16
CaO	32-45
MgO	5-15
S	0.7-2.2
Fe ₂ O ₃	0.1-1.5
MnO	0.2-1.0

*Excepto para azufre

(Fuente: ACI 233R-95, "Ground Granulated Blast-Furnace Slag as a Cementitious Constituent in Concrete", Tabla 1.1, pág 3)

Tabla 8.2: Índice de actividad estándar de las escorias para diversos grados prescritos en la Norma ASTM C 989

Grado	Índice de actividad de escorias, porcentaje mínimo	
	Promedio de las cinco últimas muestras consecutivas	Cualquier muestra individual
	Índice de 7 días	
80	-	-
100	75	70
120	95	90
	Índice de 28 días	
80	75	70
100	95	90
120	115	110

(Fuente: ACI 233R-95, "Ground Granulated Blast-Furnace Slag as a Cementitious Constituent in Concrete", Tabla 1.2, pág 4)

CAPITULO IX

CENIZAS

CAPITULO IX

CENIZAS

1.- CONCEPTO GENERAL

1.1.- INTRODUCCIÓN

Las cenizas, subproducto de la combustión del carbón, se emplean como ingrediente cementante y puzolánico en los concretos de cemento portland, ya sea como ingrediente de dosificación separado o como componente del cemento mezclado. De acuerdo al ACI 116R las cenizas son: el residuo finamente dividido resultante de la combustión del carbón, ya sea este en polvo o en trozos, el cual es transportado desde su almacenamiento por los gases de combustión.

Los romanos emplearon cenizas volcánicas con cal, agregado y agua para producir mortero y concreto, actualmente el cemento ha reemplazado a la cal. Las cenizas poseen grado variable de valor cementante y, cuando el concreto que contiene cenizas es adecuadamente curado, los productos de la reacción química de las cenizas llenan los espacios entre las partículas de cemento hidratadas, disminuyendo la permeabilidad del concreto al agua y los agresivos químicos.

La lenta reacción de las cenizas limita la cantidad de generación de calor inicial y disminuye la elevación de temperatura en estructuras masivas. Mezclas de cenizas adecuadamente dosificadas dan al concreto propiedades que podrían no ser alcanzadas a través de únicamente del empleo de cemento Portland.

Se ha estudiado y aceptado la habilidad de las cenizas para actuar como una medida preventiva contra las reacciones destructivas álcali-agregado y el potencial de las cenizas para mejorar las propiedades del concreto. En el Acápite correspondiente se hará el estudio sobre el efecto de las cenizas en las propiedades del concreto fresco y endurecido.

En la actualidad las cenizas son empleadas en el concreto por muchas razones, incluyendo reducción en los costos, mejoras en la trabajabilidad, reducción en la elevación de temperatura, mejora en la resistencia a los sulfatos, reducción en la expansión debida a la reacción álcali-agregado, y contribución a la durabilidad y resistencia del concreto endurecido.

1.2.- FUENTES DE CENIZAS

Las cenizas son un subproducto del quemado del carbón. En el Perú las cenizas para producción de energía proveniente del carbón se utilizan en la planta termoeléctrica de la ciudad de Ilo. En la actualidad se investigan para su empleo en concreto. Las plantas termoeléctricas que consumen carbón en el Perú son: Central Térmica de MOQUEGUA (EGESUR, Moquegua), Central Térmica CALANA (EGESUR, Tacna), Central Termoeléctrica ILO (ENERSUR).

La Norma ASTM C 618 clasifica a las cenizas, de acuerdo a la suma de sus contenidos de hierro, alúmina y sílice, expresados en forma de óxidos. Las cenizas de la Clase F son producidas por carbón con alto calor, tales como los carbones bituminos y antracíticos. Las cenizas provenientes de estos carbones raramente contienen mas del 15% de óxido de calcio. Las cenizas de la Clase C son sub-bituminosas y contienen mas del 20% de óxido de calcio. Ambas tienen propiedades puzolánicas y cementantes, en grado variable.

Las cenizas Clase F y Clase C muestran diferentes características de comportamiento, aunque el de una ceniza no está determinado únicamente por su clasificación. En general, la resistencia a los sulfatos y la habilidad para mitigar los efectos de la reacción álcali/sílice son función de la fuente proveedora

de carbón. Las características de resistencia impartidas por una ceniza varían ampliamente dependiendo de las propiedades físicas y químicas de ésta.

2.- COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LAS CENIZAS

La composición química en volumen ha sido empleada por la Norma ASTM C 618 para clasificar a las cenizas en 2 tipos; Clase C y Clase F. La composición química en volumen se emplea para determinar el cumplimiento con las recomendaciones de la Norma ASTM 618 pero no es un índice de la naturaleza o reactividad de las partículas.

Un amplio rango existe en la cantidad de los 4 constituyentes principales; óxido de sílice entre el 35% al 60%; óxido de alúmina entre el 10% al 30%; óxido de fierro entre el 4% al 20%; óxido de cal entre el 1% al 35%. Se requiere que la suma de los primeros 3 constituyentes sea mayor del 70% para que una ceniza pueda ser clasificada como ASTM Clase F; mientras que esa suma deberá exceder solamente al 50% para ser clasificada como ceniza ASTM Clase C. Las cenizas de la Clase C generalmente contienen mas del 20% del material reportado como óxido de cal; por lo tanto la suma de los 3 primeros óxidos puede ser significativamente menor que el 70% del limite mínimo de la Clase F.

Aparte de los cuatro principales constituyentes ya mencionados de las cenizas existen elementos menores que pueden estar presentes que incluyen cantidades variables de titanio, fósforo, plomo, cromo, y estroncio. La Tabla 9.1 da valores típicos de la composición química de las cenizas.

3.- EFECTOS SOBRE LAS PROPIEDADES DEL CONCRETO FRESCO

3.1.- TRABAJABILIDAD

El volumen absoluto del cemento mas las cenizas excede normalmente

al de las mezclas de concreto similares que no las contienen. Ello se debe a que las cenizas son de baja densidad y la masa de cenizas empleada es generalmente igual o mayor que la reducida masa de cemento. Aunque depende de las proporciones empleadas, este incremento en el volumen de la pasta produce un concreto con una mayor plasticidad y mejor cohesividad. Además el incremento en el volumen de finos, provenientes de las cenizas, puede compensar las deficiencias del agregado fino.

Las cenizas cambian la capacidad de flujo de la pasta permitiendo, gracias a su perfil esférico, que el agua en el concreto pueda ser reducida para una trabajabilidad dada, especialmente las cenizas de la clase F, las cuales reducen la magnitud de pérdida del asentamiento cuando se las compara con concretos sin cenizas en climas cálidos. Las cenizas de la Clase C tienen una mayor proporción de partículas más finas que 10 μm , lo cual influye favorablemente en la trabajabilidad.

3.2.- EXUDACIÓN

El empleo de cenizas en mezclas de concreto produce una reducción de la exudación al proporcionar una mayor área superficial de partículas sólidas y demandar un menor contenido de agua para una trabajabilidad dada.

3.3.- BOMBEABILIDAD

Cuando se emplean cenizas se aprecia una mejora en la capacidad de bombeo de un concreto. Para mezclas deficientes en los tamaños menores de agregado fino y bajo contenido de cemento, la adición de cenizas hace al mortero o concreto más cohesivo y menos propicio a la segregación y exudación. Mas aún, el perfil esférico de las partículas de cenizas sirve para incrementar la trabajabilidad y bombeabilidad por disminución de la fricción entre partículas y entre el concreto y la línea de bombeo.

3.4.- TIEMPO DE FRAGUADO

El empleo de cenizas puede extender el tiempo de fraguado del concreto si el contenido de cemento es reducido. Las cenizas F retardan la hidratación inicial de los silicatos y se han encontrado iguales resultados con cenizas C. Las características de fraguado del concreto están influenciadas por las temperaturas ambiente y del concreto, tipo de cemento, fuente, contenido y finura; contenido de agua de la pasta, álcalis solubles en agua, uso y dosajes de aditivos u otras adiciones, cantidad de cenizas, así como por la finura y composición química de las cenizas. Si se tiene en consideración todos los factores mencionados se puede obtener un aceptable tiempo de fraguado. La presión sobre los encofrados puede incrementarse cuando se emplea cenizas en el concreto que resultan en un incremento en la trabajabilidad, pérdidas en el asentamiento, o extensión del tiempo de fraguado.

3.5.- ACABADOS

Si el concreto con cenizas tiene un tiempo de fraguado mayor que el de los concretos sin ellas, tales mezclas pueden recibir acabado en un tiempo mayor. Las fallas que pueden presentarse debido a un acabado prematuro pueden consistir en acumulación de agua debajo de la superficie de coronación y planos de debilidad. Los largos plazos de fraguado pueden incrementar la probabilidad de agrietamiento por contracción plástica sobre la superficie bajo condiciones de alta evaporación.

3.6.- AIRE INCORPORADO

El empleo de cenizas en los concretos con aire incorporado deberá requerir un cambio en la dosificación del aditivo. Las cenizas de la Clase C pueden reducir la cantidad de aditivo requerida, especialmente aquellas con una cantidad significativa de álcalis solubles en el agua. Para el contenido de aire constante, el dosaje de aditivo deberá ser incrementado, dependiendo del contenido de carbón y de materia orgánica en la ceniza.

El incremento en el dosaje del aditivo puede aumentar con un incremento en las fracciones gruesas de las cenizas. Las fracciones más finas requieren menos contenido de aditivo que la muestra total, especialmente si las fracciones más gruesas contienen más alto contenido de carbón. Las partículas de carbón en las cenizas pueden absorber aditivo incorporador de aire, reduciendo su efectividad. Aquellas cenizas que requieran un dosaje más alto de aditivo tienden a sufrir una mayor pérdida de aire en el concreto fresco. La agitación del concreto es un pre-requisito para que la pérdida de aire continúe.

La pérdida de aire depende de las propiedades y proporciones de las cenizas, cemento, agregado fino, duración del tiempo de mezclado y tipo de incorporador de aire empleado. Para una ceniza dada, el contenido de aire mas adecuado puede ser alcanzado por una combinación cemento-agregado fino que tenga los más altos requerimientos de aditivo incorporador de aire. Un cambio en las cenizas que requiere un dosaje de aditivo más alto para obtener el contenido de aire especificado es más sensible a causar pérdidas de aire en la mezcla si es agitada o manipulada por un periodo dado.

La alta pérdida por calcinación de las cenizas puede ser un indicador de los problemas causados por la pérdida de aire, pudiendo el problema confinarse a las cenizas de Clase F de bajo contenido de CaO. El ensayo de índice de espumas puede emplearse para comprobar sucesivos embarques de cenizas a fin de detectar cambios en el dosaje requerido de agente incorporador de aire.

4.- EFECTOS SOBRE LAS PROPIEDADES EN LA MEZCLA ENDURECIDA

4.1.- RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN Y GANANCIA DE RESISTENCIA

La resistencia y magnitud de la ganancia son afectadas por las características de la ceniza, el cemento, y las proporciones de cada uno en el

concreto. La interrelación entre las resistencias a la tensión y compresión del concreto con cenizas no difieren de las del concreto sin ellas. Los concretos con cenizas Clase F pueden desarrollar resistencias mas bajas a los 7 días, a la temperatura ambiente del recinto.

Las microsílices pueden ser empleadas en concretos con cenizas para incrementar la resistencia en las edades iniciales. Su empleo simultaneo da un incremento continuo en las resistencias a los 56 y 91 días indicando la presencia de suficiente ion calcio tanto para la reacción de las microsílices como para que la reacción de las cenizas continúe. El incremento en la resistencia inicial puede ser alcanzado en concretos con cenizas empleando aditivos reductores de agua de alto rango para reducir la relación agua-material cementante a valores tan bajos como 0.28

La continua actividad puzolánica de las cenizas contribuye a incrementar la ganancia de resistencia en edades posteriores del concreto si éste se mantiene húmedo permitiendo que un concreto con cenizas y baja resistencia inicial pueda tener equivalente o más alta resistencia en edades posteriores, cuando se lo compara con concretos sin cenizas. Empleando la resistencia a los 28 días como referencia se han reportado incrementos del 50%, si se los compara con incrementos del 30% en un año para concretos que no contenían cenizas.

Las cenizas de la Clase C exhiben una mayor magnitud de reacción a edades tempranas que las cenizas de Clase F. En todos los casos la actividad puzolánica se incrementa en todas las edades proporcionalmente con el porcentaje que pasa la malla de 45 μm . Las cenizas de la Clase C dan buenos resultados a los 28 días, aunque pueden no mostrar la resistencia en las edades finales típica de las cenizas de la Clase F, ver Figura 9.1.

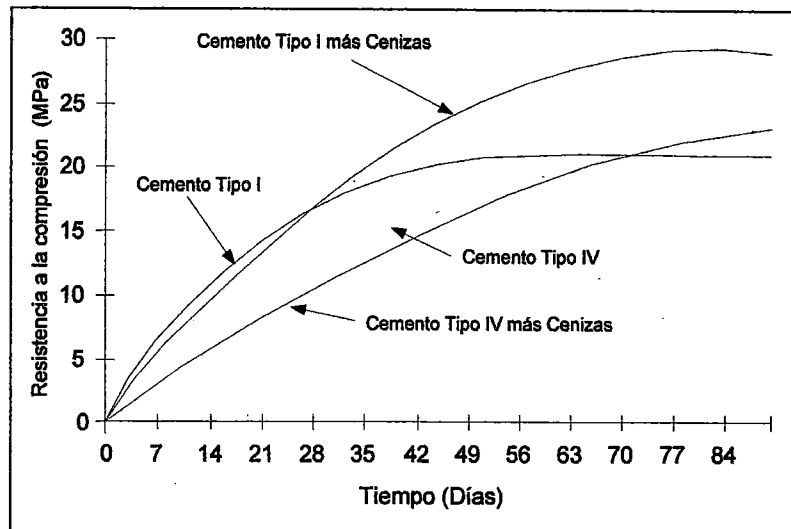


Figura 9.1: Magnitud de la ganancia de resistencia para diferentes materiales cementantes: cenizas de la clase F (Samarin, Munn, y Ashby 1983)
(Fuente: ACI 232.2R-96 "Use of Fly Ash in Concrete "; Fig. 3.1, pág. 12)

Los cambios en la marca de cemento pueden modificar la resistencia del concreto cuando se emplea cenizas de la Clase F en porcentajes del 20%. Un cemento con contenido de álcalis del 0.6% o mas puede comportarse mejor con cenizas para resistencias medidas mas allá de los 28 días, aunque en este caso se recomienda emplear cemento de bajo contenido de álcalis, aun si se emplea cenizas.

4.2.- MÓDULO DE ELASTICIDAD

El módulo de elasticidad de concretos preparados con cenizas de la Clase F es algo mas bajo en las primeras edades y ligeramente mas alto en las edades posteriores que el de concretos similares sin cenizas. Los estudios indican que las características del cemento y agregados tendrán un mayor efecto sobre el módulo de elasticidad que el empleo de cenizas. La Figura 9.2 muestra una comparación esfuerzo-deformación para concretos con y sin cenizas con agregado grueso de tamaño máximo nominal de $\frac{3}{4}$ ".

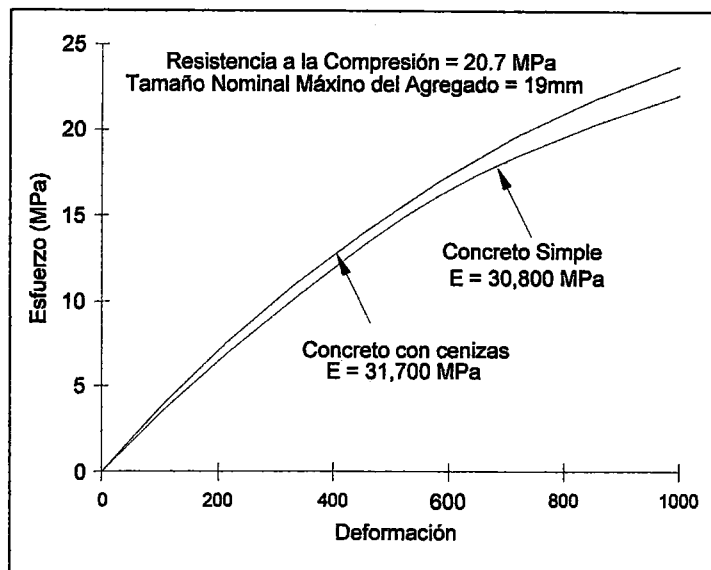


Figura 9.2: Reacción Esfuerzo-deformación a los 90 días (TVA Technical Report CR-81-1)
(Fuente: ACI 232.2R-96 "Use of Fly Ash in Concrete "; Fig. 3.3, pág. 13)

4.3.- DEFORMACIÓN

La magnitud y velocidad de deformación en el concreto dependen de la temperatura y condiciones de humedad ambiente, resistencia del concreto, módulo de elasticidad, contenido de agregados, edad del concreto al momento de la carga, y la relación del esfuerzo sostenido a la resistencia en el momento de la carga. El efecto de las cenizas sobre la deformación del concreto está limitado principalmente a la extensión en que las cenizas influyen en la resistencia última y la magnitud de la ganancia de resistencia.

Los concretos con un volumen dado de cemento mas cenizas cargados a los 28 días o menos a un esfuerzo constante deberán presentar una deformación mas alta que la de concretos que tienen igual volumen de cemento únicamente, debido a la menor resistencia de las cenizas al momento de la carga. Sin embargo, los concretos con cenizas proporcionados para tener la misma resistencia a la edad de carga como los concretos sin cenizas producen mayor deformación en todas las edades posteriores.

Si los especímenes, con y sin cenizas, son sellados para prevenir pérdidas de humedad, simulando las condiciones del concreto masivo, los valores de la deformación son esencialmente iguales después de carga a la edad de un año. Cuando especímenes sellados de igual resistencia son también cargados un año, los valores de la deformación de los concretos que contienen cenizas fueron únicamente la mitad de aquellos medidos para concretos sin cenizas.

Se ha demostrado que si concretos con y sin cenizas de la Clase F. con resistencias equivalentes a los 28 días, son igualmente cargados a la misma edad, los concretos con cenizas deberán presentar menor deformación debido a la mayor magnitud de la resistencia lateral común a la mayoría de los concretos con cenizas.

La deformación del concreto con cenizas de la Clase C, con 20% de reemplazo es la misma; por encima del 20% la deformación se incrementa con el aumento en el contenido de cenizas.

4.4.- ADHERENCIA DEL CONCRETO

La adherencia del concreto con el acero depende del área superficial del acero en contacto con el concreto, la ubicación del refuerzo, y la densidad del concreto. Las cenizas aumentan el volumen de pasta y reducen la exudación y por ello, el contacto en la interfase menor en la que el agua típicamente se almacena puede incrementarse, dando por resultado una mejora en la adherencia. La longitud de desarrollo del refuerzo en el concreto es principalmente una función de la resistencia del concreto. Con adecuada consolidación y resistencia equivalente, la longitud de desarrollo del refuerzo en los concretos con cenizas deberá ser, por lo menos, igual a la de los concretos sin cenizas. La adherencia de concretos nuevos y antiguos es poco afectada por el empleo de cenizas.

4.5.- RESISTENCIA AL IMPACTO

La resistencia al impacto del concreto es gobernada principalmente por la resistencia a la compresión del mortero y la dureza del agregado grueso. El empleo de cenizas la afecta únicamente en la extensión en que mejora la resistencia en compresión final.

4.6.- RESISTENCIA A LA ABRASIÓN

La resistencia a la abrasión del concreto es gobernada por la resistencia a la compresión, el curado, el acabado, y las propiedades del agregado. A igualdad de estas propiedades los concretos con o sin cenizas deberán presentar, esencialmente, la misma resistencia a la abrasión.

4.7.- ELEVACIÓN DE TEMPERATURA

La elevación de temperatura en el concreto debido a la reacción química e hidratación del cemento en presencia del agua puede ser reducida por el empleo de cenizas como una parte del material cementante en el concreto, ver Figura 9.3. Si el cemento, gracias a la presencia de cenizas, se reduce también se reduce el calor de hidratación del concreto, especialmente si el volumen de cenizas representa mas del 50% por masa del material cementante, ver Tabla 9.2. Algunas cenizas de la Clase C contribuyen a una elevación temprana de temperatura en el concreto. Cuando el calor de hidratación es de importancia crítica, la mezcla propuesta deberá ser ensayada por elevación de temperatura.

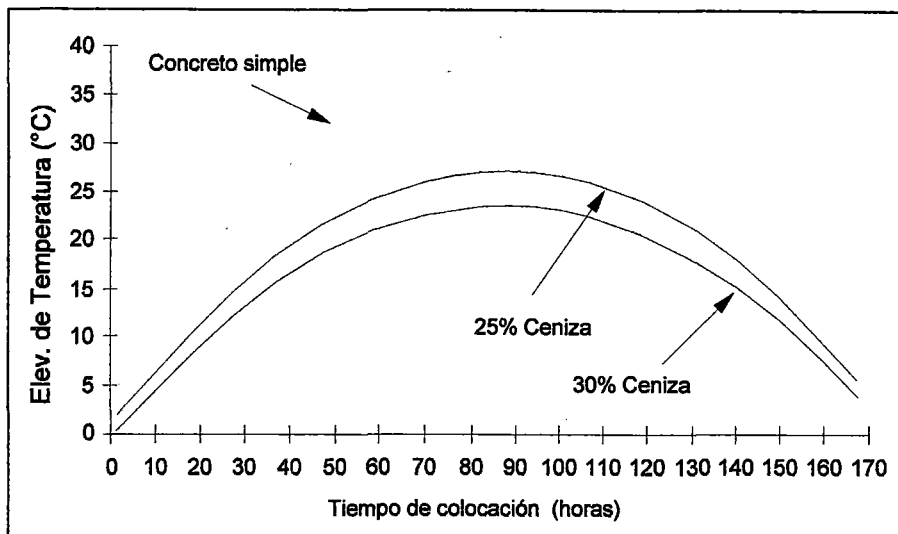


Figura 9.3: Variación de la temperatura con el tiempo en el centro de bloques de concreto de 15m^3 (Samarin, Munn, y Ashby, 1983)
(Fuente: ACI 232.2R-96 "Use of Fly Ash in Concrete"; Fig. 3.4, pág. 14)

4.8.- RESISTENCIA A LAS ALTAS TEMPERATURAS

Con respecto a la exposición del concreto a altas temperaturas sostenidas, el empleo de cenizas no cambia las propiedades mecánicas de este en relación a concretos similares conteniendo únicamente cemento portland, cuando están expuestos a condiciones de altas temperaturas que varían de 170°C a 600°C .

