

Los cementos molidos en los molinos verticales de rodillos cumplen con las exigencias de calidad del mercado

Para la producción de cemento es típicamente necesario moler por separado tres tipos diferentes de materiales: el crudo y el carbón antes del horno y el producto final del cemento una vez se ha completado el quemado y se ha enfriado el clinker. Echando la vista atrás hasta hace más de un siglo, los sistemas de molinos de bolas se utilizaban en las tres etapas del proceso, pero el desarrollo de los molinos verticales de rodillos (VRMs) más eficientes que los de bolas ha llevado a su reemplazo. Los molinos verticales de rodillos en un principio estaban enfocados en la molienda de carbón y crudo, pero más recientemente, a finales de los noventa, se han introducido también en la molienda de cemento, dónde las necesidades de molienda son para un producto más fino. La razón principal del retraso de la llegada de la tecnología VRM en la molienda de cemento era la preocupación que tenían los productores en que la calidad del producto no alcanzara las exigencias del mercado, especialmente en tres factores clave: en el consumo de agua, la evolución de resistencias y los tiempos de fraguado. Sin embargo, durante los pasados 15 años se ha podido demostrar que estas preocupaciones eran infundadas y que la calidad del cemento obtenido con los VRM es tan buena o incluso en algunos casos mejor que el producido en un molino de bolas. En consecuencia la mayoría de los principales productores mundiales de cemento más grandes del mundo ahora utilizan sin dudar los molinos verticales de rodillos para la molienda de cemento.

No hay duda que los molinos verticales de rodillos como el molino *Loesche* ofrecen ventajas significativas sobre los molinos de bolas en relación de eficiencia energética. Como se señaló en una reciente publicación (1) el consumo específico de energía de los molinos de bolas es mayor que el de los molinos verticales de rodillos (VRM) en un factor que varía entre 1.5 y 2 dependiendo del grado de optimización del molino de bolas. En la *Fig. 1* se ilustra este aspecto, y también se muestra el incremento del beneficio energético que se puede obtener con un molino vertical de rodillos en la medida que aumenta la finura específica medida según *Blaine*.

Básicamente, los molinos de bolas usan proporcionalmente más energía para producir un producto molido más fino que los VRMs, y mientras que el consumo de energía en los molinos verticales de rodillos es obvio que también aumenta con la finura, lo hace de forma bastante menos rápidamente. De hecho, así como la eficiencia energética es significativa cuando se utiliza un VRM para la molienda de OPC, este beneficio es incluso mayor en el

Palabras clave: CEMENTO, EFICIENCIA, LOESCHE, MOLIENDA, MOLINO DE BOLAS, MOLINO VERTICAL, VRM.

Ing. Dipl. Th. FAHRLAND y Dr.-Ing. K.-H. ZYSK
LOESCHE GmbH, Dusseldorf, Alemania

(El presente artículo ha sido publicado con anterioridad en *Cement International*, 2/2013, Vol. II)

caso de la molienda de escoria de alto horno que es más difícil de moler, como se puede observar en la *Fig. 2*.

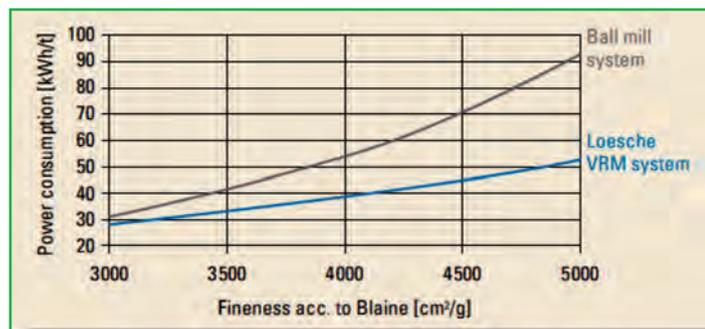
Una vez demostrada la ventaja energética del concepto del VRM sobre el molino de bolas, el resto de este trabajo se centra en diversos aspectos sobre la calidad del cemento, con el objetivo de poner fin de una vez por todas a las ideas anticuadas y sin probar que el cemento de los VRM difiere de forma marcada del producto obtenido en sistemas con molinos de bolas tradicionales. El artículo analiza primero los diferentes sistemas de molienda

disponibles en el día hoy para los productores de cemento, a continuación reflexiona sobre los supuestos problemas de calidad para demostrar que no son justificados ni válidos.

