Aditivos de molienda
especializados en reducir el contenido de clínker en el cemento de cara a 2050

Marina de la Fuente Ayuso. *Ingeniera Química. Departamento Técnico de PROQUICESA.*
Ángel Alejandro Díaz del Cerro. *Ingeniero Químico. Departamento I+D de PROQUICESA.*
Santiago Ramos Irala. *Ingeniero Químico. Director de Operaciones de PROQUICESA.*

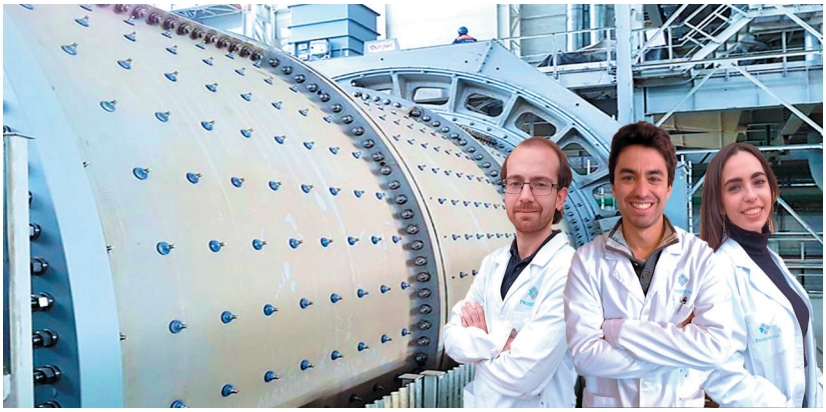
El Parlamento Europeo aprobó el pasado 20 de abril la ley de lucha contra el cambio climático que persigue alcanzar la neutralidad del carbono en 2050. Esto pasa por cumplir con el objetivo inmediato de reducir las emisiones de contaminantes en un 55% para 2030, por lo que la industria cementera está en el punto de mira. Para lograr esta transición industrial de forma eficiente, PROQUICESA está desarrollando diferentes aditivos. Estos aditivos son formulaciones específicas diseñadas para cada tipo de cemento y son capaces, entre otras cosas, de aumentar la eficiencia del proceso y/o mejorar las reacciones de hidratación del cemento,, lo que permite reducir el factor de clínker y, por tanto, reducir las emisiones de CO_2 por tonelada de cemento.

1. Introducción

La completa transición hacia una economía circular, neutra en carbono y cero en residuos es, y debe ser, una responsabilidad compartida. Los nuevos proyectos deben centrarse en el desarrollo y mantenimiento de nuevas ciudades bajas en carbono y en las que se minimicen residuos. Para adaptarnos a ello, el sector cementero tiene mucho que aportar [1].

El cemento pórtland es uno de los compuestos más utilizados en el mundo, tanto es así que en 2019 se alcanzó el consumo de 4,1 Gt y se estima que su producción crezca moderadamente hasta 2030 [2]. La creciente producción de este material implica un aumento de la necesidad de recursos naturales y energéticos, además de un aumento de emisiones de CO_2 a la atmósfera. Teniendo en cuenta que la industria cementera es responsable de la emisión de 1.700 millones de toneladas de CO_2 al año (5-7% del total generado por el hombre) es preciso buscar soluciones ante ello [1].

La industria del cemento ha hecho del cambio climático un elemento estratégico clave, aportando soluciones innovadoras para reducir su impacto. Concretamente, PROQUICESA destaca como una empresa referente en este campo, desarrollando y comercializando una amplia gama de productos que fomentan la reducción de los efectos de la industria cementera en el cambio climático.



Miembros del equipo investigador y desarrollador de los aditivos de PROQUICESA especializados en reducir el factor clínker en la industria cementera (de izquierda a derecha: Ángel Alejandro Díaz, Santiago Ramos y Marina de la Fuente).

Entre estos productos, destaca la gama de aditivos para la molienda del cemento ADITOR®, que tienen como principales propiedades aumentar la eficiencia del proceso y favorecer las reacciones de hidratación del cemento. ADITOR® permite disminuir el factor clínker y así, reducir las emisiones de CO_2 por tonelada de cemento, permitiendo un ahorro energético y de recursos naturales en las propias plantas de producción de cemento. Además de dichos aditivos, PROQUICESA dispone de otros aditivos para la industria cementera, tales como los reductores de cromo (sólidos y líquidos), modificadores de fraguado, oclusores de aire, etc.

