

sobre la activación del cemento por vibración

G. KNAPE, W. KÖLLING, H. SCHUMANN, H. HENNEK y R. SCHRADER
Silikattechnik, 18, n.º 12, diciembre 1967, págs. 388-394

En la literatura se ha tratado ya, repetidas veces, la fabricación de cementos de alta resistencia por molienda fina en molinos de vibración. Por los ensayos realizados en la Academia de Minas de Freiberg, en el Instituto de Química Inorgánica y Analítica y en la fábrica de productos químicos VEB Coswig, con molinos de vibración semi-industriales de fabricación propia o con molinos de ensayos de la fábrica VEB KEFAMA Katzhütte, se obtuvieron aumentos considerables de la resistencia de cemento. Podía aumentarse la resistencia a compresión de un cemento PZ 350 por molienda en molinos de vibración de laboratorio, después de 28 días, hasta 600 kp/cm², y empleando molinos de vibración semi-industriales, hasta 550 kp/cm². Las resistencias después de 1 día aumentaron hasta 180 kp/cm². Los ensayos realizados en una fábrica de hormigón demostraron que el hormigón, al que se ha añadido cemento molido por vibración, puede desencofrarse ya antes de 24 horas; de este modo, en estas empresas se consigue un aumento notable en la productividad.

1. LA PROBLEMATICA DE LA CREACION DE CAPACIDADES ADECUADAS DE MOLIENDA

La evolución de la técnica de moler en la industria de cemento constituye una de las bases para la obtención de cementos de buena calidad. La intensidad y la capacidad de molienda son dos de los factores más importantes en la elección del sistema. En 1935 los molinos vibratorios descritos por S. Kiesskalt (1) ofrecen una posibilidad para aumentar la intensidad de molienda. Entonces se construyeron en la firma *Siebtechnik* los molinos de vibración de artesa, según R. Freudenberg y S. Kiesskalt, conocidos todavía hoy para contenidos de 50, 150 y 250 l (2). En el año 1940, D. Bachmann describió la marcha del movimiento en molinos de vibración con materiales secos (3) y húmedos (4) y ya en el año 1942 publicó un primer resumen sobre máquinas aptas para la molienda de sustancias compactas (5). En 1940, W. Gründer y H. Stuckmann publicaron sus primeros resultados sobre la molienda finísima de hulla mediante molinos de vibración (6). En 1943, G. Linke en su tesis doctoral fijó las condiciones básicas para el desarrollo de los molinos de vibración de artesa y llegó a la conclusión de que para lograr las condiciones óptimas en la molienda gruesa serían adecuadas barras, y en la molienda fina, bolas (7), subrayando la necesidad de un trabajo continuo en los grandes molinos.

Después de la guerra se continuó con el desarrollo de los molinos de vibración en los estados europeos occidentales. Al mismo tiempo, en la URSS se creó un Centro que, apoyándose en el desarrollo realizado hasta entonces, construyó molinos de vibración que fueron empleados en la industria de la construcción. Los resultados obtenidos en estos trabajos fueron objeto de múltiples publicaciones en los años 1954-59 (8 a 12). Un resumen de los datos de productividad de algunos molinos de vibración empleados en el mercado da una idea aproximada de la situación de la técnica de molinos de vibración (tabla 1).

De dicha tabla 1 puede desprenderse que el consumo de energía difiere considerablemente y que las capacidades de las instalaciones industriales no son todavía suficientes. Hasta ahora capacidades por encima de 5 t/h sólo se han conseguido en fase de investigación, pero en principio son posibles. La construcción de máquinas en Alemania Oriental se ha limitado, hasta la fecha, a unidades más pequeñas, con capacidades máximas de 1... 2 t/hora.