4.9.- RESISTENCIA A LA CONGELACIÓN Y DESHIELO

La resistencia del concreto a daños producidos por procesos de congelación, preparados con o sin cenizas, depende de la adecuación del sistema de vacíos de aire, la estabilidad de volumen del agregado, edad, madurez de la pasta y condición de humedad del agregado. La ganancia de resistencia por el empleo de cenizas Tipo C, se puede emplear más material cementante en mezclas para alcanzar una resistencia comparable a los 28 días. Debe tenerse cuidado en la dosificación de la mezcla a fin de asegurar que el concreto tiene adecuada resistencia durante la primera exposición a ciclos de congelación, esto es cerca de 24 MPa o más.

Sobre la base indicada no se ha encontrado diferencias significativas en la resistencia a la congelación de concretos con o sin cenizas de Clase F o Clase C, no encontrándose degradación del comportamiento cuando se los compara con los concretos de control.

4.10.- PERMEABILIDAD Y PROTECCIÓN CONTRA LA CORROSIÓN

El concreto es permeable al agua en la medida que están interconectados los poros capilares a través de los cuales el agua puede moverse. La permeabilidad es gobernada por factores tales como la cantidad de material cementante, contenido de agua, granulometría del agregado, consolidación, y eficiencia de curado. El grado de hidratación requerido para eliminar la continuidad de los poros capilares de una pasta ordinaria curada bajo condiciones estándar de laboratorio es una función del agua presente en el material cementante y del tiempo. Este varía de 3 días en una relación agua/material cementante (a/mc) de 0.40 y a un año en una a/mc de 0.70.

Gracias a sus propiedades puzolánicas, las cenizas se combinan químicamente con el hidróxido de calcio y el agua para producir C-S-H, reduciendo el riesgo de lechadas de hidróxido de calcio. Adicionalmente, la reacción a largo plazo de las cenizas refina la estructura de poros del concreto para reducir el ingreso de ion cloruro. Como resultado de una estructura de poros mas refinada la permeabilidad se reduce.

La acción puzolánica de las cenizas reduce el pH del concreto, formándose un ambiente alcalino muy similar al del concreto sin cenizas, conservándose la pasividad del acero de refuerzo. Aun más, la reducida permeabilidad de los concretos con cenizas puede disminuir la magnitud del ingreso de agua, corrosivos químicos, y oxígeno.

4.11.- REDUCCIÓN DE LA EXPANSIÓN ÁLCALI-SÍLICE (ASR)

La reacción entre la sílice de las cenizas y los hidróxidos alcalinos en la

pasta consume álcalis, lo cual reduce su disponibilidad para reacciones expansivas con agregados reactivos. El empleo adecuado de las cenizas puede reducir la magnitud de la reacción, así como reducir o eliminar la expansión dañina del concreto. La cantidad de cenizas necesaria para prevenir daños debidos a la reacción álcali-agregado deberá ser mayor que la cantidad óptima necesaria para mejorar la resistencia y trabajabilidad del concreto. El mal nivel de una ceniza determinada es una importante consideración cuando se selecciona proporciones de mezcla empleando agregados potencialmente reactivos, ver Figura 9.4.

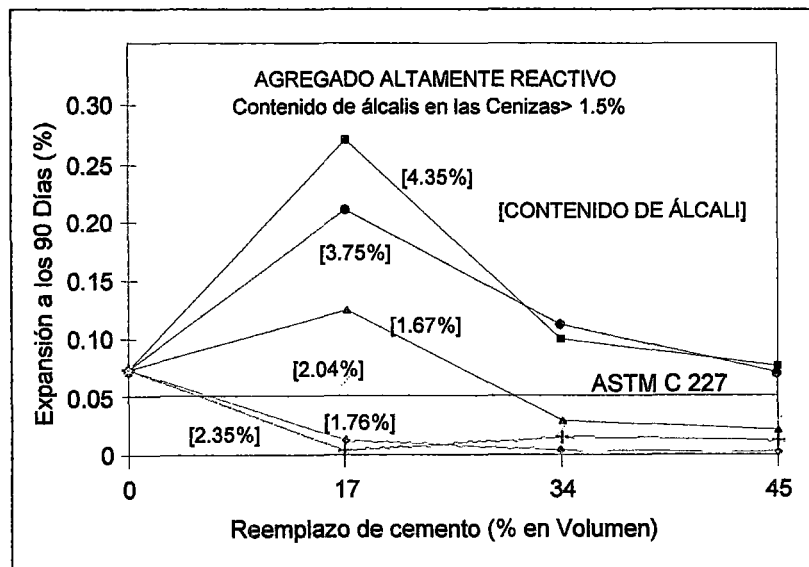


Figura 9.4: Expansión de barra de mortero contra porcentajes de reemplazo del cemento para todas los agregados altamente reactivos que contienen cenizas con más de 1.5% de álcalis

(Fuente: ACI 232.2R-96 "Use of Fly Ash in Concrete"; Fig. 3.5b, pág. 15)

Las expansiones dañinas debidas a la reacción álcali-sílice en concretos que contienen cenizas pueden prevenirse:

- Por el empleo de puzolanas que cumplan con los requisitos de Norma ASTM C 618 en una cantidad suficiente como para prevenir una expansión excesiva o,
- El empleo de cementos combinados que han demostrado controlar la expansión ASR, empleando los requisitos de la Norma ASTM C 595, o ASTM C 1157.

Las cenizas de la Clase F en porcentajes del 20% al 25% como reemplazo de masa pueden ser empleadas como una medida preventiva cuando los agregados que pasan los límites de la Norma ASTM pueden causar reactividad peligrosa en el transcurso de un número de años.

4.12.- RESISTENCIA A LOS SULFATOS

Las cenizas de la Clase F pueden mejorar la resistencia a los sulfatos de las mezclas de concreto. El incremento a la resistencia es en parte debido a la continua reacción de las cenizas con los hidróxidos del concreto para continuar formando silicato de calcio hidratado adicional (C-H-S, tobermorita). El cual llena los poros capilares en la pasta de cemento, reduciendo así la permeabilidad y el ingreso de soluciones de sulfato.

El comportamiento de las cenizas de la Clase C no es tan claro. Empleadas en cementos con alto contenido de aluminato tricálcico hacen el sistema menos resistente a los sulfatos. Los concretos que contienen cenizas con alto contenido de calcio son susceptibles a ataques por sulfatos y en general, cuanto mayor es el volumen de cenizas con alto contenido de calcio mayor es la susceptibilidad del concreto al deterioro por sulfatos, el cual depende de reacciones químicas las cuales rinden productos de mayor volumen que aquellos del material original, dando por resultado expansión. Una reacción ocurre entre los sulfatos de origen externo y la fase reactiva que produce sulfoaluminato de calcio.

Los daños debidos a esta reacción pueden ser reducidos minimizando el contenido de aluminato tricálcico en el concreto. Los cementos y las combinaciones cemento-cenizas estudiadas indican un orden descendente de resistencia al ataque de sulfatos:

- a) Tipo V + Cenizas (es resistente a los sulfatos)
- b) Tipo II + Cenizas
- c) Tipo V

- d) Tipo II
- e) Tipo I + Cenizas
- f) Tipo I (menos resistente)

Todas las cenizas empleadas en este estudio fueron de la Clase F y la relación de las cenizas al material cementante total por masa varió del 15% al 25%.

La resistencia a los sulfatos del concreto con cenizas está influenciada por los mismos factores que afectan al concreto sin cenizas: condiciones de curado, exposición y relación agua-cementante. El efecto de las cenizas dependerá de la clase, cantidad y características individuales químicas y físicas de la ceniza y el cemento empleados. Se ha encontrado que la resistencia a los sulfatos depende de la cantidad de alúmina reactiva y la presencia de fases expansivas en las cenizas y que no es influenciada en forma significativa por el óxido de hierro. En general, las cenizas que cumplen con la Norma ASTM C 618 con un contenido de menos del 15% de CaO deberán mejorar la resistencia a los sulfatos del concreto. Las cenizas con mas CaO deberán ser ensayadas por expansión a los sulfatos empleando la Norma ASTM C 1012.

La máxima resistencia a los sulfatos se alcanza a determinadas condiciones, mediante el empleo de material cementante de baja relación agua/material cementante, cemento portland resistente a los sulfatos, y cenizas que presenten buena resistencia a los sulfatos. Se ensayan, empleando la Norma ASTM C 1012 o la Norma ASTM C 1157 las cenizas a fin de determinar su limite de expansión a los 6 meses. Las cenizas con alúmina de una gran actividad química pueden afectar en forma adversa la resistencia a los sulfatos.

4.13.- CONTRACCIÓN POR SECADO

La contracción por secado del concreto es una función de la fracción volumen de la pasta, el contenido de agua, el tipo y contenido de cemento, y el tipo de agregado. Si la ceniza incrementa el volumen de pasta, la contracción por secado puede incrementarse ligeramente si el contenido de agua

permanece constante. Si hay una reducción en el contenido de agua, la contracción deberá ser la misma que la de concretos sin cenizas. El incremento en el contenido de cenizas puede dar por resultado una contracción por secado ligeramente menor.

4.14.- EFLORESCENCIA

Las eflorescencias son causadas por el lavado del hidróxido de calcio soluble en agua y otras sales que la hacen aparecer en la superficie del concreto. El hidróxido de calcio así lavado reacciona con el dióxido de carbono del aire para formar carbonato de calcio, lo que causa la decoloración del concreto. El empleo de cenizas puede ser efectivo en la reducción de las eflorescencias por reducción de la permeabilidad. Esta reducción ayuda a mantener un ambiente de alta alcalinidad en el concreto endurecido. Cenizas de la clase C de alta alcalinidad y contenido de sulfatos pueden incrementar las eflorescencias.

5.- PROPORCIONAMIENTO DE LAS MEZCLAS

Para evaluar el comportamiento de una ceniza dada en el concreto, el método más efectivo es determinar las proporciones de mezcla adecuadas para una aplicación determinada mediante mezclas de prueba y un programa de ensayos. Una serie de muestras deberán ser preparadas y ensayadas para determinar la cantidad total requerida de material cementante para obtener una resistencia especificada con diversos porcentajes de cenizas. Las cenizas normalmente se emplean en un orden de un 15% al 35% por masa de material cementante total.

Las cenizas pueden ser empleadas ya sea como un constituyente de cementos mezclados, de acuerdo a ASTM C 1157, o para cementos portland puzolánicos Tipo IP, de acuerdo a ASTM C 595, o puede ser introducida separadamente en la mezcladora. Cuando se usa como parte del cemento

mezclado las proporciones del cemento portland a cenizas son determinadas por el fabricante dentro del rango previsto en las especificaciones. En el proporcionamiento de mezclas empleando cemento Tipo IP o cemento mezclado con cenizas, la cantidad total del cemento mezclado para alcanzar las propiedades deseadas en el concreto necesita ser determinada.

La masa total de material cementante y las proporciones óptimas de las cenizas seleccionadas dependen de la calidad de la ceniza: el tipo, calidad y contenido de álcalis del cemento portland: la presencia de aditivos químicos: las condiciones de colocación: y de parámetros tales como los requerimientos de resistencia, condiciones de curado y condiciones de intemperismo al momento de la colocación.

El óptimo empleo de cenizas y aditivos químicos a menudo requiere que se efectúen ajustes en la relación del cemento a la ceniza entre el verano y el invierno. Se requiere en climas fríos ser más prudente en su uso; en tanto que en los climas cálidos se pueden emplear altas proporciones de cenizas. En ambos casos y, en general, puede esperarse una pequeña reducción en la demanda de agua de mezclado cuando se emplean cenizas.

Cuando existe incertidumbre sobre la relación agua/material cementante a ser utilizada en concretos con aire incorporado para obtener concretos resistentes a la congelación, puede ser ventajoso especificar que niveles de resistencia de 24 MPa, tal como lo estipula el ACI 308, pueden ser obtenidos antes de exponer el concreto a congelación y deshielo mientras está saturado con agua. Un mínimo nivel de resistencia es necesario para alcanzar una porosidad razonablemente baja y así minimizar la continuidad capilar en la pasta.

En forma similar a los concretos sin cenizas, los requerimientos de agua de concretos que contienen cenizas pueden ser reducidos en 15% a 20% mediante el empleo de aditivos reductores de agua convencionales, variando el porcentaje con la ceniza empleada y su proporción en el concreto. El empleo de

superplastificantes en concretos con cenizas puede conducir a reducciones de agua del 15% al 40%. El resultado depende del tipo y dosaje de aditivo, composición química del cemento, y contenido de material cementante del concreto.

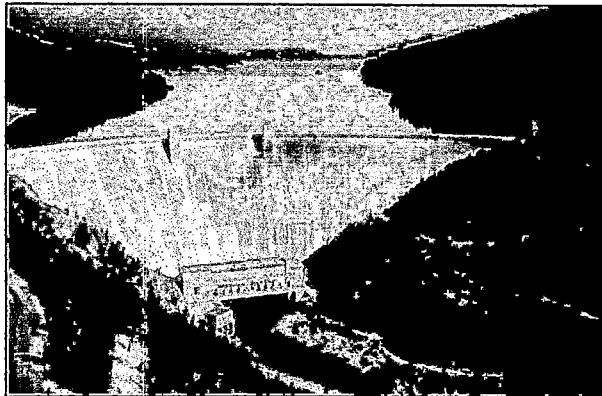


Imagen 9.1: Presa Hungry Horse en Montana, EE.UU. Construida entre 1948-52, esta estructura masiva requirió 2,453,600 m³ de concreto, aproximadamente 35% del Cemento Pórtland fue reemplazado por cenizas de carbón. Al final de su término la presa fue la tercera más grande y la segunda más alta presa de concreto en el mundo y hasta hoy es considerada como una de las más importantes estructuras de concreto en los EE.UU.

6.- ESPECIFICACIONES PARA LAS CENIZAS

6.1.- INTRODUCCIÓN

La especificación ASTM es la C 618 y el método de ensayo se encuentra en la Norma ASTM C 311. La Norma indica que las cenizas de la Clase F son “normalmente producidas por carbones clasificados como antracitas o bituminosos; y la Clase C es normalmente producida por lignitos y carbón sub-bituminosos”.

6.2.- REQUISITOS QUÍMICOS

Se han efectuado críticas sobre la suma sugerida para los óxidos como elemento de plastificación de las cenizas y se ha recomendado que sean clasificadas por su contenido de óxido de cal. El contenido de sulfato en las

cenizas puede afectar la cantidad optima de cenizas necesaria para el desarrollo de máxima resistencia y aceptable fraguado en las mezclas de cemento portland en las que ella es aceptada. Se considera necesario un límite superior a fin de evitar un exceso de sulfatos que permanezca en el concreto endurecido, el cual podría contribuir por ataques dañinos al concreto.

La Norma limita el contenido de humedad de las cenizas al 3% y la perdida por calcinación al 6%. En circunstancias especiales se puede elegir cenizas de la Clase C con un porcentaje de perdida por calcinación del 12% cuando se dispone de informe positivo del Laboratorio. La Norma ASTM C 618 limita los álcalis disponibles en las cenizas a 1.5% máximo, salvo que los ensayos de laboratorio demuestren que una expansión peligrosa no ocurrirá. Estos niveles no se consideraran si el agregado no es reactivo, ver Tabla 9.3.

6.3.- REQUERIMIENTOS FÍSICOS

La fineza de las cenizas es controlada limitando la cantidad retenida en la malla N°325 por lavado húmedo. La reactividad de las cenizas está relacionada con la cantidad que pasa este Tamiz desde que las partículas mas gruesas no reaccionan rápidamente con el concreto. La Norma ASTM C 618 limita a 34% la cantidad retenida, ver Tabla 9.4. El control de las cenizas ha sido usualmente especificado por su área superficial (permeabilidad al aire). El área superficial considera la masa del cemento portland y el volumen de las cenizas.

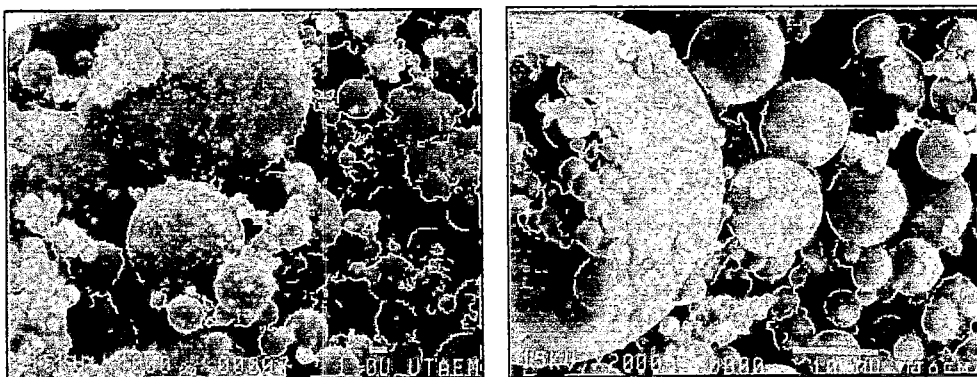


Imagen 9.2: Cenizas ampliadas con microscopio electrónico a 4000 y 20000 aumentos. En ambas fotografías se aprecia el perfil esférico de las cenizas y su distribución granulométrica por tamaños.

(Fuente: ACI 232.2R: Use of Fly Ash in Concrete; fig 2.2, fig 2.3 ; pag. 8)

El índice de resistencia con el cemento portland se considera como un indicador de la reactividad y no se emplea para predecir la resistencia en los concretos que contienen cenizas. No se considera necesario tener una optima proporción de cenizas para ser empleada en el concreto. En el pasado, los ensayos de actividad de resistencia con cal cumplían una necesidad de obtener resultados rápidos de comportamiento en resistencia (7 días en vez de 28). La Norma ASTM C 618 ha incluido a los 7 días un ensayo de actividad de resistencia con cemento Portland. Otras propiedades físicas incluyen

- a) Requerimientos de agua del mortero empleado en el ensayo de actividad de resistencia a fin de asegurar que el mortero no de lugar a un gran incremento en la demanda de agua.
- b) La estabilidad de volumen por medición en el autoclave, ya sea expansión o contracción, considera valores con cambios en la longitud de 0.8% como máximo permitido por la Norma ASTM C 618 para ambas clases de cenizas. Si se requiere que la ceniza pueda constituir mas del 20% del material cementante, la pasta empleada para los ensayo en el autoclave deberá contener el porcentaje anticipado de cenizas. Los ensayos protegen contra las expansiones retardadas que deberán ocurrir si una cantidad suficiente de óxido de magnesio está presente en el concreto como periclase, o el óxido de cal está presente como cal cristalizada.
- c) Los límites de variación están dados en la Norma ASTM C 618. Son especificados para ambos tipos de cenizas y mantienen la variación de la gravedad específica y las finezas de las cenizas dentro de los límites prácticos de embarque en un período dado.
- d) Igualmente, para las cenizas empleadas en los concretos con aire incorporado hay un límite opcional sobre la variación permitida en la demanda de aditivos incorporadores de aire causados por la

variación en las fuentes de cenizas. Estos límites tienen por finalidad disminuir la variabilidad de los concretos que contienen cenizas.

- e) El Factor Opcional Múltiple, aplicable únicamente a las cenizas de la Clase F, es calculado como el producto de la pérdida por ignición (en porcentaje) y la cantidad retenida en la Malla N° 325 (en porcentaje). El valor máximo del residuo en el Tamiz N° 255 debe ser del 34% únicamente cuando la pérdida por calcinación excede el 6%.
- f) El incremento en la contracción por secado de la barra de mortero a los 28 días se aplica solamente cuando lo requiere el comprador para demostrar que la ceniza deberá causar un incremento sustancial en la barra de mortero cuando se las compara a barras preparadas con cemento portland únicamente.
- g) Reactividad con los álcalis. Los ensayos de expansión de barras de mortero opcionales pueden ser requeridos si una ceniza va a ser empleada con un agregado que puede contener material reactivo con los álcalis. Se ha recomendado las cenizas para ser empleadas en concreto a fin de reducir el daño de la expansión por reacción álcali-sílice.

7.- CONTROL DE CALIDAD

La Norma ASTM C 618 requiere que el comprador tenga acceso a los almacenamientos de cenizas con el propósito de inspeccionar y hacer un muestreo a fin de determinar que cenizas pueden ser rechazadas si fallan en cumplir con los requerimientos de las especificaciones.

La Norma ASTM C 311 indica los procedimientos a ser empleados para

el muestreo y ensayo de las cenizas. Las tres principales divisiones de las Normas son: métodos de ensayo, métodos de análisis químicos, y procedimiento de ensayos físicos.

El método que proporciona procedimientos detallados para el muestreo incluye:

- (1) Sistemas de transporte para almacenamiento masivo;
- (2) Almacenamiento en volumen en los puntos de descarga;
- (3) Almacenamiento en volumen por media tubería de muestreo; y
- (4) Camiones o carritos sobre ruedas.

Los procedimientos de ensayos químicos comprenden la determinación del contenido de humedad para secado a masa constante y luego la determinación de la pérdida por ignición. Esto último requiere la ignición de la muestra seca a masa constante en un horno a 750°C. La mayoría de las determinaciones de requisitos químicas son efectuadas empleando procedimientos iguales a, o muy similares a aquellos empleados en el ensayo de cemento portland.

Los ensayos físicos de las cenizas incluyen densidad y cantidad retenida en la Malla N° 325, determinada empleando los métodos de ensayos desarrollados para el cemento portland. Los procedimientos de ensayo de resistencia y estabilidad de volumen están incluidos en la Norma ASTM C 311.