Los aditivos se añaden en el proceso de molienda de cemento, normalmente en la cinta del clínker. Esta etapa es la que conlleva un mayor consumo energético del proceso (60-70% del consumo total de la energía eléctrica consumida en la planta). Como consecuencia de las fric-

ciones y fracturas que se originan en el molino de bolas entre los materiales y los cuerpos moledores, las partículas de cemento adquieren cargas electrostáticas superficiales que dan lugar a la reaglomeración de las mismas, dando lugar a partículas de mayor tamaño. De igual forma, esas fuerzas de atracción provocan que los cuerpos moledores y las paredes internas del molino sean recubiertos por partículas de cemento (efecto "coating"). Todos estos procesos disminuyen la eficiencia de la molienda y aumentan el consumo energético del proceso, lo que origina la necesidad de emplear aditivos coadyuvantes de molienda.

Estos aditivos coadyuvantes son compuestos líquidos, formulados como disolución acuosa de compuestos orgánicos e inorgánicos. Estos productos son dosificados con el objetivo de neutralizar parcialmente las cargas superficiales creadas sobre las partículas de cemento durante la molienda, disminuyendo así la tendencia a la reaglomeración de las mismas, y aumentando por tanto la eficiencia del citado proceso [3].

Los aditivos pueden incluir además propiedades como mejoradores de resistencia a la compresión al tener la capacidad de catalizar las reacciones de hidratación del cemento favoreciendo el desarrollo de la microestructura al formarse fases hidratadas como portlandita, etringita y gel CSH.

Tomando como ejemplo la hidratación de la alita, las etapas de formación de la microestructura hidratada son:

1. Etapa de preinducción:
   $C_3S + H_2O \rightarrow 3Ca^{2+} + SiO_2^{2-}$
2. Etapa de inducción:
   $3Ca^{2+}+SiO_2^{2-} \rightarrow Ca(OH)_2+CSH$
3. Periodo de hidratación media: rápida precipitación de CSH junto con el $Ca(OH)_2$.
4. Período de hidratación final: se forma una estructura de CSH densa.

La reducción de CO_2 también se consigue por el uso de combustibles alternativos en el proceso de fabricación del clínker.

Para producir la energía del horno, antiguamente se usaba gas natural y carbón. Actualmente, estos productos son sustituidos por combustibles alternativos (biomasa, harinas animales, residuos urbanos, etc.), de esta manera se reduce la generación de CO_2 a nivel global, disminuyendo la huella de carbono. Sin embargo, debido a ésto se generan cambios en el perfil de temperatura del horno y en la composición del clínker por las impurezas presentes. Estas consecuencias pueden llevar a disminuciones en la resistencia a la compresión del cemento y para resolver este problema los aditivos se presentan como una solución.

Otra vía para reducir el impacto ambiental del sector cementero es la incorporación de adiciones minerales en el proceso de producción, sustituyendo parte del clínker sin que ocasione un perjuicio de la calidad final del cemento. Por esta razón, en PROQUICESA sse ha estudiado el efecto de diferentes aditivos para cada tipo de cemento con el fin de obtener el máximo rendimiento, optimizando la acción sobre cada adición en particular.

1.1 Escorias

La escoria granulada de alto horno se obtiene por el rápido enfriamiento de una escoria fundida de composición adecuada, obtenida por la fusión del material de hierro en un alto horno y constituida al menos en 2/3 por escoria vítrea [4].

Las escorias poseen propiedades hidráulicas cuando se activan de manera adecuada, es decir, activadas con agua, fraguan y endurecen por sí mismas, si bien dicha actividad puede ser acelerada e intensificada por un activador o catalizador alcalino.

La adición de escorias activadas alcalinamente sobre cemento pórtland se lleva a cabo con el fin de conseguir las siguientes ventajas [5]:

1. Aumento de la resistencia a la compresión, la cual va a depender del tipo de activador, su dosificación, la naturaleza y finura de la escoria y la temperatura de curado.
2. Reducción del calor de hidratación entre un 30-50% respecto al cemento pórtland a causa de la menor energía de hidratación de los materiales alcalinos (K-3,43•108 J/kg, Na-4,14•108 J/kg) comparada con la de los materiales alcalinotérreos (Ca-15,11•108 J/kg).
3. Mayor impermeabilidad, la velocidad de difusión de los cloruros en pastas de cemento con escorias activadas es 20-30 veces más lenta que en las pastas de cemento pórtland a iguales relaciones de agua/ligante.
4. Resistencia a altas y bajas temperaturas.
5. Resistencia al ataque químico o biodeterioro (sulfatos en general, etc.) y a la corrosión (protección de armaduras metálicas).
6. Resistencia a la interfase árido-matriz. En los hormigones con escorias alcalinas no hay cristales grandes de $Ca(OH)_2$ ni etringita, sino que por lo contrario en la zona interfacial, debido a la presencia de alcálisis se pueden dar reacciones químicas entre los materiales arcillosos de los áridos y dichos álcalis. Aumenta la adherencia y la resistencia en la interfase, más que la propia matriz.
7. Ahorro energético y económico.

