

“Adiciones y cementos con adiciones”*

Prof. Dr. JOSE CALLEJA IETCC/CSIC - MADRID - España

RESUMEN

Se tratan en este trabajo aspectos relativos a las condiciones exigibles a las materias primas y a los procesos de fabricación de los cementos que contienen constituyentes distintos del clinker y del yeso.

Se tienen también en cuenta las condiciones adecuadas para utilizar estos cementos, así como el conocimiento de las relaciones entre la fabricación y el empleo de los cementos con constituyentes secundarios que ahorran energía, a fin de ayudar a fabricantes y usuarios en su mejor aprovechamiento en condiciones técnicas y económicas óptimas.

SUMMARY

The present paper deals with aspects concerning the conditions to be fulfilled by raw materials and manufacturing process of cements containing components other than clinker and setting regulator.

It deals also with proper conditions for the utilization of these cements, as well as with the knowledge of the interrelation between manufacture and use of them, in order to aid the manufacturers and the users in the better profit or such energy saving blended cements in optimal technical and economical conditions.

0. PREAMBULO

Es evidente que, dadas las características de estas Jornadas, y las de los organismos y personas que en ellas participan como ponentes y asistentes, el tema general en ellas tratado interesa, por razones distintas, tanto a fabricantes como a usuarios del cemento.

Por ello, en la intervención correspondiente al título “ADICIONES Y CEMENTOS CON ADICIONES” se tocan puntos concernientes a aspectos relacionados tanto con las materias primas componentes y con los procesos de fabricación más adecuados de estos cementos, como con las condiciones más idóneas de utilización de los mismos, por entender que entre unos y otras hay o puede haber una interdependencia a veces muy directa, y que el conocimiento de la misma puede ayudar a los fabricantes a mejor hacer y a los usuarios a mejor emplear los cementos con adiciones, en condiciones técnicas y económicas óptimas.

1. INTRODUCCION

El título general de estas II Jornadas Nacionales de Control de Calidad: “NUEVOS CEMENTOS” es bastante sugestivo, por cuanto que induce a pensar en posibles innovaciones muy de última hora, tanto en la producción como en la utilización de conglomerantes hidráulicos. Induce también a pensar consecuentemente en CEMENTOS ESPECIALES para determinados usos específicos, que requieran tal vez un particular proceso de fabricación.

Si bien es cierto lo de que “nihil –vel paucum– novum sub sole”, y esto es también aplicable al caso que nos ocupa, también lo es que en el campo del cemento se están produciendo novedades, como los últimos Congresos Internacionales de Química del material ponen de manifiesto. Así, pues, si no hay cementos nuevos estrictamente hablando, sí hay, en cambio, novedades que afectan ya hoy o podrán afectar mañana a los cementos en diversos aspectos.

* Conferencia pronunciada por el autor en las II Jornadas de Control de Calidad en la Construcción sobre el tema “Nuevos Cementos”, desarrolladas en la F T S de Ingenieros de Caminos de Madrid, el 14-XII-82.

De pasada, y en cuanto a fabricación, se pueden citar como botón de muestra las novedades relativas a maquinaria y a proceso, por lo que atañe a los últimos sistemas de hornos ideados y desarrollados por los japoneses e imitados por los europeos, y al procedimiento soviético de fabricación de clinker "alinitico", por cocción de crudos a baja temperatura en lecho salino fundido de cloruro cálcico.

Por lo que respecta a la utilización, las novedades más destacadas van a ser, sin duda, las que emanen de la futura normalización europea –y posiblemente internacional–, con las consiguientes repercusiones en las normalizaciones nacionales, de lo cual nos acaba de hablar brillante y documentadamente el Prof. SORIA. Novedades serán también las que las mencionadas normalizaciones introduzcan en las normas para hormigón de algunos países.

En lo que concierne al tema cuyo desarrollo se me ha asignado: "ADICIONES Y CEMENTOS CON ADICIONES", las novedades previstas a plazo indefinido serán muy en particular las que se deriven de la futura Norma CEN (Comité Europeo de Normalización), que actualmente elabora el Comité Técnico 51 (CT-51): CEMENTO de dicho organismo comunitario europeo.

He dicho –y escrito– recientemente, que la utilización de las adiciones al clinker en los cementos puede obedecer aislada o conjuntamente a tres razones principales de orden diverso: tecnológico, económico y ecológico (en realidad, mixto en los dos últimos casos).

De orden tecnológico, por cuanto que los cementos con adiciones –hablando en general– carecen de algunas de las insuficiencias o deficiencias de los cementos portland ordinarios en determinados aspectos, aportando en cambio otras ventajas y siendo por ello más recomendables que los propios cementos portland para multitud de usos específicos bien definidos (por ejemplo, los cementos puzolánicos en presas y los siderúrgicos en obras marítimas). No es cuestión de desarrollar aquí y ahora este aspecto del tema, por otra parte tratado con detalle por el que expone, en diversas ocasiones.

De orden ecológico, ya que la utilización de escorias siderúrgicas y de cenizas volantes de centrales termoeléctricas supone la supresión o reducción de las correspondientes escombreras.

Y de orden económico, puesto que dicha utilización, por una parte, aprovecha subproductos desechados que aún contienen masa y energía potencial recuperables y de menor costo; y, por otra parte, por cuanto que ahorra materias primas y energía térmica para la fabricación del clinker, habida cuenta de la cada vez menor disponibilidad de aquéllas –al menos de las consideradas hasta ahora como más idóneas y explotables–, y del costo energético cada vez mayor.

Es curioso observar cómo a las razones de orden técnico, que fueron al menos aparentemente las primeras, se han impuesto con posterioridad las de orden económico-ecológico, y más concreta y universalmente las relativas al ahorro de materias primas y de energía en general –combustible (calorías, termias) en los hornos, y fuerza (kilowatios) en los molinos y transportes– en las fábricas de cemento.

El ahorro de energía –petrodólares– desde el comienzo de la crisis del petróleo en 1973 se ha convertido en una meta prioritaria de la industria, y en particular de la pesada, en todo el mundo.

La industria cementera, como tal, no se ha sustraído al reto. Por el contrario, ya antes y de forma tradicional ha procurado por todos los medios conseguir tal finalidad: i) utilizando materiales blandos de cocción, cuando dispone de ellos; ii) recurriendo al empleo de mineralizadores adecuados, o a rebajar el módulo aluminico o de fundentes de los crudos y con él la temperatura de formación de fase líquida y de clinkerización, y/o el tiempo de permanencia del material en el horno, con lo que, de paso, aumenta la producción de éste (procedimiento

utilizado en la fabricación del clinker de cemento blanco, ordinariamente muy duro de cocer); iii) transformando los procesos por vía húmeda –energéticamente más costosos– en procesos de vía seca –más económicos de energía–; iv) sustituyendo el fuel-oil como combustible más noble y caro por carbón (como en los primeros tiempos de la fabricación del cemento), o por otros combustibles (por gas natural cuando se puede); diseñando, realizando y adoptando diversos sistemas de clinkerización con menor consumo y mayor aprovechamiento térmico, como los hornos con sistemas de precalentamiento del crudo en ciclones intercambiadores de calor y con precalentadores, o tratando de introducir procedimientos no tradicionales, como la ya citada clinkerización en lecho de sales fundidas, o como la adaptación de nuevos tipos de reactores, como el THAGARD desarrollado en los Estados Unidos; vi) y, finalmente, recurriendo a las adiciones al clinker.

En cuanto al paso de la vía húmeda a la vía seca, y al retorno del fuel-oil al carbón, sobre todo en lo que se refiere a esto último, se puede decir que en el mundo y en España se ha llegado o se está llegando al agotamiento de las posibilidades.

Con respecto a las innovaciones en cuanto a maquinaria y procesos (hornos, calcinación, clinkerización), se ha alcanzado prácticamente ya una asintota que sitúa el consumo mínimo de energía logrado en la clinkerización por medios convencionales alrededor de unas 750 kcal/kg de clinker, difícilmente mejorable con facilidad y a poco costo.

Queda, pues, justificado como único medio fácil y viable, y con más amplias perspectivas para reducir el costo de la fabricación del cemento, la utilización de ADICIONES. Primero, porque esta solución incide sobre el capítulo más costoso de la producción del cemento: el horno; y, segundo, porque además está *técnicamente* justificada también, por lo ya indicado intencionadamente antes, y suficientemente sancionada de forma positiva por la práctica de muchos años en muchos países.

2. LAS ADICIONES

2.1. Generalidades

De una forma un tanto simplista se ha tratado a veces de clasificar las adiciones al clinker en activas e inertes y, sobre todo estas últimas, en nocivas y no nocivas, sin especificar en qué aspectos son una cosa u otra, y sin definir adecuadamente, o cuando menos sin establecer criterios cualitativos y cuantitativos claros ni límites entre ellas.

Se ha querido considerar activas aquéllas que lo son en un aspecto químico fácilmente explicable y comprensible, e inertes en otras, aun cuando está comprobado desde antiguo que algunas de estas otras pueden ejercer una acción de tipo físico-mecánico y más recientemente se ha confirmado que pueden actuar también por vía química y, en particular, epitáctica.

Entre las adiciones consideradas sin discrepancias como químicamente activas figuran las escorias básicas granuladas de horno alto, con propiedades hidráulicas latentes o potenciales, las cuales se manifiestan por sí mismas y se desarrollan por activación alcalina y/o sulfática; y también las puzolanas naturales y artificiales (cenizas volantes y arcillas activadas), las cuales fijan cal a la temperatura ordinaria para formar compuestos hidráulicos que se suman a los producidos por el clinker.

Entre las adiciones impropriamente consideradas como inertes venían figurando –ahora ya no– los llamados “fillers”, y en particular los de naturaleza caliza.

Todas estas adiciones son, por razones de composición y constitución, más o menos afines con

el clinker y/o con la pasta hidratada del cemento portland, aspecto este último que tiene la mayor importancia en el caso de las adiciones de naturaleza caliza, a efectos epitáxicos.

2.2. Las Escorias

La actividad hidráulica latente o potencial de las escorias se manifiesta, en el hecho de que, amasadas con agua, fraguan y endurecen por sí mismas –a diferencia de la puzolanas–, si bien dicha actividad puede ser acelerada e intensificada, como ya se ha indicado, por una especie de catálisis llevada a cabo por álcalis y/o sulfatos. En el caso de las escorias añadidas al clinker de cemento portland ambos tipos de activación pueden ser operantes: la alcalina más que la de los sulfatos, en el caso de los cementos siderúrgicos; y ésta más que la alcalina en el caso de los cementos llamados supersulfatados o sulfosiderúrgicos.

Las escorias se forman como subproducto del proceso siderúrgico en el que aparece el arrabio o fundición como producto base, y como consecuencia de la reacción entre la mena y la ganga del mineral –sobre todo esta última–, el coque y la caliza más o menos dolomítica utilizada como fundente y corrector, en el horno alto.

La escoria contiene, a efectos de su utilización como adición al clinker, una serie de compuestos deseables (silico-aluminatos cálcico-magnésicos del grupo de las melilitas), y otra serie de compuestos indeseables (sulfuros –de calcio, manganeso y hierro– y óxidos –ferroso, férrico y mixto: magnetita, de magnesio, titanio, azufre y alcalinos–), estos últimos en escasa proporción.

