

Tendencias en la tecnología del cemento y posibles innovaciones

Prof. Dr. FRANCISCO ARREDONDO Y VERDU, Director del IETcc

Hace más de un año que empezamos a preparar estos coloquios.

Pecaría de injusticia si mis primeras palabras no fueran para dedicar un cariñoso recuerdo a tres personas, a tres amigos queridos, involucrados en esta preparación que nos han abandonado en el transcurso de este año.

Marcelo Lumbier, uno de los patriarcas de la industria cementera española, todo sensatez, serenidad y simpatía.

Eduardo Calderón, empresario emprendedor y eficaz, ejecutivo dinámico, con amistosa cordialidad y sonrisa fácil.

José María Tobío, profundidad de conocimientos, sentido de la realidad e imaginación desbordada.

Desde el Consejo Técnico Administrativo del Instituto, la Comisión Consultiva de Representantes de la Industria del Cemento y el Comité Ejecutivo de estos VI coloquios, estaban colaborando en su organización y los hemos visto desaparecer de la noche a la mañana casi sin darnos cuenta de lo que perdíamos.

Tres mazazos seguidos cuyos efectos sólo pueden paliarse pensando en la Paz que indudablemente han alcanzado.

El único consuelo que nos queda es decir como Gabriel y Galán en una de sus más conocidas poesías: "Dios lo ha querido así, bendito sea".

I. INTRODUCCION

Nos reunimos una vez más para celebrar estas reuniones periódicas que convocan a los Directores y Técnicos de Fábricas de cemento españolas y a otros amigos de allende las fronteras, para dialogar, coloquiar, sobre temas o problemas que se consideran de su interés en el momento actual.

Desde las primeras reuniones, celebradas hace ya más de 20 años, hasta los V Coloquios, celebrados en mayo de 1969, se consideran temas muy variados que abarcaron desde la explotación de canteras hasta aspectos de la pasta hidratada. Por primera vez, en los V Coloquios, se toma un tema monográfico que, aunque afecta a todo el proceso de fabricación, constituye una herramienta auxiliar de gran valía para el más y mejor hacer del cemento: el tema de la automatización.

En unos años, pues, hemos pasado del estudio de problemas como los carbones pobres, los anillos, la dificultad de repuestos, etc., típicos de una época de penuria de medios, a la exposición de las técnicas sofisticadas del trabajo con ordenador, olvidándose aquellos viejos problemas y tratando de perfeccionar nuestra industria, produciendo más y mejor cemento con ahorro notorio en la mano de obra y sensible en el consumo de combustible.

En estos momentos, los problemas, las preocupaciones, son de otro orden. Como consecuencia de la crisis del petróleo, y por tanto de la energía, se ha planteado la necesidad de estudiar la forma de paliar este inconveniente que incide tan directamente en el costo del producto fabricado.

Esto obliga a estudiar las posibles formas de reducir dichos costos, destacando entre las posibles: el empleo de adiciones (circunstancia que ya se tiene en cuenta en ciertas normas o Pliegos de Condiciones), el empleo de coadyuvantes en la clinkerización para reducir la temperatura de trabajo de los hornos sin mermas de las propiedades técnicas del material, la utilización de combustibles distintos del petróleo —incluso retornando a combustibles tradicionales como el carbón— y, finalmente, aunque quizás a más largo plazo, reestructurando el proceso, al menos en las fases de mayor incidencia en el aspecto energético.

Por otro lado, al afectar esta crisis energética a otros aspectos productivos distintos a los del cemento, el problema ha trascendido a las economías nacionales a todos los niveles, lo que ha llevado consigo una fuerte recesión en la demanda y, por tanto en la producción, una infrautilización de la capacidad instalada y, a pesar de las medidas tomadas contra la inflación, un alza continuada de los precios al consumidor, aunque con marcadas discrepancias de unos países a otros.

Esto ha conducido a cerrar definitivamente o poner fuera de servicio numerosas instalaciones (hornos principalmente) y concentrar la fabricación en las unidades más rentables.

