

# **Incidencia de adiciones minerales frente al ataque por sulfatos**

**Rossetti Agustín (1)\*, Falcone Darío. D. (2) y Irassar Edgardo F. (3)**

(1) Lemit-CIC

(2) Profesional Principal Lemit-CIC- Docente UNLP

(3) Facultad de Ingeniería, CIFICEN (CONICET-UNCPBA)

## **Resumen**

La producción de cemento portland se realiza a partir de la extracción de materias primas no renovables como son la piedra caliza y la arcilla. Estos materiales son calcinados en un horno superando los 1400 °C y así se forma el clinker, que luego molido muy finamente y adicionando un porcentaje de yeso formara el cemento portland normal. La producción de clinker genera emisión de dióxido de carbono a la atmosfera aumentando el efecto invernadero y consumo de diferentes combustibles fósiles. La incorporación de adiciones minerales al cemento portland influye positivamente a la sustentabilidad ya que por un lado disminuye la utilización de clinker y además algunas de las adiciones minerales que se pueden incorporar al cemento son desechos o subproductos de la industria. En este trabajo se estudia la resistencia a los sulfatos de distintos cemento de base Portland-con diversas proporciones de materiales cementicios suplementarios (SMC) utilizando el ensayo ASTM C1012 a 20 ° C. La expansión fue medida durante un año, y el análisis de los resultados permite entender el impacto de la composición mineralógica del cemento base y los tipos de adiciones en la resistencia al sulfato de los cementos comerciales, las cuales influyen en la formación de ettringita y yeso según revelan los análisis pro DRX. Finalmente, se compara la clasificación de los cementos como resistentes a los sulfatos según el criterio de límites de expansión y el criterio de composición de la norma EN 197.

## **Introducción**

El hormigón es el segundo material más utilizado por el hombre, después del agua. Este noble material tiene como componente más importante al cemento portland .La producción de cemento portland se realiza a partir de la extracción de materias primas no renovables como son la piedra caliza y la arcilla. Estos materiales son calcinados en un horno superando los 1400 °C para formar el clinker, que luego molido muy finamente y adicionando yeso da lugar al cemento portland normal. La producción de clinker genera una gran emisión de dióxido de carbono a la atmosfera aumentando el efecto invernadero y requiere el consumo de diferentes combustibles fósiles. En la perspectiva del desarrollo sostenible, la utilización de volúmenes crecientes de adiciones aparece como beneficiosa ya que por un lado permite producir cementos con menor porcentaje de clinker portland reduciendo las emisiones de CO<sub>2</sub> al ambiente por tonelada de cemento [1]. Por otro lado, algunas adiciones minerales, como las escorias de alto horno, son subproductos industriales y al incorporarlas al cemento se reutiliza un desecho para producir un material con excelente desempeño desde el punto de vista de la resistencia y durabilidad de las estructuras. Actualmente, las adiciones más utilizadas son las puzolanas naturales o calcinadas, la ceniza volante, la escoria de alto horno y el filler calcáreo [2].

La durabilidad de las estructuras de hormigón es un factor muy importante desde el punto de vista del desarrollo sostenible, ya que garantiza un correcto el ciclo de vida de la misma. La necesidad de reparaciones o el reemplazo de estas estructuras afectadas provocan pérdidas millonarias, además de la necesidad de consumir mayores volúmenes de recursos naturales y combustibles [3].

Entre los agentes químicos que disminuyen la vida de las estructuras de hormigón se encuentran los sulfatos, el magnesio, el amonio y los ácidos

En el presente trabajo se estudió el ataque que producen los sulfatos, en particular el sulfato de sodio, a diferentes cementos portland con y sin la incorporación de adiciones minerales. El mismo se ha elaborado aplicando la misma metodología para todos los cementos, que es la norma ASTM C-1012, esta norma permite evaluar cementos normales, como también cementos con la incorporación de adiciones. Para realizar un ensayo comparativo con distintos cementos, la norma plantea sumergir probetas en sulfato de sodio para medir cambios de longitud, una vez que el mortero con que están elaboradas alcance una resistencia de 20 MPa, de este modo, todos los especímenes tienden a tener una misma porosidad, relacionada con la resistencia a compresión.