La composición química de las escorias varía, en consecuencia, entre límites amplios, predominando como es lógico la cal, la sílice, la alúmina y la magnesia, las cuales forman una serie de minerales del citado grupo de las melilitas, entre los que se encuentran la alita y la belita, principales constituyentes del clinker de cemento portland, junto con otros más o menos afines y complejos, pero vecinos próximos de aquéllas en el diagrama triangular del sistema ternario C-A-S y en el sistema C-M-S, los cuales responden de la capacidad hidráulica de las escorias.

Dada la amplia variedad de composiciones que, como se ve puede y suele tener una escoria, ha sido preciso establecer condiciones de diverso tipo a las mismas para garantía de su capacidad hidráulica latente, esto es, de su idoneidad como adición para el clinker.

Estas condiciones son de naturaleza química y mineralógica, a saber: basicidad, hidraulicidad y contenido de vidrio o fases amorfas. Las dos primeras se expresan mediante índices en función de la composición, de tal manera que para que la escoria pueda ser considerada como básica e hidráulica debe satisfacer a algunos de estos índices, los cuales son variables según normas y países. En el caso de España es operante actualmente el índice de hidraulicidad

$$IH = \frac{C + M + A}{S} > 1$$

vigente también en la Norma alemana DIN 1164. En el caso de la futura Norma Europea CEN parece que será exigido el cumplimiento del índice de basicidad

$$IB = \frac{C + M}{S} > 1$$

que es más restrictivo que el anterior.

Y de tal modo también que la calidad de una escoria, a igualdad de lo demás, será tanto mejor cuanto más alto sea el valor de sus índices.

A propósito de éstos cabe señalar que los basados sólo en los contenidos de cal y de sílice (*C* y *S*) se correlacionan mejor con las resistencias de los cementos siderúrgicos a edades cortas –hasta 7 días–, mientras que los basados en todos los conceptos analíticos (contenidos de *C*, *M*, *S* y *A*) presentan mejor correlación con las resistencias a edades mayores de 28 días.

Respecto de la composición mineralógica de las escorias, aparte de los constituyentes más o menos cristalinos del grupo de la melilita ya mencionado, aquéllas contienen también una fase vítrea.

En cuanto al vidrio, se exige con mayor o menor carácter preceptivo, según países y normas, que las escorias contengan el máximo posible de él –o por encima de un mínimo admisible muy elevado (superior al 90 %)–, ya que, para una misma composición química dada, una escoria es tanto más potencialmente hidráulica cuanto mayor es su proporción de fase amorfa frente a la de fases cristalizadas –lo cual es obvio–, incluso para valores no muy altos de sus índices de basicidad y de hidráulica. Las escorias más vítreas son también las más estables desde el punto de vista de las transformaciones $\beta\text{-C}_2\text{S} \rightarrow \gamma\text{-C}_2\text{S}$ y periclasa \rightarrow brucita, durante su formación y durante su hidratación, respectivamente.

Un alto contenido de fase vítrea exige que la escoria sea templada –es decir, bruscamente enfriada con aire y/o agua inmediatamente a la salida del horno alto, para evitar la cristalización favorecida por un enfriamiento lento–, proceso que se conoce con el nombre de granulación, por el cual la escoria queda en forma de arena granulada suelta. El templado o granulación es de importancia decisiva para la actividad y aprovechamiento de las escorias.

En definitiva, la escoria para cementería debe ser de horno alto, básica y granulada. De horno alto, porque, hasta ahora, las escorias de otros procesos siderúrgicos o de otras metalurgias no férricas, por razones de composición y/o de inestabilidad, no han sido utilizadas, si bien se están haciendo intentos en diversos países para hacer posible su utilización con garantía y sin riesgos.

Las escorias suelen ser, en general, más duras que el clinker, por lo cual deberían ser molidas aparte –como se verá después–, a fin de sacar el mejor partido de su hidráulica.

Por otra parte, la fractura de las escorias suele ser más “agria” que la del clinker, por lo que su molienda da partículas más angulosas y menos redondeadas que las de éste, lo cual se puede comprobar comparando las fracciones granulométricas análogas de unas y otras comprendidas, por ejemplo, entre 50 y 65 μm .

Se podría pensar que esto pudiera influir desfavorablemente en la reología de los morteros y hormigones de cementos con escorias, pero no siempre es así; antes bien es al contrario en la mayoría de los casos, dado que, a pesar de la forma y mayor superficie individual y global de las partículas de escoria, éstas son mucho más lisas y deslizantes que las partículas de clinker, de manera que tales cementos no suelen requerir ni absorber más agua, sino incluso menos, que los cementos portland equivalentes, para análogas consistencias de hormigón.

Mucho más se podría decir de las escorias, así como también de los cementos siderúrgicos, de los que se tratará después, pero, al impedirlo la limitación obligada de tiempo y espacio se remite al oyente y/o lector a un trabajo más extenso del que expone, que con el título de “ESCORIAS Y CEMENTOS SIDERURGICOS” aparecerá publicado en breve en las revistas técnicas españolas CEMENTO-HORMIGÓN y MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN (IETCC).

2.3. Las Puzolanas

2.3.1. Generalidades

Bajo tal denominación están comprendidos materiales naturales, artificiales o subproductos,

capaces de reaccionar con la cal liberada en la hidratación de los minerales –silicatos– del clínker, combinándose con ella y fijándola a temperatura ordinaria.

Por lo que respecta a las puzolanas llamadas naturales, éstas pueden ser rocas volcánicas de naturaleza diversa: traquítica alcalina, pumicitica, tobácea, etc., o también rocas de origen orgánico: tierras de diatomeas (algas) o de infusorios (protozoos radiolarios) de carácter fósil –“tripoli”, “kieselgur”–, con naturaleza y composición a base de sílice activa.

Hay que hacer la importante salvedad de que no toda roca volcánica, por el sólo hecho de serlo, es una puzolana natural. Es esta una idea muy simplista y equivocada que, por las circunstancias que se exponen en otro lugar más adelante, ha dado pie a equívocos y malos entendidos respecto de determinados cementos en detrimento de los mismos, al generalizar a todos ellos lo que sólo era atribuible a unos pocos “representantes espurios” de su tipo y clase.

En cuanto a las puzolanas artificiales cabe citar las arcillas naturales activadas por tratamientos térmicos adecuados.

Y en lo que concierne a las puzolanas-subproductos (en este sentido son también artificiales), las más genuinas son las cenizas volantes de centrales termoeléctricas, recogidas de los humos y gases de combustión de los carbones, por precipitación en separadores electrostáticos; y más recientemente el llamado “polvo de sílice” o “humo de sílice”, recuperado de los gases desprendidos en la obtención de aleaciones de ferrosilicio. Este material es casi exclusivamente silícico por naturaleza y presenta una textura extraordinariamente fina.

La acción puzolánica es complementaria de la hidrólisis de los silicatos del clínker por una parte, y contraria al deslavado o lixiviación de la cal hidratada de la pasta de cemento, por otra parte. De aquí que dicha acción, al formar compuestos hidráulicos con dicha cal, contribuya al desarrollo de la resistencia de los cementos que contienen puzolana, a plazos medios y largos; y que, al fijar de forma estable dicha cal, evitando su disolución o ataque por medios agresivos externos, proporcione al hormigón una mayor durabilidad o resistencia química en múltiples aspectos.

La acción puzolánica, químicamente considerada, consiste en el ataque y corrosión de los gránulos o partículas del material puzolánico por la cal de hidrólisis de los silicatos del clínker, que en disolución saturada o sobresaturada se encuentra en la fase líquida de la pasta de cemento, cuya alcalinidad –pH– se incrementa por la cesión (en su caso) de álcalis de la puzolana a dicha fase líquida.

Se forman así, con incorporación de agua, hidratos del tipo de los que forman en su hidratación los silicatos anhidros del clínker –las tobermoritas–, con distinta basicidad –relación C/S –, pero, en general y en conjunto, de menor basicidad que la propia tobermorita – CSH –, lo cual es una ventaja a efectos de resistencia mecánica y química del cemento endurecido.

Por ser la acción puzolánica un fenómeno de interacción en el que, como se ha dicho antes, influye mucho la superficie (total y específica) del material activo, éste debe estar molido a gran finura –o poseerla por sí mismo: caso del mencionado “polvo de sílice” y del kieselgur–, y ser, en todo caso, mucho más fino que el clínker. Cuando esto no sucede, se pueden producir efectos contraproducentes de los que se tratará después.

La composición química y mineralógica de las puzolanas en general es muy variable, según su origen y naturaleza.

La actividad puzolánica se puede medir mediante ensayos adecuados, de naturaleza química unos –fijación de cal a partir de disoluciones, variación del residuo insoluble, etc.–, y de

naturaleza mecánica –desarrollo de resistencias– a lo largo del tiempo de pastas y morteros de puzolana/cal o de puzolana/cemento, en comparación con otros equiparables de arena/cal o de arena/cemento. Consisten estos últimos en comparar el material presuntamente activo (la puzolana) con otro material prácticamente inerte (la arena silícica o cuarzosa). Sin embargo, prevalecen en general los ensayos que operan de forma independiente sobre los cementos puzolánicos como tales, como se verá más adelante.

En todo caso sería interesante disponer de un procedimiento, a ser posible normalizado y generalmente aceptado, para determinar a priori la mayor o menor actividad (relativa) de un material puzolánico, sin perjuicio de un ensayo de “puzolanicidad” del cemento correspondiente como producto final. En tal sentido parecen orientarse las directrices del CEN/TC-51, en cuanto a la futura Norma Europea –y tal vez mundial– para los cementos.

Otro problema de interés en el seno del CEN es el de la determinación del contenido de materiales puzolánicos en los cementos que los contengan, para la resolución del cual la aportación española del IETCC, debida a la Dra. M. P. LUXAN, ha sido y sigue siendo decisiva.

2.3.2. Puzolanas naturales

Prescindiendo aquí y ahora de las de otros países, las españolas son, o bien traquitas alcalinas como las italianas (puzolanas insulares canarias), o bien pumitas (puzolanas peninsulares de Ciudad Real y de Gerona).

Es tan extensa la bibliografía sobre el tema, tantas veces y tan ampliamente tratado, que no es cosa de repetir una vez más aquí ni siquiera lo más sustancial de lo ya expuesto en otras ocasiones y lugares, por lo cual se remite al oyente/lector a las referencias sobre el tema, y en particular a las españolas.

Cabe mencionar, no obstante, el interés despertado hace ya algún tiempo en el seno de la Comisión Permanente del Cemento por las puzolanas españolas, de cuyo estudio parece que se está encargando, o se va a encargar, con alguna colaboración, una Ponencia de Laboratorios de dicha Comisión.

También existe interés por el tema en el ámbito del CEN, y en particular en países de la CEE que poseen puzolanas naturales en una u otra proporción y de una u otra naturaleza (“trass” alemán y traquitas italianas). Los puntos de mayor debate sobre este aspecto se desarrollan más adelante, al tratar de los cementos puzolánicos.

2.3.3. Puzolanas artificiales

De las puzolanas artificiales, tal como se han definido, poco hay que decir, dado que la activación de arcillas sólo se ha practicado o practica aislada y esporádicamente por parte de muy pocas fábricas de cemento.

Cabe señalar, sin embargo, que no todas las arcillas son igualmente aptas para su activación térmica, dependiendo la aptitud de su naturaleza más o menos montmorillonítica, illítica, beidelítica, nontronítica, etc.; que existe un óptimo de temperatura –entre unos 700 y 850°C, según los casos–, y un tiempo de tratamiento asimismo óptimo para conseguir la máxima activación; y que, rebasados estos óptimos de temperatura y/o de tiempo, las arcillas ya activadas se vuelven a desactivar en parte.