2. REACCIONES MECANOQUIMICAS EN LA INDUSTRIA DE MATERIALES DE CONSTRUCCION

Hasta estos últimos decenios, la mecanoquímica no alcanzó importancia en conseguir crear perturbaciones reticulares en sustancias compactas por acumulación de mucha energía en molinos adecuados. Los trabajos de A. Smekal, G. A. Kowalew, R. Schrader y colaboradores (15 a 17) indican la activación por desplazamiento de los iones de la posición ideal en la red, lo cual conduce a un desnivel en el plano reticular y, con ello, a perturbaciones en el cristal. Además de la molienda y el aumento de superficie de las fracciones compactas creadas por la misma, la creación de perturbaciones de red al mismo tiempo causa un aumento de la energía interior del sólido compacto. La consecuencia de esto es un aumento de la capacidad de reacción de la materia, es decir, de la "actividad" frente a otras partes de reacción. Para esta clase de reacción van bien los molinos de vibración como complemento adecuado. La gran aceleración centrífuga de las bolas con pequeñas amplitudes, junto con el efecto de fricción, provocan la transferencia de golpes con mucha energía al producto a moler. Las fuerzas medias de golpe para bolas de acero son de más de 666 kp/mm². G. Naeser y W. Scholz (18) trataron en un molino de vibración de acero, cemento durante 15 min y después de 28 días alcanzaron aumentos de resistencia considerables en comparación con el material sin tratamiento. Una muestra paralela del cemento original la calentaron a 500°C 2 horas y después de 28 días reconocieron pérdidas notables de resistencia. Una molienda por vibración del cemento enfriado, después de 28 días, volvió a conseguir un aumento considerable de la resistencia (tabla 2).

T A B L A 2

Comparación de la muestra original con la muestra calentada. Resultados (kg/cm²)

Cemento	Muestra original		Muestra calentada	
	Resistencia a flexión	Resistencia a compresión	Resistencia a flexión	Resistencia a compresión
sin activar	70	340	46	219
activado	98	586	80	503

T A B L A 1

Características de molinos vibratorios continuos y discontinuos. Todas las características proceden de folletos de las firmas respectivas según la literatura (10)

Pais/Firma	Tipo	Volumen total, volumen útil (l)	Producción o carga de molienda (kg · h ⁻¹) (kg)	Consumo de energía (kW)	Número de recipientes	Peso por recipiente (kg)	Número de oscilaciones, número de vueltas (min ⁻¹)	Peso de elementos molidos (kg)	Longitud (mm)	Anchura (mm)	Altura (mm)	Tipo de trabajo
Alemania Oriental KEPAMA Katzhütte	LSO6	0,45	0,3	0,3	1	0,4		30	700	700	300	discont.
	LS/VO6	0,690		0,4	1		675	130	500	465	880	discont.
	LS 16	1,25	0,7	0,65	1	1,25		60	700	800	300	discont.
	LS 60	4,50	3	1,5	1	4,5		100	1000	1000	400	discont.
	SM 50	125		7,5	1	450	1400	760	2320	1050	1000	discont.
	SM 50	50										
	SM 125	470		17	1	1750	1400	2000	3330	2000	1450	discont.
	SM 125	125										
KSM 2 V	160	3,3	20—50	2,2	2	125	800—2800	300	2120	740	1700	cont.
	KSM 2 V	2054	1000—1500	55	2	6500	1000	6500	5000	1930	2600	cont.
	630											
Ucrania Compañía Exportadora "Maschinen- export"	M-10-3	10	≈ 3	4,5	1	36	3000	730	1000	400	720	cont.
	M-50-3	50		14	1	185	3000		1570			cont.
	M-200-1,5	200		14	1	740	1500		1980			cont.
	M-200-3	200		20	1	740	3000		1980			cont.
	M-400-1,5	400		32	1	1480	1500		2570			cont.
	M-400-3	400		50	1	1480	3000		3780			cont.
	M-1000-2	1000		70	2	3700	1500	14000	5130	3250	6320	cont.
	M-1000-3	1000	≈ 5000	163	3	3700	3000	14000	5130			cont.
Checoslovaquia Strojexport		20	10—12	6,5	1	75	2880	370*				discont.
		200	100	24	1	750	1440	1860*				discont. y cont.
Inglaterra Pilamec	Megopact	0,33	0,45—2,2	0,1	2		2800	30	430	300	300	discont. y cont.
	Vibromill		9—45	1,1	2		2800					discont. y cont.
Alemania Occidental Salzgitter AG	RS 50/2 V	3800	200—1000	20	2		1000	3000	4000 ¹⁾	1400	1950	cont.
	RS 50/2 H	3800	400—2000	20	2		1000	3000	4000 ¹⁾	1950	980	cont.
	RS 70/2 V	7500	500—2500	50	2		1000	3000	3750 ¹⁾	1760	2450	cont.
	RS 70/2 H	7500	1000—5000	50	2		1000	3000	3750 ¹⁾	2450	1315	cont.
Siebtechnik GmbH Mühlheim (Ruhr)	SM 0,6	0,6			2	6,6 ²⁾	1500	17 ³⁾				discont.
	SM 6	6			4	30 ²⁾	1500	276 ³⁾				discont.
	USM 6	6			4	30 ²⁾	1500	350 ³⁾				discont.
	USM 12	12			4	30 ²⁾	1500	450 ³⁾				discont.
	SM 20	20			4	83 ²⁾	1500	276 ³⁾				discont.
	SM 10	40			1	135 ²⁾	1500	300				discont.
	SM 10	10										
	SM 165	165			1	575 ²⁾	1500	920				discont.
	SM 50	50										
	SM 125	470			1	1610 ²⁾	1500	1000				discont.
	SM 125	125										
SM 250	840			1	3000 ²⁾	1500	2500				discont.	
SM 250	250											
SM 500	1700			1	2450 ²⁾	1500	3200				discont.	
SM 500	500											
RSM 20	150	< 200	^ 5	4	555 ²⁾		≈ 1000				cont.	
RSM 40	1250	< 1000	^ 20	4	4500 ²⁾		≈ 6000				cont.	
RSM 55	3320	< 5000	^ 60	4	12000 ²⁾		≈ 11000				cont.	
Aubema Bergneustadt	3120/45	90	50—200	4	2	300 ⁴⁾		500				cont.
	3130/20	300	200—500	10	2	1000 ⁴⁾		1100				cont.
	3145/25	800	500—2000	30	2	2800 ⁴⁾		2800				cont.
Glöckner- Humboldt- Deutz A G Köln	Palla 35 U	≈ 700		18,5	2	1100 ⁴⁾	1000		2860	1060	1520	cont.
	Palla 50 U	≈ 1700	1500	55	2	3500 ⁴⁾	1000		3920	1550	2370	cont.
	Palla 65 U	≈ 2900	3500—10000	132	2	7000 ⁴⁾	1000		4950	1850	2900	cont.