Los ensayos más difíciles y discutibles en cuanto a sus resultados son los de fineza y resistencia por reactividad con la cal. Si el índice de actividad puzolánica con cal es considerado, resulta que tiene una alta dependencia de la cal empleada en el laboratorio. Desde que el comportamiento de la cal no es controlado por métodos de ensayo estándar, los ensayos conducidos por diferentes laboratorios sobre la misma muestra de cenizas pueden dar resultados significativamente diferentes. Para muchos de los ensayos físicos y químicos de las cenizas contenidas en la Norma ASTM C 311, la precisión no ha sido determinada.

El control de calidad debe ser técnica y estadísticamente adecuado. La primera recomendación es determinar su calidad histórica a fin de demostrar que la ceniza cumple con las especificaciones y requisitos de uniformidad. Para una fuente nueva de cenizas, se recomienda por lo menos 6 meses de ensayos, con por lo menos 40 ensayos individuales de pérdida por calcinación, residuos en el tamiz N° 325, gravedad específica y óxido de azufre. La fuente debe ser ensayada por lo menos mensualmente a fin de garantizar un comportamiento continuo con la Norma ASTM C 618.

Los ensayos de características críticas de las cenizas pueden incluir: pérdida por calcinación, fineza, color, u óxido de azufre. Las muestras pueden ser tomadas periódicamente y almacenadas para el caso que futuros ensayos y evaluaciones puedan ser deseables. Un control de calidad efectivo permite que el abastecedor de cenizas mantenga un reporte de ensayos que demuestren que el producto cumple con los requerimientos físicos y químicos y de variabilidad del ASTM, así como con los requisitos especiales del proyecto. La evaluación estadística de la información proporciona al vendedor y comprador adecuada información sobre las variaciones a largo plazo.

El comportamiento de las cenizas en el concreto está relacionado a sus propiedades y la variación de esas propiedades con los embarques que vienen de las fuentes de abastecimiento. La variación de otros ingredientes en el concreto deberá también afectar el comportamiento de la mezcla. Para cenizas de clase F las propiedades que son más propensas a afectar su comportamiento en el concreto son la fineza, la pérdida por calcinación y la expansión en el autoclave. Propiedades importantes de la ceniza de la Clase C que afectan el comportamiento del concreto incluyen la fineza, la pérdida por calcinación, la expansión en el autoclave y la cantidad de óxido de azufre, óxido de cal, y álcalis presentes. El color de las cenizas puede indicar cambios en el contenido de carbón o en las condiciones de quemado de la planta de fuerza, las cuales pueden alterar el comportamiento de las cenizas especialmente en los concretos con aire incorporado.

Algunas de las propiedades especificadas en la Norma ASTM C 618 son empleadas para determinar rápidamente la calidad de las cenizas. Existen ensayos para hacer diariamente, y en algunos casos cada hora estimación de la calidad si ellas son necesarias, a fin de determinar si la ceniza cumple con los parámetros preestablecidos para calidad.

Los procedimientos de ensayos rápidos incluyen:

- | | |
|-------------------------------------|--------------------------------|
| 1. Pérdida por calcinación | 7. Densidad |
| 2. Contenido de carbono | 8. Ensayo del índice de espuma |
| 3. Fineza en la malla N° 325 | 9. Material orgánico |
| 4. Tamizado por aire | 10. Contenido de CaO |
| 5. Fineza por permeabilidad al aire | 11. Hidrocarburos |
| 6. Color | 12. Amonio |

8.- EMPLEO DE LAS CENIZAS EN LAS CONSTRUCCIONES

Las cenizas se emplean en concreto premezclado en función de las siguientes razones:

- a) Beneficios técnicos
- b) Reducción en los costos de la energía empleada en la producción del cemento.
- c) Incremento en los niveles de resistencia del concreto mayores de 50 MPa.
- d) Incremento en la disponibilidad de cenizas, obtenibles de la industria.

Muchos productores de concreto emplean cenizas para compensar las deficiencias en la granulometría del agregado, o para desarrollar mezclas que sean especiales para bombeo, a fin de tomar las ventajas derivadas de bombeos a mayor altura y menor segregación. Los concretos premezclados conteniendo cenizas han permitido bombear con éxito concretos para edificaciones con más de 75 pisos.

Resistencias del orden de 100 MPa en obra y más altas en laboratorio se han obtenido con cenizas de la Clase C. Las cenizas de la Clase F también han sido empleadas para concretos de alta resistencia debido a su contribución a la ganancia de resistencia en el largo plazo. Las cenizas de la Clase F son empleadas para controlar la expansión destructiva asociada con la reacción álcali-sílice. Se ha determinado que la decisión de emplear o no una ceniza determinada en un concreto premezclado deberá basarse en 4 factores: propiedades de las cenizas; efectividad del programa del control de calidad del vendedor; habilidad para acomodarse a los cambios de concreto, tales como demora en el acabado, o incremento de la demanda del aditivo incorporador de aire; y costo efectivo. El costo de equipo para almacenar y dosificar cenizas es un gasto que puede ser compensado por el ahorro en el costo de material.

Está permitido el empleo de cenizas en el concreto para pavimentos e igualmente está permitido el uso de cementos combinados los cuales contienen cenizas. Los problemas con el control del aire incorporado y el costo del transporte de cenizas a grandes distancias han sido considerados como las principales causas para un empleo más extenso.

Las mezclas que contienen cenizas deberán reducir el contenido de cemento, pudiéndose obtener resistencias en flexión más altas, mejor resistencia de agrietamiento, mejora en las cualidades de colocación y acabado, y resistencia al desgaste en el largo plazo.

El empleo de cenizas reduce los esfuerzos térmicos por reducción del calor de hidratación en estructuras de concreto masivas. Igualmente las cenizas permiten una reducción en la elevación de temperatura sin incurrir en los efectos indeseables derivados del empleo de mezclas pobres, tales como dureza, exudación, tendencia a la segregación, y tendencia al incremento de permeabilidad. La mejora en la resistencia a los sulfatos y la reducción en la expansión debida a la reacción álcali-agregado, obtenidas por el empleo de las cenizas en el concreto son otra importante consideración en la construcción de concretos masivos.

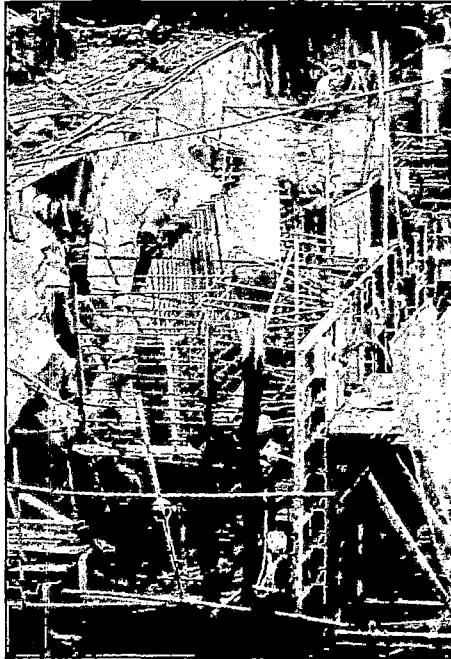


Imagen 9.3: La Presa de Las Tres Gargantas en China, se inicio en 1993 y concluirá en el 2009, está presupuestada en aproximadamente 30.000 millones de dólares. En ella se han empleado aditivos superplastificantes y adiciones a base de cenizas de la Clase C.
(Fuente: "Admixtures and Cementitious Materials", Concrete International, V. 24, No. 8, Agosto 2002, pág 50.

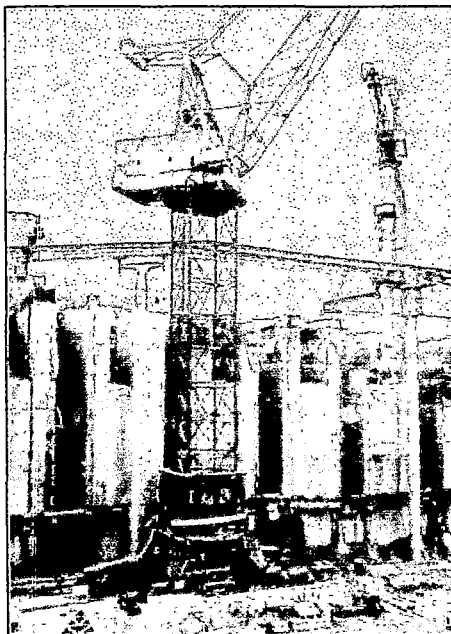


Imagen 9.4: "La Presa de Las Tres Gargantas", en China. El concreto contiene aproximadamente el 40% de cenizas como adición.
(Fuente: "Admixtures and Cementitious Materials", Concrete International, V. 24, No. 8, Agosto 2002, pág 55)

Tabla 9.1: Ejemplo de la composición en volumen de Cenizas provenientes del carbón

	Bituminoso	Sub-bituminoso	Lignita del norte	Lignita del Sur
SiO ₂	45.9	31.9	44.6	52.9
Al ₂ O ₃	24.2	22.5	15.5	17.9
Fe ₂ O ₃	4.7	5.0	7.7	9.0
CaO	3.7	28.0	20.9	9.6
SO ₃	0.4	2.3	1.5	0.9
MgO	0.0	4.3	6.1	1.7
Álcalís	0.2	1.6	0.9	0.6
Pérdida por ignición	3	0.3	0.4	0.4
Finesa por permeabilidad al aire, m ² /Kg	403	393	329	256
% retenido en la Malla 45um	18.2	17.0	21.6	23.8
Densidad Mg/m ³	2.28	2.70	2.54	2.43

*Álcalís disponibles expresados como Na₂O equivalente

(Fuente: ACI 232.2R-96, "Use of Fly Ash in Concrete", Tabla 2.1, pág 5)

Tabla 9.2: Calor de hidratación de mezclas de cemento Pórtland con cenizas

Cenizas, porcentaje del material cementante	Calorías por gramo		
	3 días	7 días	28 días
0	61	75	91
52	31	42	61
57	37	43	56
65	35	42	53
68	31	40	49
71	29	36	48

(Fuente: ACI 232.2R-96, "Use of Fly Ash in Concrete", Tabla 3.1, pág 14)

Tabla 9.3 : Requisitos Químicos Básicos para las Cenizas

ASTM C 618	Clase F	Clase C
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ mayor de	70%	50%
SO ₃ , no mayor de	5%	5%
Contenido de humedad, no mayor de	3%	3%
Pérdida por ignición, no mayor de	6% ^A	6%

^A el uso de la ceniza de la Clase F conteniendo hasta el 12% de pérdida por ignición puede ser aprobado para su uso si se cuenta con resultados de laboratorio que han dado resultados favorables.

(Fuente: ASTM C 618 - 99, "Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete"
Tabla 1, pág 2)

Tabla 9.4: Requerimientos físicos

ASTM C 618 - 80	Clase F	Clase C
<i>Fineza :</i> Porcentaje retenido en la malla N° 325	34%	34%
<i>Índice de actividad puzolánica :</i> Con cemento portland a los 7 días, mínimo porcentaje de control	75%	75%
Con cemento portland a los 28 días, mínimo porcentaje de control	75%	75%
<i>Requisitos de agua, máximo porcentaje de control :</i>	105%	105%
<i>Estabilidad de volumen :</i> Expansión o contracción en el autoclave	0.8%	0.8%
<i>Requisitos de Uniformidad :</i> Densidad, variación máxima del promedio	5%	5%
Porcentaje retenido en la malla N° 325, variación máxima del promedio	5%	5%

(Fuente: ASTM C 618 - 99, "Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete"
Tabla 3, pág 3)

CAPITULO X

MICROSILICES

CAPITULO X MICROSÍLICES

1.- INTRODUCCIÓN

1.1.- CONCEPTO

Las microsílises son un polvo muy fino que se obtiene de la decantación de humos de chimeneas de altos hornos de aleaciones metálicas de la industria del ferrosilicón, compuestas al 90-95% del dióxido de sílice amorfo y tiene propiedades puzolánicas que le permite reaccionar químicamente con el hidróxido de calcio. De esta reacción se forma un gel que mejorará las propiedades del concreto, especialmente su resistencia en compresión y durabilidad.

El Comité ACI 116 las define como “una sílice muy cristalina muy fina producida por hornos de arco eléctrico, como un subproducto de la fabricación de silicio metálico o ferrosilíceo”. La microsílise se origina por la condensación de vapores de óxido de sílice, y posee alta actividad puzolánica. Su empleo con superplastificantes permite su uso como material cementante suplementario, especialmente cuando se desea concretos de muy alta resistencia.

En el Laboratorio de Ensayo de Materiales de la UNI se han venido estudiando desde 1996 obteniéndose valores del orden de 1500 Kg./cm² de resistencia en compresión como los resultados obtenidos por la Ing. Patricia Morales en su tesis de titulación “Investigación del Concreto de Alta Resistencia: Metodología de obtención y determinación de las propiedades de los Concretos de 550 – 1200 Kg/cm²”.

1.2.- CARACTERÍSTICAS

La microsílíce es producida como un polvo ultra fino de color gris, el cual tiene las siguientes propiedades típicas:

- a) Contienen por lo menos 90% de SiO_2 ;
- b) Partículas con tamaño promedio de 0.1-0.2 μm ;
- c) Superficie específica mayor de 15000 m^2/kg
- d) Perfil esférico de las partículas
- e) Contenido mínimo de carbón.

Un elemento en el proceso de las microsílíces es la remoción de las partículas gruesas, ellas deben ser eliminadas ya que pueden ser astillas de madera, trozos de carbón, u otros componentes de la carga del horno.

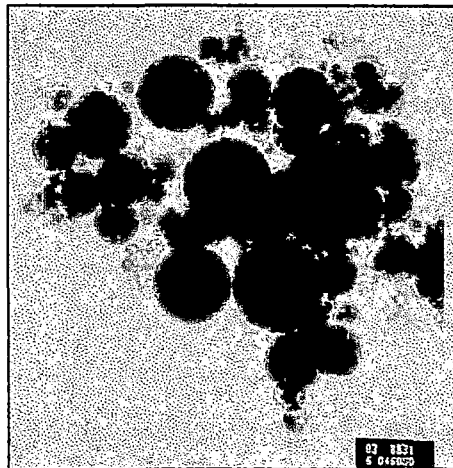


Imagen 10.1: Microfotografía de microsílíces ampliada al microscopio electrónico, se aprecia el perfil esférico y la granulometría con un porcentaje de partículas, con una distribución mejor que en el caso de las cenizas, lo que permite una mayor adherencia con la pasta, con una menor demanda de agua.

(Fuente: ACI 234R-96, Guide for the Use of Silica Fume in Concrete, fig 1.1; pag. 3)

1.3.- OTRAS FORMAS DE MICROSÍLICES

Las microsílíces pueden fabricarse a través de 3 procesos.

Los humos de sílice son producidos por hidrólisis en llama de hidrogeno y

oxígeno. Este polvo de sílice, que no es una microsílíce, es suministrado como un polvo blanco, blando y suelto.

La sílice precipitada es producida en forma de un material finamente dividido por precipitación de soluciones de álcali-metal silicoso. Esta sílice es producida como un polvo blanco.

El gel sílice es preparado por un proceso húmedo en el cual una solución acuosa álcali-metal se hace reaccionar con ácido, formándose una estructura tridimensional de sílice hidratada. Se vende como gránulos, tabletas, o como un polvo blanco.

2.- PROPIEDADES FÍSICAS

Las microsílíces presentan características comunes; tipo amorfo, diámetro promedio pequeño, altos contenidos de sílice, condensación por vapores de óxido de silicio, etc.

2.1.- COLOR

La microsílíce varía de color gris claro a oscuro, dando una lechada de color negro. El color es determinado por los componentes no silicosos, los cuales incluyen el carbón y el óxido de hierro. Cuanto mas alto es el contenido de carbón más oscuro es el color de la microsílíce. El grado de compactación también puede afectar el color.

2.2.- DENSIDAD

Las microsílíces tienen una densidad aproximadamente de 2.2 si se compara con la densidad 3.1 de los cementos portland normales (3100 kg/m^3). En algunos casos puede llegar a valores altos como 2.5. Las variaciones en la densidad son atribuidas a los componentes no silicosos.

2.3.- VOLUMEN DE LA PASTA

La baja gravedad específica de la microsílces, comparada con la del cemento portland da lugar a que cuando el reemplazo está basado sobre masa, sea necesario añadir un mayor volumen de microsílce que el del cemento portland removido. Por ello el volumen de pasta se incrementa y se produce una disminución de la relación agua-material cementante sobre la base de volúmenes. Ello explica porque, reemplazando una masa dada de cemento por una misma masa de microsílce, deberá cambiarse las características reológicas del concreto con microsílces.

2.4.- PESO UNITARIO

El peso unitario suelto de las microsílces es del orden de $130-430 \text{ kg/m}^3$, el del cemento portland normal es de 1200 kg/m^3 . Los silos, los cuales pueden contener una masa dada de cemento portland pueden contener 25% de microsílce. Las lechadas de microsílce deberán tener una densidad de volumen entre $1320-1440 \text{ kg/m}^3$. El contenido nominal de microsílce presente en las lechadas es de aproximadamente 50% por masa. Densificación de una densidad de volumen inicial de 200 kg/m^3 a un valor densificado de 500 kg/m^3 se han reportado. La densidad de volumen de las microsílces densificadas comercialmente disponibles varía en rangos de aproximadamente $480-640 \text{ kg/m}^3$. En niveles de 720 kg/m^3 puede ser muy difícil dispersar las microsílces dentro del concreto.

2.5.- SUPERFICIE ESPECÍFICA

La microsílce es un conjunto de partículas vítreas muy finas, de perfil esférico y diámetro muy pequeño, cuya superficie específica está en el orden de $200\ 000 \text{ cm}^2/\text{gr}$ cuando es determinada empleando las técnicas de absorción del nitrógeno. La distribución por tamaño indica partículas con diámetro promedio de $0.1 \mu\text{m}$, el cual es aproximadamente 100 veces menor que el de las partículas de cemento promedio. La distribución de las partículas de microsílce puede variar dependiendo del tipo de horno y de la temperatura de salida de los gases del horno.

La alta superficie específica y el gran contenido de dióxido de sílice amorfa proporcionan excepcionales propiedades puzolánicas. Su extremada fineza se entiende mejor si se compara con la de otros materiales, teniendo en cuenta que los valores derivados de las diferentes técnicas de medición no son directamente comparables:

- Microsílices	200,000 cm ² /gr
- Cenizas	4000 - 7000 cm ² /gr
- Escoria	3500 - 6000 cm ² /gr
- Cemento Portland	3000 - 4000 cm ² /gr

El índice de reactividad se incrementa debido a la elevada superficie específica, el diámetro mínimo de partículas y su alto contenido de sílice, la cual reacciona con el hidróxido de calcio, para producir cristales de silicato de calcio hidratado. El método de absorción del nitrógeno es el ensayo más común para estimar la superficie específica de partículas de microsilíce. El área superficial resultante del ensayo de la absorción por nitrógeno en un rango de 130,000 a 300,000 cm²/gr.

Uno de los ensayos más comunes efectuado a las microsilices es el residuo sobre la malla N° 325. Para este ensayo la masa y composición de las partículas mayores debe ser reportada. Muchas microsilices muestran un volumen de tamaños mayores que la malla N° 325 menor del 6%, aunque aparentemente a la vista parezca un volumen mayor.

3.- PROPIEDADES QUÍMICAS

3.1.- COMPOSICIÓN QUÍMICA

La microsilíce es un subproducto de composición química muy constante, aunque puede tener algunos cambios dependiendo de la aleación de silicio que se está produciendo y la naturaleza de las materias primas. En la

composición química predomina el SiO₂ con el 90 al 96%. La composición química de los humos varía de acuerdo al tipo de aleación o metal que se esté produciendo; así los humos de un horno de ferro silíceo contienen más óxidos de hierro y magnesio que aquellos provenientes de un horno que produce silicio. La Tabla 10.1 nos da la composición química de las microsílces de Hornos de silíceo de Noruega y Norte América.

3.2.- pH

El pH de las microsílces y de las lechadas debe ser determinado. Los valores típicos de una fuente de metal silíceo están entre 6.0 y 7.0.

3.3.- CRISTALINIDAD

Los ensayos por difracción de rayos X han mostrado que la microsílce es esencialmente amorfa. Los esquemas de difracción presentan un amplio doblado centrado alrededor del área donde normalmente debía encontrarse cristobalita cristalina, la ausencia de un material diferente en esta ubicación sugiere que la cristobalita no está presente en cantidades significativas.

3.4.- COMPORTAMIENTO EN EL CONCRETO

Las partículas mas finas deberán reaccionar mas rápidamente y en una extensión mayor que las gruesas. Sin embargo, el incremento en la demanda de agua de las microsílces mas finas puede dejar de lado, en algún grado los efectos benéficos del incremento en la reactividad de las partículas, salvo que se emplee un superplastificante, un reductor de agua, o un aditivo reductor de agua de alto rango. Existe ausencia de información respecto al comportamiento de las diferentes formas de las microsílces en el concreto, pudiendo presentarse diferencias menores tanto en el concreto fresco como en los concretos endurecidos preparados con las diferentes formas disponibles.

3.5.- CONTROL DE CALIDAD

La medida de control de calidad ayuda en asumir uniformidad de las propiedades de una microsilíce determinada a fin de minimizar las variaciones en el comportamiento del concreto. Los cambios en las microsilícees o en las aleaciones de sílice deberán ser informados por el fabricante, recomendándose ensayos de laboratorio para verificar el comportamiento en el concreto si se producen dichos cambios.

4.- MECANISMOS DE ACCIÓN

4.1.- ASPECTOS GENERALES

Por cada 15% de microsilíce como reemplazo del cemento, hay aproximadamente 2 millones de partículas de microsilíce por cada grano de cemento portland en una mezcla de concreto. La resistencia en la zona de transición entre la pasta y las partículas de agregado grueso es menor que la del volumen de la pasta. La zona de transición contiene más vacíos debido a la acumulación del agua de exudación y la dificultad de acomodar partículas sólidas cerca de la superficie. Por lo tanto, más hidróxido de calcio se forma en esta región que en el resto. Sin la microsilíce los cristales de CH crecen a un mayor tamaño y tienden a estar fuertemente orientados en forma paralela a las partículas de agregado; el CH es más débil que el silicato de calcio hidratado (C-S-H) y cuando los cristales son grandes y están fuertemente orientados en forma paralela a la superficie del agregado, ellos son fácilmente unidos. Una zona de transición débil resulta de la combinación de altos contenidos de vacíos y cristales grandes de CH fuertemente orientados.