Estamos viviendo en la industria cementera europea y otros países muy industrializados, como pueden ser Estados Unidos de América y Japón, uno de los peores momentos de su historia: el alza de los costos (sólo parcialmente compensados y con retrasos en la elevación del precio del cemento), por una parte, y la recesión en el consumo con una capacidad de producción muy superior, por la otra, han conducido a una situación tan paradójica que hasta el aspecto de ahorro de energía, tan lógico en estos momentos, pasa a ocupar un papel secundario, quedando en primer plano los problemas económicos-financieros de la empresa y los de comercialización del producto fabricado.

España, dentro del grupo de países que engloba el Cembureau, ha mantenido, al lado de otros países como Turquía y Grecia, un aumento constante en su producción (1,9 % de 1974 a 1975); pero esto no refleja el consumo interior (que ha descendido un 6,3 % en el mismo período), obligando a forzar la exportación a países de ultramar (se exportaron 3,5 millones de toneladas en 1975, récord de los países del Cembureau), a veces en circunstancias económicas desfavorables.

II. ESTADO ACTUAL DE LA TECNOLOGIA DE FABRICAS DE CEMENTO

A continuación, les daré una visión panorámica, y a grandes rasgos, de la evolución del proceso de fabricación en sus distintas fases.

Extracción de materias primas

A este respecto debemos señalar que la extracción convencional se ha limitado a yacimientos lo más uniformes posible en formación geológica, composición petrográfica y quimismo, pero en el futuro habrá que explotar también yacimientos de formación muy variada, cuya investigación y explotación tendrán una importancia económica creciente.

En la labor de extracción se ha evolucionado de forma decisiva en los últimos 20 años, al desarrollar máquinas perforadoras de gran rendimiento. Con la introducción de estas máquinas ha continuado el desarrollo de grandes voladuras con barrenos desde la superficie, y, con un control minucioso de las variables que afectan a este proceso, se ha influido de manera decisiva en las características del producto final y en las sucesivas fases de trabajo.

Desde finales de los años 50 se ha producido una profunda transformación en el empleo de explosivos, habiéndose impuesto en el mundo entero los explosivos a base de nitrato amónico y fuel-oil —por su inercia— o las suspensiones a base de TNT, nitrato amónico y agua —más densas y, por supuesto, insensibles a la humedad—.

Para el transporte en canteras se ha establecido ya definitivamente el transporte sin carriles, por sus ventajas económicas, reduciendo costes y aprovechando mejor los aparatos de carga.

Como el transporte continuo del material exige su trituración previa, buscar las mayores ventajas exige mantener aquélla cerca de los puntos de arranque. Para ello, se han instalado, en muchos casos, trituradores móviles con la más variada disposición; en el caso ideal de yacimientos homogéneos el propio operario de la trituradora recoge el material abatido con un elevado rendimiento en la operación.

Si consideramos los rendimientos por hombre y hora en los últimos años, incluyendo la trituración, aquéllos han pasado de 10 a 30 t. Naturalmente, esto sólo ha sido posible con ayuda de gigantescas inversiones, que exigen una amortización sustanciosa y un buen equipo de mantenimiento y reparación.

Insistiendo en la trituración previa, se procura que sea lo más avanzada posible para evitar un coste elevado en la fase de refinado, compensando el aumento de costos en el desgaste por abrasión durante la trituración con el ahorro de energía en la molienda fina.

Para la elección de la máquina adecuada deben tenerse en cuenta tres factores que dependen del tipo de material a desmenuzar: dureza, contenido de sílice libre y humedad. La decisión del esquema de trituración, en una o varias etapas, viene condicionada por circunstancias propias de la máquina; la industria del cemento sigue dando preferencia a una sola etapa, en tanto los gastos por desgaste de las máquinas rápidas empleadas en este caso se mantengan dentro de límites aceptables y no se produzcan atascamientos. En los últimos años se han conseguido máquinas rápidas con interesantes mejoras constructivas tendentes siempre a simplificar los trabajos de conservación y capaces de producir hasta 2.000 t/h, suficientes para plantas de 1 a 1,5 millones de toneladas de clínker al año.

En un futuro próximo son de esperar innovaciones revolucionarias con el desarrollo de máquinas potentes de un solo escalón y tendiendo a instalaciones fácilmente controlables que permitan cómodas reparaciones y se mantengan limpias sin grandes esfuerzos.