2.4. Cenizas volantes

Llamadas así primero (traducción del inglés “fly-ash” o “flying-ash”) y designadas más recién-

temente como “cenizas de carbones pulverizadas” (o como “cenizas pulverizadas de carbones”: cuestión de situación del guión en la denominación inglesa “pulverized-fuel ash” o “pulverized fuel-ash”), proceden de la combustión de carbones antracíticos, bituminosos, sub-bituminosos o ligníticos, por orden de mayor a menor poder calorífico y de menor a mayor contenido de volátiles. A efectos de su empleo en cementería parecen preferibles las cenizas de carbones bituminosos, que son los que dejan mayor cantidad de residuos sólidos.

Las cenizas constituyen un tipo de adición activa en el que más claramente se pueden dar de forma simultánea los dos tipos de acción: química (puzolánica) y física (dispersante), a más de una acción sustitutiva o complementaria de finos en el hormigón, cuando éstos faltan en las fracciones más pequeñas de los áridos del mismo.

Al empleo de las cenizas le es atribuible también una finalidad económica de doble vertiente: ahorro de clinker y, por consiguiente, de energía –combustibles, electricidad– y de materias primas en la fabricación de cemento, cuando se utilizan molidas y/o mezcladas con el clinker en fábrica; y ahorro de cemento y, por lo tanto, reducción del costo del hormigón cuando se añaden directamente en las hormigoneras. De esta última –potencialmente perniciosa– utilización de las cenizas se tratará después con mayor detalle.

La composición química de las cenizas es variable –pero similar a la de los grupos de minerales de la arcilla–, dependiendo de los carbones de que procedan. Las antracíticas y bituminosas son ricas en sílice, alúmina y hierro (suma superior a 70 %), al revés que las sub-bituminosas y ligníticas, más pobres sobre todo en alúmina y más ricas en cal, magnesia y sulfatos (suma mayor de 30 %). Las ligníticas no se suelen utilizar en cementería, o se utilizan muy poco, por ser las menos adecuadas.

La composición de las cenizas suele ser bastante constante en las de una misma central térmica, procedentes de carbones análogos, pero no en cuanto a su contenido de carbón –pérdida al fuego–, ya que éste depende de las condiciones de la combustión, las cuales pueden variar incluso dentro de una misma central termoeléctrica.

Es curioso que a las cenizas utilizadas en las fábricas de cemento se les suele exigir poco –tan sólo puzolanicidad según el ensayo de FRATINI, si se emplean en cementos puzolánicos –(PUZ-II del Pliego RC-75), en el caso de España–, mientras que a las utilizadas en hormigón, si bien no se les exige el cumplimiento de tal requisito, se les imponen –en algunos países, que no en España– valores máximos admisibles para la pérdida al fuego –contenido de carbón–, así como para los contenidos de humedad, magnesia y sulfatos. El contenido de carbón –indeseable– influye en el rendimiento y eficacia de los agentes inclusores de aire y en la demanda y retención de agua en el hormigón. Las limitaciones de magnesia y sulfatos responden al mismo criterio que las de los cementos y, curiosamente como en el caso de éstos, a las cenizas no se les fija un límite para la cal libre, aun cuando pueden llegar a contenerla en proporciones mucho más elevadas que el clinker, lo cual pudiera ser causa de expansiones en el hormigón.

En lo que respecta a la constitución químico-mineralógica de las cenizas, ésta responde en un 50 al 80 % a minerales análogos a los de las arcillas –silicoaluminatos, mullita, cuarzo, magnetita, sulfatos, carbón y vidrio, los primeros en tanto mayor proporción cuanto mayor es la edad del carbón de procedencia (sub-bituminosos y bituminosos)–. En la formación de estos compuestos por fusión se engendran, por la tensión superficial del magma fundido, las llamadas “cenosferas” que constituyen mayoritariamente la fase vítrea de las cenizas. La proporción de estos constituyentes es también variable, y de ellos tienen actividad puzolánica los aluminosilicatos –en promedio 70 %–, y más si se encuentran en fase vítrea –en promedio, también 70 %–.

En lo que respecta a las características físicas de las cenizas, las más importantes son las relacionadas con la finura en todas sus manifestaciones y expresiones –en general, el residuo

sobre el tamiz de 45 μm , no siempre en concordancia con la superficie específica ni con la granulometría.

Las distintas fracciones granulométricas de las cenizas se comportan de modo distinto en muchos aspectos, siendo las más representativas las menores de 80 μm ; en las mayores se acumula el carbón inquemado.

Las resistencias que las cenizas son capaces de dar dependen de su puzolanicidad y parecen ser inversamente proporcionales al citado residuo (por lo cual a veces se limita éste a valores variables: 12,5 %, 20 %, 50 %), y a la superficie específica, a la cual se le imponen, también a veces, límites mínimos de 4.000, 5.000 ó más cm^2/g BLAINE.

La finura, la densidad y la forma de las partículas influyen asimismo en la exigencia y en la retención de agua por parte del hormigón, por lo cual (y por lo señalado acerca de las fracciones granulométricas) conviene moler las cenizas, con lo que se cambia favorablemente el tamaño, la forma y la superficie de las partículas, aunque, como en el caso del cemento ordinario, la molienda no debe ser exagerada.

Las cenizas, por su composición, constitución y proporción en cementos y hormigones pueden influir en todo; en la puzolanicidad y en el desarrollo de las resistencias; en la exigencia (reducción) y retención de agua y, por lo tanto, en la reología del hormigón (e, indirectamente por este concepto, también en las resistencias); en la retracción de todo tipo, en la fisuración y en la fluencia del hormigón; y, por supuesto, en la durabilidad entendida como resistencia química del hormigón al medio ambiente, y particularmente en el aspecto de la corrosión de las armaduras.

Es evidente que cada uno de estos aspectos requeriría un tratamiento extenso no procedente en la brevedad de esta ocasión, pero en relación con todos ellos y con los cementos y hormigones con cenizas, de los que se tratará más adelante, se remite al oyente y/o lector al trabajo más extenso del que expone, titulado “CENIZAS, CEMENTOS Y HORMIGONES CON CENIZAS”, en vías de publicación en las revistas técnicas españolas CEMENTO-HORMIGÓN y MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN (IETCC).

2.5. Los “Fillers”

Con este nombre se designan las adiciones que, generalmente en pequeñas proporciones, acompañadas o no de otras, se añaden al clínker con objeto de aumentar y/o abaratar en parte la producción de cemento, y de contribuir al ahorro energético –en cocción y en molienda– de dicha producción, sin olvidar los efectos benéficos dispersantes y aceleradores de la hidratación del cemento, y las acciones epitáxicas que pueden ejercer en los hormigones.

Tal es el punto de vista que rige en las actuaciones y en las posibles futuras decisiones del Comité Técnico 51: CEMENTO (CT-51) del CEN. Y en tal criterio consistió también, en su momento, la iniciativa de introducir en el Pliego español PCCH-61 (ratificándolo después el PCCH-64), los denominados cementos portland “comerciales” con un máximo admisible de 10 % de filler calizo (adición “no nociva”), los cuales se han utilizado durante más de 15 años.

Los fillers, sean cuales fueren, no son generalmente inertes de un modo absoluto, pues, cuando menos, ejercen en proporción limitada una acción física dispersante del cemento, la cual facilita y acelera la más completa hidratación de éste. Lo que sucede es que, por “inercia”, se suele entender –o se suele querer entender– inercia *química*, esto es, incapacidad de reacción o interacción entre el filler y el cemento. Es en este aspecto en el que cabría distinguir entre fillers químicamente inertes totales (o casi totales) –como, en el límite, podría serlo la sílice cuarzosa o

la arena silícica finamente molida-, y fillers químicamente activos (en una u otra medida), entre los cuales se encuentran algunas calizas finamente molidas; en el bien entendido de que tanto unas como otras son físicamente activas y no inertes, por la acción dispersante ya mencionada.

Por lo común, es un valor entendido que cuando se habla de “fillers” en los cementos se hace referencia a los de naturaleza caliza exclusivamente.

Está ampliamente comprobado que, en general, pequeñas adiciones de ciertas calizas, del orden del 1 al 10 % entre límites amplios, con un valor medio muy centrado de alrededor del 5 %, añadidas al clínker y molidas conjuntamente con él, proporcionan cementos con mejor plasticidad y comportamiento reológico en hormigones que los que no las contienen, con menor retracción y tendencia a la fisuración, y sin menoscabo de las resistencias, o incluso con ligeras mejoras de las mismas.

En parte de esto se basa, entre otras cosas, el hecho bien conocido y practicado desde siempre en todo el mundo, de añadir mármol blanco (incluso en proporciones mucho mayores que las citadas) y molerlo conjuntamente con el clínker blanco, para obtener cementos blancos llamados “de albañilería” y “de pavimentación”, hecho que tiene su correspondencia en el caso del cemento portland gris, con el cemento C-200 del Pliego RC-75. Naturalmente que estos cementos no son aptos para usos estructurales, pero sí pueden serlo, sin el menor inconveniente, los que contengan fillers calizos adecuados, en proporciones discretas, como lo han probado los cementos “portland comerciales” de los Pliegos españoles PCCH-61 y PCCH-64.

Asimismo va estando comprobado, cada vez más claramente a través de las experiencias de países europeos de la CEE que trabajan sobre el tema en el seno del CEN/TC-51, que el comportamiento de la caliza como adición al clínker puede ser menos dependiente de la cuantía de la adición que de la propia naturaleza de la misma en cada caso.

En efecto, por lo que se va viendo a través de los resultados de las experiencias en curso, de dos cementos portland con contenidos prácticamente iguales (del orden del 12 %) de caliza, uno se ha comportado muy bien en hormigón, en diversos aspectos –tan bien o mejor que el portland de referencia sin caliza–; mientras que el otro se ha comportado muchísimo peor en términos relativos, y muy mal en términos absolutos. Pero un tercer cemento, con un contenido de caliza del orden del doble de los anteriores, se ha comportado a su vez mucho mejor que el bueno de los dos precedentes, e incluso mejor que el portland sin adición alguna.

Por el momento se está tratando de atribuir estos hechos a la textura macroscópica de las calizas y a su estructura cristalina microscópica: dureza, sistema cristalino, tamaño de los cristales de calcita –en su caso–, dislocaciones, imperfecciones e impurezas de la red cristalina, inclusiones extrañas en la misma, etc., todo lo cual vendría a demostrar, una vez definitivamente confirmado, que no todas las calizas se comportan igual ni valen lo mismo como adición para el clínker. Esto sería lógico, pues no tiene por qué ser distinto de lo que sucede con las escorias siderúrgicas, con las puzolanas naturales o con las cenizas volantes.

Ello vendría a probar también que en el comportamiento de la caliza como adición al clínker juegan más factores que los puramente físicos, siendo posibles –y determinantes– otros de naturaleza muy probablemente química, mucho más destacados en unos casos que en otros. Sin entrar en demasiados detalles, está comprobada la formación de carboaluminatos cálcicos hidratados por reacción entre carbonato cálcico y aluminatos cálcicos hidratados o en vías de hidratación, así como también la existencia real de acciones epitáxicas entre la pasta hidratada del cemento y los materiales calizos. Consisten éstas en una interacción superficial, en virtud de la cual el hidróxido cálcico producido en la hidrólisis parcial y correlativo con la hidratación de los silicatos anhidros del clínker, y posiblemente algunos otros compuestos hidratados de éste, se fijan sobre dichos materiales calizos prolongando sin solución de continuidad la red cristalina de

éstos, dada la similitud de esta red con la de los propios productos que se forman en la hidratación del cemento. El resultado es una especie de sólida soldadura entre ambas partes, más resistente incluso que cada una de ellas por separado, de manera que, como en las soldaduras de los metales, éstos no rompen por ellas, sino por cualquiera –el más débil– de los dos metales soldados.