La presencia de microsilíce en el concreto fresco generalmente da por resultado una reducción de la exudación y Mayor cohesividad. Este es un efecto físico como resultado de incorporar partículas extremadamente finas en la mezcla. La presencia de microsilíce acelera la hidratación del cemento durante la etapa inicial. Los cristales CH deberán estar orientados paralelamente a la

superficie del agregado, esté o no la microsílíce. Dentro de la zona de transición (dentro de 50 μm de la superficie del agregado) tanto el tamaño de los cristales como el volumen de CH se reducen, dando lugar a una rigidización de esta región. La reacción puzolánica brinda mejoras importantes en la resistencia en el tiempo.

En el concreto endurecido, las partículas de microsílíce incrementan el acomodo del material sólido al llenar los espacios entre los granos de cemento. De la misma manera como el cemento llena los espacios entre las partículas de agregado grueso en el concreto. Esta analogía se aplica únicamente cuando las fuerzas superficiales entre las partículas de cemento son despreciables, es decir, cuando existe suficiente aditivo presente para compensar el efecto de las fuerzas superficiales.

Se ha demostrado que la microsílíce reduce la demanda de agua debido a que éstas han de ocupar espacios de otra manera ocupados por el agua entre los granos de cemento. Esa reducción solamente se aplica a sistemas con suficiente agua para reducir las fuerzas superficiales. Igualmente, existe una disminución en la demanda de agua para aditivos con microsílíce y se ha determinado que los aditivos reductores de agua tienen un efecto mayor sobre los concretos a base de microsílíce. Sin embargo, en la mayoría de los concretos empleados para construcción, la adición de microsílíce deberá resultar en un incremento en la demanda de agua debido a la alta área superficial de las microsílíces, pudiendo requerir el empleo de aditivos reductores de agua, o un aditivo superplastificante.

En resumen, las microsílíces reaccionan con el hidróxido de calcio que se forma como un subproducto en el proceso de hidratación del cemento, dando como resultado un incremento en la cantidad de silicato de calcio hidratado, ligante (gel) que proporciona al concreto su resistencia. Este incremento en el contenido de gel disminuye los poros capilares de la pasta, hace la masa mas compacta, facilita la distribución de los elementos mayores y aumenta la densidad del sistema.

Las fuerzas superficiales que actúan entre las partículas de microsílíce, pueden impedir una adecuada dispersión de ésta en el concreto fresco. Los superplastificantes, al reducir el exceso de agua y las fuerzas superficiales, hacen a las partículas más móviles, permiten una compactación más densa y mejoran la dispersión del sistema.

Las microsílíces reaccionan dentro de los primeros 28 días, con el hidróxido de calcio formado durante la hidratación y mejoran la resistencia en compresión del mortero. Además modifican la distribución por tamaños de los poros por reacción con el hidróxido de calcio formado y producen una estructura de poros más discontinua e impermeable que la de la pasta hidratada.

4.2.- MORTEROS CON MICROSÍLICE

Los morteros con microsílíce presentan una mayor resistencia en la relación agua-cementante de 0.45, apreciándose este incremento desde el primer día de curado. En una relación agua/material cementante de 0.60, no se aprecian significativos incrementos debido a la presencia de microsílíces. Si no se emplea microsílíces, la pasta es más resistente que el mortero con valores, a los 180 días, de 68 MPa para la primera y de 55 MPa para el segundo. Las mezclas que contienen 30% de microsílíce muestran una tendencia inversa, y después de 180 días el mortero es de 82 MPa comparado con 74 MPa de la pasta.

En función del tiempo de curado, los estudios de la relación de la resistencia en compresión de morteros a pastas, han determinado que después de un descenso inicial, esta relación para especímenes que contienen 30% de microsílíce se incrementa a un valor de 1.11 después de 180 días. Para especímenes que no contienen microsílíce la relación comienza a declinar después de 7 días llegando a un valor de 0.8 después de 180 días. En los especímenes con 10% de microsílíce la relación después de 180 días de curado es de 0.90

La resistencia de los morteros sin microsilíce disminuye en comparación con la de la pasta después de 14 días, cuando se han formado grandes cantidades de hidróxido de calcio. Después de los 28 días, las pastas con 30% de microsilíce son mas fuertes debido a una mejor adherencia entre los granos de arena al formarse nuevo C-H-S por la reacción del hidróxido de calcio con la microsilíce, dando mejores características de adherencia.

Los especímenes con 0% de microsilíce permiten obtener valores de 20.3% y 17.3% de hidróxido de calcio, en tanto que las mezclas con 10% de microsilíce, muestran valores máximos de éste a los 7 días, los cuales disminuyen a 7.5% y 4.6% después de 180 días de curado. Para muestras de 30% de hidróxido de calcio los valores son nulos después de 3 días de curado.

4.3.- REACCIÓN PUZOLÁNICA

En presencia del cemento portland hidratado, las microsilíceas deberán reaccionar como un constituyente amorfo, rico en sílice, en presencia de CH combinándose con la sílice para formar un hidrato calcio-sílice mediante una reacción puzolánica. La forma más simple para que una reacción ocurra es la mezcla en solución de una sílice amorfa y un hidróxido de calcio.

En 1981 se ha encontrado que una forma bien cristalizada de C-S-H-I se forma a los 7 días de curado. Para la mezcla 2:1 todo el CH fue consumido en 7 días, para mezcla 1:1 se requirió 28 días para consumir el CH. Se ha sugerido, un modelo de gel de la hidratación de las mezclas microsilíce-cemento. De acuerdo a este modelo, la microsilíce contacta con el agua de mezclado y forma un gel rico en sílice, absorbiendo la mayoría del agua disponible. Entonces el gel se aglomera entre los granos del cemento no hidratado, revistiendo los granos en el proceso. El hidróxido de calcio reacciona con la superficie exterior de este gel para formar C-S-H. Este gel se forma en los vacíos del C-S-H producido por la hidratación del cemento, lográndose una estructura muy densa.

Se ha estudiado el sistema cemento-microsilíce en relaciones de agua/material cementante bajas de 0.23 a 20°C. El volumen de CH presente

después de diversos periodos de hidratación en relaciones cemento portland-microsílice de 100:0, 90:10, 80:20 y 60:40 encontró que en altos niveles de microsílice casi todo el CH es consumido a los 28 días. En niveles bajos de microsílice como el 10%, el CH se reduce siempre a 50% a los 28 días.

La microsílice suelta, acelera la hidratación temprana y tiende a incrementar la producción de CH en tiempos de 8 horas, siendo en edades posteriores el CH consumido, y en una mezcla que contiene 50% de microsílice no se detecta CH después de 14 días. Se ha encontrado que con 20% por volumen de reemplazo de la microsílice no se detectó CH después de 91 días de curado húmedo a 23°C, en tanto que 10% de microsílice reducen el CH en 50% a la misma edad.

Los constituyentes exactos del cemento Portland o la microsílice o ambos, los cuales determinan la extensión de la reacción puzolánica no han sido bien definidos, aunque algunos estudios indican que el contenido de álcalis y sílice de las microsílises parecen tener alguna influencia. Las microsílises con bajo contenido de álcalis y alto contenido de SiO₂ son capaces de unir más CH e incrementar la magnitud de la reacción puzolánica.

4.4.- REACCIÓN CON OTRAS ADICIONES MINERALES

Se han efectuado estudios sobre combinaciones de cenizas y microsílice a fin de ver la posibilidad de eliminar las resistencias iniciales bajas típicas de los concretos con cenizas y evaluar los parámetros de durabilidad de concretos con combinación de puzolanas. El Comité ACI respectivo no tiene información sobre las reacciones mecánicas que se producen cuando ambas están presentes en la mezcla. La presencia de puzolanas muestra mayor actividad puzolánica, a los 7 y 28 días, que cuando se emplea cenizas únicamente. La combinación muestra considerable reducción en el volumen de grandes poros en todas las edades estudiadas. Malhotra ha encontrado que el desarrollo de resistencia del concreto en edades finales, cuando éste contiene microsílice y cenizas, no es imposible, indicando que existe disponibilidad suficiente de CH para permitir la actividad puzolánica de las cenizas.

Cuando se combina microsílces con escorias, la presencia de las primeras ayuda en la obtención de altas resistencias a edades tempranas, así como que el desarrollo de altas resistencias finales en concretos en los que se ha utilizado la microsílce fue mejorada por la adición de escorias. La microsílce y las escorias compiten por el hidróxido de calcio disponible y la microestructura de la pasta y la resistencia del mortero no fueron muy diferentes para las mezclas que contenían 5% de microsílce.

Igualmente se ha apreciado que la mezcla pasta/agregado adhiere mucho mejor en la presencia de microsílces. En tanto que la microsílce comienza a reaccionar al día, la reacción de la escoria es mucho más lenta, debido posiblemente al alto consumo de CH de la microsílce. Empleando microsílce con cemento portland Tipo V se producía una reducción de la velocidad de hidratación de la alita.

4.5.- CALOR DE HIDRATACION

Aunque la magnitud de la liberación de calor expresada sobre una base de cemento, es mayor conforme la cantidad de microsílce se incrementa, el calor total que es liberado, expresado sobre la base de sólidos totales en la mezcla, tiende a disminuir conforme el cemento es reemplazado por microsílce. El calor total puede ser reducido en 15% a 30% dependiendo del tipo de cemento y la cantidad de microsílce empleada. Excepto para la combinación del 10% de microsílce y un reductor de agua del grupo de los lignosulfonatos, todas las pastas muestran una disminución en el calor total de hidratación cuando se las compara con una pasta de cemento simple, siendo el incremento en el calor total posiblemente debido a una interacción entre la microsílce y el lignosulfonato.

4.6.- REACCIÓN CON ADITIVOS QUÍMICOS

Debido a su alta área superficial, las microsílces incrementan la demanda de agua en el concreto. Los superplastificantes son recomendados en orden a disminuir la demanda de agua a un nivel apropiado y permitir una

adecuada dispersión y apropiado acomodo de las partículas de microsilíce. La adsorción de polímero molecular actúa sobre la superficie de los granos de cemento facilitando la dispersión de éste. Igualmente facilitan la dispersión de la microsilíce en el cemento o mezclas de concreto.

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

La microsilíce con superplastificantes no densifica el concreto en el sentido usual del término; si la adherencia pasta-agregado se adhiere para producir un determinado incremento de resistencia y que dicho incremento no parece tener efecto sobre la reducción de la porosidad. Esta es controlada principalmente por la relación agua/material cementante, la cual puede ser disminuida por el empleo de superplastificantes. Esto permite entender mejor el mecanismo por el cual se mejoran las propiedades mecánicas del concreto que contiene tanto microsilíce como superplastificantes sean de naturaleza física o puzolánica.

A la edad de 7 días, la influencia de las microsilíces sobre la resistencia en compresión del concreto puede ser atribuida principalmente a efectos físicos. A una edad de 28 días, tanto los efectos físicos como los químicos serán significativos.

5.- EFECTO SOBRE LAS PROPIEDADES DEL CONCRETO FRESCO

Debido su alta superficie específica, la demanda de agua de los concretos que las contienen se incrementa con el aumento de ellas. A fin de alcanzar la máxima mejora en la resistencia y permeabilidad, estos concretos deberán incorporar, como reductor de agua, un aditivo superplastificante. El dosaje dependerá de la cantidad de microsilíce y del tipo de reductor.

Los concretos frescos que contienen microsilíce son más cohesivos y menos propensos a la segregación que aquellos que no la contienen, aunque aparecen mas ligosos conforme el contenido de microsilíce se incrementa.

La presencia de microsilices no debería significar cambios en la magnitud de la pérdida de asentamiento en la mezcla dada, Sin embargo, desde que son empleadas conjuntamente con superplastificantes, habrá cambios en las características de la pérdida de asentamiento. Se recomienda emplear mezclas de prueba usando los materiales a ser utilizados a fin de establecer las características de pérdida de asentamiento para una situación determinada.

Los aditivos químicos adicionados a la mezcla pueden afectar el tiempo de fraguado, el cual no es significativamente afectado por el empleo de microsilices por si mismas. Un control práctico del tiempo de fraguado puede ser alcanzado por el empleo apropiado de aditivos químicos.

Los concretos con microsilíce usualmente no segregan apreciablemente debido a la fineza de las microsilices y al empleo de superplastificantes. Sin embargo, el empleo de microsilices requiere adecuadas prácticas de manejo o consolidación ya que la segregación puede ocurrir por excesivo asentamiento, inadecuado proporcionamiento, mal manejo, o prolongada vibración.

La exudación se reduce en forma significativa en este tipo de concretos debido a la alta área superficial de las microsilices a ser humedecidas, lo que deja muy poca agua libre. Adicionalmente, la exudación es reducida por bloqueo físico de los poros en el concreto fresco.

Desde que los concretos con microsilíce exhiben significativa reducción en la exudación, el potencial para agrietamiento por contracción plástica se incrementa especialmente si se ha incorporado microsilices. Por lo tanto debe tenerse cuidado para prevenir pérdidas tempranas de humedad de concretos con microsilices recién colocados, especialmente bajo condiciones las cuales promueven un rápido secado de la superficie por uno o mas factores tales como

la alta temperatura del concreto, baja humedad, baja temperatura ambiente combinada con alta temperatura del concreto, y mucho viento.

Todas las causas mencionadas hacen necesario proteger la superficie de los concretos con microsilíce recién colocados para prevenir una rápida evaporación de agua. Se puede emplear lagunas, retardadores de evaporación, cortavientos, y curado inmediato, todos los cuales han sido empleados con éxito para eliminar el agrietamiento por contracción plástica durante la colocación de concretos con microsilíce.

Los concretos fresco y endurecido que contienen microsilíce son generalmente más oscuros que los convencionales. A menudo las diferencias de color desaparecen con el tiempo.

El dosaje de incorporador de aire necesario para producir el volumen requerido de aire en el concreto usualmente se incrementa con aumentos en el volumen de microsilíces debido a su muy alta superficie, el área de ésta y los efectos del carbón cuando él está presente.

El empleo de microsilíces no cambia significativamente el peso unitario del concreto. Algunos cambios son el resultado de otros cambios debidos a modificaciones en el proporcionamiento efectuadas para acomodar la mezcla al empleo de microsilíce. Está aceptado que la microsilíce deberá incrementar la densidad del concreto, producir un concreto menos permeable, pero no producirá un concreto con alta masa por unidad de volumen.

6.- EFECTO SOBRE LAS PROPIEDADES DEL CONCRETO ENDURECIDO

6.1.- POROSIDAD

La porosidad del concreto no parece afectada en forma importante por el empleo de las microsilíces, aunque ellas hacen la estructura porosa de éste más

homogénea por disminución del número de grandes poros. Se explica este comportamiento por la lentitud de la pérdida de agua durante el secado del concreto. Adicionalmente, la porosidad total permanece prácticamente la misma para concretos con o sin microsilíce. Bajo las mismas condiciones de secado, el agua deberá evaporar más rápidamente de los grandes poros que de los pequeños poros. La lenta evaporación del concreto, cuando contiene microsilíce, es debida a que tiene una mayor proporción de poros finos que los de los concretos convencionales.

6.2.- PERMEABILIDAD

La permeabilidad del concreto es determinada por la medida de la magnitud del flujo del líquido o vapor a través del medio. La alta permeabilidad del concreto es sinónimo de baja durabilidad, favoreciendo los daños debidos a los procesos de congelación y deshielo del agua, deterioro de la pasta debido a la penetración de agresivos químicos, y corrosión del acero de refuerzo embebido por ingreso del ion cloruro. La reducción del tamaño de los poros capilares incrementa la probabilidad de transformar los poros continuos en discontinuos, permitiendo que la permeabilidad de los líquidos y vapores se reduzca por la adición de microsilíces. El ACI considera que son las características de baja permeabilidad de los concretos con microsilíce y la correspondiente mejora en la durabilidad a largo plazo los responsables en las importantes mejoras del concreto.

6.3.- ABSORCIÓN DE AGUA

Algunos investigadores han informado que el coeficiente de absorción de agua de concretos con microsilíce reforzados con fibra es menor que la de concretos ordinarios reforzados con fibra. Igualmente indican que la absorción de agua en los concretos lanzados con microsilíce es menor que la de los concretos lanzados normales, cuando ambos se ensayan de acuerdo a ASTM C 642. Otros investigadores indican que la absorción de agua en concretos que contienen microsilíce es mucho menor que la de los concretos de referencia. Los

concretos con microsilíce muestran una más gradual magnitud de la absorción de agua independientemente del hecho que ambos tipos de concreto han obtenido un grado similar de saturación.

6.4.- TRANSICIÓN PASTA-AGREGADO

La microestructura de la zona de transición pasta-agregado en los concretos es significativamente diferente de la del volumen de pasta, y se ha llegado a afirmar que la zona de transición es cerca de 50 μm mas espesa, después de estudiar el proceso de hidratación en la zona de transición para pastas hechas a base de cenizas, escorias y microsilíce, se ha concluido que todos los materiales tienen efecto sobre la morfología de la zona de transición y particularmente disminuyen el espesor y grado de orientación de los cristales de hidróxido de calcio que se forman adyacentes a las partículas de agregado. Se sugiere que el comportamiento de alta calidad de los concretos que se alcanza por el empleo de microsilíces es, en parte, el resultado de efectos interfaciales.

Se ha demostrado que las microsilíces no presentan en la pasta el mismo efecto de empotramiento que tienen en el concreto. Para la misma relación agua/material cementante, las pastas, con y sin microsilíce, tienen la misma resistencia y como conclusión se indica que solamente los concretos, debido a la adición de la microsilíce, tienen un incremento en la resistencia.

Las medidas cuantitativas con microscopio electrónico han confirmado la reducción de la porosidad en la zona de transición debido a la adición de la microsilíce. Lo anterior tiene el efecto de eliminar las zonas de debilidad y la mejora en la adherencia puede facilitar efectos de composición cuando las partículas de agregado actúan como un relleno de refuerzo y no como un elemento inerte. Ello tiende a un incremento en la resistencia del concreto sobre aquel que tiene la matriz de la pasta.

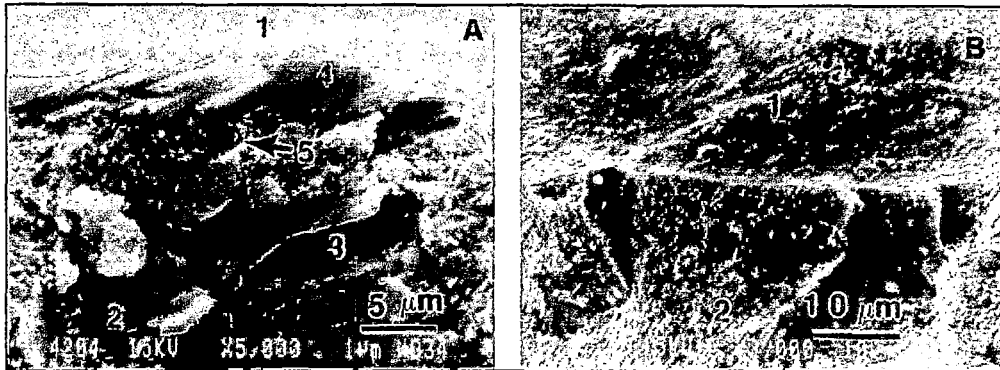


Imagen 10.2: Estructura típica de la zona de transición entre la matriz de la pasta de cemento y el agregado. A) sistema a los 28 días sin microsilíce; b) sistema a los 28 días con microsilíce. (1) superficie del agregado (2) pasta de cemento; (3) vacíos (4) hidróxido de calcio; y (5) microgrietas.

(Fuente: ACI 234R-96, Guide for the Use of Silica Fume in Concrete, fig 5.5; pag 16)

6.5.- MÓDULO DE ELASTICIDAD Y RELACIÓN DE POISSON

Se ha reportado para los concretos de alta resistencia con microsilíce curados por 28 días, un módulo de elasticidad estático de 43 GPa para una resistencia a la compresión de 98 MPa. El módulo de elasticidad estático de los concretos con microsilíce es aparentemente similar al de los concretos preparados con cemento portland y resistencias similares. El módulo de elasticidad dinámico se incrementa con el aumento del contenido de microsilíce de la pasta. Se ha concluido que el comportamiento esfuerzo-deformación de los concretos con microsilíce es similar al de los concretos a base de cemento portland. Se han reportado relaciones de Poisson de 0.21 para concretos con microsilíce de 98 MPa. En general la relación de Poisson aumenta con la resistencia del concreto, y esta variación se ha considerado que no es significativa.

6.6.- ESCURRIMIENTO PLÁSTICO

No se han encontrado diferencias significativas entre el escurrimiento plástico de mezclas con y sin microsilíce para reemplazos hasta del 15% de cemento en mezclas de 80 a 100 MPa. Los mismos resultados se han encontrado para mezclas hasta de 25% de reemplazo en resistencias que variaban de 50 a 80 MPa. Las divergencias entre laboratorios hacen difícil las

conclusiones específicas excepto que el escurrimiento plástico de concretos con microsílces no es mayor que el de concretos de igual resistencia sin microsílce.

6.7.- CONTRACCIÓN POR SECADO

La contracción por secado de concretos con microsílce, después de 28 días de curado húmedo, es generalmente comparable a la de los concretos de control independientemente de la relación agua/material cementante. Aparentemente la contracción por secado es poco influenciada por el contenido de microsílce hasta el 10% por masa del cemento. En mezclas pobres la contracción por secado se incrementa debido a que el secado rápido inhibe la reacción puzolánica. Se ha reportado que la contracción por secado de los concretos de alta resistencia con microsílce es igual o algo menor que la de los concretos de igual resistencia sin microsílce. Igualmente se ha encontrado que, para igual resistencia, la contracción por unidad de volumen de pasta es similar, ya sea que el concreto contenga o no microsílce.