El cemento estudiado con esta adición en el presente estudio (CEM III / A-M) tiene una composición de 70,0% clínker / 5,0% yeso / 25,0% escoria.

1.2 Caliza

La caliza es una roca sedimentaria compuesta mayoritariamente por carbonato de calcio ($CaCO_3$) que no posee propiedades hidráulicas, es decir, permanece inerte durante el proceso de hidratación.

La caliza en el cemento actúa como "filler", se puede incorporar en la molienda del clínker para evitar aglomeraciones, acelerar la hidratación del cemento y rellenar huecos intergranulares, obteniendo pastas de cemento más compactas y homogéneas [6].

El cemento estudiado con esta adición en el presente estudio (CEM II/A-L) tiene una composición de 90,0% clínker / 7,0% yeso / 3,0% caliza.

1.3 Puzolana

La puzolana es una sustancia natural de composición silícea y/o sílico-aluminosa que no endurece por sí misma al hidratarse pero finamente molida y en pre-

sencia de agua reacciona con el $Ca(OH)_2$ para formar compuestos de silicatos y aluminatos de calcio capaces de desarrollar resistencias [4].

Entre las propiedades/ventajas que aporta la adición de puzolana a los cementos destaca [7]:

1. Disminución del calor de hidratación con el tiempo, en una cantidad prácticamente proporcional a la puzolana añadida.
2. Resistencia química en ambientes agresivos (aguas puras y ácidas, de mar, etc.).
3. Aumento a largo plazo de resistencia a la compresión y tracción.
4. Disminución de la relación agua/cemento.
5. Ahorro energético y económico.

El cemento estudiado con esta adición en el presente estudio (CEM IV / B (Q)) tiene una composición de 47,70% clínker / 5,10% yeso / 47,20% puzolana.

2. Resultados y discusión

Para la realización de este estudio se utilizan los molinos de bolas de la planta piloto de PROQUICESA con el fin de fabricar cementos con diferentes adiciones, empleando en cada caso los aditivos correspondientes (Tabla 1) desarrollados teniendo en cuenta las propiedades de cada adición.

Sobre los diferentes cementos se lleva a cabo un estudio de caracterización de sus propiedades físicas. En dicha caracterización se mide la evolución de la finura con el tiempo de molienda (según la Norma UNE-EN 196-6) para comprobar la eficiencia de molienda y las resistencias a la compresión (según la Norma UNE-EN 196-1) para evaluar el efecto de los aditivos en las reacciones de hidratación.

Como experimentación previa al estudio, el Departamento Técnico de PROQUICESA lleva a cabo la caracterización por separado de la molturabilidad del clínker empleado y de cada adición para determinar las condiciones de molienda en cada caso y el tiempo de molienda en el que añadir cada adición en función de su molturabilidad (figuras 2 y 3).

Figura 1. Planta piloto de PROQUICESA en la que se reproducen a escala los cementos de los clientes.

Tabla 1. Formulación de aditivos empleados.

Adición	Aditivo	Agua (%)	Ácido (%)	Compuestos orgánicos (%)
Escoria	F-S1	30-40	-	60-70
	F-S2	40-50	-	50-60
	F-S3	20-30	-	70-80
Caliza	F-L1	0-10	-	90-100
	F-L2	0-10	-	90-100
	F-L3	20-30	10-20	60-70
Puzolana	F-Q1	20-30	-	60-70
	F-Q2	30-40	0-10	60-70
	F-Q3	10-20	-	80-90

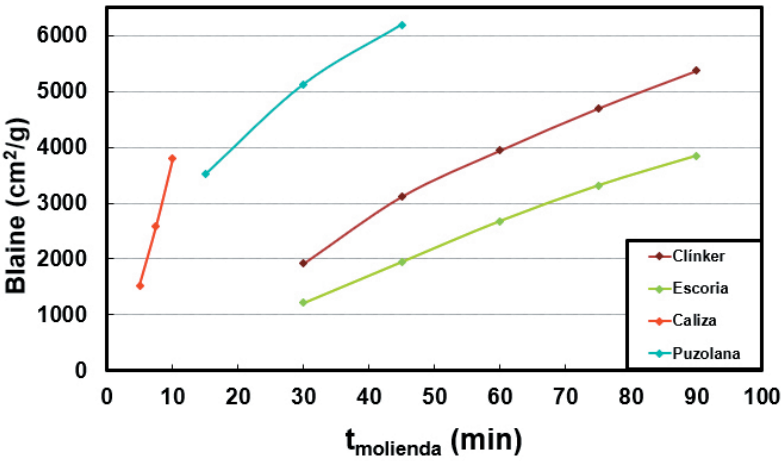


Figura 2. Finura Blaine de las diferentes adiciones y el clínker.