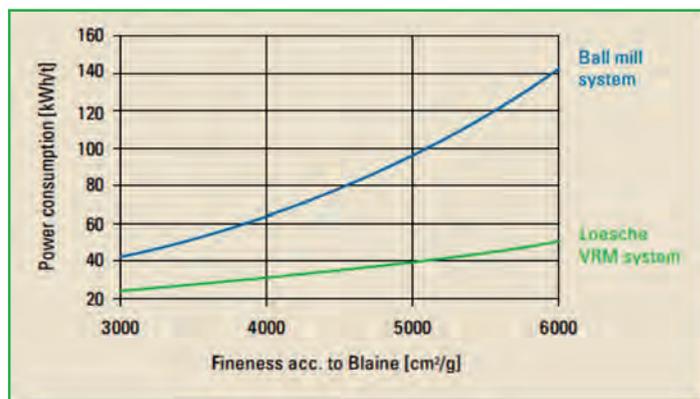
Métodos de molienda

Hoy en día los productores de cemento tienen posibilidad de utilizar diferentes sistemas para la molienda de cemento. Una lista completa de los métodos disponibles sin duda incluye los sistemas de molinos de bolas, los rodillos de alta presión en cada uno de los diferentes diseños y por su puesto en combinación con los molinos de bolas y los molinos verticales de rodillos (VRMs). Todos estos sistemas tratan el material a moler de forma diferente, varían de uno a otro en relación a la molienda que se necesite realizar para lograr las características deseadas. La *Fig. 3* ilustra esquemáticamente varios posibles diagramas de flujo alternativos utilizando VRMs y molinos de bolas.

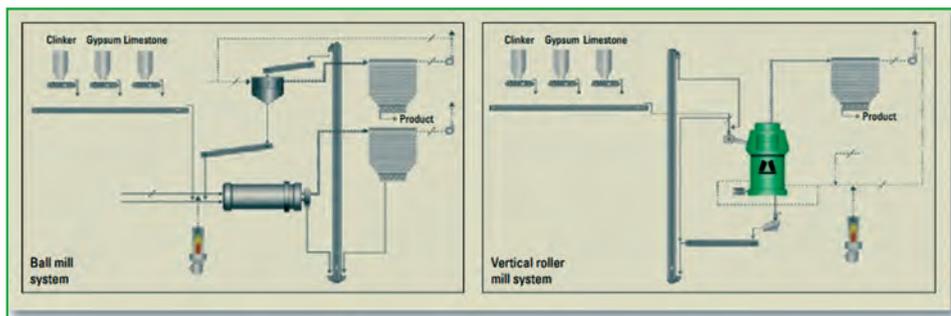
Centrándonos en los molinos de bolas y los VRMs, la *Tabla 1* muestra algunos parámetros



[Fig. 1] .- Consumo específico de energía de un molino de bolas frente un molino vertical de rodillos en la molienda de OPC.



[Fig. 2] .- Consumo específico de energía de un molino de bolas frente un molino vertical de rodillos en la molienda de escoria.



■ [Fig. 3].- Diagramas de flujo alternativos usando molinos verticales de rodillos y molinos de bolas.

comparativos de operación para los dos sistemas cuando son utilizados en la molienda de cemento. Debemos recordar que hay grandes diferencias en el mecanismo de molienda entre los VRMs y los molinos de bolas, en cuanto a cómo se produce la molienda, el tiempo de residencia, el nivel de re-molienda y los factores de recirculación, entre otros.