Prehomogeneización

Esta técnica, nacida a principios de siglo para la minería del hierro y del carbón, se introdujo en la industria del cemento hacia el año 1960. Su establecimiento y la elección de las instalaciones adecuadas entre las muchas existentes en el mercado dependen de las fluctuaciones en la composición de la materia prima y del grado de homogeneización deseable; en este momento no podemos analizar los distintos sistemas ofertados, aunque sí debemos señalar que una instalación de muestreo continuo debe ser el complemento indispensable en todo parque de prehomogeneización. Gracias a las indicaciones periódicas suministradas por esta instalación será posible orientar los aparatos de recogida en el frente de cantera hacia las zonas donde las características del material proporcionen una composición media lo más próxima posible a la impuesta por las normas de fabricación.

Molienda y secado de materias primas

Para la obtención de crudo en polvo se manejan numerosos sistemas de secado y molienda en cuya selección influyen principalmente, aparte del tamaño de alimentación y la molturabilidad del material, el contenido de humedad y su efecto agresivo.

Normalmente se prefieren los sistemas secado-molienda conjuntos, ya que funcionan en condiciones más ventajosas, tanto en cuanto a economía térmica como desde el punto de vista de la técnica de molturación, aparte de reducir inversiones y evitar problemas adicionales de depuración de polvo, almacenamiento intermedio y dosificación de materiales previamente desecados.

El secado y molienda conjuntos es posible hasta humedades en la materia prima del orden del 15 %. Pasada esta cifra, o cuando se dan otras circunstancias (componentes pegajosos, por ejemplo) debe de pensarse en un secado independiente.

Son de destacar los progresos logrados en los últimos años en los molinos de rodillos o de pista, tanto en detalles constructivos como en dimensiones unitarias, llegando a existir modelos con capacidades de producción de hasta 500 t/h.

En vía húmeda también prevalece la tendencia a efectuar la molienda en circuito cerrado con ayuda de cribas, tamices o hidrociclones, logrando incrementos de producción que, según las características de la pasta, oscilan del 10 al 40 %.

Con determinadas materias primas, principalmente cretas, y con un filtrado de la pasta por vacío y secado posterior en parrilla Lepol, se han conseguido resultados satisfactorios, con un consumo térmico inferior a las 950 kcal/kg de clínker.

Homogeneización de crudos

Las grandes unidades de producción empleadas ya hoy día en la molienda de crudos han obligado a reconsiderar los criterios de proyecto y funcionamiento de los silos de homogeneización, los cuales están supeditados, a su vez, al grado de homogeneización y regulación del proceso antes de la alimentación del molino. En casos extremos, con materias primas favorables y con el empleo de analizadores de rayos X, pueden prepararse clínkeres de excelente calidad sin necesidad de silos de homogeneización.

La homogeneización intermitente, que consta de dos silos generalmente situados sobre los silos de almacenamiento, sigue muy extendida en Europa. La homogeneización continua, utilizada ya en algunos casos, consta de un número y capacidad de silos, función de la producción y de las desviaciones máximas admisibles en la composición del producto homogeneizado; parece ser que, con producciones superiores a 500.000 t/año y teniendo en cuenta que los mayores silos de homogeneización no suelen superar las 3.000 t de capacidad, dos silos en serie tienen un comportamiento óptimo. Un inconveniente de los sistemas de homogeneización continua es que no hay posibilidad de hacer correcciones o rectificaciones en los crudos.

En general, en la homogeneización de crudos se ha mejorado mucho el diseño de las superficies de aireación y se ha reducido considerablemente el tiempo de mezcla, al introducir gran volumen específico de aire por metro cuadrado de superficie.

Proceso de cocción

Aun cuando en los últimos años se han logrado notables éxitos y progresos en la técnica de procesos, empleando dispositivos de combustión o cocción más modernos y de mayores dimensiones, la cocción del clínker sigue siendo el proceso parcial más costoso de la fabricación. De esta fase dependen en gran medida la economía y rentabilidad de la empresa.