Todo esto lleva a considerar que la utilización de una caliza como adición al clinker deberá ser objeto de una prueba previa de idoneidad de la misma, como en el caso de las otras adiciones más activas, y con arreglo a unos criterios y métodos que todavía están por establecer.

No obstante, y como siempre, la experiencia real con cada caliza y con cada clinker es la decisiva en cualquier caso, y esta experiencia se podría llevar a cabo, de momento, por parte de los fabricantes, y a ser posible en colaboración con los usuarios, en el caso improbable de que se normalizaran cementos portland compuestos conteniendo caliza, sin indicación de métodos o procedimientos para evaluar la idoneidad de ésta. Por otra parte, la larga experiencia anterior de los cementos portland “comerciales” ya citados, supone un precedente en favor de unos “nuevos cementos portland” que, como los que están en vías de estudio y en fase de propuesta en el CEN/TC-51, habrán de contener, no ya un máximo de 10 %, sino un máximo de 5 % de caliza incorporada, aparte de otros compuestos con contenidos posiblemente mayores de dicho filler.

3. LOS CEMENTOS CON ADICIONES

3.1. Generalidades

Cuando se trata de cementos con adiciones se suele fijar más la atención en las características de éstas, y en si cumplen o no –y con qué margen– las prescripciones impuestas a las mismas, sin parar mientes en las características de los clínkeres a los que se van añadiendo, como si cualquiera de éstos fuese igualmente o suficientemente idóneo para recibir una cierta adición en una dosis determinada.

No suele ser así, y hay que decir que un clinker es tanto más capaz de recibir cualquier adición en cualquier proporción, cuanto mejor es su calidad, entendiéndose por tal un alto grado de saturación, un contenido elevado de C_3S , de $(C_3S + C_2S)$ y de fase vítrea, y un contenido mínimo de cal libre.

Esto es evidente para cualesquiera adiciones, siempre que éstas estén a tono, por razones obvias.

La conclusión de que, por ejemplo, con una buena ceniza –o puzolana, o escoria– se saca *relativamente* mejor partido de un cemento (clinker) peor que de otro mejor y reciprocamente, y que, en consecuencia, no vale la pena seleccionar clínkeres especiales o cuando menos de mejor calidad para una adición dada, es engañosa. Si bien puede ser parcialmente cierta en cuanto a las resistencias mecánicas a plazo largo, sucede lo contrario en lo que se refiere a las resistencias a edades cortas, verdadero caballo de batalla en el problema de las adiciones, como se verá a continuación.

Por otra parte, si, como se ha dicho recientemente, un papel de las adiciones es “atemperar” o “calmar” la fuerte reactividad de los clínkeres actuales, los clínkeres más necesitados de tal acción y más propicios para ella son precisamente los más reactivos, es decir, los señalados como de mejor calidad.

3.2. Las Resistencias

El problema principal para el usuario –desde su punto de vista– suele estar, en general, en la

resistencia mecánica que el cemento puede dar a un hormigón determinado. Lo que no implica que la resistencia mecánica sea el único factor a considerar, pues nunca lo es, ni siempre es el más importante, dado que prácticamente siempre cuenta con una resistencia mínima garantizada, que es suficiente a los efectos.

Para el usuario –y también para el fabricante– el cemento ideal, y por ello inalcanzable y utópico, sería aquél que, ya desde un principio y a edades muy cortas fuese capaz de desarrollar resistencias elevadas, continua e indefinidamente crecientes. Esto es tan imposible como deseable. Lo más parecido a ello, salvo en lo del crecimiento indefinido y aún continuo, lo representaría el cemento aluminoso.

El cemento portland común u ordinario tiene un desarrollo de resistencias con el tiempo que, en promedio, es el que es, y a él se atiene –¡qué remedio!– el usuario. Y en función de dicho desarrollo adopta las medidas oportunas de diseño y curado del hormigón y observa los plazos necesarios para descimbrar, desencofrar, sacar piezas o elementos de moldes, etc.

El cemento portland con adiciones tiene un desarrollo de resistencias algo más bajas a edades y plazos cortos y, por otra parte, suele dar –en muchos casos– resistencias más altas a plazos largos.

Lo uno y lo otro es comprensible, pues las adiciones, cualquiera que sea su naturaleza, al principio se comportan como inertes (caso de las puzolanas y de las cenizas volantes), o como menos activas o con actividad retardada (caso de las escorias siderúrgicas).

En efecto, tanto para que comience la acción puzolánica de las primeras como para que se desarrolle la capacidad hidráulica latente de las segundas se precisa la presencia y la acción de la cal de hidrólisis del clinker, por lo cual es éste, dentro del cemento con adiciones, el que tiene que actuar y de hecho actúa primero. Y lo hace, además, de muy distinta manera, según sea la composición y constitución del clinker que lo forma. Es, por lo tanto, el único factor desencadenante del desarrollo de la resistencia a corto plazo, en una u otra medida.

Ahora bien, al estar el clinker en menor proporción en los cementos portland con adiciones que en los cementos portland que no las contienen, la masa activa reaccionante de los primeros al principio de la hidratación y del endurecimiento es menor que la de los segundos y, en consecuencia, el desarrollo de las resistencias es más lento en las primeras etapas, en el caso de los cementos portland con adiciones.

Este es un hecho fatal, ineluctable, que el usuario debe tener en cuenta siempre.

Por otro lado, una vez que una buena parte del clinker de los cementos portland con adiciones se ha hidratado proporcionando suficiente cal de hidrólisis, entra en juego la acción puzolánica y/o se actualiza por activación –alcalina y sulfática– la capacidad hidráulica latente potencial de las escorias. Esto proporciona compuestos hidráulicos adicionales que, sumados a los que sigue produciendo el clinker aún en curso de hidratación, explica el que, a partir de un momento dado, la resistencia de los cementos portland con adiciones crezca más deprisa que la de los cementos portland ordinarios y llegue a superar a la de éstos.

Si, por una parte el hecho de su menor resistencia mecánica a corto plazo se puede considerar como un inconveniente de los cementos portland con adiciones, no se puede dar de lado el hecho de sus múltiples ventajas, sobre todo en determinados usos específicos para los que están especialmente indicados, en lo que se refiere, en general, a su mayor plasticidad en pasta y mortero, y trabajabilidad en hormigón; a su menor calor de hidratación y retracción y, sobre todo, a su mucho mayor resistencia química a los ataques agresivos del medio ambiente atmosférico, marino, del terreno o industrial. Pero éstos son temas también tratados ampliamente

por el que expone, en otras ocasiones, los cuales requerirían varios capítulos aparte.

En suma, hay que contar siempre con una resistencia algo menor a corto plazo de los cementos portland con adiciones, en relación con los cementos portland ordinarios equivalentes, hasta el punto de que administraciones como la norteamericana, al tiempo que recomiendan el uso de cementos portland con adiciones, indican la necesidad –y llaman la atención sobre ello– de ampliar en la cuantía oportuna las medidas de curado y los plazos de desencofrado.

Deliberadamente no se ha mencionado aquí de nuevo el factor económico que supone el menor costo de producción y el menor consumo de materias primas por parte de estos cementos, pero sí es ocasión de indicar que países tradicionalmente poco o nada proclives a la utilización de adiciones, algunos de ellos calificados a justo título de “ricos” en materias primas y/o energía –como, por ejemplo, los propios EE.UU. y los de la CEE, entre otros–, han acatado o están acatando la normalización, producción y utilización de los cementos con adiciones.

En este sentido, la vuelta atrás de la situación real presente y futura previsible en todo el mundo, renunciando a las adiciones, será, en todo o en parte, muy difícil, por no decir imposible. Otras deberán ser las soluciones; por ejemplo, actuando sobre los componentes de los “nuevos cementos”: el propio clinker y las adiciones, buscando la máxima calidad en ambos y la mejor adecuación entre ellos, y optimizando sus proporciones.

3.3. La finura de molido y la granulometría de los cementos con adiciones

Se ha tratado de paliar, al menos en parte, los inconvenientes de la menor resistencia de los cementos con adiciones, sobre todo a muy corto plazo, recurriendo a una mayor finura de molido en su fabricación.

Con tal medida se consigue evidentemente algo, sobre todo en el caso de los cementos puzolánicos, los cuales desde siempre suelen ser en general más finos que los portland ordinarios.

Pero la molienda a finuras mayores tiene una limitación en cuanto a la elevación de las resistencias a edades cortas, ya que aumentos discretos de éstas exigen a veces finuras demasiado elevadas, con el consiguiente incremento exagerado del costo energético de la molienda, y con los consabidos inconvenientes en el uso de los cementos.

Por otra parte, una finura excesiva o, si se prefiere, una proporción muy elevada de partículas muy finas de tamaño inferior a muy pocas micras, puede ser contraproducente a muchos efectos, incluido el de las resistencias mecánicas a todo plazo.

En efecto, en cuanto a las resistencias mecánicas, tales partículas extrafinas se hidratan aisladamente con tal velocidad que apenas hay tiempo para que formen ligaduras estables y firmes, ni éstas pueden alcanzar las dimensiones y radios de acción eficaces en cuanto a la trabazón y ligadura de la pasta de cemento, consigo misma, con los áridos del hormigón y con las armaduras de éste.

Por lo tanto, una vez hidratadas, estas partículas muy finas se comportan como gránulos o corpúsculos aislados e inertes, con lo cual contribuyen a la resistencia a plazos cortos en nula o muy escasa medida, o cuando menos en menor proporción que las partículas algo más gruesas (hasta unos 20 μm).

Por otra parte, si la proporción de tales partículas extrafinas es abundante, también en la misma proporción abundarán menos las partículas algo más gruesas (hasta unos 30 μm), cuya hidrata-

ción más lenta y prolongada proporciona mayores incrementos de la resistencia con el tiempo, y valores más altos de la resistencia final, factores ambos que se ven por ello negativamente afectados. Claro está que un exceso de partículas más gruesas (superiores a 30 μm) tardan mucho más en hidratarse o no llegan a hacerlo por completo, con lo cual una buena parte de las mismas queda sin contribuir a la hidratación y a las resistencias.

Otros efectos negativos de las finuras excesivas se pueden manifestar, como es bien sabido, en la retracción intrínseca química e irreversible de la pasta de cemento, la cual puede constituir a veces un factor coadyuvante de la retracción plástica de fraguado. Esta, a su vez, puede contribuir a la fisuración temprana del hormigón, cuando en condiciones de curado y/o ambientales inadecuadas o desfavorables no hay tiempo ni lugar para la “acomodación” del material aun en estado plástico.

No hay que olvidar tampoco la influencia que el exceso de finura o lo inadecuado de la misma puede tener en la exigencia de agua en la pasta de cemento y del hormigón –para una consistencia o trabajabilidad dadas, respectivamente–, en la capacidad de retención de dicho agua, y en el principio, el final y el intervalo de fraguado.

Mención aparte merece la influencia de la finura del cemento en la propia estructura microscópica y en la textura macroscópica de la pasta, en cuanto a su retracción por secado, su porosidad y capilaridad, y su permeabilidad y penetrabilidad al agua y a los iones –electrólitos–, todo lo cual es decisivo desde el punto de vista de la durabilidad –resistencia química del hormigón a los agentes agresivos externos–.