En un VRM, la trituración se produce a través de fuerzas de presión y cizallamiento ejercidas a través de los rodillos de molienda. En los molinos de bolas, la trituración se produce principalmente por impacto, con las bolas de molienda que se elevan por la carcasa giratoria cayendo de nuevo sobre la carga y sobre otras bolas. También hay algo de fricción.

También hay una gran diferencia en cuanto al tiempo medio de residencia (tiempo que permanecen las partículas en el sistema de molienda antes de abandonar el separador como producto terminado). Incluyendo la molienda en el cuerpo del molino y la recirculación, el tiempo de residencia en un VRM es menos de un minuto, mientras que en un molino de bolas las partículas puede llegar a permanecer dentro del sistema de 20 a 30 minutos. Las partículas individuales de cemento serán molidas de una a tres veces en un VRM antes de llegar al separador, mientras que la molienda repetida en un molino de bolas es virtualmente imposible de contar debido al mecanismo de molienda. Finalmente, mientras que en un molino de bolas tendremos un factor de recircula-

ción de 2 a 3, este se incrementa de 6 a 20 en un VRM, dependiendo de la fuerza de presión, la configuración de las herramientas de molienda, la molidurabilidad del material y la finura del producto requerida. Las diferencias en todos estos parámetros de muestran en la **Tabla I**.

Exponiendo los temas

El primer molino moderno de *Loesche* para la molienda de cemento y escoria fue el **LM 46.2+2** y fue vendido en 1993 a *Taiwan's Lucky Cement Corp.* y se puso en marcha en 1994, para la molienda de cemento de su



planta de Pu Shin. Mientras que los productores de cemento estaban preocupados inicialmente porque la calidad del cemento producido no alcanzara las especificaciones de sus clientes, los resultados de las primeras instalaciones demostraron que las calidades del cemento eran en verdad aceptables para el mercado. Desde finales de los noventa, la mayoría de los productores de cemento cambiaron su

preferencia a los sistemas de los molinos verticales de rodillos.

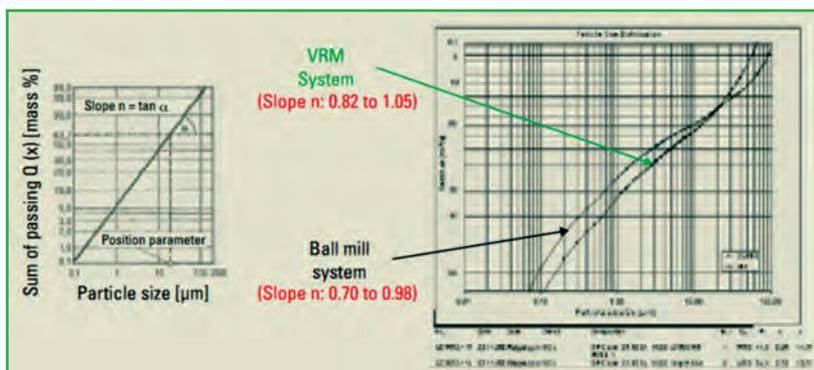
La preocupación de los productores se centraba en tres áreas específicas: que la producción de cemento en los VRM tuviera mayor demanda de agua para obtener una pasta manejable, que los tiempos de fraguado difirieran drásticamente y que la resistencia a la compresión sería menor en comparación con el mismo cemento producido con un molino de bolas. Las supuestas razones para estas inquietudes eran respectivamente: una más inclinada distribución de partículas, las diferentes formas de las partículas producidas en un VRM y una menor deshidratación del yeso. A decir verdad, desde entonces las experiencias de operación han demostrado concluyentemente que ninguna de estas preocupaciones está justificada, y que utilizando los VRM los productores de cemento cumplen en todos los aspectos con las exigencias del mercado.