El costo de combustible se ha elevado considerablemente en los últimos años y esto ha inclinado de modo decisivo la balanza del lado de los sistemas de vía seca, salvo en aquellos casos en que por la naturaleza y composición de la materia prima el proceso húmedo o semihúmedo pueda tener interés o sea obligado, o en países como Rusia y EE.UU. donde los combustibles son todavía más baratos. No obstante, estos países están revisando rápidamente la posibilidad de evolucionar hacia la vía seca.

En 1974, el 58 % de la producción de cemento en USA se obtenía por vía húmeda, en tanto que en Alemania Occidental, en el mismo año, este proceso se extendía solamente al 5 % de la producción y en España al 15 %.

Dentro de la vía semiseca, los hornos verticales han quedado prácticamente en desuso, porque aunque son sencillos y trabajan de forma económica (gastan sólo unas 900 kcal/kg de clínker) su rendimiento es relativamente bajo —máximo 300 t/día—; sólo podrán ser idóneos en fábricas que han de abastecer áreas de necesidades limitadas en cantidad y calidad, circunstancia muy propicia en países en vías de desarrollo.

El horno Lepol, primera máquina que se diseñó con un rendimiento térmico elevado, es exigente en las características físicas de las materias primas; la proporción de nuevas instalaciones ha descendido en su conjunto en los últimos años en favor de los hornos de vía seca, sobre todo de los hornos con intercambiador en suspensión gaseosa.

Desde hace unos 10 años existe esta tendencia definida hacia la vía seca. Por eso, no es una coincidencia el hecho de que los mayores rendimientos se hayan logrado con instalaciones de este tipo y que el procedimiento se aplique hoy día aún en casos en que hasta hace poco tiempo eran del dominio exclusivo del procedimiento húmedo. La mayor producción en estos momentos de un horno de este tipo es ya del orden de las 4.500 t/día.

La idea del intercambiador de calor para crudos en polvo con ciclones como elementos separadores nació a principios de los años 30, pero tardó dos decenios en llevarse a la práctica, hasta resolver las dificultades técnicas surgidas por desconocer que la transmisión de calor entre gas y polvo se realizaba en cuestión de segundos a lo largo de la torre del intercambiador.

Según las circunstancias se han instalado precalentadores de ciclones con una, dos y cuatro etapas, con dominio de estos últimos por su menor consumo de combustible y, por tanto, un volumen de gases más reducido a la hora de la depuración.

El primer intercambiador en suspensión entró en servicio en Alemania en 1951; se trataba de una instalación de cuatro escalones, sistema Humboldt. El haber transcurrido tanto tiempo hasta el desarrollo y perfeccionamiento de las gigantescas instalaciones actuales, se debe al hecho de que se carecía de instalaciones adecuadas de despolvamiento.

A lo largo de estos años se desarrollaron diferentes sistemas que, en las formas más variadas, llevan a cabo el intercambio de calor sólido-gas (desde el flujo en paralelo al flujo en contracorriente puros, pasando por diversas soluciones intermedias).

Estos sistemas llamados SP (Suspensión Preheater) han presentado problemas cuando aparecen álcalis y cloruros en las materias primas a partir de ciertas proporciones; esto, unido a las dificultades en el revestimiento de refractario de las grandes unidades y, sobre todo, a su elevada carga térmica, es lo que quizás ha conducido al sistema SF (Secondary Furnace System) del que a lo largo de ocho o nueve años han surgido diversidad de variantes.

La idea básica de todos los hornos SF es incorporar una cámara de combustión independiente en la base del intercambiador convencional, justamente delante del horno rotatorio; es decir, proporcionar calor donde es necesario en mayor medida: el proceso de descarbonatación. El resultado final es aumentar la descarbonatación a la entrada del tubo rotatorio del 45 al 90 %, en relación con los sistemas SP. El sistema SF consume alrededor del 60 % del total de las exigencias del horno, reduciendo las necesidades del quemador principal del horno al 40 %.