2.1 Eficiencia de molienda

Una vez fijadas las condiciones de molienda se procede con el estudio de la eficiencia del proceso de molienda para cada adición.

En las figuras 4, 5 y 6 se muestra la evolución de la finura medida como R32 µm (%) frente al tiempo de molienda para los diferentes tipos de cementos estudiados con los respectivos aditivos, todos ellos aplicados a la misma dosificación para cada tipo de cemento, tal y como se describe en cada gráfica.

Cemento con escoria

La adición de escoria se incorpora al proceso de molienda a $t_{molienda}$ = 0 min, es decir, junto al clínker, por tener molturabilidades similares.

Cemento con caliza

La adición de caliza se incorpora al final del proceso de molienda debido a la gran diferencia de molturabilidad entre el clínker y la caliza.

Mediante la evolución del Residuo 32 µm con el tiempo no se pueden comparar los efectos de los diferentes aditivos sobre los cementos con caliza debido a que durante el periodo de molienda no hay un cemento con caliza, sino un CEM I, es decir, clínker y yeso.

Cemento con puzolana

La adición de puzolana se incorpora al proceso de molienda a $t_{molienda}$ = 20 min, es decir, después de comenzar la molienda de clínker y yeso.

Comparando los aditivos testados se observan importantes diferencias en el rendimiento de molienda, ofreciendo todos una mejora en la eficiencia de molienda del cemento sin aditivar (Blanco), logrando reducir hasta un 10% el tiempo necesario para alcanzar la consigna de finura final. A nivel industrial este incremento del rendimiento en la molienda se traduce en moliendas más estables y mayores tasas de alimentación en el molino, optimizando así la eficiencia energética del proceso.

A partir de las evoluciones del residuo a 32 µm con el tiempo de molienda se calcula la velocidad de reducción del tamaño de partícula (CR32) en el periodo de máxima eficiencia del proceso, permitiendo así establecer una correlación lineal para la velocidad de reducción del tamaño de partícula como se muestra en la ecuación (1).

$$CR_{32} = -\frac{d(R32/R32)_{t=to}}{dt_{molienda}} \Big|_{t=to}^{t=tf} \qquad (1)$$

La linealización del cemento con caliza no se realiza ya que en el periodo de molienda eficiente no hay caliza adicionada al CEM I. Por lo tanto, no se vería el efecto de la reducción de velocidad del tamaño de la partícula al dosificar aditivos sobre el cemento con caliza, sino sobre el cemento libre de caliza. Este efecto se debe a la gran diferencia de molturabilidad entre el clínker y la caliza.

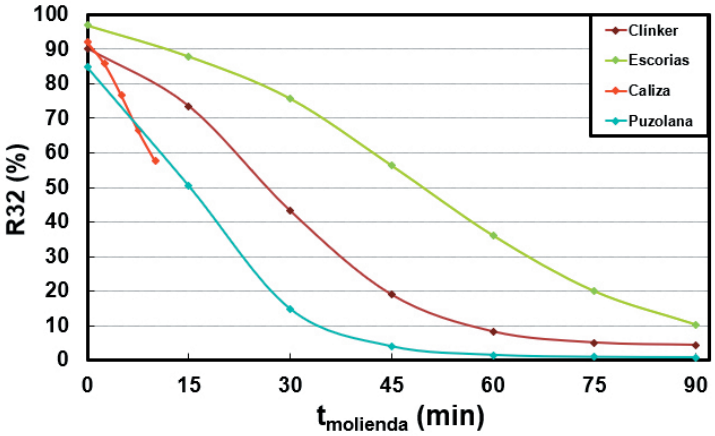


Figura 3. Curvas de finura (residuo 32 µm) de las diferentes adiciones y el clínker.