* Con elementos de molienda.—1. Con motor.—2. Masa de los elementos de molienda (acero); con recipiente.—3. Sin recipiente.—4. Masa de los elementos de molienda (acero).—5. Porcelana.—6. 80 % de llenado.

No se indicaron cambios en la superficie a consecuencia del calentamiento a 500°C, de manera que todavía no se ha comprobado la activación, aunque ya se alude su posibilidad.

En las publicaciones de investigación en el sector del cemento en Rusia, se da gran importancia a la molienda fina de cemento en molinos de vibración (19 a 21). Los trabajos teóricos de *P. A. Rehbinde* en el campo de la molienda más fina y de la tecnología moderna para la fabricación de hormigón por molienda vibratoria (22) y (23) han contribuido esencialmente a la introducción de este método de moler en la industria de la construcción de la Unión Soviética.

Los cementos de mezcla fabricados también según este método han causado un aumento de la rentabilidad de las obras realizadas en la URSS. Los trabajos de *A. W. Wolshenski* y *L. N. Popow* (24), del año 1961, sobre la fabricación de hormigón de "sandzement" por medio del molino de vibración, excluyendo el cemento portland, son de los más interesantes en este sector. Como material de adición emplearon no solamente arena, sino también escorias. Sobre el empleo de materiales de adición existen múltiples publicaciones (25 a 29).

Parecen especialmente interesantes los informes de *N. I. Wasiljew* y *J. A. Antonow* (30) sobre la fabricación empleando la molienda por vibración de bloques y otros productos de la construcción para el ferrocarril de Turquestán a Siberia.