Con este nuevo sistema son de prever las siguientes ventajas:

- Aumento de la capacidad específica del horno, manteniendo una carga térmica constante en la cabeza del mismo, multiplicando por un factor del orden de 2,2. Esto permitirá llegar fácilmente a producciones de 10.000 t/día.
- Reducción del consumo específico de refractario en la zona de sinterización, al doblar la producción en un horno del mismo diámetro.
- Quizás, una ligera reducción en el consumo de combustible.
- Un mejor control del proceso, al tener lugar gran parte del mismo en unidades estacionarias.
- Un mejor control de los álcalis, al facilitar su concentración en los gases de escape.

La capacidad media de las instalaciones con precalcinador existentes en el mundo (que ya superan el medio centenar) es superior al millón de toneladas/año y proporciona ya más del 10 % de la producción mundial de cemento.

Enfriadores de clínker

Un consumo calorífico bajo en la producción de clínker sólo puede lograrse si del calor procedente del clínker se obtiene la mayor cantidad posible de aire secundario a elevada temperatura.

En los enfriadores de parrilla, que en hornos de gran producción se duplican o forman enfriadores combinados con parrillas individuales, se han logrado temperaturas del aire secundario del orden de 900°C, lo bastante elevadas para crear problemas en los anillos de descarga del horno y un mayor desgaste del refractario y de las toberas.

En contrapartida, desde el punto de vista térmico en su conjunto, este sistema de enfriamiento no es satisfactorio, porque en la vía seca, cada día más extendida con las grandes unidades y los nuevos sistemas de precalcificación, los volúmenes de aire para el enfriamiento son cada día mayores que el aire secundario necesario para la combustión, aumentando el exceso de aire expulsado a la atmósfera con la consiguiente pérdida de calorías del sistema. A su vez, el desempolvamiento de este aire en exceso también presenta dificultades, como consecuencia de la mayor concentración de polvo en las grandes unidades. Hablamos naturalmente en el supuesto de que no se tenga prevista una recuperación de este calor en otras fases del proceso de fabricación.

Estas dificultades han provocado el “redescubrimiento” de enfriadores como el planetario o de satélites, que no expulsan aire residual. Con mejoras sustanciales en su diseño y calidad de los materiales, y resueltos los problemas de sobrecarga en la parte baja del horno, el enfriador planetario vuelve a primer plano con un rendimiento satisfactorio, simplificando y haciendo más fáciles los pasos seguidos en la evolución de la moderna tecnología de fabricación del cemento.

Se ha puesto en marcha un enfriador vertical, al parecer con rendimientos superiores a los anteriores, y ya se habla del retorno del viejo enfriador tubular en versión más o menos perfeccionada para la capacidad de máquinas hoy día en servicio.

Almacenamiento de clínker

Aunque todavía existen hangares de almacenamiento al aire libre, constantemente se están sustituyendo por construcciones cerradas o grandes silos de diseño y capacidad variables, a la vista de las exigencias, cada vez mayores, en la emisión de polvo a la atmósfera.

Molienda de cemento

El desarrollo más notable en los molinos de cemento en los últimos años ha sido, siguiendo la tendencia manifestada por otras unidades de producción, el aumento continuo de sus dimensiones; la razón fundamental reside en el costo más bajo de inversión de capital por tonelada de capacidad de molienda, ya que parece ser que no está claro que se consigan ahorros significativos en los costos de producción.

Esto ha llevado consigo la necesidad de estudiar y perfeccionar los sistemas de arrastre y de suspensión o soporte del molino e, incluso, prever la posibilidad de montarlo y ensamblarlo in situ, como se viene haciendo ya desde hace tiempo con los hornos.

La mayor parte de las grandes plantas de molienda de hoy día se construyen con molinos de dos compartimientos equipados con separador (circuito cerrado), como regulador de la granulometría y de la finura del producto acabado.

Las exigencias cada vez mayores que se presentan en la práctica, en lo que respecta a resistencia y velocidad de endurecimiento de los cementos y su relación directa con la curva granulométrica, obligan a reconsiderar las posibilidades del circuito abierto, que ya prácticamente se había abandonado por dificultades operacionales para conseguir elevadas finuras.