El ataque de sulfatos generalmente está asociado con la difusión de los iones al interior, la reacción con las fases AFm para la formación de ettringita en el hormigón endurecido causando la expansión y fisuración, la formación de yeso al reaccionar los sulfatos con el CH y finalmente la pérdida de cohesión de la pasta cuando se desestabiliza el C-S-H debido al consumo del CH. En el cemento portland, la resistencia a los sulfatos depende fundamentalmente del contenido de  $C_3A$  y  $C_4AF$ , y secundariamente del contenido de  $C_3S$ . Cuando el cemento contiene carbonatos (filler) o cuando están expuestos en atmosferas ricas en  $CO_2$ , se puede formar thaumasita [4]. Según Berra y Baronio [5], la formación de thaumasita requiere de un ambiente con elevada humedad relativa y una temperatura reducida (cercana a los 5 °C). Las bajas temperaturas contribuyen a la velocidad de deterioro porque la thaumasita a 5 °C es 100 veces menos soluble que a 20 °C [4]. Estos ataques son gobernados fundamentalmente por los mecanismos de transporte, es decir la absorción capilar, la difusión y más que nada la permeabilidad. Es por esto que se sabe en la literatura que hormigones muy poco permeables son poco vulnerables a ataques por sulfatos desde una fuente externa.

Para el hormigón de cemento portland, el ataque de sulfatos puede prevenirse usando una baja relación agua/cemento ( $< 0,45$ ) y un cemento portland altamente resistente a los sulfatos (ARS) de limitando contenido de  $C_3A$  y  $C_4AF$ , solución que ha sido muy eficaz desde 1930. El cambio en la composición de los cementos también requiere rever la clasificación de los cementos resistentes a los sulfatos. Para las normas IRAM 50001, EN 197 y ASTM C 150; los cementos de base portland Resistente a los Sulfatos (CPN-ARS, CEM I-RS ó Tipo V) se limita el contenido de  $C_3A$  a menos del 5% y el de  $C_4AF$  según una fórmula que contempla el  $C_3A$ . La nueva EN 197:2011 ha incorporado tres clases de CEM I –SR con 0,3 y 5 % de  $C_3A$  en la composición del clinker. Las normas IRAM y ASTM denominan un cemento Moderadamente resistente a los sulfatos (MRS o Tipo II) con 8 % de  $C_3A$ .

Con respecto a los cementos con adiciones, la normativa ha asumido que para producir un cemento mezcla resistente a los sulfatos se debe contar que un clinker portland de bajo  $C_3A$  y limitado contenido de  $C_4AF$  y con una proporción acorde de una adición mineral activa. En este sentido, la norma IRAM 50001 requiere que el contenido de  $C_3A$  del cemento portland sea menor a 4% y el contenido de  $C_4AF+C_3A$  sea menor a 22%. En los

cementos con adiciones, dichas limitaciones se realizan sobre el clinker portland utilizado en la fabricación. La norma ENV197:2011 ha incorporado los contenidos de  $C_3A$  que debe cumplir el clinker con los que se van a fabricar los cementos resistentes a los sulfatos. La limitación depende del tipo de cemento que se pretende producir o en otras palabras del tipo y contenido de la adición incorporar. Para los cemento portland (CEM I) se establecen tres niveles de resistencia a los sulfatos con 0,3 y 5% de  $C_3A$ . Para los cementos con elevado contenido (> 36%) de escoria de alto horno (CEM III/B y CEM III/C) los mismos se consideran ARS independientemente de la composición del clinker, mientras que los cementos puzolánicos (CEM IV/A y CEM IV/B) el clinker debe tener un máximo de 9 % de  $C_3A$ . En estas condiciones se excluyen los CEM II que son los más usados en la actualidad.

La norma ASTM C-150 especifica el cemento portland Tipo V como resistente a los sulfatos con un máximo de 5% de  $C_3A$  y limita la suma de  $C_4AF + 2C_3A$  en 25% y una expansión menor a 0,04% a los 14 días en el ensayo ASTM C 452. Para los cementos con adiciones (ASTM C 595 y C 1157), la norma especifica un límite de 0,10 % a los 6 meses para los cementos mezcla de moderada resistencia cuando se ensaya según ASTM C1012. Mientras que los cementos co5000n adiciones se califican como de alta resistencia a los sulfatos cuando la expansión del ensayo ASTM C1012 es menor de 0,05 y 0,10% a 6 meses y 1 año, respectivamente. Para las adiciones, la mezcla del ensayo ASTM C 1012 está constituida por cemento portland ( $C_3A > 7\%$ ) y una proporción determinada de adición (Puzolana 25 -35 %; humo de sílice 7-15 %, escoria 40 -70 %).

Sin embargo, el comportamiento frente a los sulfatos de los cementos mezcla dependerá del tipo y porcentaje de adición y del contenido de  $C_3S$  en el clinker.

## **MATERIALES Y PROCEDIMIENTOS**

### **Aplicación de la norma ASTM 1012**

La resistencia a los sulfatos de los cementos con filler a distintas temperaturas y los cementos con otras adiciones fue investigada utilizando el ensayo de expansión de barras de mortero especificado en la norma ASTM 1012-04 [6]. Según la norma ASTM C1157 los cementos se califican como moderadamente resistente a los sulfatos cuando la expansión a los seis meses no superan el 0,10% y como resistente a los sulfatos cuando la expansión a no supera el 0.05% y 0.10% a los seis y doce meses, respectivamente.