Tampoco es desconocido en la URSS el desarrollo de cementos impermeables al agua y resistentes a la helada a base de molienda por vibración (31). Son de interés extraordinario las resistencias finales alcanzadas en las piezas fabricadas sobre esta base, llegando a valores de GOST 1.000 kp/cm², al emplear cementos portland de la calidad GOST 500 kp/cm². Las superficies necesarias para esto según las indicaciones soviéticas (32), están entre 4.500 y 5.000 cm²/g, según *Blaine*. Para la introducción de este método en la práctica son importantes las publicaciones de *I. I. Cholin* (33), *H. Grimme* (34), y *K. Weigert* (35), sobre la inalterabilidad de los cementos así tratados. Afirman que los cementos, ya después de pocos días, pierden su carácter activo y que por eso es necesario el uso inmediato del cemento en la obra. De ahí que la molienda por vibración también tendría que tener lugar en la obra misma; punto este que la industria de cemento estima interesante, aunque en muchos casos resulta demasiado caro.

El empleo de medios auxiliares para la molienda del cemento (36 a 38), incluyendo la molienda por vibración, ha conducido a efectos aún mayores que los logrados con los procedimientos convencionales (39). *Beke* (40), informa sobre la molienda del cemento por vibración en cuanto a la eficacia de la granulometría sobre el tiempo de fraguado del cemento.

Animado por los trabajos de *R. Schrader* y colaboradores, en el sector de la mecanoquímica (41 a 44), en 1964 se comenzó en la fábrica de productos químicos VEB de Coswig a valerse de los conocimientos descritos sobre la molienda más fina de cemento y examinarlos cuidadosamente. Se empleó para esto un cemento portland de la calidad PZ 350 producido según el método *Müller-Kühne* para la fabricación del ácido sulfúrico y cemento.

3. ALGUNOS ENSAYOS TECNICOS CON CEMENTOS ACTIVADOS POR VIBRACION REALIZADOS EN LA FABRICA DE COSWIG

3.1. Características del material de salida

El PZ 350 producido en Coswig, al tener lugar los ensayos correspondía en todos sus parámetros químicos y físicos a los TGL. Los datos aquí mencionados solamente dan una idea de las características más importantes (tablas 3, 4 y 5).

T A B L A 3
Análisis químico del material de salida

Determinación	% en peso		
CaO	66,40	Standard de cal:	103,4
SiO ₂	19,56	Módulo silicatos:	2,11
Al ₂ O ₃	6,63	Módulo fundentes:	2,52
Fe ₂ O ₃	2,63		
MgO	1,65		
SO ₃	2,02		
S ⁼	0,34		
Cal libre	1,26		

T A B L A 4
Retracción de los cementos portland no activados

Edad	Retracción (mm . m ⁻¹)
28 días	0,437
56 días	0,681
90 días	0,720

T A B L A 5
Resistencias de los cementos portland no activados

Edad	Resistencia a tracción (kp/cm ²)	Resistencia a compresión (kp/cm ²)
3 días	30	150
7 días	40	225
28 días	60	360

3.2. Investigaciones adicionales

Los ensayos se realizaron en dos molinos vibratorios de doble tubo en escalas piloto e industrial, que fueron desarrollados por el Instituto de preparación de máquinas de la Universidad técnica de Dresden (Dir. Prof. Dr. *Weinrich*) y del Instituto de Química Inorgánica y Analítica de la Academia de Minas, en Freiberg (Dir. Prof. Dr. *Schrader*) y fabricados por la fábrica química VEB de Coswig, o sea, de VEB KEFAMA Katzhütte (figuras 1 y 2 y tabla 1). Para la molienda en el laboratorio se utilizó un molino de vibración del VEB KEFAMA Katzhütte.

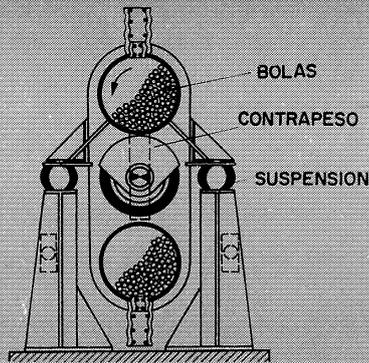


Fig. 1.—Esquema del molino vibratorio de escala piloto KSM 2 V 160.