La introducción de elementos molturadores de pequeño diámetro (4-8 mm) unido a nuevos diseños de tabiques de separación y diafragmas de descarga, el empleo de materiales altamente resistentes al desgaste en los elementos molturadores, el diseño adecuado de los blindajes interiores, la reconsideración de la molienda escalonada o separada en casos divergentes de molturabilidad de componentes, el empleo de coadyuvantes de molienda y las medidas tomadas para refrigerar al máximo el cemento producido —sobre todo en el diseño de los separadores—, constituyen los puntos en los que se centra la evolución presente, y en parte futura, de la fase fina de elaboración de los cementos.

III. FUTURO DE LA INDUSTRIA DEL CEMENTO

Futuro en el material

Haciendo un poco de historia, sobre todo en lo que atañe a la evolución de los materiales de construcción en lo que va de siglo, los conglomerantes hidráulicos, en sus distintas versiones, seguirán siendo la base de las construcciones mecánico-resistentes. Con reformas estructurales o texturales en sus componentes básicos se conseguirá una mejora continua de sus propiedades, aunque no se pueda esperar un equivalente al desarrollo de los materiales de síntesis en los últimos 40 años.

Por otro lado, es una ventaja el que las reservas de materias primas para la fabricación de cemento sean enormes, ya que prácticamente pueden emplearse todos los materiales de la corteza terrestre e, incluso, residuos y subproductos (cada vez en mayor volumen) de otras industrias.

Naturalmente, no todos los materiales de la corteza terrestre son aprovechables para hacer cemento; incluso, la presencia de ciertos compuestos en pequeña proporción pueden afectar desfavorable o favorablemente las propiedades del producto resultante según su naturaleza, proporción o coexistencia con otros elementos. Por eso, en el futuro, deberá dárseles mayor importancia a la geología de las canteras y a la mineralogía de las materias primas, singularmente a las de naturaleza arcillosa.

Mejorar sus propiedades es una forma de extender su campo de aplicación, con la posibilidad, ya iniciada hace años con la simbiosis hormigón-acero, de ampliar las posibles combinaciones de materiales haciendo un mejor uso de sus propiedades individuales (caso de los hormigones con fibras o de los hormigones impregnados con polímeros).

El precio del cemento, y por tanto, el de su primera derivada, el hormigón, es bajo. Hace un siglo el cemento costaba 30 veces más caro que hoy (a moneda constante). Es uno de los productos industriales cuyo coste ha disminuido más en valor relativo desde la última guerra mundial, gracias al incesante desarrollo de la investigación tecnológica en todos los campos: desde la cantera hasta el encofrado, pasando por las diversas fases de la fabricación del cemento y del hormigón.

En el futuro su precio será más competitivo que hoy día con el de otros materiales, debido a la escasez de algunos y su encarecimiento como consecuencia de la crisis del petróleo, materia prima de productos como los plásticos, los productos bituminosos, las pinturas, etc.

Es de destacar, a título de ejemplo, que en el caso concreto de los firmes en vías de comunicación, la crisis petrolífera ha inclinado la balanza del lado de los firmes rígidos. En España, concretamente, el firme negro ha incrementado su precio en un 14 %, en tanto que el aumento en el firme blanco ha sido sólo del 4,5 %. En este campo (autopistas, vías de suelo-cemento, estabilización de suelos, etc.), el cemento tiene reservado un papel de primer orden.

Futuro en el proceso de fabricación

El progreso más importante en el campo del cemento desde hace ya bastantes años (quizás de los años 40 para acá) ha tenido lugar en su tecnología (mayores temperaturas en los hornos y, por tanto, posibilidad de obtener cementos de la máxima saturación, mayores finuras en los productos molidos y mejores sistemas de homogeneización de productos desde la cantera hasta el ensacado).

En este sentido, las empresas cementeras, habida cuenta de los constantes aumentos de costos, singularmente del factor energético en su conjunto, deberán aprovechar todas las posibilidades de racionalización que el desarrollo de la técnica le ofrece.

El creciente tamaño de las unidades, y por tanto de las fábricas, parece ser condición primordial para una mayor rentabilidad en la producción, creando márgenes para el transporte a largas distancias, condición ineludible en aquellos casos en que la densidad de consumo no es muy elevada.

La adaptación a las posibles oscilaciones del mercado, junto a la necesidad de grandes inversiones de capital, obligarán a la agrupación de empresas a nivel nacional, como ya se viene haciendo y, posiblemente a nivel internacional, en un futuro no muy lejano.