Por cada tipo de cemento se moldearon series de doce probetas de mortero de 25 x 25 x 285 mm de acuerdo con la norma ASTM C-1012 (razón a/c = 0,485; cemento:arena 1:2.75), con arena silíceo cuya granulometría se ajusta a la norma ASTM C-778 y agua destilada. Junto con la elaboración de las probetas para determinar cambios de longitud también la norma exige elaborar cubos de 5 cm de arista para evaluar periódicamente la resistencia de los mismos. Inmediatamente terminada la confección de probetas y cubos, se procede al curado acelerado a 38 °C durante 24. Pasado el día de curado a 38 °C se desmoldan todos especímenes y son sumergidos en agua con cal a temperatura de laboratorio salvo dos cubos que se ensayan a compresión simple para determinar la resistencia. Se ensayan cubos a compresión periódicamente hasta que la resistencia de los mismos sea de 20 MPa o más. En este momento las probetas para medir cambios de expansión son sumergidas en solución de sulfato de sodio 1 normal.

Este procedimiento de sumergir las probetas en sulfato cuando se ha alcanzado una determinada resistencia surge como respuesta de encontrar un punto en el que las probetas con distintos cementos presenten un cierto grado de permeabilidad, factor fundamental en

los fenómenos de ataques de iones, más que nada los de sulfatos externos donde el material nocivo penetra desde el exterior hacia la masa de hormigón.

. A los 7, 14, 28, 56, 91, 180, 252 y 364 días se realizó la medición de expansión de cada probeta y se obtuvo el promedio de seis probetas con la condición que verifiquen la dispersión máxima dispuesta en la norma. Después de cada medición la solución se renovó completamente. A cada edad, las probetas fueron inspeccionadas visualmente y con lupa identificándose las alteraciones y fisuras que se habían producido. El grado de deterioro fue categorizado de 0 a 6: (0) Sin ataque; (1) muy leve ataque; (2) ataque moderado; (3) ataque severo; (4) fisuración y curvado del prisma; (5) fisuración de toda la superficie y (6) desintegración del prisma. Además al término de un año o finalizado el ensayo de expansión se realizaron estudios de DRX para determinar los compuestos mineralógicos formados y con ello poder entender un poco mejor como es el mecanismo de ataque.

### Cementos estudiados

Se evaluaron dos cementos Portland CPN-40 disponibles en el mercado con un contenido medio y bajo de  $C_3A$  que contienen filler calcáreo como minoritario (< 5%). Estos cementos son equivalentes al CEM I de la norma EN 197:2011. El análisis químico de ambos cementos obtenidos por XRF se proporciona en la Tabla 1. El CPN tiene un contenido de  $C_3A$  de 7,8 % ligeramente inferior al límite de la norma IRAM 50001[] para ser considerado CPN -MRS y un elevado contenido de álcalis ( $Na_2O_{eq}$ ). El CPN-ARS tiene un contenido de  $C_3A$  (3 %) menor que el límite máximo IRAM 50001 (5%) y puede ser considerado como un CEM I-SR3 de la norma EN 197. El cemento portland blanco (CPN-B) tiene una elevada proporción de  $C_3A$  y es usado como una referencia del grado de ataque.

También se analizaron cuatro cementos mezclas (fillerizado, compuesto, puzolánico y de escoria de alto horno) que pueden ser clasificados según la norma IRAM 50000 y la norma EN 197 de la siguiente forma: CPF (CEM II/B -L); CPC (CEM V/A) cuyos componentes son escoria y filler, CPP-ARS (CEM II/B-P) y un CAH (CEM III/B). Según los datos de trazabilidad de clinker aportados por los fabricantes: el CPF es elaborado con un clinker portland con 5 a 6 %  $C_3A$ , el CPC y el CAH con un clinker con un contenido de  $C_3A$  menor del 5 % y el CPP-ARS con un clinker que contiene menos de 3% de  $C_3A$ . La composición química de estos cementos comerciales se informan en la Tabla 1 y de acuerdo a la resistencia a 2 y 28 días se clasifican como de clase resistente 40 el CPN-ARS; CPN; CPN-B, CPF y CCP-ARS; y como clase 30 el CPC y el CAH. Finalmente se evaluaron dos cementos mezclas elaborados en el laboratorio utilizando CPN con un reemplazo de 30% en peso por escoria granulada de alto horno en el CPE (cemento portland con escoria) y de 30% en peso por puzolana natural en el CPP. La puzolana natural está compuesta mayoritariamente por vidrio volcánico (93%) y muy pequeñas proporciones de cuarzo, feldespato, anfíboles y mica [7] y tiene una probada efectividad para reducir el deterioro en ambientes con sulfatos [8]. La composición química de las adiciones también se informa en la Tabla 1 y las resistencias hasta adquirir 20 MPa a compresión se informan en la tabla 2.