Distribución del tamaño de partículas

La distribución del tamaño de partículas del cemento normalmente se representa mediante el conocido diagrama RRSB. La **Fig. 4** muestra las curvas de distribución de tamaño de partículas de los cementos producidos en los VRM y en los molinos de bolas. La inclinación de cada curva, la pendiente n , se mide en la posición de los parámetros que representa el diámetro de partícula en la que el residuo en términos de masa es un 36,8%. Un valor n más alto origina una curva más inclinada mientras que cuanto más leve es la pendiente, más finas y sobre molidas son las partículas del producto final para un valor *Blaine* constante, medido en cm^2/g .

La **Fig. 4** muestra que n en el sistema de molienda de cemento en VRM es más pronunciada que en el caso del cemento producido con el sistema de molino de bolas. Esto se debe a la mayor proporción de material fino (sobre molido) presente en el molino de cemento de bolas, que a su vez refleja el mayor

Características	Molino de Bolas (circuito cerrado)	Molino vertical de rodillos
Trituración por	Impacto y fricción	Fuerzas de presión y cizallamiento
Tiempo de residencia [min]	20 a 30	< 1
Aplastamientos antes de clasificación	∞	1 a 3
Factor de circulación	2 a 3	6 a 20
Desgaste [g/t]	~50	3 a 6



■ [TABLA I] .- Comparativa de los parámetros de operación de los dos sistema de molienda de cemento.

■ [Fig. 4].- Diferente distribución de tamaño de partícula.

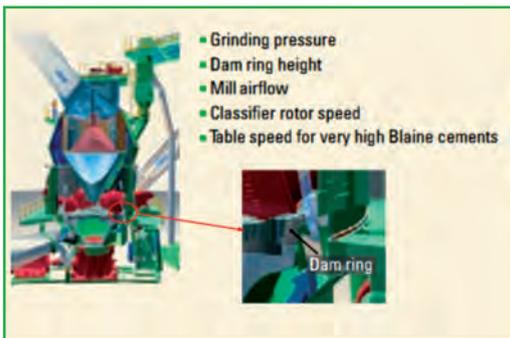
número de impactos y la ineficiencia inherente de la molienda del molino de bolas.

En términos más generales, una distribución del tamaño de partículas en un sistema de molino de bolas, de circuito cerrado con separador de alta eficiencia de tercera generación, estaría entre 0.75 y 0.98. El sistema equivalente de molienda con **VRM** estaría entre 0.82 y 1.05. Estos rangos pueden diferir según el tipo de medidor láser utilizado.

En el pasado la preocupación era que la distribución del tamaño de partículas más pronunciada del cemento producido con el **VRM** llevaría, por ejemplo, a un aumento de la necesidad de agua y a unas resistencias iniciales menores. Esto por supuesto podría producir problemas especialmente en la elaboración de hormigón prefabricado por su sofisticado proceso de producción en relación al ciclo y los tiempos de desencofrado.

La cuestión entonces era preguntarse por la razón de las diferentes pendientes en los diagramas de distribución de tamaño de partículas. Primeramente, y como se explicaba anteriormente, la diferencia proviene del diferente comportamiento de la molienda en el molino vertical y en el molino de bolas que mantiene el material dentro sistema de molienda entre 20 y 30 minutos antes de abandonar el separador como producto final. Las partículas son impactadas repetidamente durante ese tiempo, y como resultado algunas partículas se muelen más de lo necesario. Por el contrario, en el sistema **VRM** la cantidad limitada de molienda sobre cada partícula antes de la separación, evita una sobre molienda innecesaria.

Sin embargo, si se necesita un producto similar a uno existente de un sistema de molino de bolas existente, el **VRM** se puede ajustar para lograrlo. Como se muestra en la **Fig. 5**, se pueden realizar ajustes en la presión de molienda, en la altura del anillo de retención, en el flujo de gas del molino, en la velocidad del rotor del separador, y para cementos con muy altos valores de *Blaine* también en la velocidad de la mesa. La **Fig. 6** muestra el efecto del ajuste de cada uno de estos parámetros en la pendiente de la curva de distribución de tamaño de partículas.