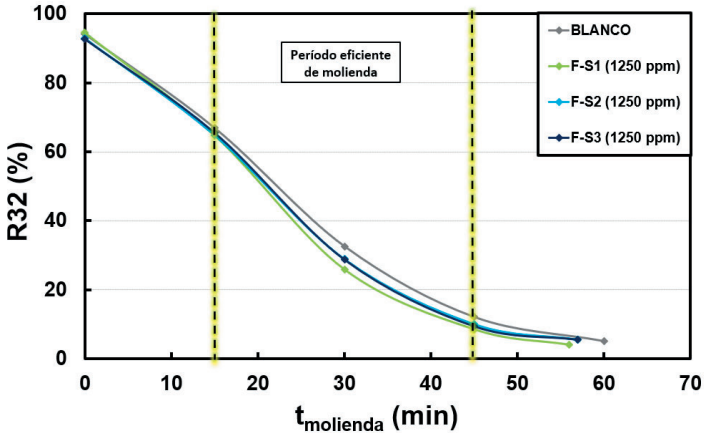


Figura 4. Residuo a 32 µm del CEM III/A-M fabricado en la planta piloto de PROQUICESA con los aditivos preparados para cemento con escoria.

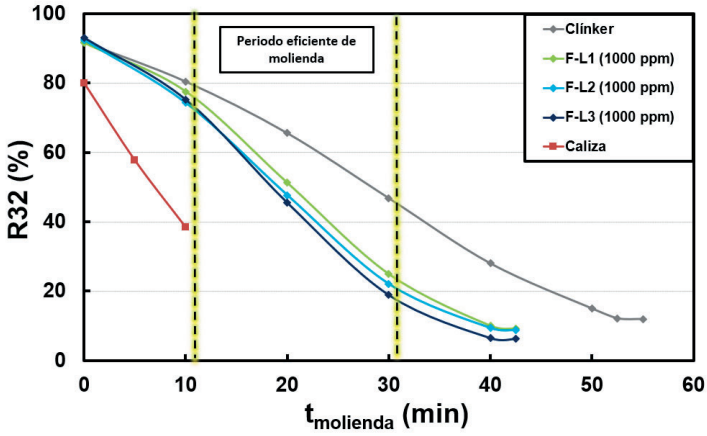


Figura 5. Residuo a 32 µm del CEM II/A-L fabricado en la planta piloto de PROQUICESA con los aditivos preparados para cemento con caliza.

La cuantificación de los resultados de reducción del tamaño de partícula se muestra en la Tabla 2.

Todos los aditivos propuestos por PROQUICESA para diferentes tipos de adiciones en el cemento representan una alternativa técnica que permitiría optimizar de forma sustancial el balance

Tabla 2. Velocidades de reducción de tamaño de partícula.

CEM	Aditivo	Dosif.	AJUSTE		
			CR_{32} (min^{-1})	R^2	% Mejora CR_{32}/Ref
CEM III / A-M	BLANCO	-	0,0287	0,9790	-
	F-S1	1250	0,0312	0,9536	8,7
	F-S2	1250	0,0300	0,9687	4,5
	F-S3	1250	0,0303	0,9690	5,6
CEM IV / B (Q)	BLANCO	-	0,0324	0,9964	-
	F-Q1	500	0,0336	0,9913	3,7
	F-Q2	500	0,0354	0,9868	9,3
	F-Q3	500	0,0365	0,9852	12,7

técnico-económico del sistema de molienda al conseguir mejorar la eficiencia de molienda hasta un 8,7% en cemento con escoria y un 12,7% en cemento con puzolana. Promoviendo por tanto, un gran aumento de la eficiencia energética del proceso de producción del cemento.

2.2 Resistencia a la compresión

Mostrados los resultados de molturabilidad fruto de los ensayos realizados en la planta piloto de PROQUICESA, para cada ensayo de molienda, se elaboran los correspondientes morteros con arena normalizada. A continuación, con estos morteros se preparan probetas mediante moldes normalizados y éstos se introducen en una cámara húmeda para su curado. A partir de este momento, las probetas elaboradas se van extrayendo para su rotura a diferentes edades de curado (2, 7 y 28 días), de esta manera se determinan las resistencias a la compresión de cada probeta (según la Norma UNE-EN-196-1) y se comparan los resultados respecto del blanco (cemento sin aditivo) como se muestra en las figuras 7, 8 y 9 y la Tabla 3.

Los resultados de la Figura 7 muestran cómo PROQUICESA ha conseguido un aditivo mejorador de resistencia para cementos con adiciones de escoria tanto a edades iniciales, como finales de curado, y otros dos mejoradores únicamente a 28 días.