TABLA 1: Composición química y características físicas de los cementos y adiciones utilizadas.

Cemento:	CPN	CPN-ARS	CPN-B	CPN-F	CPP-ARS	CPC	CAH	Escoria	Puzolana Natural
<b>Composición química, (%)</b>									

CaO	58.29	63.45	49.90	65.19	56.44	61.23	56.23	39.37	1.80
SiO <sub>2</sub>	20.79	21.44	19.31	20.44	18.88	19.59	20.00	34.61	76.90
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.42	3.40	5.97	3.16	5.71	4.48	4.64	12.38	9.80
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.18	4.20	0.30	3.28	3.15	4.06	3.02	0.81	3.60
MgO	5.19	0.57	2.20	1.80	4.91	2.66	5.24	9.72	0.50
SO <sub>3</sub>	2.58	2.91	3.13	1.36	1.58	2.14	4.98	0.60	--
Na <sub>2</sub> O	0.05	1.18	--	0.46	1.27	0.23	0.26	0.30	3.70
K <sub>2</sub> O	1.10	0.04	--	0.71	1.71	1.13	0.80	0.21	1.40
PxC	2.95	1.82	--	7.50	2.96	4.57	0.77	--	2.40
<b>Características físicas</b>									
Finura Blaine, m <sup>2</sup> /kg	263	321	432	396	365	394	360		
Densidad	3.07	3.13	2.95	2.98	2.91	3.00	3.00		
<b>Resistencia a compresión MPa</b>									
2 días	23.7	20.2	30.6	22.6	22.9	15.0	9.1		
28 días	44.2	45.1	58.8	48.5	43.2	37.9	36.7		

Tabla 2: Resistencia a compresión después del curado normalizado por ASTM C 1012

Edad (días)	Resistencia a Compresión (MPa)								
	CPN-B	CPN	CPN-ARS	CPP-ARS	CPF	CPC	CPE	CAH	CPP
1	21.2	12.0	10.5	13.6	17.2	11.2	13.6	3.8	14.9
2		20.8	20.6	20.4	20.7	17.6	17.0	14.3	
3						20.0	21.3		
5								22.0	18.3
6									20.0

### Resultados y discusión:

#### Cementos sin adiciones:

Los resultados de la expansión de las barras de los cementos de base portland (CPN-

B, CPN y CPN-ARS) se muestran en la Fig. 1. Como era de esperar, las barras de mortero del cemento CPN-B presentan una muy rápida evolución de la expansión (posee alto contenido de  $C_3A$ ) y antes de los 28 días ha sobrepasado el límite de expansión de 0,10 %. En el aspecto visual (Fig. 1b) se muestra un rápido crecimiento del deterioro. A los 28 días, la fisuración de bordes se transformó en fisuración generalizada sobre la superficie (Fig. 2). La excesiva deformación de la barra impidió las mediciones de expansión más allá de las 15 semanas.

Con respecto al CPN, su moderado contenido de  $C_3A$  produce una evolución de la expansión con una pendiente de 0,061 %/día hasta los seis meses y luego la expansión crece exponencialmente. Este cemento no cumple los criterios establecidos por la norma ASTM (expansión < 0,10% a los 6 meses) para ser considerado como un cemento de moderada resistencia a los sulfatos. Unas fisuras muy leves se detectan en los bordes y extremos a los 6 meses (Fig. 1b), luego se fisuran los extremos a los 9 meses y ya se observan desprendimiento del material de las esquinas (Fig. 3).

El cemento CPN-ARS tiene una baja tasa de expansión (0,011% /día) hasta la edad de un año alcanzando una expansión de 0,040%. Para este cemento, la expansión se encuentran por debajo de los límites propuestos por ACI 201 para un cemento de alta resistencia a los sulfatos (expansión < 0,05% a los 6 meses y < 0,10 a los 12 meses). A los 12 meses las barras de mortero mostraron evidencias de un leve ataque en los bordes de la probeta (Fig. 1b).