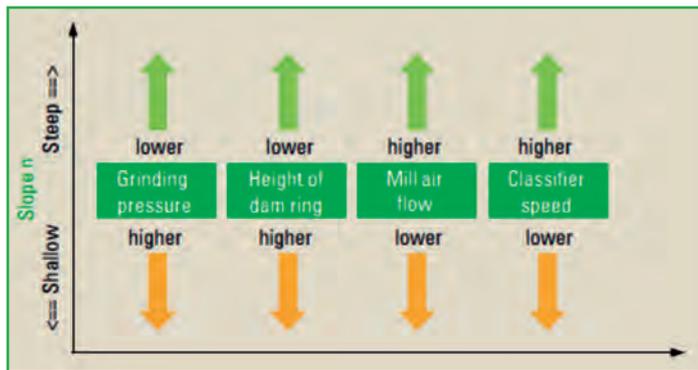


■ [Fig. 5]. - Parámetros de operación.



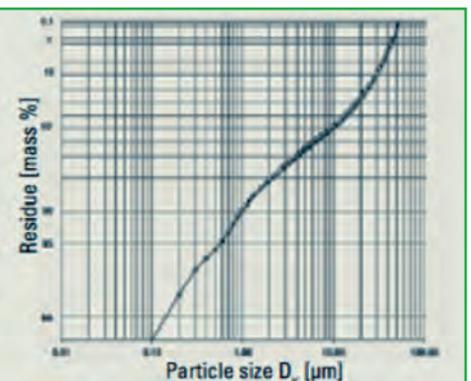
■ Molino vertical de rodillos Loesche (VRM).

Una mayor presión de molienda da como resultado una molienda más intensa con un material más fino, y por tanto a una distribución de partícula más aplanada. La altura del anillo de retención, hace que el material permanezca más tiempo en la mesa de molienda, y a una mayor molienda por ciclo. Esto de nuevo da como resultado una mayor finura y una distribución del tamaño de partícula más tendida. Además, se puede ajustar el flujo de aire y los pará-



■ [Fig. 6]. - Opciones de ajuste para obtener el producto deseado.

Technical properties			
Mill	Unit	VRM	BM
Separator		LSKS	O-SEPA
Density	g/cm ³	3.164	3.152
Blaine	cm ² /g	4258	4095
Slope n	-	0.93	0.92
Position parameter d'	μm	11.7	12.6
Water demand (Standard consistency)	%	28	28.5



■ [Fig. 7]. - Una distribución de tamaño de partículas de acuerdo con las necesidades puede producirse fácilmente dentro de un sistema con molino vertical del rodillos.

metros del separador para conseguir un producto con las características deseadas.

La prueba de trabajo llevada a cabo en 2009 en la planta de Montalieu (Francia) del grupo *Vicat*, han probado de forma concluyente que con estos ajustes se han conseguido a los resultados deseados. El estudio consistió en llevar a cabo al mismo tiempo la molienda de un mismo cemento en un sistema cerrado de con molino de bolas y en una planta de molienda con un molino **Loesche LM 53.3+3**.

La **Fig. 7** muestra algunos resultados de este proyecto, que confirman que los parámetros de posicionamiento, la pendiente de la distribución del tamaño de partículas y la finura del producto de ambos cementos son exactamente los mismos. Además, la demanda de agua de ambos cementos para crear una pasta de cemento con una consistencia estándar es la misma, reflejado por la misma pendiente *n*, parámetros de acotado y valores *Blaine*. Esta prueba ha demostrado de forma práctica que no hay diferencia en las propiedades del material molido con diferentes mecanismos de molienda.