Resumiendo lo anterior sobre finuras y granulometrías, traído a colación de las resistencias mecánicas a edades cortas de los cementos con adiciones, se puede decir que, tanto en ellas como en prácticamente todos los aspectos tecnológicos del hormigón, la finura de los cementos en sus diversas manifestaciones y expresiones puede tener una gran influencia de signo diverso, según las circunstancias y la naturaleza de los restantes materiales que no son cemento, así como según la ejecución del propio hormigón.

Pero hay un aspecto muy particular en el que la finura del cemento –y muy especialmente la de los cementos con adiciones– puede tener una influencia extraordinaria: el de su curva granulométrica.

Al hablar de finura del cemento en éste y otros aspectos conviene siempre referirse a la curva granulométrica del material –distribución estadística de granos por tamaños–.

Hace ya tiempo se estableció una ley de distribución granulométrica, aún no superada, debida a ROSIN, RAMMLER Y SPERLING, cuyas expresiones matemáticas para las cantidades de cemento que pasan a través de, o son retenidas por cada uno de una serie de tamices de luz de malla x (μm), expresadas en % del total del material, son respectivamente:

$$P \% = 100 (1 - e^{-bx^n})$$

$$R \% = 100 e^{-bx^n}$$

en las que P y R son las cantidades porcentuales que pasan o son retenidas por cada tamiz de x μm de luz de malla, y b y n son valores constantes característicos de cada material.

La expresión de R % fue transformada por BENNET en la doble logarítmica siguiente:

$$\log (\log 100/R) = n \cdot \log x + C$$

cuya representación gráfica es una recta de coeficiente angular n y ordenada en el origen C , la cual es variable con las constantes n y b del material.

De tal suerte que cuanto más fino es éste, mayor es la pendiente de la recta representativa, y más a la izquierda del gráfico correspondiente se sitúa.

Esto es válido para un cemento constituido por clínker y yeso, aunque éste no cuente, a los efectos.

Cuando se trata de un cemento que contiene clínker y una adición, puede suceder que ésta sea más dura o más blanda que el clínker. En el primer caso su recta representativa, supuesta separada del clínker, se situaría a la derecha y por debajo de la de éste; mientras que en el segundo caso sucedería lo contrario.

Por principio, las adiciones, cualquiera que sea su naturaleza o actividad, deben ser más finas que el propio clínker (caso segundo), es decir, deben dar rectas representativas situadas a la izquierda y por encima de la del clínker. Es el caso general de las puzolanas y de las cenizas volantes, y el particular de algunas escorias siderúrgicas.

Esto ha de ser así por razones diversas. En primer lugar, por motivos de dispersión, ya que la de las partículas o gránulos de clínker debe ser máxima para lograr su más rápida y completa hidratación en tiempo oportuno, y esto se consigue mejor con una adición que, para una proporción dada de la misma en el cemento, sea a su vez lo más dispersa posible y, en todo caso, más fina que el clínker.

En segundo lugar, por razones de interacción entre la adición y el clínker: si esta interacción está basada en la formación de cal de hidrólisis, la cual actúa de una forma u otra sobre las adiciones según la naturaleza de las mismas, éstas deben presentar la mayor superficie posible a la acción de aquélla desde la fase líquida de la pasta. Por el contrario, el clínker debe ser más grueso para que la cantidad de cal de hidrólisis formada en un tiempo dado (velocidad de hidrólisis) no sea tan grande que desborde en demasía la capacidad de captación por la adición, o de interacción con la misma. En tales circunstancias toda –o la mayor parte– de esta cal es operante y las potencialidades de las adiciones se aprovechan al máximo.

Pero si tales circunstancias no se dan, se corre el riesgo de agotar la capacidad puzolánica y/o hidráulica de la adición, y de que una buena parte de la cal de hidrólisis quede inoperante a tales efectos.

3.4. La Retracción Plástica

Cuando la adición es notoriamente más gruesa que el clínker, esto es, cuando su recta representativa se sitúa a la derecha y por debajo de la del clínker, aparte de los inconvenientes acabados de señalar pueden surgir otros aún de mayor cuantía.

En efecto, se han dado casos en los que por utilizar materiales de origen volcánico, realmente o supuestamente puzolánicos pero mucho más duros que el clínker (ofitas, basaltos, etc.), o determinadas escorias muy duras, se han obtenido cementos con granulometrías anómalas desde los puntos de vista señalados. Estos cementos se caracterizaban por requerir un exceso de agua innecesaria (y por lo tanto excedente, que luego expulsaban), para poder dar unos hormigones trabajables en unas condiciones dadas. Como consecuencia se producían segregaciones y fuerte exudación que, en condiciones inadecuadas o insuficientes de curado, y/o en circunstancias estructurales y ambientales propicias –forjados de pisos o losas de pavimentos, de gran superficie y poco espesor, sometidos a la acción del viento caliente y seco en zonas de clima cálido y en

estación estival–, favorecían una evaporación rápida y una desecación intensa de la superficie del hormigón, no compensadas –a tiempo– por la difusión del agua desde el interior del mismo –proceso mucho más lento que la evaporación–, con lo cual se producía una fuerte retracción plástica, con la consiguiente fisuración y agrietamiento superficial ostensibles, por imposibilidad de “acomodación” del material, dada la rapidez del fenómeno.

Esto no es, ni mucho menos, general en el caso de las adiciones; tan sólo lo es cuando éstas son inadecuadas, por las razones expuestas. Buena prueba de ello puede ser la experiencia realizable con losas de hormigón, a las que se somete, por mitades, a un curado normal y adecuado, y a una desecación y evaporación intensa y rápida con aire caliente y seco, respectivamente. Si en cada caso se utilizan cementos portland con adiciones idóneas y granulometrías correctas, cementos portland con adiciones inadecuadas y granulometrías “invertidas”, y cementos portland ordinarios, se podrá observar que:

- i) con el curado normal se comportan bien las losas de cemento portland ordinario y las de cemento con adiciones idóneas y granulometrías adecuadas, y menos bien las del otro cemento;
- ii) frente a la desecación intensa se comportan peor las losas de los cementos portland ordinario y con adiciones correctas (ambas por igual), y muchísimo peor las del cemento con adiciones inadecuadas, con aparición, en el caso de estas últimas, de grietas de retracción plástica muy acusadas.

Por todas estas razones la finura –granulometría– de los cementos con adiciones, y por lo tanto su molienda, alcanzan gran importancia, sobre todo cuando las durezas de los materiales que se muelen son muy diferentes, y más dura la adición que el clínker.

3.5. La molienda conjunta o por separado de clínker y adiciones

Todo lo acabado de exponer ha dado lugar a un nuevo planteamiento del clásico problema de la molienda conjunta o por separado (con mezcla y homogeneización subsiguiente) de los componentes del cemento.

En efecto, las partículas de los materiales más duros actúan como “elementos moledores” o “de refino” de las partículas de los materiales más blandos, con lo cual se distancian aún más los tamaños de ambos materiales, quedando bastante más grueso el más duro y mucho más fino el más blando.

Dentro de ciertos límites esto es, como se ha visto, lo adecuado cuando el material más duro es el clínker y el más blando la adición –filler calizo, puzolanas y cenizas volantes (en general), y tal vez alguna escoria–; pero es totalmente inadecuado cuando las adiciones, idóneas o no (otras escorias, ofitas y basaltos, respectivamente), son más duras que el clínker.

Por todo ello se ha considerado la conveniencia de moler por separado los componentes de los cementos, al menos en algunos casos, y así se ha llegado a la conclusión de que para adiciones de puzolanas, de más fácil molturación que el clínker, es aconsejable la molienda conjunta; mientras que para adiciones de escorias muy duras, más difíciles de moler que el clínker, se recomienda la molienda por separado, y tanto más cuanto mayor sea la proporción de escoria añadida en el cemento.

También se están teniendo en cuenta procedimientos de molienda no convencionales, como los llevados a cabo en molinos de proyección centrífuga, en los cuales se obtienen cementos de finura deseada, pero con curvas granulométricas menos extendidas –más tendentes a la mono-granularidad y con muchas menos fracciones gruesas y muy finas para una misma superficie específica dada–, en comparación con los clásicos molinos de bolas o con los de barras. Este

tipo de molienda da pocas partículas superiores a $20\ \mu\text{m}$ e inferiores a $5\ \mu\text{m}$, y con él parecen conseguirse aumentos apreciables de resistencia, ya que se llega a obtener una cantidad mucho mayor de granos monocristalinos de C_3S y C_3A , angulosos y de superficie lisa, y el cemento resultante admite una mayor proporción de yeso. Esto beneficia a la reología del hormigón y favorece al mismo tiempo la incorporación de adiciones de todo tipo (incluidos los fillers calizos), de forma que con cantidades mayores de adición se pueden alcanzar resistencias iguales o mayores a toda edad –también a plazos muy cortos–, incluso en algunos casos en que las pastas y morteros resultantes requieren una relación a/c mayor, a igualdad de características reológicas.

Es importante señalar que la mayor exigencia de agua de los cementos más monogranulares y su influencia en las resistencias se palia precisamente con la adición de fillers calizos que, por otra parte, completan la curva granulométrica por el extremo de los finos si la molienda es conjunta, y sirven para establecer una continuidad con la curva granulométrica de los áridos del mortero, en el caso de éstos y de los hormigones, mejorando la reología y la compacidad de los mismos, con todas sus ventajas para el material fresco y endurecido.

3.6. Los Cementos Siderúrgicos

Descubiertos y desarrollados en Alemania por motivos técnico-económicos, y fabricados en los Estados Unidos por razones exclusivamente económico-comerciales (al menos en un principio), se han impuesto desde antiguo por sus prestaciones (durabilidad) en muchos países.

En el aspecto de su fabricación la adición de escorias al clinker supone una economía muy sustancial de energía térmica (combustible). En general es rentable teniendo en cuenta, por una parte, los ahorros por concepto de extracción, trituración y transporte de materias primas, y por otra parte los gastos por compra, granulación, transporte, secado y molienda, aún considerando que el de esta última puede ser el doble que el del clinker equivalente, ya que hay escorias que son aproximadamente el doble de duras que el clinker. No obstante, su utilización puede no ser rentable en algunos casos, en función del costo del transporte de la escoria desde la siderurgia a la cementería.

Respecto de la molienda conjunta o por separado de los dos componentes de los cementos siderúrgicos, clinker y escoria, se puede repetir que, en general, es preferible la separada, por las razones ya expuestas antes; pero que ello depende de la dureza relativa del clinker y de la escoria en cada caso, ya que también hay escorias del mismo orden de dureza que algunos clinkeres. De cualquier forma el refinado es caro y afecta poco a las resistencias tempranas del cemento, ya que las escorias son mucho más lentas que el clinker en sus reacciones de hidratación, incluso a pesar de la activación mixta sulfática y sobre todo alcalina que reciben por parte del clinker.

No obstante, en molienda por separado –el clinker a la finura ordinaria de unos 3.000 a $3.500\ \text{cm}^2$ y la escoria a unos $5.000\ \text{cm}^2$ BLAINE– de mezclas 50:50 se pueden conseguir a 3 y a 7 días con cementos siderúrgicos, resistencias análogas a las de cementos portland equivalentes (comparables), siendo preciso optimizar las finuras en función del clinker y de la escoria en cada caso.

En cuanto al clinker, es conveniente que sea rico a la vez en C_3S y en C_3A y tenga un alto grado de saturación de cal –superior a 100 %, ya que no importa (sino que conviene) que contenga cal libre por encima de lo usual–, a efectos de una mayor activación alcalina, no exenta de una posible acción puzolánica posterior.