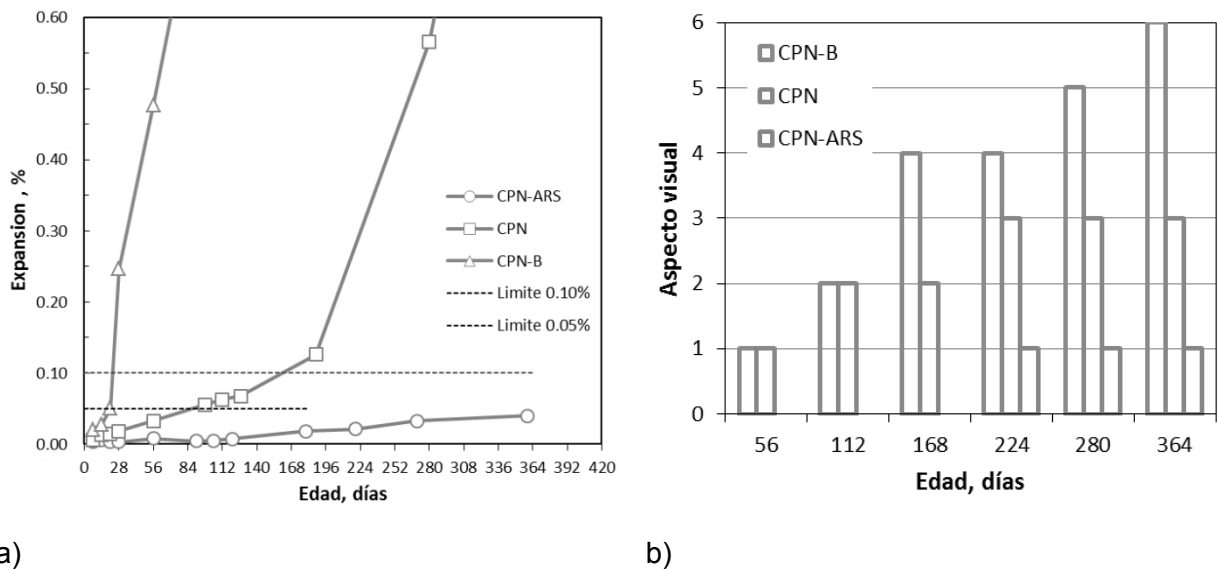


Figura 1: Comportamiento del CPN-B; CPN y CPN-ARS: a) Expansión; b) aspecto visual

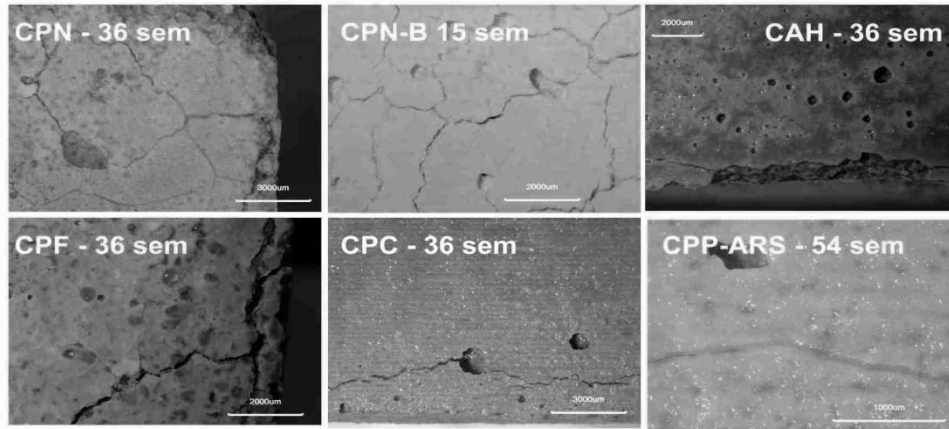


Figura 2: Aspecto de los bordes y extremos de las barras observados con lupa binocular.