Desde edades iniciales de curado, la RC se ve mejorada por el aditivo F-S3 debido a la presencia en su formulación de activadores alcalinos. Estas sustancias activadoras aceleran la solubilización de la escoria, favorecen la formación de hi-

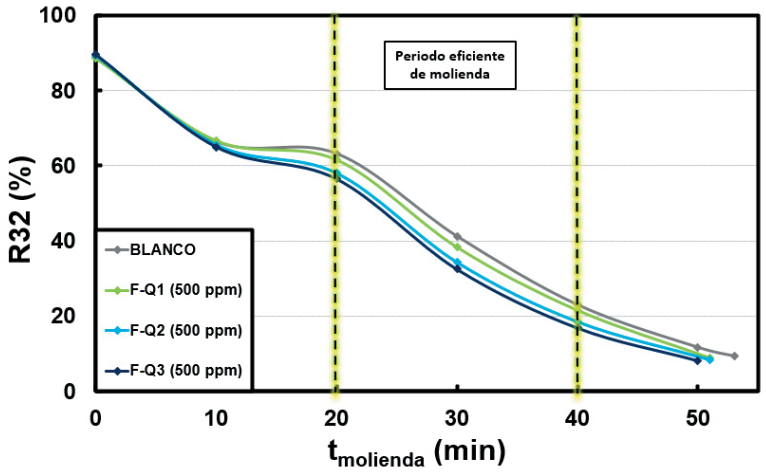


Figura 6. Residuo a 32 µm del CEM IV/B (Q) fabricado en la planta piloto de PROQUICESA con los aditivos preparados para cemento con puzolana.

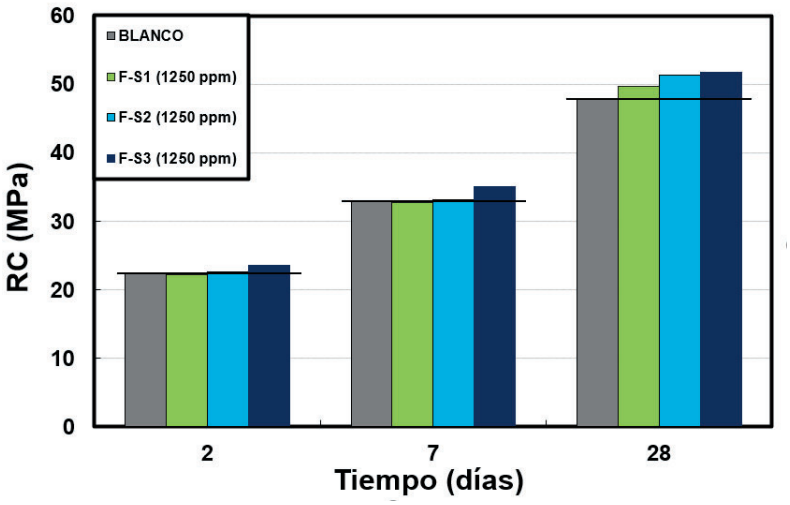


Figura 7. RC de las probetas del CEM III/A-M fabricado en la planta piloto de PROQUICESA con los aditivos preparados para cemento con escoria.

dratos estables de baja solubilidad y la formación de una estructura compacta con esos hidratos formados [5].

Los otros dos aditivos solo causan efecto mejorador a edades avanzadas de curado. Entre ellos, el aditivo F-S1 es el que menores resistencias ofrece debido a la baja concentración de compuestos nitrogenados y activadores en su formulación. La diferencia del aditivo F-S2 que a 28 días presenta una RC superior, radica en una mayor concentración de nitrogenados.

Para adiciones de caliza en el cemento, PROQUICESA desarrolló diferentes aditivos mejoradores de resistencia como se muestra en la Figura 8. Entre ellos, el aditivo F-L1 es el que menores resistencias ofrece debido a la baja concentración de compuestos nitrogenados en su formulación, además a medida que aumenta el tiempo de curado, la RC baja a valores similares al blanco (cemento sin aditivo). Por el contrario, los aditivos F-L2 y F-L3 son los que mayores resistencias ofrecen, con la diferencia de que el aditivo F-L3 aporta un resultado algo superior. A pesar de que el aditivo F-L2 presenta un mayor contenido de nitrogenados, la presencia de ácido en el aditivo hace que su resistencia baje hasta valores inferiores que el F-L3.