Consideraciones sobre la forma de las partículas

La forma de las partículas ha sido otro tema sobre la cual el molino vertical de rodillos ha sido sometido a escrutinio. Se sugería que las partículas de cemento provenientes del molino de bolas siempre eran mucho más esféricas que las que se obtenían en un **VRM**, las cua-

les eran más planas y alargadas. Esto de nuevo, junto con el tamaño de partículas menos fino, daría como resultado una mayor demanda de agua para la fabricación de la pasta de cemento.

La redondez o circularidad de las partículas puede determinarse a través de medios ópticos como análisis de imagen. Dentro de esas mediciones, la forma de la partícula se cuantifica con valores entre 1 y 0. El valor 1 indica que la partícula es perfectamente esférica, y según se acerca el valor a 0 se entiende que hay un elevado alargamiento, superficies poligonales.

La «Fig. 8 ilustra la distribución del tamaño de partícula de un cemento con una finura de aprox. 4.100 g/cm² según Blaine. Esto muestra que para este cemento en particular la partícula más pequeña es de aprox. 0.1 μm y la partícula más grande es de 52 μm. En general, hay una amplia variedad de cementos que son molidos a diferentes finuras, las partículas más grandes suelen ser de entre 45 y 55 μm.

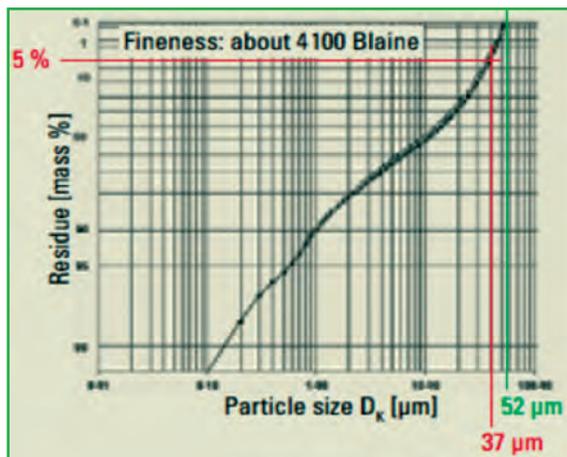
Adicionalmente, el 95% de las partículas de cemento están por debajo de 45 μm, dependiendo de nuevo de la finura del producto final y de la pendiente de la curva de distribución de tamaño de partícula.

Durante las pruebas llevadas a cabo por el VDZ como *Instituto Alemán de Investigación del Cemento*, se compararon las formas de las partículas producidas a través de diferentes sistemas de molienda. En la «Fig. 9 se puede observar un gráfico de las formas de las partículas de cemento provenientes de rodillos de alta presión, molinos de bolas y molinos verticales de rodillos, el tamaño de las partículas se muestra en el eje x y la redondez en el eje y [2].

De este gráfico se deduce claramente que no existe una diferencia significativa en la forma de las partículas del cemento producido a través de estos tres sistemas diferentes de molienda, solo en las partículas de un tamaño alrededor de 58 μm es donde la forma comienza a no coincidir. Sin embargo, esta partícula raramente se encuentra en la mayoría de los diferentes tipos de cemento, y cuando aparece solo lo hace en proporciones muy pequeñas, por lo que no tiene gran influencia en la demanda de agua, resistencias iniciales u otros factores.

Optimización de la deshidratación del yeso

El yeso se agrega al cemento para que actúe como regulador del fraguado, eligiendo la cantidad y tipo de yeso adecuado en función de su solubilidad y del Clinker usado. El fabricante calculará la proporción correcta y tipo de sulfato a utilizar a través de la optimización del



[Fig. 8].- La mayoría de las partículas de cemento son menores de 55 μm y un 95% están por debajo de 45 μm.

producto a fin de alcanzar correctamente los requisitos óptimos.