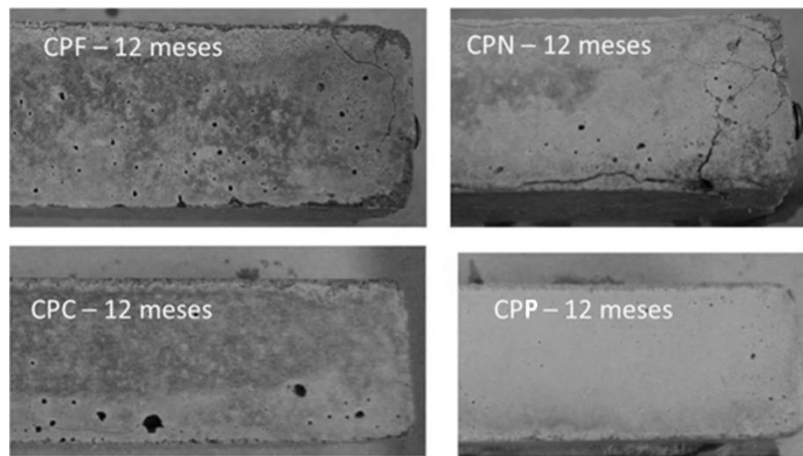


Figura 3: desprendimiento del material en las esquinas

### Cementos mezclas comerciales

En la figura 4 se muestran la expansión de las barras de mortero elaboradas con cementos mezclas comerciales (CPF, CPC, CAH y CPP-ARS). El CPF muestra un rápido aumento en la expansión a partir de los 56 días y supera el límite de expansión de 0,10 % aproximadamente a los 120 días indicando su baja resistencia a los sulfatos. Posteriormente, la tasa de expansión es moderada (0,131 %/días) y alcanza una expansión de 0,408 % al año. Las fisuras se detectaron antes de los 6 meses y al año las fisuras son gruesas y causan el desprendimiento de los bordes (Fig. 3). En el CPC, la tasa de expansión es creciente desde el comienzo hasta un año y la expansión final es 0.120 %. Este cemento cumple el criterio establecido por ASTM C1157 (expansión < 0,10% a los 6 meses) para ser considerado un cemento de moderada resistencia a los sulfatos. La evolución de su apariencia visual (Fig 3b) es menor al del CPF y las probetas presentan fisuras dispuestas paralelas a los bordes a los 9 meses (Fig. 2) que luego causan el desprendimiento.

En cuanto a los cementos CPP y CAH presentan una similar evolución de la expansión. La tasa de expansión es constante luego de los 56 días (0,007 y 0,012 %/días) y la expansión final es 0,056% y 0,060%, respectivamente. Ambos cementos cumplen los límites establecidos a los 6 y 12 meses para ser considerados como cementos ARS. En el CPP, se pueden observar leves fisuras a la edad de un año (Fig. 2), mientras que el CAH estas fisuras son extremadamente finas (Fig. 2).

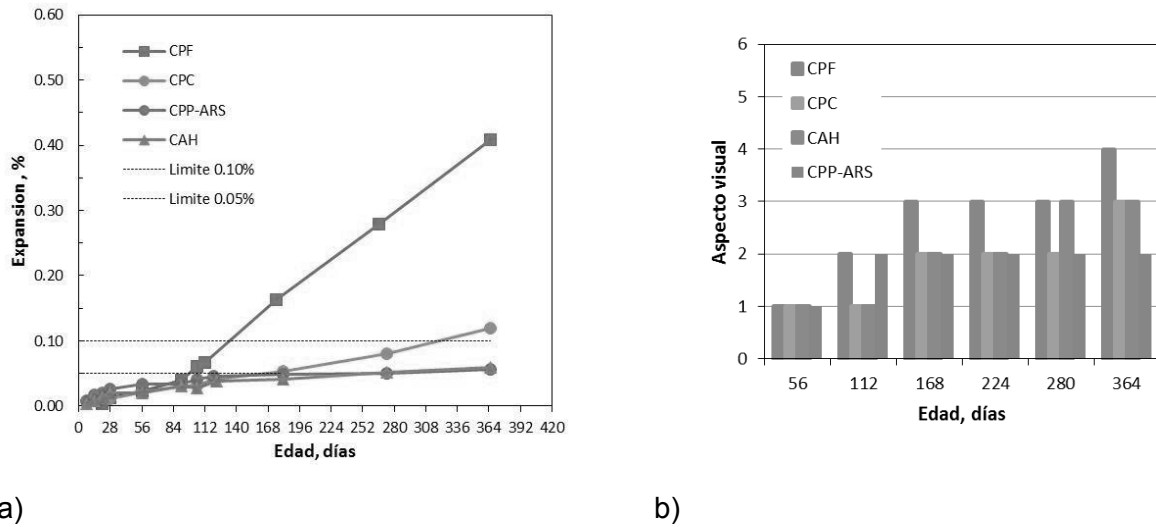
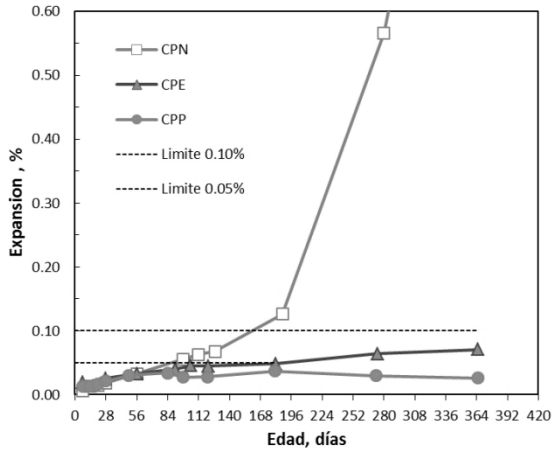


Figura 4: Comportamiento de los cementos mezcla comerciales: a) Expansión; b) aspecto visual