6.8.- RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

La principal contribución de las microsílces al desarrollo de la resistencia del concreto en temperaturas de curado normales tiene lugar entre los 3 y 28 días. Se ha observado que la resistencia a la compresión al día de los concretos con microsílce es prácticamente igual a la de los concretos de control cuando la microsílce es empleada como un reemplazo directo. Cuando la microsílce es empleada como una adición a la mezcla de cemento portland con cenizas, la resistencia al día puede ser significativamente mas alta que la de control, dependiendo de la cantidad de microsílce añadida. A los 28 días la resistencia en compresión de los concretos con microsílce es siempre mayor y en algunos casos significativamente mas alta.

La contribución de las microsílces al desarrollo de resistencia después de 28 días es importante. Esta situación comprende a los concretos hechos con cenizas de la Clase F de la Norma ASTM C 618, en los que la reacción

puzolánica es muy lenta en las edades iniciales, y la contribución al desarrollo de resistencia del concreto es evidente después de los 28 días y continua por más de un año. La Figura 10.1 muestra la resistencia a la compresión de pastas y concretos con y sin microsílíce para la misma relación agua/material cementante.

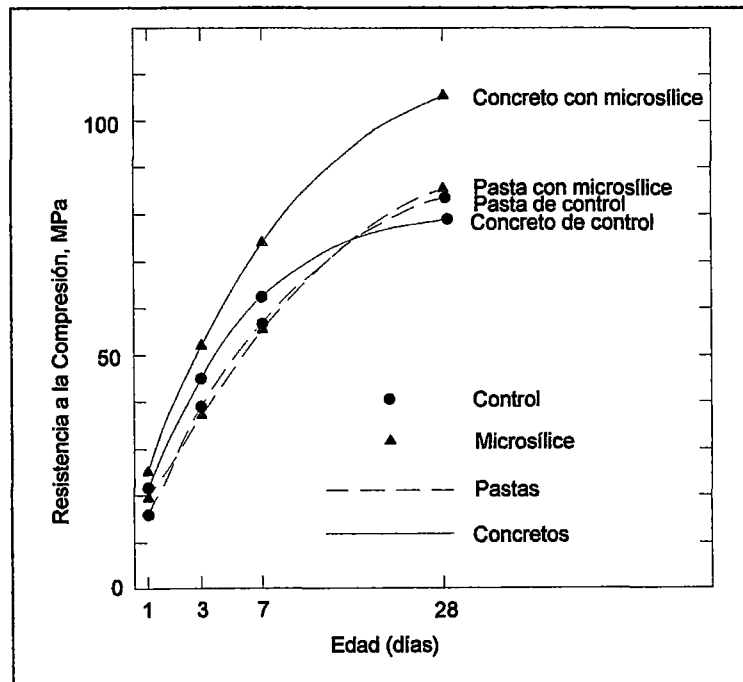


Figura 10.1: Resistencia a la compresión de pastas y concretos con y sin microsílíces para la misma relación agua material cementante (Fuente: ACI 234R-96, Guide for the Use of Silica Fume in Concrete, fig 5.4; pag16)

Los efectos de la temperatura sobre la resistencia en compresión han sido estudiados por diferentes investigadores reportándose que cuando el concreto es curado a 10°C, la presencia de microsílíce no mejora significativamente la resistencia del concreto a los 7 días. En el caso de altas temperaturas de curado, entre 20°C y 65°C, la presencia de microsílíces mejora la resistencia a los 7 días, así como la resistencia después de un largo periodo de curado. La acción puzolánica es muy sensible a la temperatura, pero lo es menos para microsílíces que para cenizas.

Como se mencionó al inicio de este Capítulo con la microsílíce podemos obtener resistencias muy altas tal como lo demostró la Ing. Patricia Morales en el año 2000, en el LEM - UNI. Para ello utilizó cemento portland Tipo I y cemento

Tipo V; superplastificantes y microsílíce densificada en polvo. Por tanto los resultados fueron:

Cemento Tipo I + Superplastificante + Microsílíce		
Edad (días)	Area (cm ²)	Esfuerzo Prom. (kg/cm ²)
3	78.54	416.03
7	78.54	519.80
28	78.54	748.56
42	78.54	1007.34
90	78.54	1081.83
180	78.54	1180.71
360	176.72	1500.40

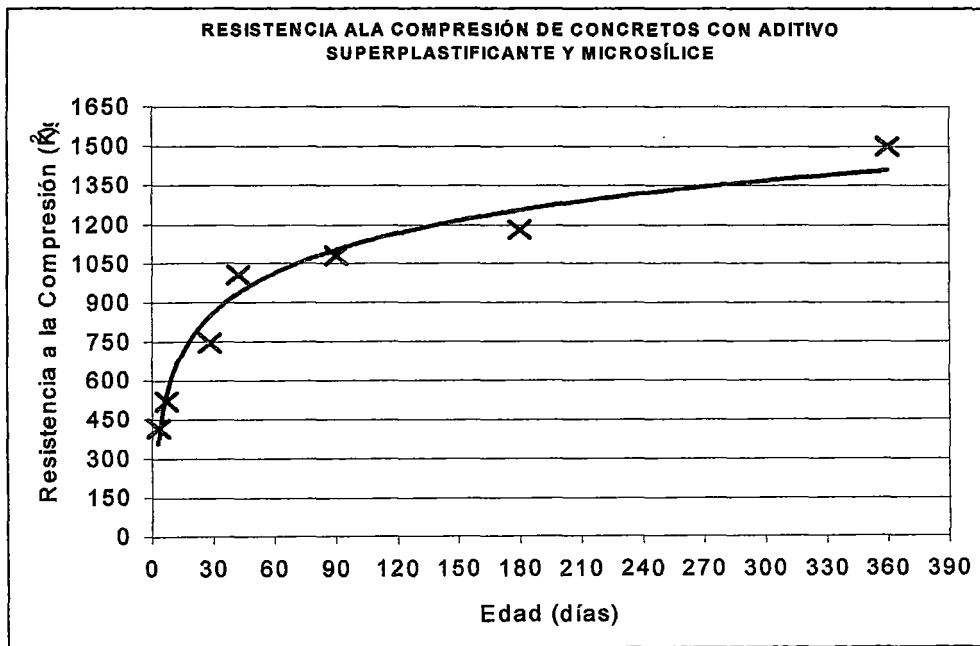


Figura 10.2: Se presenta un cuadro resumen y grafico de resultados de resistencia a la compresión obtenidos para Concretos con aditivo superplastificante y microsílíce obtenidos en el LEM - UNI.

De la Figura 10.2 podemos observar que se obtuvo una resistencia a la compresión de 1500 kg/cm^2 . La resistencia a la tracción conserva su proporción del 10% al 11% del valor de la compresión.

6.9.- RESISTENCIA A LA FLEXIÓN Y TENSIÓN

El desarrollo de resistencias a la flexión y tensión de concretos que contienen microsílices es similar a la que se ha observado en concretos sin adición de microsílíce. Para ambos tipos de concretos, conforme la resistencia en compresión se incrementa la resistencia en flexión también se incrementa, pero en una magnitud gradualmente decreciente. Sin embargo, debido a que en los concretos endurecidos la relación de la resistencia en tensión a la resistencia en compresión es fuertemente afectada por las propiedades de los materiales empleados, no existe una relación única entre los diversos tipos de resistencias. Si la resistencia en tensión es importante para el diseño, ella deberá ser ensayada para concretos individuales.

Se ha reportado que para concretos de 100 MPa con 593 kg/m^3 de cemento y 20% de microsílíce, la relación de la resistencia en flexión a compresión variaba de 0.13% a 0.15%. El módulo de ruptura de los concretos con microsílíce preparados con agregado grueso a base de dolomita y con resistencias en compresión entre 51 y 107 MPa tienen 1.02 veces la raíz cuadrada de la resistencia en compresión expresada en MPa. La resistencia en tensión varía entre 5.8% a 8.2% de la resistencia en compresión a la misma edad. Los mas altos porcentajes fueron a 1 y 3 días. La resistencia en tensión varía de 3.4 MPa a la edad de 1 día a un máximo de 7 MPa a la edad de 90 días para resistencias en compresión de 100 MPa. Se ha encontrado que la resistencia a la tensión de los concretos preparados con cenizas y los concretos preparados con microsílíce son similares, variando entre 9.7% y 10.6% de la resistencia en compresión.

6.10.- RESISTENCIA POR ADHERENCIA

La presencia de microsílices mejora la resistencia por adherencia de tres

tipos de interfaces: pasta de cemento a agregado; pasta de cemento a acero de refuerzo; y concreto nuevo a concreto antiguo. La adición del 5% de microsilíce incrementa la resistencia por adherencia a los 28 días aproximadamente al doble que la de la muestra sin microsilíce. La resistencia por adherencia de las muestras que contienen microsilíce es más alta que la de las muestras sin ella. La resistencia por adherencia se incrementa de 2 MPa para pastas sin microsilíce a 2.4 MPa para pastas que contenían 30% de microsilíce. La adición al concreto de microsilíce da por resultado un incremento en la resistencia por adherencia el cual es proporcional a la raíz cuadrada de la resistencia en compresión.

6.11.- RESISTENCIA A LA CONGELACIÓN

En concretos con aire incorporado, la microsilíce tiene efectos positivos sobre la resistencia a la congelación o sobre el control del descascaramiento. Los valores críticos para el factor de espaciamiento son menores para los concretos con microsilíce. El descascaramiento de la superficie es menos severo, y se ha observado reducciones importantes para incorporaciones de reemplazo de 5% de microsilíce. Se ha observado resultados similares para contenidos de microsilíce mayores del 10% y relación agua/material cementante mayor de 0.38. En concretos con aire incorporado y microsilíce, y relaciones agua/material cementante de 0.25, hay una buena resistencia a la congelación independientemente del contenido de microsilíce. Para relaciones agua/material cementante de 0.35, a 0.45 y 0.55 la resistencia a la congelación es pobre.

Ningún concreto sin aire incorporado falla en menos de 50 ciclos, independientemente de la relación agua-microsilíce, cuando el curado húmedo dura 14 días antes de la congelación. Es importante recordar que la calidad de la microsilíce y el cemento, las proporciones de la mezcla, y el tiempo de curado antes de la primera congelación pueden dar grandes diferencias en los resultados, por lo que se recomienda revisar los valores de aire incorporado a ser empleados de acuerdo a la Norma ASTM C 666 en lugar de la Norma ASTM C 671.

6.12.- RESISTENCIA A LOS ATAQUES QUÍMICOS

Los concretos que contienen microsilíce muestran mejor resistencia a los ataques químicos que los otros tipos de concretos, debido a su menor permeabilidad y su reducción en la permeabilidad. Adicionalmente, la adición de 20% de microsilíce a la masa de cemento reduce considerablemente la magnitud de la difusión del ion cloruro cuando se la compara con el comportamiento de pastas de la misma relación agua-cemento. Si se incrementa la relación agua/material cementante, la resistencia a la difusión del ion cloruro disminuye.

6.13.- RESISTENCIA A LA PENETRACIÓN DEL ION CLORURO

Un método de bajo costo, rápido y ampliamente empleado es la aplicación de la Norma ASTM C 1202 para evaluar la resistencia del concreto al ion cloruro a fin de medir la carga eléctrica que pasa a través del concreto y la relación con la penetración de cloruros. La permeabilidad de los concretos y su resistencia a la penetración del ion cloruro, en los concretos con microsilíce, depende del método y longitud del tiempo de curado. La permeabilidad disminuye con el tiempo y ésta disminución es proporcional al grado de dilatación del concreto. La Tabla 10.2 presenta valores típicos obtenidos empleando la Norma ASTM C 1202 para diversos tipos de concreto.

6.14.- RESISTENCIA A LA ABRASIÓN EROSIÓN

La excelente resistencia de los concretos con microsilíce a los daños por abrasión-erosión ha sido reconocida encontrándose valores similares a los convencionales con una relación agua/material cementante de 0.40 y un agregado conformado por horsteno duro. La mejora en la resistencia a la abrasión-erosión es atribuida a la muy alta resistencia en compresión de la fracción pasta de concreto.

6.15.- RESISTENCIA AL FUEGO

Los concretos con 20% de microsílíce, en peso del cemento, y una relación agua/material cementante menor a 0.35, con resistencias en exceso de 170 MPa, tienen un comportamiento muy poco diferente del de los concretos convencionales. En los concretos con microsílíce no se ha informado de un astillamiento significativo en la cara expuesta al fuego.

6.16.- RESISTENCIA A LA EXPANSIÓN ÁLCALI-AGREGADO

Los efectos positivos de las microsílíces sobre la reactividad álcali-sílíce (ASR) son principalmente debidos a la habilidad de las microsílíces para combinar rápidamente con los álcalis en la solución de poros y la incorporación de los álcalis como sustitutos del calcio en la matriz C-S-H, gracias a ello los álcalis en solución no tienen la concentración suficiente para elevar el pH de la solución de poros lo bastante para causar expansión peligrosa por ataque a la sílice reactiva en el agregado. Un 10% de reemplazo, por masa, con la microsílíce permite tres veces mas álcalis en el CSH que en el cemento portland simple. Se ha encontrado que la magnitud de la difusión de álcalis a través de los poros del concreto cuando se incorpora microsílíces, es menor restringiendo la capacidad de reacción de los álcalis al migrar hacia los agregados reactivos. Se requiere 10% de reemplazo de los cementos con alto contenido de álcalis para reducir la expansión a 0.020% a los 14 días. Las arenas riolíticas expansivas reducen su expansión a menos del 10% anual con 5% de microsílíce.

Como conclusión puede afirmarse que las microsílíces son efectivas en controlar la expansión, requiriéndose volúmenes del orden del 20% como reemplazo de masa. Igualmente reemplazos del orden del 5% incrementan la reacción cuando se utilizan agregados altamente reactivos. En resumen puede decirse que una microsílíce adecuadamente dispersada en el concreto es efectiva en controlar los efectos destructivos de la reactividad álcali-sílíce, recomendándose que cada fuente de microsílíce sea ensayada con el agregado reactivo antes de ser empleada.

Las microsílices son menos efectivas en controlar la expansión causada por la reacción álcali-carbonato, aunque ningún aditivo mineral es efectivo en combatir esta reacción.

6.17.- RESISTENCIA A LOS SULFATOS

La reducida permeabilidad de los concretos con microsílíce es suficiente para reducir el transporte de los iones sulfato dentro del concreto. Un concreto expuesto a soluciones de sulfato de sodio mejora su durabilidad por la adición de microsílices. El empleo de éstas con cemento Tipo I mejora el comportamiento a niveles similares a los de los cementos Tipo V. En el caso del sulfato de amonio se ha encontrado mejoras en los morteros preparados con microsílices. En altas concentraciones de sulfato de magnesio, la microsílíce mejora el comportamiento de pastas preparadas con cemento Tipo I o cemento Tipo V. En ambos casos la adición de microsílíce reduce la resistencia e incrementa la pérdida de masa por un factor de 5 a 10.

6.18.- RESISTIVIDAD ELÉCTRICA

Un incremento en la resistividad eléctrica hace al concreto más resistente a las corrientes galvánicas de corrosión por reducción de la magnitud de la corrosión. Se ha comprobado que el 20% de adición de la microsílíce presenta una resistividad de 110,000 ohm-cm. Igualmente los concretos a los que se ha incorporado microsílíce tienen una alta resistencia eléctrica al paso de las corrientes de corrosión. Todos los ensayos indican una alta resistividad como índice de un buen comportamiento de resistencia a la corrosión.

7.- APLICACIONES

7.1.- ASPECTOS GENERALES

Los edificios de más de 70 pisos son cada vez más representativos de los concretos de más de 150 MPa. Los concretos con microsílíce han significado un concreto mucho más durable en el tiempo con un menor costo.

7.2.- CONCRETOS DE ALTA RESISTENCIA

El empleo conjunto de microsílces y superplastificantes permite alcanzar valores de 150 MPa o mayores para concretos vaciados en sitio. En la producción de concretos premezclados y el empleo de concretos sobre 100 MPa, se puede anticipar las propiedades mecánicas y el nivel de comportamiento. A continuación resultados obtenidos en especímenes cilíndricos de 10 x 20 cm en condición de curado húmedo:

1 día	.....66 MPa
7 días	.....97 MPa
28 días	.....114 MPa
90 días	.....117 MPa
128 días	.....126 MPa

Combinaciones adecuadas de agua-cementante de 0.25, y porcentajes de microsílce y superplastificantes, han permitido obtener concreto de permeabilidad nula y resistencias de 150 MPa a los 90 días.

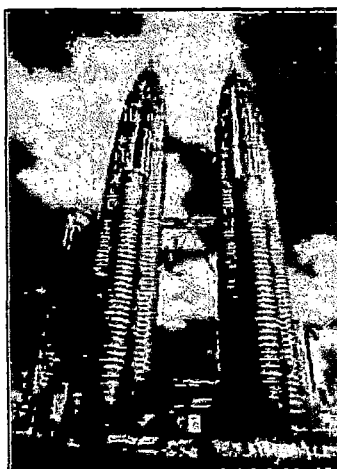


Imagen 10.3: "Petronas Towers". En Kuala Lumpur, Malasia; con 452 m de altura, inaugurado en 1996. Las primeras mas altas del mundo, hoy superadas por "La Torre Taipei 101". En la mezcla de concreto se empleo cemento rico en C3S; arenas con módulo de fineza de 3.1, como agregado grueso una caliza de 3.4 de pulgada; como aditivo un superplastificante del grupo polcarboxilatos; y como adición microsílce al 12%.

El desarrollo de altas resistencias plantea la necesidad de nuevos métodos de ensayo para tener un mejor conocimiento de las mismas. Las Normas ASTM no fueron desarrolladas teniendo en cuenta concretos de alta resistencia, pero no se ha encontrado ninguna razón que impida efectuar estos ensayos.

7.3.- EDIFICIOS

Una de las principales aplicaciones de los concretos de alta resistencia en los edificios son las columnas en las que se puede ahorrar cemento, acero, concreto, mano de obra, peso y tiempo.

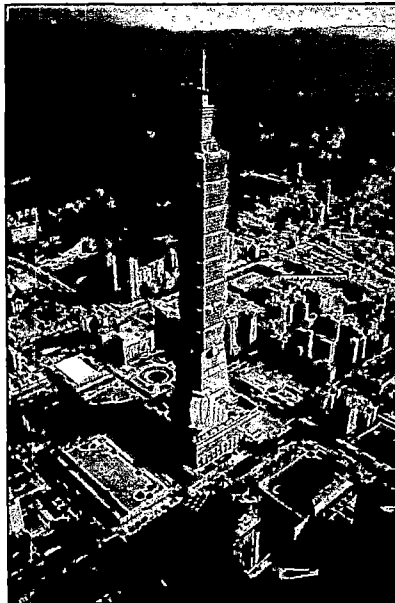


Imagen 10.4: "Taipei 101". El rascacielos más alto del mundo, con 508 m de altura y 101 pisos, puede soportar maremotos y terremotos que lleguen a la intensidad 7 de Richter. Costó 1.800 millones de dólares; es el centro financiero de la capital de Taiwan. Tiene los elevadores más rápidos del mundo, sistema de antibalaceo más grande conocido, sensores sísmicos, y sistemas de seguridad conectados con internet.

Edificaciones de gran envergadura hechas recientemente en Malasia, Taiwan, y los Emiratos Árabes, son algunos ejemplos en los cuales se ha empleado microsílices y superplastificantes. En Japón existen puentes de ferrocarril hechos con concretos que contenían microsílices. En el Perú se utiliza para concreto lanzado y otras pequeñas aplicaciones mineras.

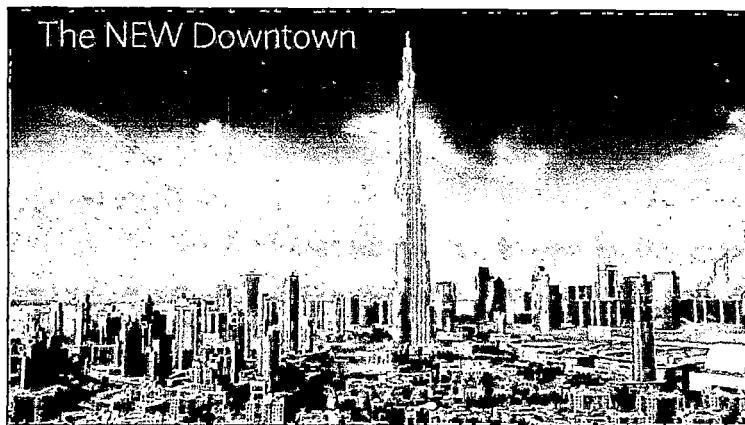


Imagen 10.5: “La Torre de Burj Dubai”. Ubicada en los Emiratos Árabes Unidos, con 800 metros de altura, 300 metros mas que el actual edificio mas alto del mundo (la Torre Taipei en Taiwan); será finalizada en el 2009, con un costo de 8.000 millones de dólares.

7.4.- CONCRETO LANZADO

Aparte de las mejoras en la resistencia y durabilidad, las microsílices permiten una reducción en el rebote del orden del 50% al 70%, permitiendo construir capas de 2 a 300 mm en una pasada, siendo empleadas en el concreto lanzado o shotcrete con gran éxito. El empleo de lechadas en concreto permite que estas sean introducidas conjuntamente con el agua a través del pistón. El proceso de concreto lanzado mejora empleando microsílices al reducir el rebote en un factor de 3 a 5; el espesor de las capas en cada pasada puede incrementarse por encima de 200 mm, se puede emplear fibra, y la posibilidad de lograr una buena adherencia entre capas permite reducir la cantidad de aditivo acelerante, evitándose incrementar el contenido de cemento para compensar el efecto del aditivo acelerante. Estos concretos son fáciles de bombear y permiten obtener altas resistencias.

La adición de microsílices en las mezclas de concreto lanzado secas, en proporción de 10% a 15% por masa de cemento portland mejora significativamente las propiedades adhesivas y cohesivas del concreto lanzado fresco aplicado. La microsílíce crea una mezcla muy densa y pegajosa con una completa falta de exudación.