El calor es introducido en el molino y los gases calientes calentaron el cemento, con la deshidratación parcial del yeso para convertirlo a hemihidrato, llamado yeso cocido. Mezclado con el agua, el yeso hemihidratado se disuelve mejor que el yeso sulfato cálcico, así la dilución es más reactiva en la regulación del fraguado del cemento. La deshidratación parcial es buscada en el proceso de molienda, pero si se produce en exceso o por debajo de cierto valor, puede provocar un comportamiento de falso fraguado. Esto se traduce en problemas para la manipulación de la pasta de cemento.

Como el tiempo de permanencia en un molino de bolas es entre 20 y 30 veces mayor que en un molino vertical de rodillos, el cemento es expuesto a una atmósfera de gas caliente mucho más tiempo. Además, para moler la misma cantidad de cemento el molino de bolas utiliza mucha más energía que el molino vertical de rodillos, con esta energía se produce un calentamiento adicional del material. Por este motivo, en un molino de bolas que opera sin un sistema de enfriamiento por agua la temperatura de las partículas a la salida de

molino es normalmente de unos 30°C más que en molino vertical de rodillos.

Por lo tanto, si la misma muestra de cemento se muele en ambos molinos, la pasta obtenida del cemento molido en un molino vertical de rodillos mostrará diferentes comportamientos en el fraguado y en las resistencias iniciales durante el endurecimiento. Esto se debe a que en el sistema de molino de bolas el yeso es secado más intensamente, dando como resultado la formación de más hemihidrato y por tanto mayor cantidad de sulfato soluble.

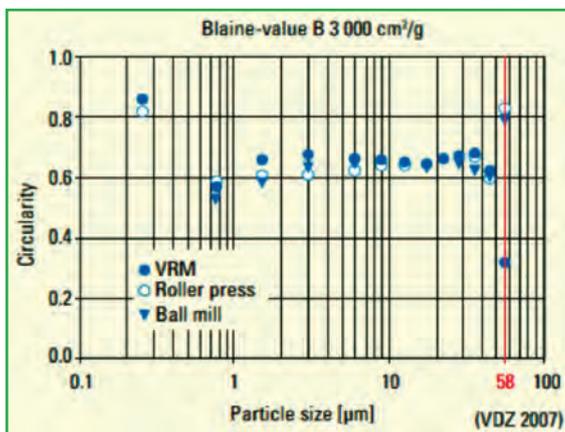
Por supuesto, cada puesta en marcha de un molino requiere una optimización del sistema, incluyendo ajustes en la cantidad de yeso y otros aditivos necesarios para conseguir los correctos valores de comportamientos en fraguado y resistencias iniciales. Esto mismo es de aplicación cuando se cambia de un molino de bolas a un molino vertical de rodillos, cuando el operador necesita aumentar ligeramente la proporción de yeso en el cemento, o sustituir el yeso sulfato cálcico por hemihidratado o anhídrito para incrementar la solubilidad.

Otras medidas de optimización incluyen el aumento de la temperatura a la salida del molino y/o la reducción del contenido de humedad del flujo de gases del molino, ambas medidas mejoran el proceso de secado del yeso adicionado. Como se resume en la Fig. 10 estos son procedimientos estándar para la optimización del proceso que también pueden ser utilizados para asegurar que el cemento producido en los molinos verticales de rodillos tenga los mismos parámetros de tiempo de fraguado y desarrollo de resistencias iniciales que los producidos en molinos de bolas. En parte es cierto que el cemento producido en un molino vertical tiene una menor deshidratación del yeso pero esto se puede ajustado a través de una optimización estándar del proceso.