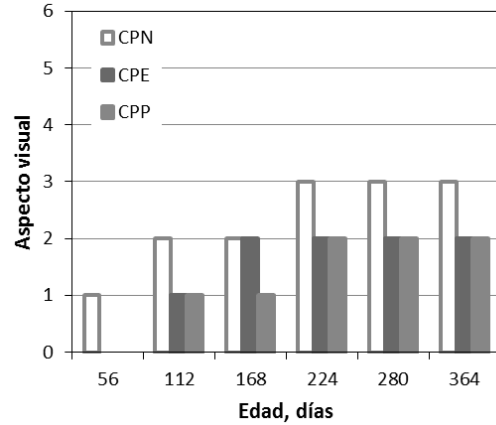
### Cemento Mezcla

Las barras de mortero de las mezclas binarias elaboradas con CPN y 30 % de puzolana o de escoria mostraron una significativa reducción de la expansión desde los 84 días como se muestra en la Fig. 4. El CPE presenta un crecimiento leve pero continuo de la expansión durante el año de ensayo alcanzando una expansión final de 0,071 %. En cambio, la expansión de las barras de mortero del CPP fue menor a 0.040 desde los 84 días hasta el año. En ambos casos el reemplazo del 30% del CPN ( $C_3A = 7,8\%$ ) por escoria o puzolana natural cumple con los límites de expansión para un cemento ARS. El aspecto visual de estos cementos presenta una evolución similar con leve deterioro de las aristas de las barras a un año.





a)



b)

Figura 5: Comportamiento de los cementos mezcla: a) Expansion; b) aspecto visual.

### DRX de las muestras

La Figura 6 muestra los diagramas de difracción de rayos X de los morteros expuestos durante un año a la solución de sulfatos. En la barra de mortero con cemento CPN se identifica ettringita ( $2\theta = 9,08^\circ$ ) y yeso ( $2\theta = 11,60^\circ$ ) como producto del ataque de sulfatos, mientras que para el CPN-ARS solo se identifica un leve pico de ettringita y el yeso está ausente. En este último se identifica aun el pico ferroaluminato sin hidratar ( $2\theta = 12,1^\circ$ ). En ambos cementos la intensidad del pico de CH ( $2\theta = 18,01$ ) es significativa y no se han podido identificar fases AFm. Para los cementos mezclas comerciales, la ettringita está presente en el CPF, CPC y CAH. Sin embargo, en el cemento conteniendo filler calcáreo el pico de yeso es de mayor intensidad que en otros morteros en consonancia con su mayor expansión final.

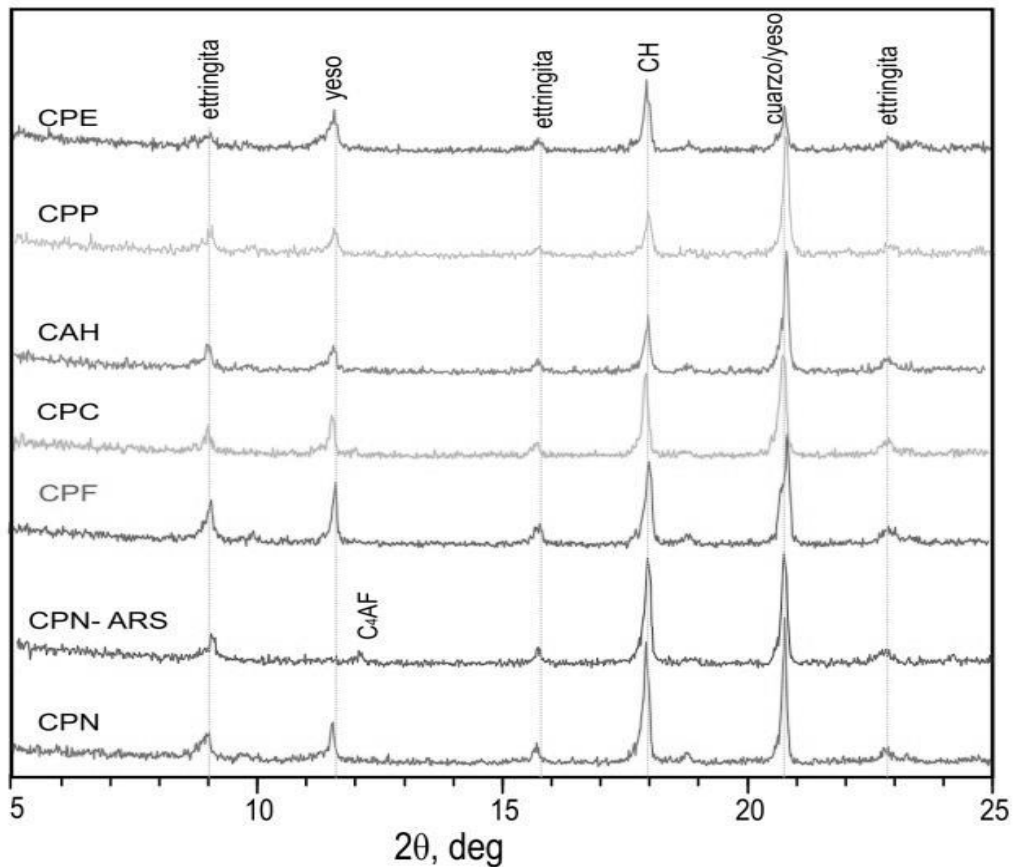


Figura 6: Diagramas de DRX de una sección de barra de mortero al año de exposición.