7.5.- Puentes

Los concretos con microsílces han sido empleados en la construcción de puentes para obtener altas resistencias, baja permeabilidad, alta resistividad eléctrica, impedimento de cloruros al acero de refuerzo, capas de cubierta de losas, control de la reacción álcali-agregados, e incorporación de aire para controlar el proceso de congelación. Debido a la incorporación de aire las mezclas están en tres categorías:

- a) Mezclas con bajo dosaje de microsílce y un factor de seguridad aceptablemente moderado, que incorporan 1200 kg/m³ de microsílce con relaciones agua/material cementante del orden de 0.40.
- b) Mezclas similares pero más conservadoras en el factor de seguridad. Dosajes de microsílce en el orden de 1200 a 1600 kg/m³ y relaciones agua/material cementante del orden de 0.35.
- c) Mezclas con un dosaje bajo de microsílce y moderada relación agua/material cementante. Se emplean en aquellos casos en que la microsílce es utilizada como material de reemplazo del cemento. El dosaje de microsílce varía de 400 a 800 kg/m³ y la relación agua/material cementante está en el orden de 0.45.

Para la tercera categoría la microsílce reemplaza a parte del cemento. Se ha elegido la segunda categoría para las sobrecapas, y las otras aplicaciones se hacen empleando la primera categoría.

No existen informes sobre corrosión del acero embebido en concretos con microsílce. Se han especificado y obtenido resistencias del orden de 700 kg/cm² para vigas de puentes. En los casos de ataque al concreto por procesos de congelación, se ha empleado concretos con microsílces en los parapetos de los puentes y otros elementos de la estructura. En todos los casos no se ha observado evidencias de deterioro o corrosión.

En relación con la resistencia al impacto no se han detectado daños en los puentes. Respecto al desgaste por erosión y/o abrasión, se ha podido determinar que en tanto los concretos convencionales tienen un buen comportamiento durante 2 años, los concretos con microsilice exceden largamente ese tiempo (7 años).

7.6.- APLICACIONES EN EL PERU

En el Perú existen algunas limitaciones para su uso como la falta de difusión y un desconocimiento general acerca de sus aplicaciones y ventajas. Algunas empresas concreteras han venido empleando el concreto con microsilice, a continuación algunos ejemplos:

- Proyecto especial del tren eléctrico; una de las aplicaciones mas antiguas, el concreto colocado alcanzo los 490 Kg/cm^2 para las columnas. En casi todos los tramos no había mucho espacio disponible para los pilares y la elevada resistencia del concreto permitió ahorrar espacio y el diseño por carga axial.
- Marrito Hotel; El concreto se coloco en la base de las columnas colindantes con el lote vecino, además de la carga axial que debía soportar. La resistencia especificada en el proyecto fue de 600 Kg/cm^2 , pero los ensayos dieron hasta 750 kg/cm^2 .
- Planta de la Compañía COPSA; en el año 1991 se construyo la planta neutralizadora para aceite, cuyo volumen requerido fue de 500m^3 y su característica principal era que se requería buena resistencia a la agresividad química. Los ensayos de resistencia promedio fueron de 960Kg/cm^2 .
- Remodelación y ampliación del centro comercial aminos del Inca; para poder efectuar la ampliación fue necesario el empleo de un concreto especial ya que no era posible el empleo de elementos estructurales que tuvieran gran sección. La resistencia promedio requerida fue de 700 Kg/cm^2 pero esta alcanzo 764 kg/cm^2 .

**Tabla 10.1 : Composición química de la microsílíce
Hornos de sílice de Noruega y Canadá**

Constituyente	Noruega (%)	Norte América (%)
SiO ₂	90 – 96	93.7
Al ₂ O ₃	0.5 – 3.0	0.30
Fe ₂ O ₃	0.2 – 0.8	0.8
MgO	0.5 – 1.5	0.2
CaO	0.1 – 0.5	0.2
Na ₂ O	0.2 – 0.7	0.2
K ₂ O	0.4 – 1.0	0.5
C	0.5 – 1.4	0.6
S	0.1 – 0.4	0.1
Otros	0.7 2.5	2.8

(Fuente : “Investigación del concreto de alta resistencia: Metodología de obtención y determinación de las propiedades de los concretos de 550 – 1200 Kg/cm²”,
Ing. Patricia Morales)

**Tabla 10.2: Permeabilidad de los cloruros de acuerdo a la Norma AASHTO
T 277 ó ASTM C 1202**

Paso de carga (Coulombs)	Permeabilidad a los cloruros	Valores típicos de los concretos que se indican
Mas de 4000	Alta	Relación a/c alta (0.6) concreto convencional
2000 a 4000	Moderada	Relación a/c moderada (0.4 a 0.5) concreto convencional
1000 a 2000	Baja	Relación a/c baja (0.4) concreto convencional
100 a 1000	Muy baja	Concreto modificado con látex, baja relación a/material cementante microsílíce (5 a 15%), y concreto sellado internamente
Menos de 100	Despreciable	Concretos impregnados con polímeros; concretos polímeros; baja relación agua material cementante, concretos con alto contenido de microsílíce (15 a 20%)

(Fuente: ACI 234R-96, “Guide for the Use of Silica Fume in Concrete”,
Tabla 5.1, pág. 21)

CAPITULO XI

GUIA PRACTICA PARA USO DE ADITIVOS Y ADICIONES

CAPITULO XI

GUÍA PRÁCTICA PARA USO DE ADITIVOS Y ADICIONES

I.- ADITIVOS

El dosaje del aditivo y de una adición a ser empleados en la mezcla, deberá estar condicionado a las propiedades que se desean modificar y a las recomendaciones del fabricante en función de las condiciones ambientales y las de obra.

Como ya se mencionó los aditivos son sustancias químicas las que añadidas a las mezclas de concreto o mortero, modifican, mejoran o incrementan las propiedades físicas seleccionadas tanto en estado fresco como endurecido. Los aditivos están agrupados en diversos tipos, cada uno cumple con una función determinada.

El obtener resultados óptimos depende de varios factores debido a que cada mezcla es muy particular pues se realiza en diferentes condiciones, algunas de ellas son el clima, la temperatura, el uso de los distintos tipos de cemento. En ocasiones se utilizan dos aditivos además de requerirse diferentes propiedades por todo ello ocurren variaciones en el tiempo de mezclado y en el tiempo de adición del aditivo, siguiendo estas consideraciones es recomendable preparar mezclas de prueba hasta encontrar una apropiada dosificación y la aplicación del aditivo en el momento adecuado de mezclado, con estos dos criterios se podrán obtener óptimos resultados.

El modo de aplicación tiene mucha influencia en el buen resultado de la mezcla, es recomendable seguir las especificaciones del fabricante y comprobarlas con mezclas de prueba, pues las condiciones de clima,

temperatura, naturaleza de los agregados, tipo de cemento, pueden variar y por lo tanto necesitar ajustes.

A continuación se presentan los siguientes criterios para el modo de aplicación de los aditivos:

- Incorporando el aditivo al inicio del mezclado los resultados son satisfactorios.
- Incorporando el aditivo en el agua de mezclado los resultados son óptimos.
- Se puede añadir el aditivo de acuerdo a lo indicado por el fabricante y la experiencia del constructor.
- No deberá añadirse el aditivo sobre el concreto seco excepto en el caso de aditivos ligantes.
- Se mezclará el concreto de acuerdo a las recomendaciones indicadas por el fabricante.
- Si se emplean dos o más aditivos es preferible se añadan independientemente, no se mezclan los aditivos entre si y es recomendable incorporarlos en diferentes intervalos de tiempo, así como incrementar el tiempo de mezclado.

INCORPORADORES DE AIRE	
DESCRIPCIÓN	Producción y dispersión de minúsculas burbujas de aire en la masa del concreto para una mejor resistencia a la congelación y deshielo.
DOSIS	Según el fabricante. Usualmente se recomienda entre 0.03% a 0.05% del peso del cemento.
PROPIEDAD QUE CONFIERE AL CONCRETO	Incorpora microporos en forma de burbujas al concreto produciendo: <ul style="list-style-type: none">- Resistencia al hielo-deshielo.- Mayor trabajabilidad- Menor permeabilidad- Eventual exudación
APLICACIONES RECOMENDADAS	<ul style="list-style-type: none">- Protección al hielo-deshielo.- Estructuras en zonas de baja temperatura.- Protección contra agentes químicos
LIMITACIONES	Menor resistencia mecánica.
CONSIDERACIONES	Los aditivos incorporadores de aire deberán emplearse en el concreto de estructuras expuestas a la acción conjunta de la humedad y de temperatura por debajo de los 4°C. Siempre debe recordarse que el 1% de un aditivo incorporador de aire reduce la resistencia en compresión del concreto en el orden de 5%, la utilización indiscriminada de aditivo incorporador de aire puede ser negativa para el buen comportamiento final del concreto.

ACELERANTES	
DESCRIPCIÓN	Aceleran el inicio del fraguado y desarrollo de resistencia inicial. Además permiten desencofrar, someter a cargas o también exponer el concreto al hielo dentro de un intervalo de tiempo bastante más corto.
DOSIS	Se debe seguir las instrucciones del fabricante en cuanto al porcentaje añadido a la mezcla, recordando que un exceso puede ocasionar rigidización de la mezcla y elevación innecesaria de la temperatura inicial del concreto.
PROPIEDAD QUE CONFIERE AL CONCRETO	Aumentan las resistencias iniciales y finales.
APLICACIONES RECOMENDADAS	<ul style="list-style-type: none">- Vaciado del Concreto en clima frío.- Concreto lanzado.- Concreto prefabricados.- Reducción del plazo de desencofrado.- Reparaciones.
LIMITACIONES	Liberan más calor.
CONSIDERACIONES	<ul style="list-style-type: none">- Se emplea los aditivos acelerantes únicamente con el propósito de reducir el tiempo de fraguado.- El cloruro de calcio es el acelerante mas utilizado.- Si el acelerante va ha ser empleado para acelerar el desarrollo de resistencia, además de las recomendaciones del fabricante en cuanto al porcentaje mas recomendable, el ingeniero deberá tener en cuenta los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio, sin dejar de recordar que un exceso de cloruro de calcio, al disminuir la pasividad del concreto, puede dar origen a un proceso de corrosión del acero de refuerzo y de los elementos metálicos embebidos.

REDUCTORES DE AGUA

DESCRIPCIÓN	Los aditivos reductores de agua permiten una disminución en la relación agua-cemento, con el consiguiente incremento en la resistencia y modificación en el tiempo de fraguado, sin variación en la consistencia. Su empleo es recomendable cuando se requiere mejorar la resistencia del concreto sin modificar su facilidad de colocación en los encofrados.
DOSIS	Según las especificaciones del fabricante.
PROPIEDAD QUE CONFIERE AL CONCRETO	Mejorar la lubricación entre partículas, obteniéndose: – Mayor trabajabilidad para la misma cantidad de agua. – Mayor facilidad de colocación y compactación.
APLICACIONES RECOMENDADAS	– Concretos bombeados y premezclado. – Concretos en elementos prefabricados o estrechos – Concretos de alta resistencia.
LIMITACIONES	Un exceso puede significar una pérdida significativa de asentamiento.
CONSIDERACIONES	Alternativamente pueden ser reemplazados por un superplastificante.

ADITIVOS FLOCULANTES	
DESCRIPCIÓN	Reducción de la necesidad de agua y mejoramiento de la trabajabilidad.
DOSIS	Según el fabricante. Pero usualmente para aumentar trabajabilidad 0.5% a 1.0% del peso del cemento. Para reducir agua a 1.0% a 3.0% del peso del cemento.
PROPIEDAD QUE CONFIERE AL CONCRETO	Aumentan fuertemente la trabajabilidad, permitiendo: Reducir el agua de amasado para trabajabilidad constante, con incremento de resistencia.
APLICACIONES RECOMENDADAS	<ul style="list-style-type: none">- Concretos de piezas estrechas y difícilmente accesibles.- Concreto en climas cálidos.- Concretos bombeados.- Concretos de alta resistencia.- Concretos prefabricados.- Reparaciones.
LIMITACIONES	Obliga a mantener la cantidad de cemento constante a fin de facilitar la colocación por incremento en el asentamiento.
CONSIDERACIONES	Los aditivos floculantes requieren necesariamente un estudio previo de laboratorio para determinar el asentamiento que puede ser obtenido de acuerdo al porcentaje de empleo utilizado con la modificación del asentamiento obtenido.

SUPERPLASTIFICANTES

DESCRIPCIÓN	Los superplastificantes se ubican en el grupo de los aditivos reductores de agua de alto rango que actúan por reducción de las fuerzas que unen a las partículas.
DOSIS	Las dosis dependiendo del fabricante fluctúan desde 0.5% a 2% del peso del cemento. Aumentan las resistencias como reductores de agua, y como fluidificantes, aumentan la trabajabilidad.
PROPIEDAD QUE CONFIERE AL CONCRETO	En general, actúan como reductores de agua de alto rango o fluidificantes otorgando: <ul style="list-style-type: none">– Consistencia fluida sin disminución de resistencias.– Calidad homogénea, mínima segregación y exudación.– Disminución de retracciones y fisuración.– Facilidad de colocación y mayor rendimiento durante el vaciado.
APLICACIONES RECOMENDADAS	<ul style="list-style-type: none">– Concreto bombeado.– Concreto pretensado.– Concreto de alta resistencia.– Concreto de buena terminación.– Concreto bajo agua.– Morteros y lechadas de inyección.– Concreto para elementos esbeltos, con alta densidad de armaduras.
LIMITACIONES	En sobredosis puede provocar segregación.
CONSIDERACIONES	En la actualidad se trabaja con el grupo de los formaldehídos y el grupo de los policarboxilatos, el cual ha dado los mejores resultados, con reducciones de agua que permiten llevar la relación agua cemento al orden de 0.30, manteniendo la trabajabilidad y la consistencia de la mezcla. Facilitan la incorporación de adiciones y permitiendo un significativo incremento en la resistencia al facilitar la reacción química de las adiciones con el hidróxido de calcio para formar silicato de calcio hidratado.

ADITIVOS LIGANTES

DESCRIPCIÓN	Los aditivos ligantes son utilizados para aumentar las propiedades de unión de la mezcla de cemento, incrementando su resistencia por adherencia.
DOSIS	La cantidad ha ser empleada depende de las condiciones de obra y las recomendaciones del fabricante.
PROPIEDAD QUE CONFIERE AL CONCRETO	– Permite la unión entre concreto antiguo y concreto nuevo.
APLICACIONES RECOMENDADAS	– Para reparaciones
LIMITACIONES	Ninguna
CONSIDERACIONES	Ninguna

ADITIVOS COLORANTES

DESCRIPCIÓN	Los aditivos colorantes son pigmentos que se añaden a la mezcla a fin de producir el color deseado en el concreto acabado.
DOSIS	La adición de un pigmento al concreto no deberá exceder de 10% en peso de cemento, salvo el negro de carbón que deberá ser empleado en cantidades menores.
PROPIEDAD QUE CONFIERE AL CONCRETO	– Permiten dar al concreto tonalidades diversas, mejorando los concretos arquitectónicos.
APLICACIONES RECOMENDADAS	– En casos en los que se quiera obtener para el concreto una coloración determinada en el largo plazo. – Para concreto caravista.
LIMITACIONES	Costo de los pigmentos.
CONSIDERACIONES	Mal utilizados pueden decolorarse por acción del sol.

INHIBIDORES DE LA CORROSIÓN

DESCRIPCIÓN	Son los que previenen la corrosión en el acero de refuerzo.
DOSIS	La recomendada por el fabricante de acuerdo al tipo de aditivo.
PROPIEDAD QUE CONFIERE AL CONCRETO	<ul style="list-style-type: none">- Evita la pérdida de pasividad.- No altera significativamente las propiedades del concreto en estado fresco ni endurecido.- Controla la corrosión de los elementos metálicos embebidos en el concreto.
APLICACIONES RECOMENDADAS	<ul style="list-style-type: none">- Concreto bajo agua.- Concreto de permeabilidad media a alta.- Estructuras pre y post tensadas.- Concretos expuestos al ingresos de anhídrido carbónico o cloruros.
LIMITACIONES	Ninguna.
CONSIDERACIONES	<ul style="list-style-type: none">- Los Aditivos Inhibidores de la Corrosión incluyen el empleo de pequeñas cantidades de bentonita que al disminuir la permeabilidad del concreto reduce la corrosión.- El nitrito de calcio ha sido reportado como un efectivo inhibidor de la corrosión. Se ha empleado cromatos, benzonato de sodio al 2%, lignosulfonatos, nitrito de sodio al 2%, cloruro estañoso, etc. Con resultados variables, concluyéndose que el mejor inhibidor de la corrosión es un buen concreto y la ausencia de cloruros.

II.- ADICIONES MINERALES

Las adiciones minerales deben ser empleadas en función de las propiedades que desea alcanzar, por ejemplo: en el caso de la resistencia en compresión las puzolanas y/o las escorias pueden ser adecuadas para concretos hasta de 600 kg/cm^2 de resistencia en compresión medida a los 54 días; si se trata de resistencia entre 600 y 900 kg/cm^2 , a la misma edad, las cenizas de la Clase F pueden dar resultados mas convenientes; por encima de 900 Kg/cm^2 las microsílices son la adición mas recomendable.

En todo los casos en que se emplee adiciones, siempre debería emplearse superplastificantes dado que la mezcla tiende a secar debido a la alta fineza de la adición y ello provocaría una perdida de trabajabilidad que podría hacer necesario añadir agua a la mezcla, los superplastificantes cumplen esta función incrementando en forma importante la trabajabilidad y permitiendo reducir el agua hasta en un 30% sin pérdida significativas en el asentamiento. Los reductores de agua cumplen la misma función pudiendo ser utilizados en los casos de las puzolanas y las escorias cuando se desea incrementos de la resistencia dentro del orden indicado en el párrafo anterior.

Adicionalmente las adiciones tienden a disminuir la porosidad del concreto, interviniendo de esta forma de acuerdo a la Ley de Feret en una mejora importante en la impermeabilidad y un incremento en la resistencia. Igualmente al disminuir el agua la acción conjunta de aditivos y adiciones permite el empleo de relaciones agua cemento que pueden llegar a ser del 0.28 con lo que se cumpliría la Ley de Abrams sobre relación de resistencia y humedad.

PUZOLANAS

ORIGEN	Material de origen volcánico, crudas o procesadas que tienen propiedades puzolánicas.
PORCENTAJE DE EMPLEO	Algunas puzolanas se emplean de 15% a 35% sobre la base de la masa del material cementante total en el concreto. Las puzolanas naturales más reactivas pueden ser empleadas de 5% á 15% por masa del material cementante.
PROPIEDAD QUE CONFIERE AL CONCRETO	<ul style="list-style-type: none">- Incrementa su resistencia- Aumenta su durabilidad- Mejora su impermeabilidad- Mejora las propiedades al estado fresco- Incrementa la resistencia a ataques agresivos por agua de mar, soluciones de sulfatos en el suelo y aguas ácidas naturales.
CONSIDERACIONES	<p>Las puzolanas naturales crudas o procesadas son empleadas en la producción de concretos y morteros de cemento hidráulico en 2 formas: como un ingrediente de un cemento mezclado o como una adición mineral.</p> <p>El metacaolín ($Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$) es una puzolana natural, su empleo se ha desarrollado a partir de 1985, se comportan en una forma similar a las microsílices.</p> <p>La caolinita es altamente reactiva, las investigaciones indican excelente desarrollo de resistencia, reducción en la permeabilidad, y buena resistencia química, además de reducción en la penetración a los cloruros, buena resistencia a los procesos de congelación y deshielo. Mezclas con 8% a 12% de caolinita como reemplazo en mezclas de relación agua-cementante de 0.4 á 0.3 mejoran significativamente la resistencia en todas las edades.</p>
LIMITACIONES	Es recomendable hasta los 600 kg/cm ²
APLICACIONES	<ul style="list-style-type: none">- En Acueductos (ejemplo: el Acueducto de Los Ángeles en la Bahía de San Francisco).- Otras estructuras como los acueductos romanos proporcionan evidencias de la durabilidad de los morteros con puzolana-cal.

ESCORIAS DE ALTO HORNO

ORIGEN	Proviene de los hornos de fundición del hierro.
PORCENTAJE DE EMPLEO	Pueden ser empleadas del 25% al 75% por masa del material cementante total (ASTM C 595), a mas porcentaje de escoria menos ganancia de resistencia. El óptimo porcentaje de escorias que produce la mayor resistencia a los 28 días parece ser del 50% del material cementante total (esta relación puede variar dependiendo del grado de la escoria).
PROPIEDAD QUE CONFIERE AL CONCRETO	<ul style="list-style-type: none">– Incrementa su resistencia– Aumenta su durabilidad– Mejora su impermeabilidad– Mejora las propiedades al estado fresco
CONSIDERACIONES	<p>Las proporciones de la escoria deberán ser dictadas por los propósitos para los cuales el concreto va a ser empleado, la temperatura de curado, el grado de la escoria, y el cemento portland u otro activador. Otras consideraciones que deberán determinar la proporción de la escoria a ser empleada deberán depender de los requerimientos de control de la elevación de temperatura, tiempo de fraguado y acabado, resistencia a los sulfatos, y el control de la expansión debida a la reacción álcali-sílice.</p> <p>Escorias de Grado 120, el resultado puede ser una reducción de la resistencia inicial a 1 y 3 días y un incremento a edades mayores de los 7 días.</p> <p>Escorias de Grado 100 da por resultado bajas resistencias en edades tempranas (1 á 21 días), pero igual o mayor resistencia en edades posteriores.</p> <p>Escorias de Grado 80 reducen la resistencia en todas las edades.</p>
LIMITACIONES	Es recomendable hasta los 700 kg/cm ²
APLICACIONES	<ul style="list-style-type: none">– Son utilizadas para la producción de cementos con escorias.– Para concreto masivo– Presas de concreto

CENIZAS

ORIGEN	La ceniza es un subproducto, resultado de la combustión del carbón, que se obtiene generalmente de las plantas térmicas.
PORCENTAJE DE EMPLEO	Se emplean en un orden de un 15 al 35% por masa de material cementante total.
PROPIEDAD QUE CONFIERE AL CONCRETO	<ul style="list-style-type: none">- Mejoras en la trabajabilidad.- Reducción a la expansión debida a la reacción álcali-sílice- Mejora en la Resistencia a los sulfatos.- Reducción en la elevación de temperatura durante la hidratación inicial. Las cenizas pueden ser empleadas en concretos masivos.- Contribución a la durabilidad y resistencia del concreto endurecido.
CONSIDERACIONES	<p>La composición química en volumen ha sido empleada (Norma ASTM C 618) para clasificar a las cenizas en 2 tipos, Clase C y Clase F. Esta composición se usa para determinar el cumplimiento con las recomendaciones de la Norma ASTM C 618, este tipo de análisis es empleado como una herramienta para asegurar calidad.</p> <p>Los 4 constituyentes principales: oxido de sílice (35 al 60%); oxido de alúmina (10 al 30%); oxido de fierro (4 al 20%)y oxido de cal (1 al 35%).</p> <p><i>Clase F:</i> la suma de los primeros 3 constituyentes sea mayor del 70%; <i>Clase C:</i> la suma de los primeros 3 constituyentes deberá solamente exceder al 50%. Contienen mas del 20% del material reportado como óxido de cal. El contenido de óxido de cal es generalmente mayor del 10% y puede exceder al 35%.</p> <p>El empleo de cenizas permite reducción en los costos.</p>
LIMITACIONES	Es recomendable hasta los 900 kg/cm ²
APLICACIONES	<ul style="list-style-type: none">- Se emplean mayormente en presas de concreto.- Concreto Masivo.