Son de esperar, por otra parte, nuevos procedimientos, o desarrollo de los existentes, con vistas a mejorar los bajos rendimientos energéticos de las máquinas principales, singularmente de los molinos, y las características y calidades de los productos acabados, sobre todo en lo que se refiere a la finura de los cementos: hoy día, los cementos contienen, con mucha frecuencia, de 5 a 10 % de elementos muy finos (menores de 2,5 micras) cuya acción es más bien perniciosa, y más del 30 % de granos superiores a 30 micras, cuya hidratación, incluso a largo plazo, es dudosa.

Esto conducirá, a corto plazo, a la precalcificación (cocción con dos quemadores), por un lado, y posiblemente a la molienda por separado de los componentes de cementos binarios y ternarios (cuando sus aptitudes a la molturación sean muy diferenciadas), por el otro.

Limitándonos al aspecto técnico, y de modo inmediato, pueden lograrse importantes economías en el consumo energético con el empleo generalizado de adiciones activas, tal como lo contemplan ya algunas Normas o Pliegos de Condiciones.

Nuevas economías de combustible son o serán posibles como consecuencia de la modernización de fábricas, modernización que consistirá en cerrar las viejas factorías, grandes consumidoras de combustible, principalmente las de vía húmeda, sustituyéndolas por modernas y mayores fábricas de vía seca. En este sentido, España, gran parte de la Europa Occidental y el Japón tienen mucho adelantado el haber sido casi suprimida la vía húmeda (que absorbe del 5 al 15 % de la producción total) y disponer de grandes unidades de vía seca con intercambiador (del 50 al 70 % de la producción total).

El empleo de combustibles sólidos, incluso los pobres, como los esquistos y pizarras bituminosas, cuya fracción mineral entra a formar parte del clínker, puede representar una aportación, aunque sólo sea parcial, al problema del ahorro energético.

Una faceta importante del futuro, dentro del campo de la fabricación, será la integración y automatización total del proceso, con un planteamiento y una infraestructura radicalmente nuevos, tendiendo a su simplicidad y amplio dimensionamiento.

Las nuevas fábricas deberán tomar estrictas medidas para evitar el polvo, los ruidos, la radiación de calor y las sacudidas en canteras e instalaciones de explotación, procurando reducir al máximo las perturbaciones o averías en el ciclo de producción, que tantos perjuicios proporcionan al medio ambiente. La emisión de polvo en servicio permanente, que puede ya mantenerse por debajo de $150 \text{ mg/m}^3\text{N}$, es inocuo e insignificante, en comparación con la contaminación producida por la población en grandes ciudades.

En cuanto a gases, se puede decir lo mismo ya que, el azufre, único componente nocivo incorporado en el horno por los crudos o el combustible, se fija, prácticamente en su totalidad, en el clínker.

En cuanto al ruido, se ha reducido ya hasta por debajo de 50 dB a 100 m de los edificios de la fábrica: el tráfico rodado produce mayores molestias.

Lo mismo puede decirse de las sacudidas producidas en cantera, por debajo ya de los valores originados por otras causas.

Futuro en las aplicaciones

Pensando en las aplicaciones futuras, en el campo de los cementos especiales cabe mencionar los de elevada resistencia a corto plazo (uno o dos días). Estos se podrán lograr, y de ello ya existe algún precedente, por incorporación de pequeñas adiciones al crudo de elementos tales como flúor, cromo, manganeso, fósforo, etc., aumentando la finura y dosificando convenientemente el yeso en el clínker.

Un punto débil de los cementos normales es su deficiente durabilidad, por falta de resistencia química en ambientes agresivos, debiendo extenderse en el futuro el uso de cementos mixtos, binarios o ternarios, con este fin.

También será conveniente incrementar el estudio y empleo de los cementos expansivos o cementos de expansión o retracción controlados, de especial interés en las técnicas del pretensado y en la atenuación de fisuras y grietas en el hormigón en general.

En el futuro se incrementará el carácter estético y decorativo de los cementos, exigiendo mayor regularidad de color a los cementos grises y desarrollando en mayor escala los cementos blancos y coloreados.