En el aspecto de la utilización de los cementos siderúrgicos hay que tener en cuenta que, por su endurecimiento más lento, dan en hormigones resistencias a menos de 3 días, inferiores a las de los cementos portland equivalentes, pese a su molienda más fina. Requieren por ello un curado más esmerado –sobre todo hormigonando a temperaturas bajas–, y a veces plazos de desencofrado algo más largos.

La disminución de resistencia a muy corta edad –inferior a 3 días– es aproximadamente proporcional al contenido de escoria en el cemento, pero hay cementos 60:40 (clinker/escoria) que dan a partir de 3 días resistencias incluso superiores a la de los cementos equivalentes, permitiendo los mismos plazos de desencofrado. Por lo demás, los cementos siderúrgicos se equiparan a los portland comparables con ellos, en todo lo demás, salvo en el aspecto de la durabilidad, siendo muy superior la de los cementos siderúrgicos.

Las proporciones óptimas de clinker/escoria oscilan entre 60:40 y 30:70, según componentes y empleos.

De todos estos aspectos de estabilidad y durabilidad, del control de calidad de los cementos siderúrgicos y de la determinación del contenido de escorias en ellos, así como de los ahorros de energía y reducción de costos de producción de los mismos, el expositor ha tratado in extenso en el trabajo ya mencionado sobre “ESCORIAS Y CEMENTOS SIDERURGICOS”, próximo a publicarse en las revistas antes indicadas.

3.7. Los Cementos Puzolánicos

3.7.1. Generalidades

Considerados como tales tanto los que contienen puzolanas naturales como artificiales (incluidas las cenizas volantes), y habiendo quedado ya expuesto lo necesario acerca de los materiales en cada caso, cabe indicar aquí que las propiedades y el comportamiento de estos cementos vienen dadas por sus resistencias mecánicas en función de su puzolanicidad –dependiente a su vez de las características del clinker y de la puzolana, de sus proporciones relativas y de la finura del conjunto–, por su menor calor de hidratación y por su mayor durabilidad.

La determinación y el control de la puzolanicidad de estos cementos es quizás el punto más importante, y por ello constituye un capítulo de interés en la elaboración de la futura Norma CEN/TC-51.

El ensayo “ad hoc” para tal determinación y control parece que será el de FRATINI, vigente en la actualidad en el Pliego español RC-75. Es un método de sobra conocido, sobre cuyo fundamento y mecanismo no es cosa de detallar.

Pero sí merece la pena destacar dos aspectos. Uno es el carácter cualitativo del ensayo, en el sentido de que éste indica si un cemento se comporta o no como puzolánico a un plazo dado, pero no indica en qué medida. Esto quiere decir que el método, por sí solo, no permite comparar la puzolanicidad absoluta ni relativa de los cementos.

Sin embargo, se ha intentado dar al método un carácter semicuantitativo y en cierto modo comparativo, en el sentido de considerar que un cemento es tanto más puzolánico cuanto más por debajo de la curva del gráfico de FRATINI se sitúa su punto representativo; y suficientemente puzolánico si la distancia del punto representativo a la curva (medida sobre ordenadas) es del 20 al 30 % de la distancia total de la curva al eje de abscisas (medida también sobre ordenadas y pasando por dicho punto).

El otro aspecto destacable es el relativo a los criterios de puzolanicidad basados en el plazo o

edad de la pasta de cemento al cual se manifiesta la puzolanidad. Es evidente que este plazo será tanto más corto cuanto mayor sea la actividad de la puzolana, a igualdad de lo demás.

Esto ha dado lugar, en el seno del CEN/TC-51, a discusiones entre algunos países sobre si el plazo mencionado debía ser más corto o más largo, a efectos de establecer el carácter puzolánico o no de un cemento, abogando –naturalmente– por los plazos más cortos aquellos países cuyas puzolanas naturales son per se de mejor calidad por su actividad mayor. La especificación sobre la edad o plazo de cumplimiento del ensayo de puzolanidad está, pues, pendiente de resolución, siendo factible una solución ecléctica –no satisfactoria para los países con puzolanas naturales de más baja calidad–, tal que se señale un plazo más corto para puzolanas “de primera”, y otro más largo para puzolanas “de segunda”

3.7.2. Cementos Puzolánicos con puzolanas naturales

De los cementos puzolánicos con puzolanas naturales se ha escrito tanto en cuanto a su composición, fabricación, propiedades, aplicaciones, modos de empleo y usos específicos, así como en lo referente a sus ventajas sobre los cementos portland ordinarios en cuanto a dichos usos –y también en lo relativo a algunos posibles inconvenientes en determinados casos muy especiales–, que no procede insistir aquí, remitiendo al oyente/lector a la bibliografía general, y en particular a la española sobre el tema.

3.7.3. Cementos Puzolánicos con cenizas volantes

Es un hecho que las acciones de las cenizas –de una determinada ceniza– dependen del clinker con el que se mezclen, pese a que, en principio, tal dependencia no parezca muy evidente. No obstante, el hecho pudiera ser atribuible a una influencia de la ceniza sobre la velocidad e intensidad de las reacciones de hidratación de las distintas fases del clinker, y al momento a partir del cual dicha influencia comienza a manifestarse.

En virtud de ello, y puesto que la acción parece ejercerse sobre los silicatos y sus productos de hidratación, es previsible que un cemento portland sea tanto más eficaz sobre una ceniza –o ésta sobre él– cuanto mayor sea el contenido de silicatos (y menor, por consiguiente, el de aluminatos) del mismo. Esto es, además, lo que lógicamente cabe esperar, según lo ya expuesto en otro lugar.

No obstante, no parecen estar del todo claras las características que debe reunir el mejor clinker para una determinada ceniza, dada la multitud de factores que, además de los químicos, intervienen; y tanto menos cuanto que “parece” que con una buena ceniza se saca *relativamente* mejor partido de un clinker menos bueno que de otro mejor, lo cual ha llevado –erróneamente– a desinteresarse por la selección de clinker más adecuados para unas cenizas dadas.

La adición de cenizas al clinker en fábricas de cemento se puede hacer por molienda conjunta o separada –con mezcla y homogeneización posterior en el segundo caso–.

Se suele utilizar la molienda conjunta por varias razones: i) la ceniza ya es fina de por sí, pero además es fácil de refinar más en presencia de clinker –por rotura de las cenosferas huecas–; ii) la mezcla y homogeneización en el molino es perfecta; iii) el proceso es más fácil y menos costoso de instalaciones y operación; iv) la regularidad de la producción y la homogeneidad del cemento resultante son mayores.

En el aspecto económico la molienda de ceniza, conjuntamente o por separado, requiere menos energía que la de una cantidad equivalente de clinker, siendo el ahorro de kilowatios tanto mayor cuanto mayor es la proporción de ceniza en el cemento. Por otra parte, el ahorro de calorías en el horno se puede considerar también proporcional a la cantidad de ceniza añadida al clinker.

La conclusión es que la ceniza que se haya de utilizar debe ser, en cualquier caso y de cualquier modo, molida. Esto se matiza más a continuación.

3.8. Los Cementos con Fillers calizos

Una vez explicadas las características y acciones de los fillers calizos utilizables como adición para los cementos, cabe señalar dos grupos de éstos, según que los contengan en una u otra proporción.

Por una parte, están los cementos que los puedan contener en proporción pequeña –hasta 5 % (o, tal vez, hasta 10 %)–, sin detrimento de las resistencias –incluso de las de corto plazo–, y con otras ventajas en determinados aspectos del hormigón; y, por otra parte, están los cementos que los contienen en proporciones mayores –hasta 30 ó 35 %–.

Los primeros son –o van a ser– según las más recientes previsiones del CEN/TC-51, todos los cementos considerados en la futura Norma Europea, salvo los puzolánicos y los cementos que, en su caso, se designarán como II-M o II-F (aún sin decidir), ya que estos últimos constituirán el otro grupo de cementos.

Este será en su día, de acuerdo con las citadas previsiones, el formado por los mencionados cementos II-M o II-F, semejantes a los ya citados cementos “de albañilería” y/o “para pavimentación”, tal vez no aptos para cualquier hormigón estructural, a diferencia de los anteriores que, en principio, se podrán utilizar sin cortapisas para cualquier tipo de estructura de hormigón. Los cementos del último grupo son o podrán ser, en suma, análogos a los actuales cementos C-200 del Pliego español RC-75.

El uso o usos específicos de estos cementos podrá depender de la proporción real del filler calizo y del desarrollo de sus resistencias, según las que sean capaces de alcanzar a todo plazo. Y dependerá también, en muy gran medida, de la durabilidad que sean capaces de conferir a los hormigones que los contengan.

4. LAS ADICIONES EN LOS HORMIGONES

Por principio y de forma apriorística, cualquier adición que a partir de una cierta proporción pueda ser añadida al clinker en fábricas de cemento, no debe ser añadida en hormigonera, ni al cemento –si así se considera–, ni al hormigón. Y mucho menos si ello se hace *en sustitución* de una parte del cemento. A continuación se razona sobre ello, en función de los distintos tipos de adiciones:

- i) En cuanto a las escorias siderúrgicas, porque éstas deben ser siempre molidas y de forma adecuada, conjuntamente con el clinker –o, preferentemente, aparte–, hasta alcanzar el grado de finura y la granulometría más idóneos.
- ii) En lo que respecta a las puzolanas naturales y arcillas activadas, ya que deben ser previamente refinadas para que su reactividad se manifieste con más rapidez, intensidad y eficacia.
- iii) En lo que se refiere a las cenizas volantes, por cuanto que es más conveniente refinarlas rompiendo las cenosferas, con lo cual se logran más ventajas que inconvenientes.
- iv) En lo que atañe a los filler calizos porque, evidentemente como en los casos anteriores y más aún, requieren una molienda fina para que puedan ejercer su función dispersante con eficacia, máxime si se añaden al clinker en pequeña proporción.

- v) Y porque la consecución de todo esto –moliendas, refinados, mezclas, homogeneizaciones, dosificación, etc.–, que es imprescindible, no se puede conseguir en todo o en parte, ni fácilmente ni con garantías y responsabilidad, no ya en las obras, sino ni siquiera en las centrales hormigoneras, tal como están concebidas y desarrolladas en el presente.

Hay que tener también en cuenta que, aun disponiendo a pie de hormigonera de todas las citadas adiciones molidas en la forma y a la finura más conveniente, su incorporación al hormigón no sería análoga a la que se hiciera si estuviesen previamente incorporadas al clinker en el cemento. Y esto porque:

- i) el tiempo de amasado del hormigón, comparado con el de permanencia del material o mezcla de materiales que se muelen aislada o conjuntamente, en un molino, es insignificante;
- ii) en consecuencia, es mucho más difícil –si no imposible– obtener una masa de hormigón homogénea en cuanto a la distribución de sus componentes, con los consiguientes problemas;
- iii) el control de la calidad y homogeneidad de los materiales, de la finura y granulometría de los mismos, y el de la dosificación con el cemento en el hormigón es también mucho más difícil y problemático, y ofrece menos garantías de regularidad y homogeneidad de las mezclas;
- iv) desde el momento en que se le añade al hormigón, al mismo tiempo que el cemento y aparte de éste, un material tan fino como el propio cemento, y de composición afín con la de éste, el fabricante del cemento queda al margen de toda responsabilidad sobre el hormigón resultante, dada la dificultad –imposibilidad– de determinar en dicho hormigón, una vez fraguado y endurecido –e incluso en estado fresco–, los componentes del mismo y, por lo tanto, averiguar su verdadera dosificación en cemento;
- v) la adición controlada de materiales finamente molidos, en la hormigonera, aparte de todo lo anterior, requeriría conocer –y tener en cuenta– con toda precisión la naturaleza y composición del cemento que se utiliza –por si se trata de un cemento que ya de por sí contiene adiciones–, lo cual no siempre es fácil;
- vi) la *sustitución* de cemento por adiciones, hecha en la hormigonera (aun suponiendo un pleno conocimiento del cemento que se sustituye y del material de sustitución, lo cual no es poco suponer), con objeto de obtener un hormigón (estructura, obra) más barato es, cuando menos, arriesgado o temerario. Hay que empezar alguna vez a pensar que además y antes que construir MUCHO, RAPIDO y BARATO, hay que construir BIEN y en condiciones de SEGURIDAD y DURABILIDAD;
- vii) no estará de más, finalmente, tener en cuenta el tipo de personal que en hormigoneras habría de estar a cargo de las adiciones y sustituciones, en cuanto a su formación, capacidad y responsabilidad, así como el control –continuidad y rigor del mismo– que sería preciso llevar de tales operaciones.