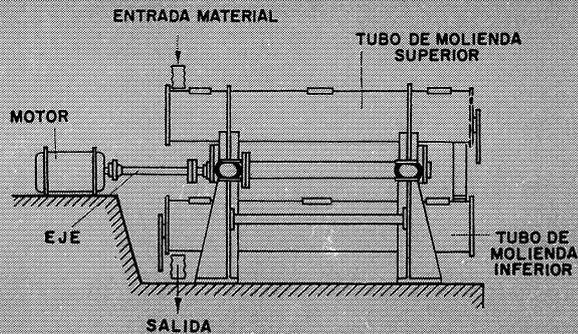


Fig. 2.—Esquema del molino vibratorio industrial KSM 2 V 630.

3.3. Resultados del ensayo

3.3.1. Resistencias

Estos ensayos técnicos van precedidos por otros en un molino de laboratorio. En éstos se consiguieron resultados máximos para las resistencias finales hasta 630 kp/cm^2 después de un tiempo de activación de 20 min (figura 3). Frente a las resistencias finales exigidas

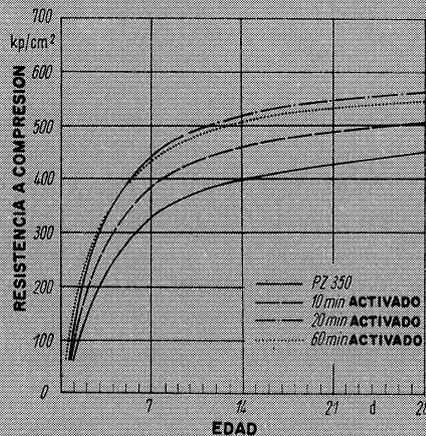


Fig. 3.—Resistencia a compresión del cemento PZ 350 activado, en función del tiempo de tratamiento y de la edad.

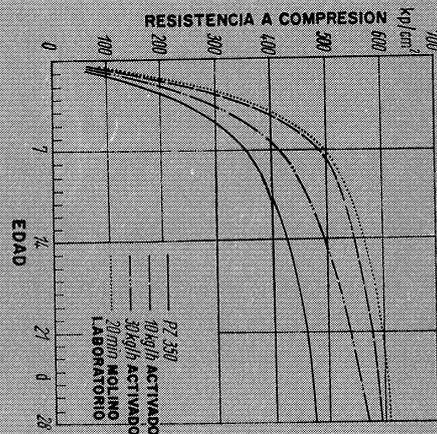


Fig. 4.—Resistencia a compresión del cemento PZ 350 activado, en función de la producción del molino.

según TGL, las resistencias después de la molienda se dejan aumentar hasta en un 16 %, siendo la duración de la molturación, claro está, de la mayor importancia. De la figura puede desprenderse que el tiempo óptimo de activación es de 20 min. Mientras que la activación después de 10 min todavía no está terminada, las resistencias se disminuyeron considerablemente cuando el tratamiento se prolonga hasta 60 min. Además es interesante señalar que la resistencia final según TGL ya se consiguió después de 4 días aproximadamente. Las resistencias a primera edad adquirieron valores de 160 ... 190 kp/cm², después de 1 día.