Por otro lado, aunque en producciones limitadas, se estudiarán y fabricarán cementos densos, especialmente indicados para preparar hormigones con fines nucleares.

El consumo creciente de cemento en forma de hormigón preparado en central exigirá una elevación de su calidad, sobre todo en lo que atañe a su regularidad en comportamiento y propiedades tales como fraguado y resistencia mecánica, dos factores muy a tener en cuenta en la calidad del hormigón y posibilidades de transporte y puesta en obra.

Continuará in crescendo el uso de los aditivos al cemento, pero su empleo racional exigirá una normativa que será consecuencia de un mejor conocimiento, control y ensayo que conducirá a una mayor confianza y seguridad en su aplicación. Esto llevará a la incor-

poración, en parte, de dichos aditivos en fábrica, lo mismo que se hace ya hoy día con los coadyuvantes de molienda.

Un factor, al cual se le está dando una importancia creciente y supone un punto muy discutido a todos los niveles, es el de la normalización, tanto en lo que respecta a las limitaciones en las características como a los métodos de ensayo para determinarlas. Aunque es aventurado presuponer lo que sucederá en el mundo, es evidente que se darán pasos adelante en esa clara tendencia a una normativa única a nivel mundial. Por supuesto, será más fácil llegar a acuerdos internacionales sobre métodos de ensayo que sobre limitaciones que, sin duda, están más supeditadas a condiciones locales (tipos de materias primas, posibilidad de adiciones, climatología y ambiente en la aplicación, desarrollo tecnológico, etc.).

Es lógico que se simplifiquen las limitaciones, singularmente las de tipo químico e, incluso, físico, sustituyéndolas por otras basadas en la regularidad y mejora de las propiedades útiles de los cementos (fraguado, resistencia a la compresión y estabilidad de volumen, principalmente). A ello contribuirán las normas de control de calidad que ya existen en algunos países y que definen perfectamente, principalmente en lo que a categoría resistente se refiere, cualquier clase, tipo o categoría de cemento.

Dentro de los métodos de ensayo ocupa un puesto prioritario el procurar procedimientos rápidos —acelerados— que permitan encontrar en un plazo de horas un equivalente a la resistencia a compresión a los 28 días, según los métodos convencionales. En este sentido no debemos ser optimistas ya que, dada la variedad de origen y composición de los cementos, su reacción al tratamiento térmico es distinta, sin poder establecer una regla que relacione ambas circunstancias. En realidad, con un mismo cemento, de una misma fábrica, es posible deducir relaciones empíricas para controlar rápidamente esta variable; de hecho, hay varias fábricas que emplean un determinado método, tanto ensayando los cementos en forma de pasta como en forma de mortero.

Tratar de buscar un coeficiente de paso que pueda generalizarse es una utopía, ya que hay muchas variables en los cementos (a veces incontroladas) que afectan la curva de endurecimiento (composición química, contenido de cal libre, porcentaje de yeso, composición mineralógica, finura de molido, proporción y estado de componentes menores, relación agua/cemento, compactación, condiciones de tratamiento temperatura-tiempo, etc.).

Ya se han hecho algunos intentos de, incluso, suprimir el método de ensayo de la resistencia de los cementos, sustituyéndolo por un cálculo en el que intervienen las múltiples variables que acabamos de citar anteriormente, lo cual, como siempre, ha conducido a resultados parciales, porque, para conseguir algo más general, debemos saber también algo más sobre el cemento y esto todavía está en manos de la investigación básica.

Queda por establecer o definir un método que valore cuantitativamente la durabilidad química de un cemento. Se han propuesto muchos, en la forma y procedimientos más variados pero, aparte de ser de por sí un problema complejo, donde a la dificultad de interpretación de la hidratación del propio conglomerante se añade la influencia del medio externo, existen tendencias o intereses opuestos a un criterio unificado por parte de los diferentes países. Con todo, esperamos que algo se progrese en este sentido en el futuro.

Después de presentar ante Vds. esta panorámica no me queda más que hacer votos por el éxito de estos coloquios de Directores y Técnicos de Fábricas de Cemento en su sexta edición, éxito que creo asegurado desde el momento que yo les ceda la palabra.