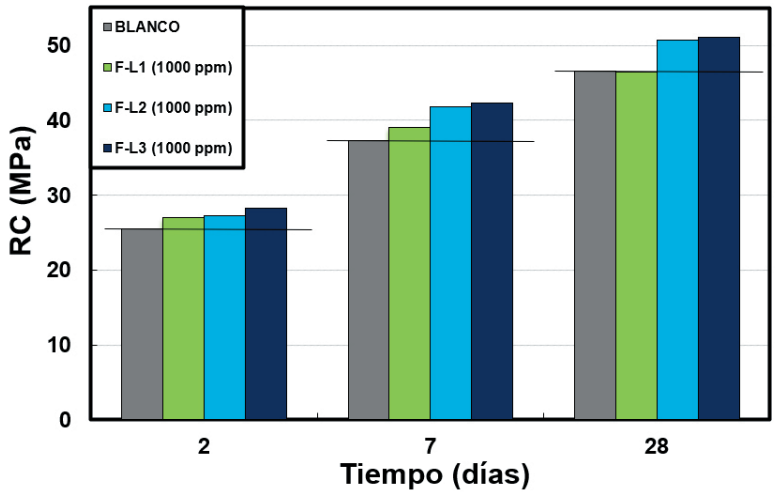


Figura 8. RC de las probetas del CEM II/A-L fabricado en la planta piloto de PROQUICESA con los aditivos preparados para cemento con caliza.

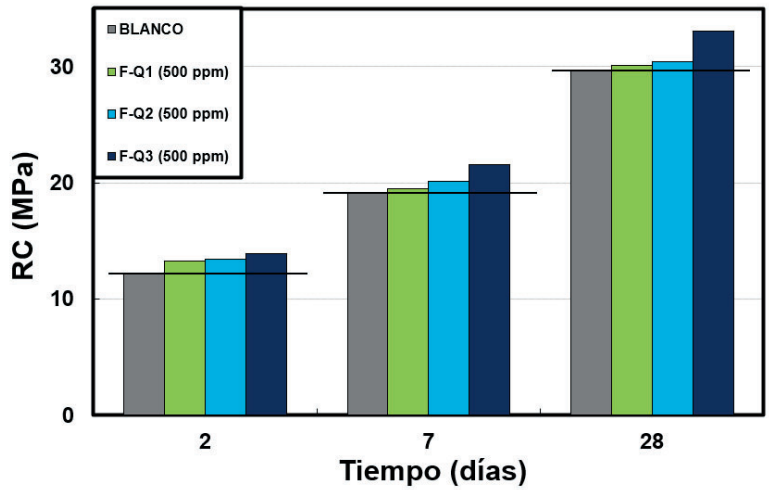


Figura 9. RC de las probetas del CEM IV/B (Q) fabricado en la planta piloto de PROQUICESA con los aditivos preparados para cemento con puzolana.

Para el cemento con puzolana, en la Figura 9 se observa que el aditivo F-Q1 es el que menos mejoras de RC ofrece debido a la presencia de ciertos glicoles en su composición que hace que las reacciones de hidratación del cemento se vean retardadas. Por otro lado, los aditivos F-Q2 y F-Q3 son los que mayor RC ofrecen, con la diferencia de que el aditivo F-Q3 permite conseguir un resultado superior. La diferencia entre la formulación de estos dos aditivos es el contenido en ácido. En vista a los resultados obtenidos, la RC se optimiza con aditivos que presentan en su formulación compuestos orgánicos libres, que conllevan a una mayor conversión de $Ca(OH)_2$ a gel CSH y sin embargo, la presencia de ácido hace que la mejora de RC disminuya con el tiempo de curado como es el caso del aditivo F-Q2.

Todos los aditivos testados por PROQUICESA permiten una mejora de RC, lo cual puede permitir una disminución del factor clínker y así, una reducción en la emisión de CO_2 a la atmósfera.

Las resistencias a la compresión que se desarrollan en el cemento dependen de las reacciones de hidratación. En estas reacciones intervienen los diferentes componentes de cada tipo de clínker, sin embargo, también intervienen adiciones como la escoria y la puzolana. Estas adiciones a diferencia de la caliza, desarrollan RC debido a que, por un lado la escoria posee propiedades hidráulicas, es decir, en presencia de agua, fragua y endurece por sí misma y por otro lado, la puzolana es capaz de hidratarse y generar microestructura en presencia de $Ca(OH)_2$. Como cada cemento es diferente, resulta difícil cuantificar a nivel general cuántos puntos de clínker y así de CO_2 pueden disminuirse en función de la variación de las RC.

De los diferentes cementos estudiados, el cemento con caliza es el único que puede dar una idea de la relación entre el factor clínker y la RC, ya que en este cemento el único componente que desarrolla RC es el clínker. Por tanto, de

Tabla 3. Resistencias a la compresión a los 2, 7 y 28 días de curado.