MICROSÍLICE

ORIGEN	Es un subproducto de la fabricación de silicio metálico o ferro silicio producida por hornos de arco eléctrico.
PORCENTAJE DE EMPLEO	En concretos de alta resistencia pueden ser empleadas de 10% a 40% en peso de contenido de cemento. Si se desea mantener la misma relación agua-material cementante (en masa), deberá usarse un aditivo reductor de agua o un superplastificante, o ambos para obtener una trabajabilidad requerida.
PROPIEDAD QUE CONFIERE AL CONCRETO	<ul style="list-style-type: none">- Incrementa su resistencia- Aumenta su durabilidad- Reduce la permeabilidad del concreto en forma importante.- Mejora las propiedades al estado fresco.
CONSIDERACIONES	<p>La presencia de la microsíllice acelera la hidratación del cemento durante la etapa inicial.</p> <p>La microsíllice debe ser medida con el mismo grado de seguridad de los otros ingredientes del concreto.</p> <p>El empleo conjunto de las microsíllices con los superplastificantes permite su uso como material cementante suplementario, especialmente cuando se desea concretos de muy alta resistencia y baja permeabilidad.</p> <p>La microsíllice en el Perú no se produce todavía.</p>
ALCANCES	Se han obtenido valores que superan los 1200 kg/cm ² de resistencia en compresión.
APLICACIONES	<ul style="list-style-type: none">- Para edificaciones de gran altura que requieran alta resistencia.- En concretos bajo agua, puertos, puentes, etc.- En concreto lanzado (minería)- Plataformas petroleras

***CONCLUSIONES Y
RECOMENDACIONES***

CONCLUSIONES

- El empleo de adiciones requiere obligatoriamente que éstas tengan actividad puzolánica, y que el concreto tenga hidróxido de calcio libre para reaccionar con la adición en presencia del agua y formar silicato de calcio hidratado (tobermorita).
- Deberán efectuarse ensayos que permitan determinar cual es el contenido de aditivo incorporador de aire necesario en los concretos en los cuales se utiliza adiciones, teniendo en consideración que la reacción química de éstas al disminuir la porosidad y mejorar la impermeabilidad limitarán o impedirán el ingreso del agua congelable al interior del concreto.
- Las resistencias en compresión sobre los 700 Kg/cm^2 requieren el uso de una adición y de un superplastificante a fin de poder trabajar con relaciones agua-cemento del orden de 0.40 ó menores y permitir que se cumplan las teorías de Feret y Powers.
- En las altas resistencias en que se incrementa la formación adicional de tobermorita, disminuyendo significativamente los poros capilares, los aditivos incorporadores de aire pueden dejar de ser necesarios o reducirse a un mínimo. En todos los otros casos de riesgo de congelación deben ser empleados especialmente si la humedad relativa ambiente es menor a 40%.
- El empleo de cloruro de calcio, si bien contribuye al acortamiento del tiempo de fraguado inicial y a la aceleración del desarrollo de resistencia, puede favorecer el desarrollo de la corrosión del acero de refuerzo y elementos metálicos embebidos en el concreto. Por ello su empleo debe tener en

consideración la necesidad de mayores recubrimientos y menores contenidos de poros capilares.

- Los diferentes tipos de aditivos y los cambios y combinaciones de ellos afectan a las propiedades al estado plástico y endurecido de los concretos en general y de los de alta resistencia en particular. Su empleo debe estar condicionado a las propiedades que se desea modificar y a las recomendaciones del fabricante complementadas con las de esta tesis.
- En todos los casos el ingeniero proyectista, Supervisor, o Contratista, debe tener presentes las diferencias entre los aditivos (productos químicos que en contacto con el agua dan lugar a reacciones que modifican una o mas de las propiedades del concreto) y las adiciones (productos de origen mineral muy finos que por tener actividad puzolánica reaccionan con el hidróxido de calcio, subproducto de la reacción del cemento en presencia del agua, para formar tobermorita adicional).
- Los reductores de agua controladores de fragua, los floculantes, y los superplastificantes, tienen la misma función (reducir el agua, modificar el tiempo de fraguado, y mejorar la trabajabilidad) por lo que en mi opinión los tres capítulos podrían reunirse en uno solo dado que las funciones son prácticamente las mismas.

RECOMENDACIONES

- Ya sea que se trate de aditivos o de adiciones, deberán efectuarse ensayos con los materiales que van a emplearse en obra, a fin de determinar las modificaciones en las propiedades, en estado fresco y endurecido, de la mezcla de concreto.
- Las cenizas que deberían ser empleadas para la elaboración del concreto deben ser cenizas de Clase F. La experiencia de obra indica que no son recomendables las cenizas de la Clase C porque tienen exceso de cal y poco óxido de alumina y óxido de fierro, excepto en el caso de las grandes presas en que el calor generado disminuye.
- Las microsílices por su alto costo en el Perú pueden ser empleadas cuando se trate de concretos de alta resistencia inicial o final, en otros casos su empleo no se justifica para concretos menores de 700 kg/cm². Salvo en caso de climas extremos de la sierra peruana en los que su empleo favorecería la disminución de poros capilares debido al incremento en la tobermorita.
- Todo trabajo en que se emplee aditivos y/o adiciones implica un estudio de costo-beneficio a fin de determinar si la solución elegida es la más conveniente.
- Antes de recomendar un aditivo y/o adición debe considerarse los propósitos para los cuales pudieran ser empleados.
- Se recomienda desarrollar Normas Peruanas en relación con los ensayos de resistencia en compresión de muestras de concreto que sobrepasan los 1200 Kg/cm² a los 90 días, incluyendo recomendaciones de moldeo, curado y ensayo. Estas Normas deben hacerse extensivas a los casos de resistencias a la flexión y al corte.

BIBLIOGRAFÍA

LIBROS:

- Instituto Nacional del Cemento y del Concreto, A.C.; Aditivos para Concreto; Editorial Limusa, México 1991.
Biblioteca UNI – FIC
- Venuat, Michel; Aditivos y tratamientos de Morteros y Hormigones; Editores Técnicos Asociados S.A., Barcelona 1972.
Biblioteca UNI – FIC
- Enrique Rivva López; Naturaleza y Materiales del Concreto; Editorial ACI - Perú, Lima 2000.
Biblioteca Personal
- Enrique Rivva López; Concretos de Alta Resistencia; Editorial del ICG; Lima 2002.
Biblioteca Personal
- Aditivos convencionales en la Tecnología del Concreto; Simposiom Aditivos y Superplastificantes.- ACI Capítulo Peruano,- Agosto 1986.

TESIS:

- Vera Ortiz Janny Elizabeth; *Efecto del Cloruro de Sodio en las Propiedades del Concreto*; Lima – Perú 1999; Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Civil; Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Ingeniería.
- Morales Alfaro, Mary Patricia; *Investigación del Concreto de Alta Resistencia: Metodología de obtención y determinación de las propiedades de los Concretos de 550 – 1200 Kg/cm²*; Lima – Perú 2000; Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Civil; Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Ingeniería.
- Tineo Paucas Jenny; *Estudio de las propiedades reológicas de diferentes Cementos con distintos Superplastificantes*; Lima – Perú 2005; Tesis para optar el Título Profesional en la especialidad de Química; Universidad Cayetano Heredia.

- Amaro Vicuña; Ivan Manuel; *Estudio de la variación de la Resistencia en compresión en concretos de alta resistencia curado en laboratorio y bajo condiciones de obra*; Lima – Perú 2002; Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Civil; Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Ingeniería.
- Álvarez Cangahuala José; *Concretos de alta resistencia empleando la microsílice Sicacrete 950 y el Superplastificante Sikament FF -86*; Lima – Perú 1998; Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Civil; Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Ingeniería.
- Biondi Shaw Ana y Rodríguez Baigorria Pilar; *Utilización de las escorias de Chimbote en la preparación de los cementos económicos*; Lima – Perú 1965; Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Civil; Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Ingeniería.
- Galindo Tambo, Feliciano María; *La Microsílice y su empleo en concretos de Alta Resistencia*; Lima – Perú 1999; Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Civil; Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Ingeniería.
- Díaz Chuquiruna, Mariela Jeannette; *Efectos de las cenizas volantes sobre el comportamiento del concreto frente a la expansión por ataque de sulfatos y la reactividad álcali – sílice*; Lima – Perú 2005; Informe de Suficiencia; Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Ingeniería.
- Figueroa Balvas, Leoncio; *Estudio de las escorias de Sider Perú y su utilización como agregado*; Lima – Perú 1991; Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Civil; Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Ingeniería.
- Vargas Victorio Irma; *Efectos del aire incorporado en las propiedades del concreto preparado con el supercemento atlas puzolánico Tipo IP*. Lima – Perú 1994; Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Civil; Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Ingeniería.
- Tello Rodríguez, Rafael; *Concretos de alta resistencia empleando el superplastificante PSP- N2*; Lima – Perú 1994; Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Civil; Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Ingeniería.

- Requena Soto, Elías; *Concretos preparados a base de microsilice y cemento puzolánico*; Lima – Perú 1994; Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Civil; Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Ingeniería.
- Martínez Vargas, Irma del Rosario; *Efectos del aditivo “SIKA RAPID 1” sobre las propiedades del concreto*; Lima – Perú 1998; Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Civil; Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Ingeniería.
- Arévalo Villacorta Lucio; *Influencia de las microsilices en el concreto*; Lima – Perú 2001; Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Civil; Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Ingeniería.
- Rodríguez Dionisio, Sandra; *Estudio de las propiedades del concreto en zonas frías con aditivo incorporador de aire, superplastificante y acelerante de fragua*; Lima – Perú 2004; Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Civil; Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Ingeniería.
- Pérez Navarro, Miguel Edgar; *Concreto en climas fríos, en las ciudades de Huancayo, Juliaca, Tacna, Huancavelica, Arequipa*; Lima – Perú 2003; Informe de Suficiencia; Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Ingeniería.
- Medina Vásquez, Ulises; *Efectos del aditivo acelerante y reductor de agua sobre el concreto utilizando Cemento Puzolánico Tipo IP*; Lima – Perú 2001; Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Civil; Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Ingeniería.
- Torres Atalayo, Juan Carlos; *Estudio de la influencia de aditivos acelerantes sobre las propiedades del concreto*; Lima – Perú 2004; Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Civil; Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Ingeniería.
- Roca García, Tomas Alfonso; *Efectos del aditivo acelerante y reductor de agua sobre el concreto utilizando Cemento Puzolánico tipo IP*; Lima – Perú 1999; Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Civil; Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Ingeniería.

- Cossio Bolaños, Alfonso Manuel; *Aditivos Superplastificantes en el concreto*; Lima – Perú 2001; Informe de Suficiencia; Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Ingeniería.
- Jiménez Gómez, Rubén Dante; *Efectos de la incorporación del aditivo superplastificante sobre las propiedades del concreto utilizando el Cemento Pórtland Tipo I*; Lima – Perú 2000; Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Civil; Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Ingeniería.
- Castro Napaico, Napoleón Delfín; *Características del concreto con aditivos acelerante e incorporador de aire y C.P.T.I fabricado en la ciudad de Huancayo*; Lima – Perú 2001; Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Civil; Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Ingeniería.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM)

ASTM C 94 Specification for ready Mixed Concrete

ASTM C 109 Método de prueba para la resistencia en compresión de cementos hidráulicos y morteros

ASTM C 114 Estándar Test Methods for Chemical Análisis of Hydraulic Cement

ASTM C 125 Terminología relacionada con el concreto y agregados

ASTM C 150 Especificaciones para el cemento portland

ASTM C 157 Standard Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic-Cement Mortar and Concrete

ASTM C 185 Método de prueba para el contenido de aire de los cementos hidráulicos

ASTM C 188 Método de prueba para la densidad de los cementos hidráulicos

ASTM C 233 Método de prueba estándar de aditivos incorporadores de aire para concretos

ASTM C 260 Especificaciones de los aditivos incorporadores de aire para el concreto

ASTM C 311 Test method for sampling and testing Fly Ash or natural puzzolans for use as a mineral admixture in Portland cement concrete

ASTM C 441 Test Method for effectiveness of mineral admixtures or ground blast-furnace slag in preventing excessive expansion of concrete due to the alkali-silica reaction

ASTM C 457 Standard Test Method for Microscopical Determination of Parameters of the Air-Void System in Hardened Concrete

ASTM C 494 Especificaciones de aditivos químicos para concreto

ASTM C 595 Specification for blended Hydraulic cement
ASTM C 618 Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete
ASTM C 642 Standard Test Method for Specific gravity, absorption, and Voids in Hardened Concrete
ASTM C 666 Test for resistance of concrete to rapid freezing and thawing
ASTM C 671 Standard Test method for Critical Dilation of Concrete Specimens subjected to Freezing
ASTM C 979 Especificaciones estandar de pigmentos para los concretos coloreados
ASTM C 989 Especificaciones para las escorias de alto horno finamente granuladas para el uso en concretos y morteros
ASTM C 1012 Test Method for Length Change of Hydraulic Cement Mortars Exposed to a Sulfate Solution
ASTM C 1017 Especificación estándar de aditivos químicos para el uso de producción de concretos fluidos
ASTM C 1073 Test Method for Hydraulic Activity of Ground Slag by Reaction with Alkali
ASTM C 1157 Performance Specification for Hydraulic Cement
ASTM C 1202 Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to resist Chloride Ion penetration
ASTM C 1240 Standard Specification for Silica Fume for Use in Hydraulic-Cement Concrete and Mortar

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI)

ACI 116R-00 Terminologia de cemento y concreto
ACI 212.3R-91 Aditivos quimicos para el concreto
ACI 212.4R-93 Guia para el uso de aditivos reductores de agua de alto rango (Superplastificantes) en concreto
ACI 232.1R-00 Use of Raw or Processed Natural Pozzolans in Concrete
ACI 232.2R-96 Uso de cenizas en el concreto
ACI 233R-95 Ground Granulated Blast-Furnace Slag as a Cementitious Constituent in Concrete
ACI 234R-96 Guia para el Uso de microsilices en el concreto
ACI 304R-00 Guide for Measuring, mixing, Transporting, and Placing Concrete
ACI 305R-99 Concreto en climas calidos
ACI 306R-88 Concreto en climas frios

ACI 308R-01 Guía para el curado de concreto

ACI 318R-05 Building Code requirements for Structural Concrete and Commentary

ACI 363R-92 State of the Art report on High Strength Concrete

Otros ACI:

1. Chemical Admixtures.- Compilation 23.- 1993
2. Chemical and Air-Entraining Admixtures for Concrete; ACI Comité E-701 – 1996
3. Mineral Admixtures; Compilation 22. – 1993

DIRECCIONES WEB

<http://www.construaprende.com/ingtrabajos.html>

<http://www.burjdubai.com>

<http://www.unicon.com.pe>

<http://www.imcyc.com/>

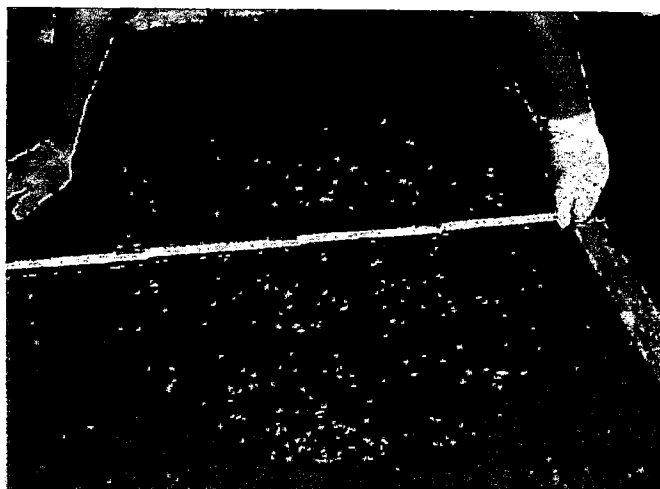
<http://www.ietcc.csic.es/>

<http://www.peru.com/>

ANEXOS

ANEXO - A

ADITIVOS



SUPERPLASTIFICANTES: Ensayo de asentamiento por fluidez en concretos con aditivos superplastificantes.
(Fuente: "Admixtures", Concrete International, V. 22, No. 4, Abril 2001, pág 32.)



SUPERPLASTIFICANTES: Ensayo para medir la consistencia, capacidad de flujo y cohesividad de los concretos autocompactados en los que se ha empleado un policarboxilato como aditivo superplastificante.
(Fuente: "Admixtures", Concrete International, V. 22, No. 4, Abril 2001, pág 32.)

ADITIVOS ACELERANTES Y REDUCTORES DE AGUA

Algunos resultados de los ensayos hechos por Tomas Alfonso Roca García en su tesis "Efectos del aditivo acelerante y reductor de agua sobre el concreto, utilizando cemento puzolánico tipo IP" para optar el título de Ingeniero Civil, en la que utilizó cemento Pórtland tipo I – atlas puzolánico, aditivo acelerante y reductor de agua ADIKRET – WRA:

- Resultados de ensayos del concreto al estado fresco

RESUMEN DE LAS PROPIEDADES DEL CONCRETO AL ESTADO FRESCO

MEZCLA	Dosificación aditivo (gln/bls)	Asent. (pulg)	Peso Unit. (Kg/m ³)	Exudac. (%)	Tiempo de fragua		Cont. de aire Met. Washington (%)	Indice de consistencia (%)
					Inicial (h:m)	Final (h:m)		
0.40	PATRON	3 1/2"	2,355	0.27	3:28	4:24	1.80	64.00
	1/8	3 1/4"	2,341	0.20	3:30	4:17	1.90	75.60
	1/4	3 1/2"	2,333	0.18	3:21	4:07	2.00	86.10
	3/8	3 1/4"	2,337	0.15	2:56	3:32	2.10	90.70
0.50	PATRON	3 1/2"	2,399	0.60	3:43	4:55	2.00	62.40
	1/8	3 1/4"	2,442	0.54	3:30	4:10	1.90	64.20
	1/4	3 1/2"	2,391	0.38	3:15	4:12	2.20	72.10
	3/8	3 1/4"	2,413	0.26	2:52	3:53	2.10	78.70
0.60	PATRON	3 1/2"	2,420	0.88	3:53	5:02	1.80	58.70
	1/8	3 1/4"	2,413	0.75	3:28	4:32	2.10	68.00
	1/4	3 1/2"	2,449	0.72	3:30	4:37	1.90	78.40
	3/8	3 1/4"	2,420	0.57	3:18	4:21	2.10	80.00

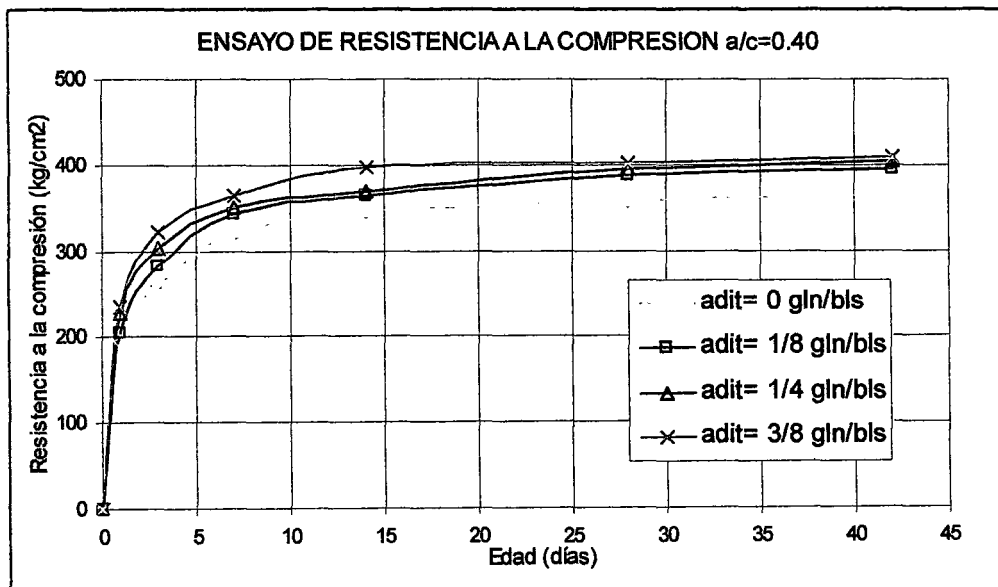
(Fuente: "Efectos del aditivo acelerante y reductor de agua sobre el concreto, utilizando cemento puzolánico tipo IP", Roca García Tomas Alfonso, Lima 1999, pág 77)

- Resultados de ensayos del concreto a estado endurecido, Resistencia a la Compresión.