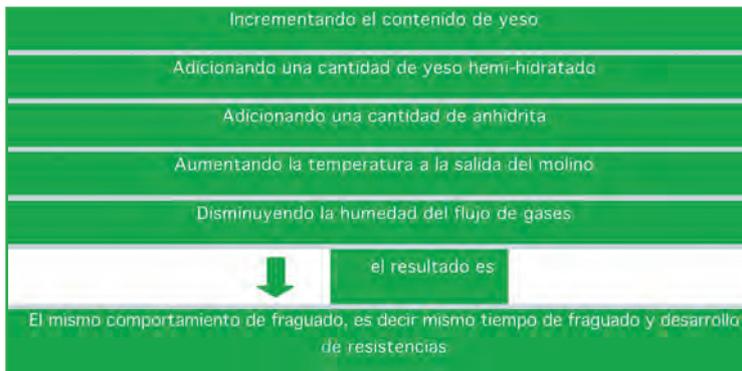
Anotaciones finales

La Tabla II muestra un resumen de los resultados obtenidos en los ensayos de molienda comparativa realizados en la planta de Montalieu en Francia. Mientras que en las características claves tiene unos valores muy parecidos de distribución de tamaño de partícula, acotado de parámetros y finura según Blaine, los resultados muestran que el tiempo de fraguado de los dos cementos es el mismo. En ambos casos el fraguado comienza en aproximadamente 125 minutos y finaliza a los 175 minutos. Además, la resistencias a la compresión y el desarrollo de la resistencias iniciales, medido a los 2, 7 y 28 días, son básicamente exactamente las mismas.

Esto demuestra que el cemento producido en un molino de bolas y en un molino



[Fig. 9].- Forma similar de la partícula de cemento producido a través de diferentes sistemas de molienda.



■ [Fig. 10].- Resumen de la optimización del sistema.

[TABLA II].- Mismos cementos con las mismas características. ■

Designación	Unidad	Molino vertical de rodillos	Molino de Bolas
Separador		LSKS	
Finura según Blaine	cm ² /g	4.258	4.095
Consistencia estándar	%	28	28.5
Comienzo del fraguado	min	130	130
Fin del fraguado	min	175	175
Fuerza de compresión (w/c = 0,5)			
2 días	MPa	29.8	29.9
7 días		38.9	38.6
28 días		57.1	54.1
Consumo específico de energía (medido en el eje)	kW/h	28,6	39,7

vertical de rodillos puede tener las mismas características y cualidades cuando lo requieran los mercados locales, en particular en cuanto a demanda de agua de la pasta de cemento, tiempos de fraguado, resistencias iniciales y evolución de resistencia en los morteros.

Hoy en día, de los 260 molinos *Loesche* vendidos en el mundo, 185 se utilizan para la molienda de productos de cemento. A nivel regional, el porcentaje más alto se encuentra en el este de Asia y en Europa y América que también cuenta con un número significativo de máquinas. También es significativo que el 60% de estos molinos se utilizan para moler más de un tipo de producto, y aproximadamente el 40% es utilizado para la molienda de más de

tres productos. Ciertamente, hoy este sistema de molienda es el más flexible.

Loesche, presente en todo el mundo

Loesche es una empresa orientada a la exportación, dirigida por su propietario, que se estableció en Berlín en 1906. Hoy es una compañía internacionalmente activa con subsidiarias, representantes y agencias en todo el mundo.

Nuestros ingenieros están desarrollando constantemente nuevas ideas y conceptos específicos en tecnología de molienda y procesos de preparación para beneficio de sus clientes. Su competencia se debe principalmente a que gestiona la información a nivel mundial. Gracias a esto se asegura que los

conocimientos y desarrollos actuales puedan ser implantados inmediatamente en nuestros propios proyectos.

Los servicios que prestan las subsidiarias y agencias de la compañía tienen un papel relevante en el análisis, el tratamiento y la resolución de los problemas de los proyectos específicos de nuestros clientes.

LOESCHE
INNOVATIVE ENGINEERING
LOESCHE GmbH
LOESCHE Latinoamericana, S.A.U.
Condesa de Venadito, 1 - 4ª Plta.
28027 Madrid • ☎ : 34 91 458 99 80
E-mail: loesche@loesche.es
Web: www.loesche.com