El yeso presentó una baja intensidad en el CPC y muy baja en el CAH, que también está en concordancia con el menor pico de CH. Los cementos elaborados con CPN y puzolana natural (CPP) o escoria (CPE), mostraron una clara disminución del pico de CH con respecto al cemento base y la formación de ettringita y yeso con menor intensidad. En ningún de los cementos que contienen filler calcáreo fue detectada la thaumasita.

### Cementos resistentes a los sulfatos

Según la expansión medida con el ensayo ASTM C 1012 comparada con los límites establecidos a 6 y 12 meses han resultado como resistentes a los sulfatos los cementos CPN-ARS, CAH, CPP-ARS, CPE y CPP. Según la norma EN 197:2011, el CPN-ARS es equivalente al CEM I-SR, el CAH al CEM III/B que no tiene requisitos de contenido en el  $C_3A$  para ser considerado SR y el CPP-ARS y el CPP como CEMV/A-P que con un clinker de menos de 9% de  $C_3A$  puede ser considerado como SR. En el CPE, el reemplazo de escoria utilizado es ligeramente menor al 36% para que pueda ser considerado SR en la

norma EN 197. Los cementos CPF que contienen una mayor proporción de filler calcáreo y el CPC con filler y baja proporción de escoria no cumplen los límites de expansión a los 6 y 12 meses; y la norma EN 197 no los contempla como SR.

## CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados de ensayo de expansión de morteros expuestos a 5% de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  por un periodo de 12 meses (ASTM C 1012), las siguientes conclusiones pueden exponerse:

Como ya se sabe la resistencia a los sulfatos de los cementos CPN depende del contenido de  $\text{C}_3\text{A}$  en el cemento. Los CPN con un bajo contenido de  $\text{C}_3\text{A}$  y  $\text{C}_4\text{AF}$  cumplen con los límites de expansión de los cementos resistentes a los sulfatos de la norma ASTM C 1012. La mayor expansión es acompañada por la formación de ettringita y yeso.

Los cementos mezcla comerciales (CPP y CAH) que son considerados por composición ( $\text{C}_3\text{A}$  en el cemento y tipo y cantidad de adición) como resistente a los sulfatos (RS) por la norma EN 197 cumplen con los límites de expansión de la normas ASTM a 6 y 12 meses para esta clasificación.

Los cementos mezclas con un cemento de moderado  $\text{C}_3\text{A}$  ( $> 5\%$  y  $< 9\%$ ) que contienen 30% de puzolana natural o escoria de alto horno presentan una buena performance a los sulfatos en correspondencia con lo establecido en la composición de la norma EN 197.

Los cementos CPC y CPF estudiados no pueden ser considerados como resistente a los sulfatos debido a que superan los límites de expansión establecidos para el ensayo ASTM C1012.

La norma EN 197 no clasifica a los cementos con escoria frente al ataque por sulfatos.

## Referencias

- [1] Capítulo 3. Ese material llamado hormigón., AATH, 2012, pp. 81. Viviana Rahhal, Lilian Eperjeci.
- [2] Evolución de la resistencia mecánica de morteros con cemento portland y puzolanas naturales. D.D Falcone, J. D. Sota, O. R. Batic. CONAMET/SAM-2006
- [3] Durabilidad del hormigón estructural. AATH, 2012, pp. xv.
- [4] Crammond N. J. & Halliwell M. A. "The thaumasite form of sulfate attack in concretes containing a source of carbonate ions – a microstructural overview", Second International Symposium on Advances in Concrete Technology, ACI SP 154, 357-380 (1995).
- [5] Berra M. & Baronio, "Thaumasite in deteriorated concretes in the presence of sulfates", Concrete Durability, ACI SP 100, 2073-2102 (1987).
- [6] ASTM C 1012-04 Annual book of ASTM standard, volumen 04.02, 2008
- [7] Bonavetti, V. Hormigones con alto contenido de adiciones. Hormigones especiales AATH. 2004.

[8] E. Irassar, A. Di Maio & O.Batic, "Sulfate attack of concrete with mineral admixtures", Cement and Concrete Research, V26, 1, pp. 113-123, 1996.