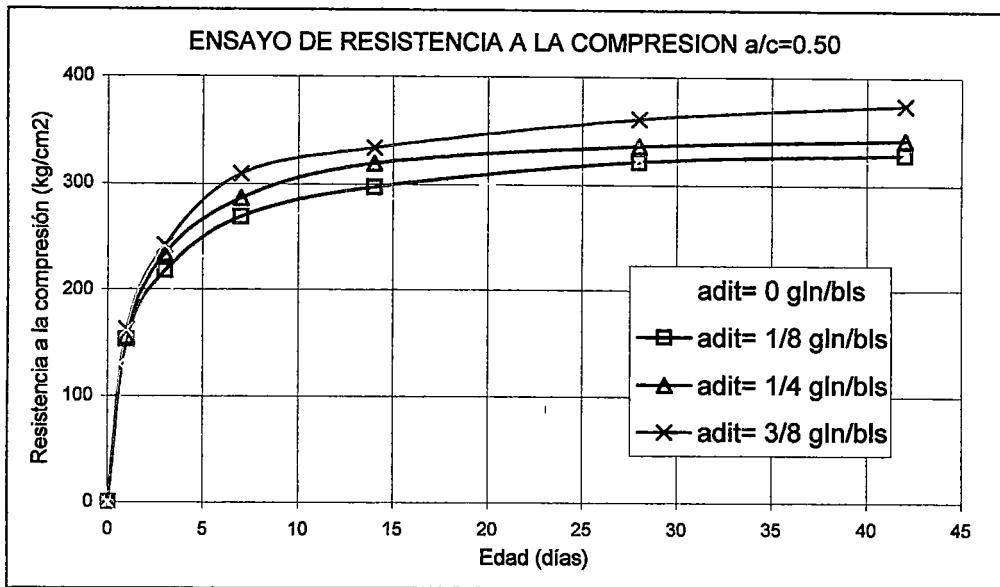
ENSAYOS DE RESISTENCIA A LA COMPRESION

Relación a/c	Dosificación aditivo (gln/bls)	Reducción de agua (%)	a/c efectivo	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN (Kg/cm ²)					
				EDAD (días)					
				1	3	7	14	28	42
0.40	PATRON		0.40	195	260	321	346	358	365
	1/8	2.27	0.391	205	283	345	364	389	395
	1/4	3.73	0.388	228	304	352	369	396	405
	3/8	4.38	0.386	235	324	366	397	403	410
0.50	PATRON		0.50	130	191	257	283	317	322
	1/8	3.19	0.484	153	218	269	297	321	328
	1/4	6.18	0.469	156	234	286	319	336	342
	3/8	9.17	0.454	163	242	309	334	361	374
0.60	PATRON		0.60	98	161	200	237	273	284
	1/8	3.92	0.577	121	176	221	253	284	290
	1/4	5.21	0.569	130	187	238	265	287	296
	3/8	8.26	0.552	134	201	248	270	301	310

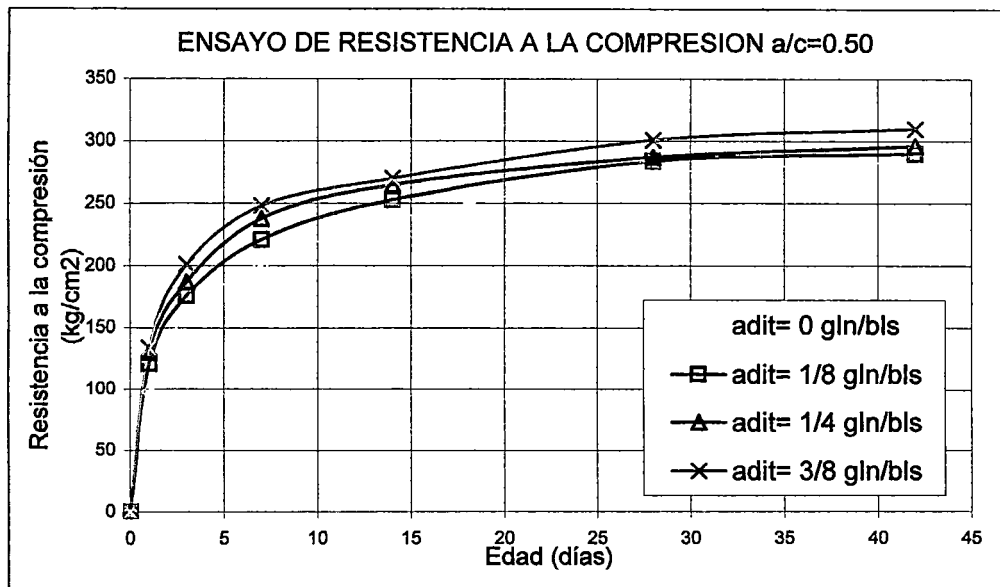
(Fuente: "Efectos del aditivo acelerante y reductor de agua sobre el concreto, utilizando cemento puzolánico tipo IP", Roca García Tomas Alfonso, Lima 1999, pág 78)



(Fuente: "Efectos del aditivo acelerante y reductor de agua sobre el concreto, utilizando cemento puzolánico tipo IP", Roca García Tomas Alfonso, Lima 1999, pág 100)

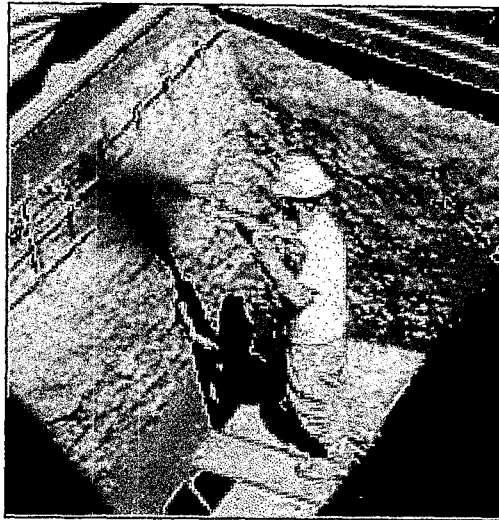


(Fuente: "Efectos del aditivo acelerante y reductor de agua sobre el concreto, utilizando cemento puzolánico tipo IP", Roca García Tomas Alfonso, Lima 1999, pág 111)



(Fuente: "Efectos del aditivo acelerante y reductor de agua sobre el concreto, utilizando cemento puzolánico tipo IP", Roca García Tomas Alfonso, Lima 1999, pág 112)

NOTA: todas las mezclas se diseñaron considerando asentamiento constante (3" - 4")



ACELERANTES: Los aditivos acelerantes son utilizados para concreto lanzado o shotcrete



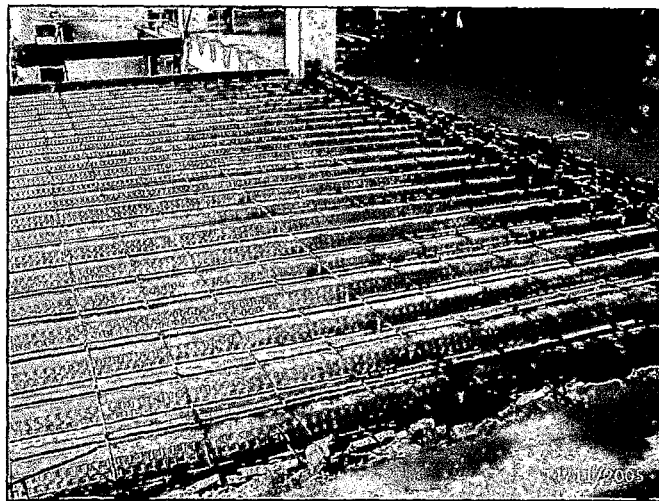
INCORPORADORES DE AIRE: Cámaras de frío de media y baja temperatura de 4 °C con espesor de losa 0.15m y -13 °C con espesor de losa 0.20m respectivamente para almacenar carnes, pescados, embutidos, lista para vaciar concreto con incorporador de aire de 350 Kg/cm²; curado de 15 a 20 días inmerso en agua.

(Foto: Remodelación y ampliación de Plaza Vea Santa María – Chacarilla, Noviembre 2005)



LIGANTES: se aprecia el aditivo colocado en el concreto existente para poder empalmar con el nuevo concreto.

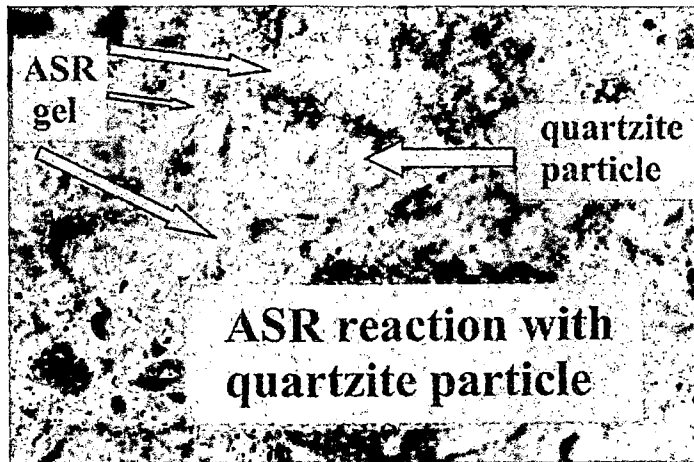
(Foto: Remodelación y ampliación de Plaza Veá Santa María – Chacarilla, Noviembre 2005)



LIGANTES: Losa colaborante lista para vaciar, en la que se ha aplicado aditivo ligante en los bordes del concreto antiguo.

(Foto: Remodelación y ampliación de Plaza Veá Santa María – Chacarilla, Noviembre 2005)

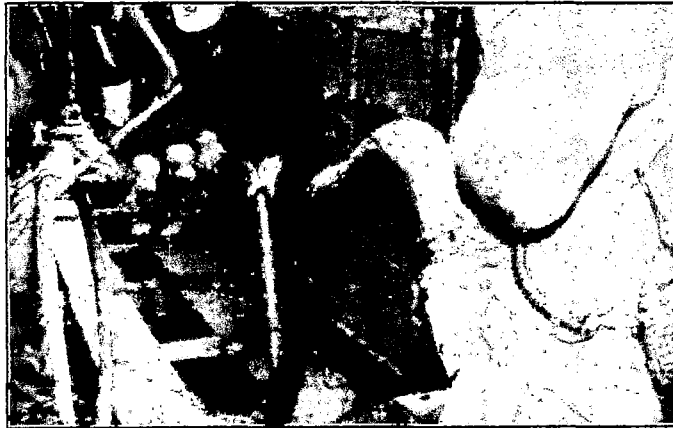
REACCIÓN QUÍMICA ÁLCALI-AGREGADO



La partícula de cuarzo cuando reacciona con los álcalis del cemento forma un gel reactivo que tiende a expandirse fisurando el concreto.
(Fuente: "Admixtures and Cementitious Materials", Concrete International, V. 24, No. 8, Agosto 2002, pág 99)

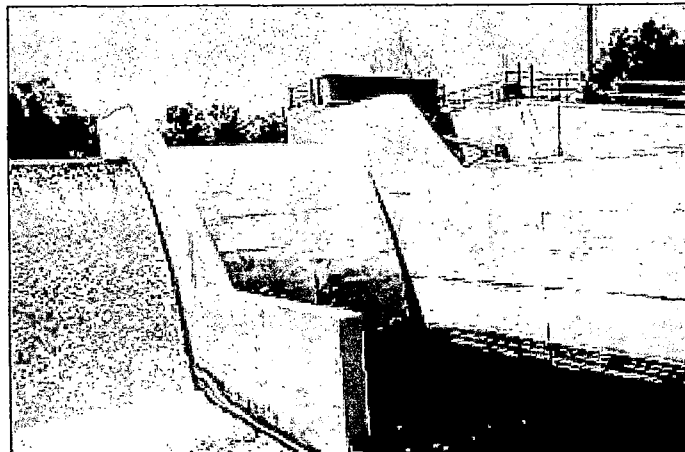
ANEXO - B

ADICIONES



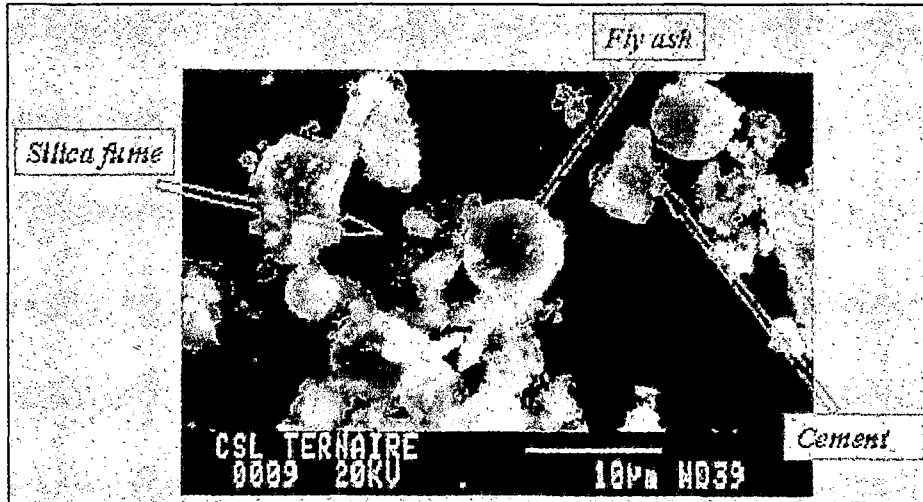
CENIZAS: Concreto con 50% de cenizas de la Clase F y una combinación de aditivos reductores de los Tipos A y F para obtener un concreto de alta resistencia y fácil colocación.

(Fuente: "Admixtures and Cementitious Materials", Concrete International, V. 24, No. 8, Agosto 2002, pág 67.)

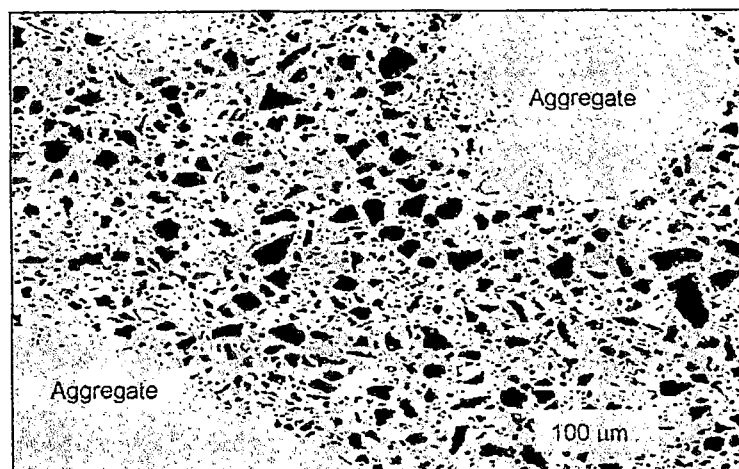


CENIZAS Y ESCORIAS: son a menudo utilizadas en la construcción de presas debido a su bajo calor de hidratación durante vaciados de concretos masivos.

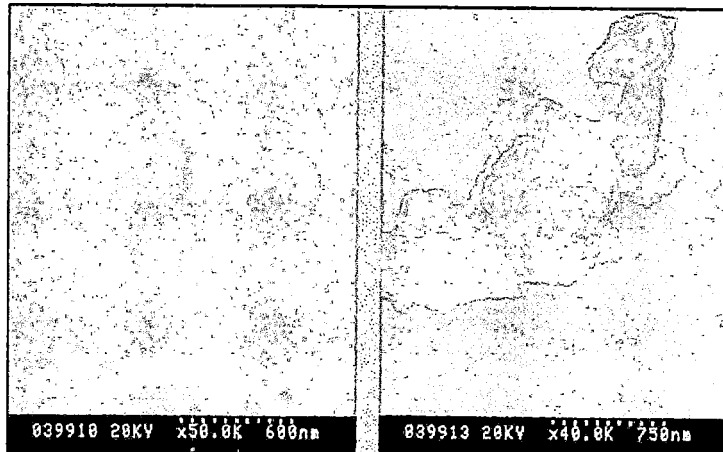
(Cortesía de The portland Cement Association)



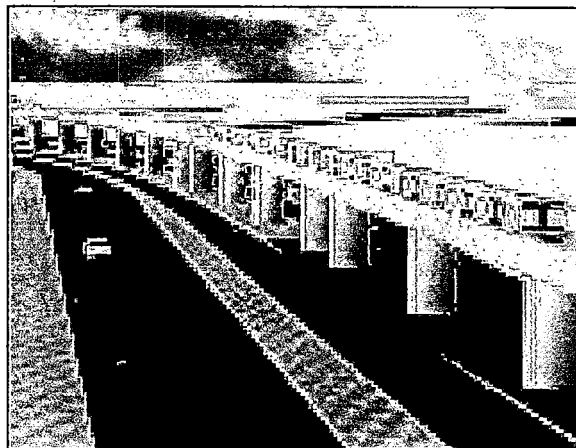
MICROSILICES: Conjunto ternario de cenizas, microsíllice y cemento.
(Fuente: "Admixtures", Concrete International, V. 23, No. 4, Abril 2001, pág 38.)



MICROSILICES: Fotografía de una pasta parcialmente hidratada rodeando partículas de agregado antes de la acción de la microsíllice.
(Fuente: "Admixtures", Concrete International, V. 23, No. 4, Abril 2001, pág 38.)

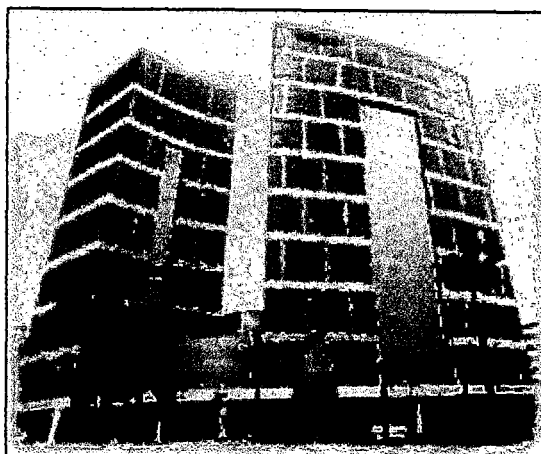


MICROSILICES: Fotografía de la microsílíce y su alta reactividad con el metacaolín.
(Fuente: "Admixtures and Cementitious Materials", Concrete International, V. 24, No. 8, Agosto 2002, pág 60.)



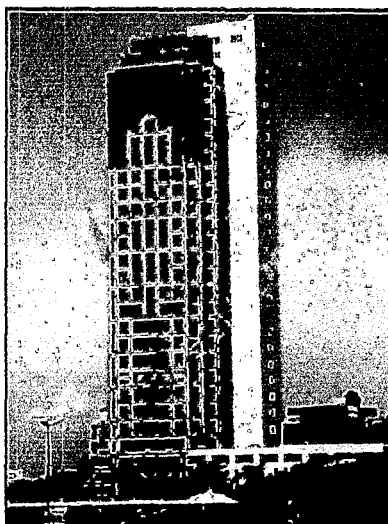
Proyecto especial del tren eléctrico; el concreto con microsílíce alcanzo los 490 Kg/cm² para las columnas. En casi todos los tramos no había mucho espacio disponible para los pilares y la elevada resistencia del concreto permitió ahorrar espacio y el diseño por carga axial.

(Fuente: www.peru.com)

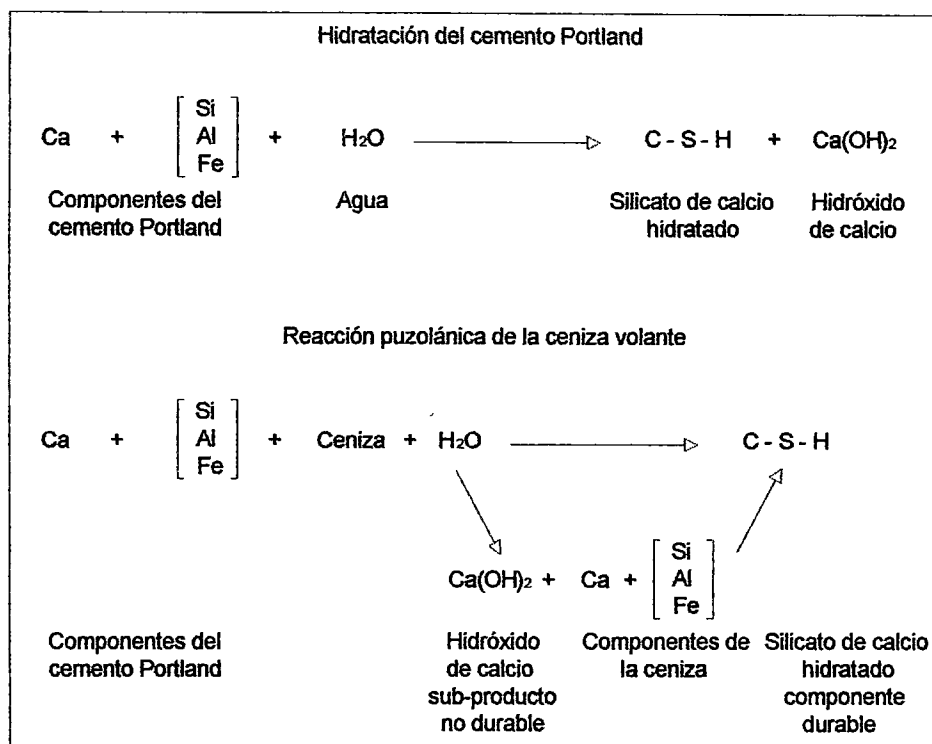


Marriot Hotel; el concreto con microsílces se colocó en la base de las columnas colindantes con el lote vecino, además de la carga axial que debía soportar. La resistencia especificada en el proyecto fue de 600 Kg/cm^2 , pero los ensayos dieron hasta 750 kg/cm^2 .

(Fuente: www.unicon.com.pe)



Suarez Trade Building; en Brasil de 32 pisos y 40m de altura, esta edificación se basa en la sencillez pero con una vigorosa exposición; es un sistema integral estructurado eficiente, soporta tanto las cargas verticales como horizontales, debidas a la gravedad y el viento. Aquí también se ha utilizado concreto de alta resistencia con microsílces. Este edificio prácticamente no tiene vigas ocasionando que la altura entre los entresijos sea mínima.



Esquema de la hidratación del cemento y de la reacción puzolánica de la ceniza volante.
 (Fuente: "Efectos de las cenizas volantes sobre el comportamiento del concreto frente a la expansión por ataque de sulfatos y la reactividad álcali – sílice"; Díaz Chuquiruna, Mariela Jeannette; Lima 2005, pág 12.)