Todo lo de los dos apartados anteriores hay que referirlo especialmente a hormigones estructurales de edificación y viviendas, en los cuales el riesgo y la responsabilidad son mayores; no tanto a otros casos, como los de hormigones de pavimentos. De todo ello, y particularmente de su parte menos dramática, se trata también en el ya mencionado trabajo del que expone: CENIZAS, CEMENTOS Y HORMIGONES CON CENIZAS, en vías de publicación en las revistas ya indicadas.

5. LAS ADICIONES Y LOS CEMENTOS CON ADICIONES EN LA NORMALIZACION EUROPEA (E INTERNACIONAL) FUTURA

Veamos ahora cuáles son las propuestas que los Grupos de Trabajo 6 y 8 de la Comisión TC-51: CEMENTO del CEN, los cuales se ocupan respectivamente de la clasificación y definición de los cementos y de las especificaciones químicas, físicas y mecánicas de los mismos, han elevado a la citada Comisión en su reunión plenaria del pasado mes de Noviembre de 1982.

En cuanto a la Tabla de Clasificación de los Cementos, se ha presentado la Propuesta "K", última elaborada por el GT-6 en 25-X-82. En ella se toman en consideración 6 tipos de cementos, cuyas denominaciones en inglés y designaciones son las que figuran en el cuadro correspondiente, en el cual se indican también los límites para las respectivas proporciones de clinker y de las diferentes adiciones posibles.

TABLE K
Table of Cement Types

Type	Designation	Proportion by mass, %				
		Clinker	Granulated Blastfurnace slag	Pozzolana	Fly-ash	Filler
I	Portland cement	95...100	0... 5			
II-S	Portland slag cement	65... 90	10...35	0... 5		
II-Z	Portland pozzolana cement	65... 90	0... 5 (1)	10...35	0...5 (1)	
II-S/Z	Portland composite cement	65... 88	6...29	6...29	0...5	
III	Blastfurnace cement	20... 64	36...80 (2)	0... 5		
IV	Pozzolanic cement (3)	≥ 60	—	≤ 40	—	—

(Figures in the table to the nucleus of cement, excluding calcium sulphate and additives).

(1) The total content of blastfurnace slag and filler shall not exceed 5 % by mass.

(2) Proportions of granulated blastfurnace slag exceeding 65 % will be additionally marked.

(3) Pozzolanic cement shall meet the requirement of the pozzolanicity test according to CEN.

Son de destacar en el Cuadro los siguientes hechos:

- i) *puede existir* un solo cemento "unitario": el Portland I con 0 % de adiciones;
- ii) todos los demás cementos, salvo el tipo Puzolánico, que es "binario" y sólo contiene clinker (60 %) y puzolana (40 %), pueden contener hasta 4 adiciones distintas en proporciones diferentes, según el tipo de cemento;
- iii) todos los cementos –salvo los de tipo Puzolánico, como queda indicado–, pueden contener hasta un 5 % como máximo de filler, que puede ser incluso de los impropriadamente llamados "inertes" –calizo–;
- iv) el Cemento Portland Compuesto II-S/Z, que es el más aproximadamente "ternario", puede contener, además de clinker, conjuntamente escoria de horno alto y material puzolánico (puzolana natural o ceniza volante);
- v) queda pendiente de resolución todo lo relativo a los cementos II-M (o II-F), los cuales podrán contener tal vez una proporción alta de filler, cuyo límite superior en cuanto a especificación queda aún por precisar, así como todo lo referente a la naturaleza y calidad de los posibles fillers.

ESPECIFICACIONES QUIMICAS Y FISICAS

Categoría	I	II-S	II-Z	II-S/Z	III	IV
Pérdida al fuego (%)	≤ 5	≤ 5	≤ 7	≤ 7	≤ 5	≤ 7
Residuo insoluble (%)	≤ 5	≤ 5	—	—	≤ 5	—
SO ₃ (%)	Clase 32,5 ≤ 3,5	≤ 3,5	≤ 3,5	≤ 3,5	≤ 4	≤ 3,5
	Clase 42,5 ≤ 4	≤ 4	≤ 4	≤ 4	≤ 4	≤ 4
Cloruros (%)	≤ 0,1					
Estabilidad (mm)	≤ 10					
Principio del fraguado (minutos)	Clase 32,5	> 60				
	Clase 42,5	> 45				
Fin del Fraguado (horas)	≤ 12					

RESISTENCIAS MECANICAS (a compresión)

Clases	Subclases	RESISTENCIAS EN N/mm ² A LAS EDADES DE			
		mímimo	mínimo	mínimo	máximo
		2 días	7 días	28 días	
32,5 (M S S)	N E S	—	16	32,5	52,5
	H E S	8	—		
42,5 (H S S)	N E S	%	—	42,5	62,5
	H E S	16	—		

Notas: M S S = Medium Standard Strength.
H S S = High Standard Strength.
N E S = Normal Early Strength.
H E S = High Early Strength.

6. FUTURO PREVISIBLE

Si se tienen en cuenta los logros alcanzados hasta el presente en el ahorro energético ligado a la fabricación del cemento, y la situación que cabe esperar en el porvenir, en cuanto a disponibilidades de materias primas y energía, todo lo cual se puede resumir así:

- i) reducción a la mitad del consumo térmico específico, al haberse pasado de las 1.500 kcal/kg de clínker de la vía húmeda a las 750 kcal/kg de la vía seca tradicional más avanzada, con precalentamiento y precalcinación del crudo, valor este último que se puede considerar como asintótico;
- ii) retorno del empleo del uso del fuel-oil al del carbón –o al de otros combustibles– en prácticamente la totalidad de las fábricas;
- iii) posible y probable elevación creciente del precio de todos los combustibles, incluido el carbón, así como de la energía en general y de la termoeléctrica en particular. (Es curioso señalar que estas líneas se escribían muy pocos días antes de anunciarse como un hecho la subida de los derivados del petróleo a primeros de Diciembre de 1982, y la inminente subida de las tarifas eléctricas, así como la solicitud de subida de otros combustibles –carbones de la cuenca Asturiano-Leonesa–. En Enero de 1983 tales subidas ya están cuantificadas y aprobadas);
- iv) agotamiento progresivo en número y reservas de las canteras de materias primas más idóneas, con la necesidad de utilizar otras que no lo son tanto;
- v) necesidad cada vez mayor de eliminar escombreras de subproductos y productos de desecho, aprovechándolos, por razones ecológicas y económicas,

se llega a la conclusión de que las tendencias de cara al futuro apuntarán hacia los siguientes objetivos y acciones:

- i) empleo cada vez más reducido –hasta el punto de que llegará a hacerse excepcional– de cementos portland fabricados exclusivamente a base de clínker y regulador de fraguado;
- ii) en correspondencia, empleo cada vez más extendido en todas partes de cementos con adiciones, a base de clínker portland;
- iii) como corolario, utilización creciente de las adiciones ordinariamente conocidas como activas –escorias (incluidas, tal vez, las de otras metalurgias no férricas) con 50 años de uso en el momento actual, cenizas volantes (con 25 años de historia en cementería) y puzolanas (cuyo empleo se remonta a la Edad Antigua)–, así como de otras adiciones conocidas como “fillers”, activas en otras formas y/o medida –calizas idóneas–, de cuya aptitud existe variada experiencia en diversos países, entre ellos España;
- iv) avance extenso y profundo en el conocimiento científico más detallado de todas estas adiciones y de los cementos que las contienen, así como en el desarrollo tecnológico de la fabricación y utilización de los mismos;
- v) como consecuencia, establecimiento de criterios de idoneidad y calidad, e implantación de métodos para evaluarlas y controlarlas, tanto en lo que se refiere a las adiciones en sí como en lo que concierne a los cementos;
- vi) como detalle de lo que precede, estudio de métodos, normalizables o no, para determinar cuantitativamente la exigencia de agua y la capacidad de retención de la misma por parte

de los cementos, así como para estudiar el fraguado en condiciones extremas de frío y calor, la influencia de las adiciones del cemento en el comportamiento de los aditivos del hormigón, la tendencia a la fisuración por retracción plástica. etc.:

- vii) elaboración de recomendaciones oficiales por parte de las Administraciones, tendentes a la difusión del empleo de los cementos con adiciones, así como de instrucciones para su utilización más racional y eficaz, señalando con detalle los usos específicos de cada uno;
- viii) en el terreno internacional, intentos de creación de una Norma de gran ámbito y con tal carácter, que armonice y homologue los cementos con adiciones de los distintos países.

7. CONCLUSION

Razones técnicas, económicas y ecológicas parecen orientar con carácter internacional y tal vez irreversible, hacia la utilización de diversas adiciones para el cemento, y hacia el empleo –recomendado ya por varias Administraciones– de cementos con adiciones.

Todo esto va a requerir un estudio cada vez más sistemático y detallado de los materiales de adición, de los procesos de fabricación y de los métodos de ensayo y control de los cementos que las contienen, de las condiciones más idóneas para el empleo de los mismos y de los usos específicos a los que deben ir principalmente destinados. Algo de esto parece estar ya en marcha, incluso en España.

Con respecto a lo anterior, es obligado seguir de cerca el curso de los acuerdos y decisiones del CEN en relación con la nueva clasificación, definiciones y composiciones de los cementos, dentro de la posible (¿próxima?) futura Norma Europea y tal vez internacional, a través de los trabajos de la normalización española UNE del IRANOR (Comisión 80: CEMENTOS Y CALES).

Esto muy probablemente influirá en el futuro de la normalización española relativa al cemento, así como tal vez también en las Instrucciones de Hormigón y/o en las eventuales Recomendaciones de empleo de los cementos que se apoyen en las mismas.

Todo ello va a exigir el máximo interés y atención por parte de fabricantes y usuarios de los cementos, en orden a lo cual se exponen las siguientes sugerencias, por vía de recomendaciones dirigidas a unos y otros.

8. RECOMENDACIONES

8.1. A los fabricantes de cemento

- I) Seleccionar y controlar las adiciones y el clinker, y experimentar previamente los cementos, antes de su lanzamiento al mercado.
- II) Optimizar las proporciones de mezcla de clinker y adiciones, y el contenido de yeso de los cementos.
- III) Moler de forma que se obtengan cementos con finuras y granulometrías adecuadas, de tal modo que éstas sean compatibles con la exigencia y retención de agua más favorables de las pastas y con la reología, plasticidad y resistencias mecánicas de los hormigones.
- IV) Regularizar la producción para conseguir la mayor homogeneidad de la misma, dentro del logro de una calidad lo más alta posible.