Aditivo	Resistencia a la compresión								
	2 días			7 días			28 días		
	RC (MPa)	ΔRC (MPa)	ΔRC (%)	RC (MPa)	ΔRC (MPa)	ΔRC (%)	RC (MPa)	ΔRC (MPa)	ΔRC (%)
BLANCO	22,3	-	-	32,9	-	-	47,9	-	-
F-S1	22,0	-0,3	-1,3	33,4	0,5	1,5	49,8	1,9	4,0
F-S2	22,6	0,3	1,3	33,2	0,3	0,9	51,4	3,5	7,3
F-S3	23,6	1,3	5,8	35,1	2,2	6,7	51,8	3,9	8,1
BLANCO	25,5	-	-	37,3	-	-	46,6	-	-
F-L1	27,0	1,5	5,9	39,1	1,8	4,8	46,5	0,0	0,0
F-L2	27,3	1,8	7,1	41,8	4,5	12,1	50,7	4,1	8,8
F-L3	28,3	2,8	11,0	42,5	5,2	13,9	51,1	4,5	9,7
BLANCO	12,2	-	-	19,1	-	-	29,7	-	-
F-Q1	13,4	1,2	9,8	20,1	1,0	5,2	30,4	0,7	2,4
F-Q2	13,3	1,1	9,0	19,5	0,4	2,1	30,1	0,4	1,3
F-Q3	13,9	1,7	13,9	21,6	2,5	13,1	33,1	3,4	11,4

manera empírica en el presente estudio, el cemento con caliza aditivado a 28 días supone una mejora de 4,5 MPa, lo que se traduciría en una posible disminución de hasta un 10% del factor clínker en el cemento. Estos datos se basan en estimaciones empíricas que sirven como punto de partida a un proyecto para la cuantificación de la relación entre el factor clínker y la RC, que a nivel general podría estudiarse en otro proyecto mediante experimentos empíricos.

3. Conclusiones

Para todos los tipos de adiciones en el cemento, los aditivos de PROQUICESA testados mejoran la RC, alcanzando mejoras en este estudio de hasta un 8% en escoria, 12% en caliza y 11% en puzolana a los 28 días de curado. En cuanto al poder coadyuvante, se consigue un aumento de la eficiencia de molienda de hasta un 8,7 y 12,7% respecto al blanco para las adiciones de escorias y puzolana, respectivamente. Estas mejoras permiten optimizar el balance técnico-económico de la planta, además de reducir el factor clínker y con ello, el efecto que tiene la industria cementera sobre el cambio climático al disminuir las emisiones de CO_2 en el proceso.

En cementos con escoria, los aditivos que contienen activadores alcalinos en su formulación aceleran la solubilización de la misma favoreciendo la formación de hidratos estables de baja solubilidad y la formación de una estructura compacta con esos hidratos formados. Por el contrario, el cemento con caliza ofrece mejores prestaciones cuando en la formulación de los aditivos se da la presencia de compuestos nitrogenados y la ausencia de ácido. Al igual ocurre con los aditivos para el cemento con puzolana, donde además un alto contenido de compuestos orgánicos libres en los aditivos conlleva una mayor conversión de $Ca(OH)_2$ a gel CSH, y la mayor densificación de este último.

En estudios posteriores podría evaluarse la relación entre la mejora de RC causada por los aditivos con el porcentaje de reducción del factor clínker y por tanto, con la reducción de las emisiones de CO_2 que permiten cumplir con los Objetivos De Desarrollo Sostenible (ODS) en la industria del cemento, aumentando su eficiencia energética usando economía circular.

Referencias

[1] Agrupación de fabricantes de cemento en España (Oficemen). Hoja de ruta de la industria española del cemento para la reducción de emisiones de carbono a 2050.

[2] International Energy Agency. Disponible en: https://www.iea.org/reports/cement. (Última visita: 05/04/2021.

[3] Pérez Velázquez, A. y Pérez Calvo, J.F. Nueva familia de aditivos coadyuvantes de bajo coste para la molienda de cemento. Cemento Hormigón, 2009, nº 926, pp. 6-21.

[4] AENOR. Norma UNE-EN 197. Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes. Disponible en: https://www.aenor.com/normas-y-libros/. (Última visita: 05/04/2021).

[5] Puertas, F. Cementos de escorias activadas alcalinamente: Situación actual y perspectivas de futuro. Materiales de Construcción, 1995, 45(239), 53–64. https://doi.org/10.3989/mc.1995.v45.i239.553

[6] Redondo Soto, C.; Díaz del Cerro, A.A. y Ramos Irala, S. Desarrollo de aditivos para la minimización de emisiones de CO_2 por parte de la industria del cemento. Cemento Hormigón, 2019, nº 995, pp. 22-28.

[7] Santamaría Soria, F. Las puzolanas y el ahorro energético en los materiales de construcción. Materiales de construcción, 1983, vol. 33, nº 190-191, pp. 69-84.