8.2. A los usuarios del cemento

- I) Utilizar racionalmente los cementos con adiciones, teniendo en cuenta lo que se puede y debe esperar de ellos y lo que no se les puede exigir.
- II) Dosificar estos cementos en las proporciones adecuadas, según las resistencias de los hormigones que haya que preparar, sin escaseces ni ahorros peligrosos, y utilizar relaciones agua/cemento lo más bajas posible.
- III) Proporcionar a los correspondientes hormigones las condiciones necesarias y suficientes de ejecución, puesta en obra, curado y control y, sobre todo, los plazos mínimos indispensables de endurecimiento para poder desencofrar sin riesgos.
- IV) No añadir por cuenta propia adiciones en la homigonera, y menos aún como *sustitutivo* del cemento y ahorro de este material.

8.3. A fabricantes y usuarios del cemento, conjuntamente

- I) Entablar diálogos con carácter permanente para información mutua de necesidades de unos y posibilidades de otros.
- II) Establecer de común acuerdo planes conjuntos de experimentación y ensayos de los nuevos cementos que vayan siendo normalizados o normalizables, antes de que salgan definitivamente al mercado.
- III) Establecer por mutuo convenio condiciones previas de fabricación, entrega y recepción de cementos, al margen de lo estipulado por las normas, siempre que sea necesario y, sobre todo, en casos especiales.
- IV) Estar dispuestos en todo momento a armonizar sus respectivos intereses, cediendo y concediendo unos a otros lo que sea posible, necesario y razonable.

En la realización de los cuatro puntos precedentes podrá ser decisiva la buena disposición de las tres agrupaciones sectoriales implicadas, OFICEMEN, SEOPAN y ANEFHOP.

BIBLIOGRAFIA ESPAÑOLA DEL IETCC SOBRE EL TEMA

- (1) CALLEJA, J.: "Apología de los conglomerantes puzolánicos". *Cemento-Hormigón*, N.º 386, Jun. 1966.
- (2) CALLEJA, J.: "Las Puzolanas". *Revista ION*, Vols. 29 y 30, Núms. 340, 623-638 (1968); 341, 700-713 (1968); 343, 81-90 (1969) y 344, 154-160 (1969). *Materiales de Construcción*, N.º 281 (1969). *Monografía del IETCC* N.º 281 (1969).
- (3) CALLEJA, J.: "Cementos Puzolánicos". *Materiales de Construcción*, N.º 165, 23-36 (1977). Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI). Buenos Aires (Argentina) 1976. 23.ª Reunión de Técnicos de Cemento, de la ABCP (Asociación Brasileña del Cemento Portland), Simposio de Cemento y Concreto. São Paulo, 1976.
- (4) CALLEJA, J.: "Las adiciones a los cementos". *Materiales de Construcción*, N.º 165, 5-11 (1977).
- (5) CALLEJA, J.: "Curso sobre adiciones y materiales puzolánicos para cementos". Instituto Colombiano de Productores de Cemento. Medellín (Colombia), Octubre 1977, en: "Actividades técnicas cementeras en Iberoamérica". *Materiales de Construcción*, N.º 169, 5-27 (1978).

- (6) CALLEJA, J.: "Consideraciones sobre la economía de combustibles y otros derivados del petróleo en la fabricación y en la utilización de los cementos".
2.^a Reunión Plenaria del GLAICYC (Grupo Latinoamericano de Instituciones del Cemento y del Concreto), Río de Janeiro (Brasil), Octubre 1979.
Materiales de Construcción, N.º 175, 5-22 (1979).
Materiales de Construcción, N.º 175, 35-44 (1979).
Cemento-Hormigón, LI (555), 109-121 (1980).
Cemento-Hormigón, LI (554), 11-13 (1980).
- (7) CALLEJA, J.: "Cementos con adiciones".
Presencia y actuación española en la 30.^o Reunión de Técnicos de la Industria del Cemento del Brasil. Río de Janeiro (Brasil), Octubre 1979.
Materiales de Construcción, N.º 175, 51-69 (1979).
Cemento-Hormigón, LI (566), 197-218 (1980).
- (8) CALLEJA, J.: "Empleo de los cementos para los diferentes tipos de obras".
2.^a Jornadas Internacionales de la Construcción EXPOCONSTRUCCION 80. Centro de Ingenieros de Rosario (Argentina), Buenos Aires, Diciembre 1980.
Materiales de Construcción, N.º 180, 17-73 (1980).
- (9) CALLEJA, J.: Apostillas al trabajo de P. DUTRON titulado: "La respuesta de la Industria Cementera a los problemas económicos y técnicos actuales".
Materiales de Construcción, N.º 184, 17-29 (1981).
Cemento-Hormigón, LIII (580), 227-243 (1982).
- (10) CALLEJA, J.: "Hormigón con bajo contenido de cemento y hormigón con sustitución parcial de cemento".
Materiales de Construcción, en prensa.
Cemento-Hormigón, en prensa.
- (11) CALLEJA, J.: "Cenizas, Cementos y Hormigones con cenizas".
Materiales de Construcción, en prensa 1983.
Cemento-Hormigón, en prensa 1983.
- (12) CALLEJA, J.: "Escorias y Cementos Siderúrgicos".
Materiales de Construcción, en prensa 1983.
Cemento-Hormigón, en prensa 1983.
- (13) ULLOA, L.: "Utilización de las cenizas volantes en la fabricación de cementos".
Materiales de Construcción, N.º 172, 23-54 (1978).
- (14) SANTOS, M. J.: "Cementos que contienen 20 y 30 por ciento de cenizas volantes de Puentes de García Rodríguez y de Ponferrada".
Materiales de Construcción, N.º 179, 9-37 (1980).
- (15) DUTRON, P.: "La respuesta de la Industria Cementera a los problemas económicos actuales".
Trabajo traducido y apostillado por J. CALLEJA (véase referencia 9).
Materiales de Construcción, N.º 184, 7-16 (1981).
Cemento-Hormigón, LIII (580), 211-226 (1982).
- (16) AGUANEL, M., BARAGAÑO, J., GOMA, F., GONZALEZ VILA, V., LOPEZ SOLER, R., PEREZ ALONSO, J., PUIG J. y REZOLA, J. (Grupo de Trabajo de OFICEMEN): "Industrial research of new Spanish blended cements".
Coloquio Internacional sobre "Escorias y Cementos con Adiciones". Mons (Bélgica), Septiembre 1982.
Silicates Industriels (Bélgica), en prensa 1983.
Cemento-Hormigón, LIII (578), 5-23 (1982).
- (17) SORIA, F.: "Panorámica de los cementos puzolánicos en el futuro".
Monografía IETCC N.º 270. Ediciones 1968 y 1969.
- (18) SORIA, F.: "Puzolanas y Cementos Puzolánicos".
Materiales de Construcción, N.º 110, 1963.
- (19) SORIA, F.: "Cemento puzolánico en hormigón pretensado".
Hormigón y Acero, N.º 119-120, 1976.
- (20) DE LUXAN, M. P.: "Sustitución de la permanganimetría por la complexometría en la valoración de la cal del ensayo de puzolanidad".
Materiales de Construcción, N.º 148, 71-75 (1972).
- (21) DE LUXAN, M. P.: "Corrección del fraguado anormal de un conglomerante hidráulico mediante adiciones".
Materiales de Construcción, N.º 149, 54-66 (1973).
- (22) DE LUXAN, M. P. y VAZQUEZ, T.: "El gel de sílice como puzolana patrón: su energética actividad y sus limitaciones".
Materiales de Construcción, N.º 160, 79-95 (1975).
- (23) DE LUXAN, M. P.: "Estudio de las puzolanas naturales de origen volcánico mediante espectroscopia de absorción infrarroja".
Cuaderno de Investigación del IETCC N.º 32, 1976.
- (24) DE LUXAN, M. P.: "Comportamiento del gel de sílice en el ensayo de puzolanidad".
Materiales de Construcción, N.º 161, 39-58 (1976).

- (25) DE LUXAN, M. P.: "Procedimiento para la obtención cuantitativa del residuo al tratamiento salicílico-metanólico". *Materiales de Construcción*, N.º 162, 5-8 (1976).
- (26) DE LUXAN, M. P.: "Método de valoración cualitativo y cuantitativo de las adiciones de tipo silíceo presentes en el cemento. I. Existencia de material silíceo en el cemento". *Cemento-Hormigón*, N.º 91-103 (1978).
- (27) DE LUXAN, M. P.: "Método de valoración cualitativo y cuantitativo de las adiciones de tipo silíceo presentes en el cemento. II. Identificación del material silíceo". *Cemento-Hormigón*, N.º 530, 103-111 (1978).
- (28) DE LUXAN, M. P.: "Método de valoración cualitativo y cuantitativo de las adiciones de tipo silíceo presentes en el cemento. III. Análisis cuantitativo de la adición silícea. (Tratamiento con ácido salicílico en medio metanólico)". *Cemento-Hormigón*, N.º 531, 202-214 (1978).
- (29) DE LUXAN, M. P.: "Método de valoración cualitativo y cuantitativo de las adiciones de tipo silíceo presentes en el cemento. IV. Análisis cuantitativo de la adición silícea inerte. (Método espectroscópico)". *Cemento-Hormigón*, N.º 531, 217-229 (1978).
- (30) DE LUXAN, M. P.: "Método de valoración cualitativo y cuantitativo de las adiciones de tipo silíceo presentes en el cemento. V. Método propuesto". *Cemento-Hormigón*, N.º 531, 229-234 (1978).
- (31) DE LUXAN, M. P. y VAZQUEZ, T.: "Il gelo di silice come pozzolana di riferimento: sua notevole attività e suoi limiti". *Il Cemento* (Italia), Vol. 71, N.º 3, 113-130 (1974).
- (32) DE LUXAN, M. P. y SORIA, F.: "Study and critical review of the pozzolanicity test". *Cement and Concrete Research* (USA), Vol. 5, No. 5, 461-480, (1975).
- (33) DE LUXAN, M. P. y SORIA, F.: "Reply to Dr. BENSTED's Discussion on: "Study and critical review of the pozzolanicity test"". *Cement and Concrete Research* (USA), Vol. 7, No. 4, 463-464 (1977).
- (34) DE LUXAN, M. P.: "Aplicación del método de valoración cualitativo y cuantitativo de las adiciones de tipo silíceo presentes en el cemento sobre muestras recibidas de obra". *Monografía IETCC* N.º 369 en prensa (1983).
- (35) CALLEJA, J.: "Criterios sobre Normas para cemento". *Materiales de Construcción*, N.º 128 (1967).
- (36) CALLEJA, J. y DEL OLMO, C.: "Determinación del contenido de cemento en morteros y hormigones fraguados: datos para la puesta al día del método". *Materiales de Construcción*, N.º 140 (1970).
- (37) CALLEJA, J.: "Cuestiones que plantea el empleo del cemento". *Materiales de Construcción*, N.º 148 (1972). *Cemento-Hormigón*, XLIII (461). 655-674 (1972).
- (38) CALLEJA, J.: "Problemas que surgen en la técnica del hormigón". *Cemento-Hormigón*, XLIII (462). 777-792 (1972).
- (39) CALLEJA, J.: "Las nuevas Normas Españolas para cemento". *Materiales de Construcción*, N.º 164 (1976).
- (40) CALLEJA, J.: "El problema de la determinación del contenido de cemento en morteros y hormigones fraguados". *Materiales de Construcción*, N.º 168 (1977).