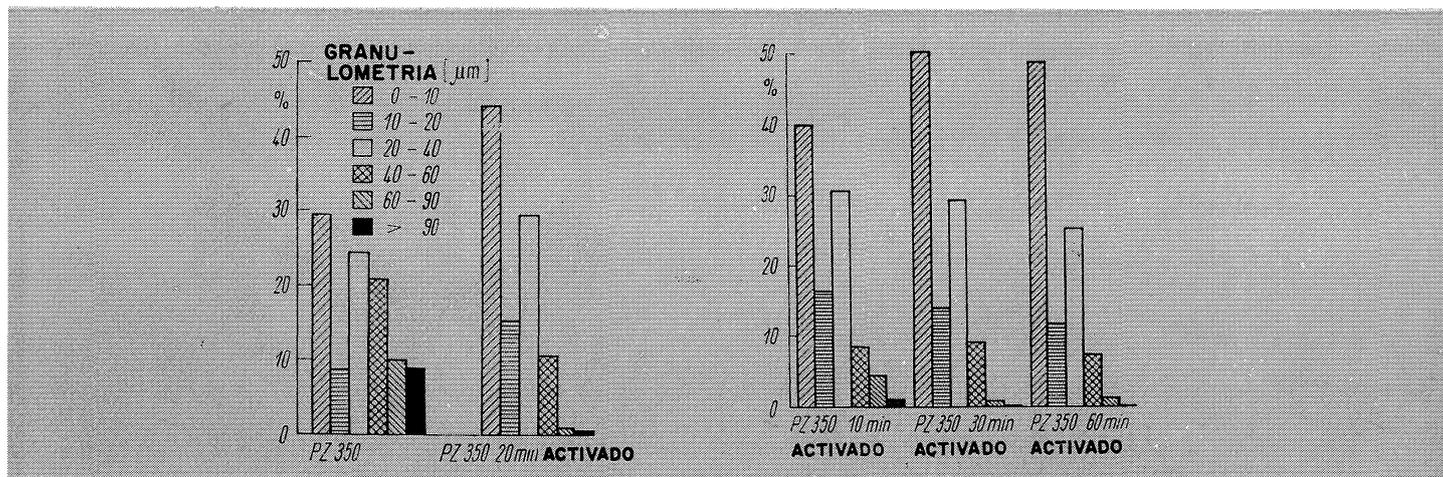


Fig. 5.—Granulometría del PZ 350 activado (0 y 20 min).

Fig. 6.—Granulometría del PZ 350 activado (10, 30 y 60 min).

Al prolongar la duración del tratamiento, la finura Blaine aumenta considerablemente y, por el contrario, surge una disminución en las resistencias. Es necesario tener en cuenta que la relación agua/cemento según TGL ya no es suficiente y que hay que aumentar la adición de agua al prolongarse la molienda más de 40 min. Las modificaciones en el hormigón a consecuencia de esto, sobre todo en el tamaño de los poros, influyen de manera negativa en las resistencias. Este fenómeno tiene influencia en la duración óptima de la molienda. De momento se ensaya si la adición de plastificantes puede mejorar los resultados. En la figura 4 se calcularon las cargas de un molino de vibración piloto en función de la resistencia óptima. Frente a la carga de 30 kg/h puede reconocerse que 10 kg/h, en las condiciones actuales, produce un coeficiente óptimo.

En la química del cemento, la cuestión de la granulometría es de la mayor importancia. Una confrontación del espectro de tamaños de un PZ 350 en las figuras 5 y 6, demuestra que la activación lleva consigo, en todo caso, un aumento de la fracción fina en el cemento. Llama la atención la fracción de 0 - 10 µm, que en el cemento molido durante 30 min consigue la mayor proporción. Las fracciones 10 - 20 y 20 - 40 µm presentan las mayores proporciones por un tiempo de molienda de 10 min. Las diferencias en tanto por ciento de las fracciones granulométricas en cementos molidos por vibración son pequeñas en el caso expuesto. Esto indica, probablemente, una posible activación de las partículas en la molienda por vibración. La comprobación de este supuesto será reservada para otros trabajos.

3.3.2. Mezclas de cemento activado y no activado

De una serie de ensayos realizados con 10, 15, 20, 25 y 40 % de cemento activado, resulta que la relación de 80 % de cemento inactivado y 20 % de cemento activado permite un aumento hasta del 50 % en las resistencias del cemento sin activar (figura 7). El óptimo

descrito 8:2 hace llegar a la conclusión de que es preciso tener en cuenta la relación de mezclas. Hay que considerar qué ahorro de energía será posible cuando se reduzca el grado de molienda en los molinos de bolas y se establezcan las resistencias exigidas por adición de cemento activado.

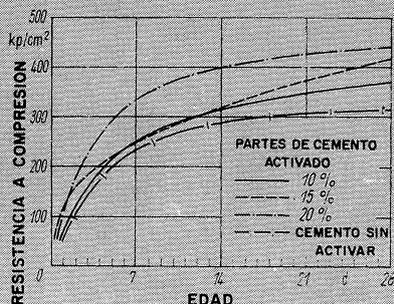


Fig. 7.—Mezcla del cemento activo con cemento sin activar.

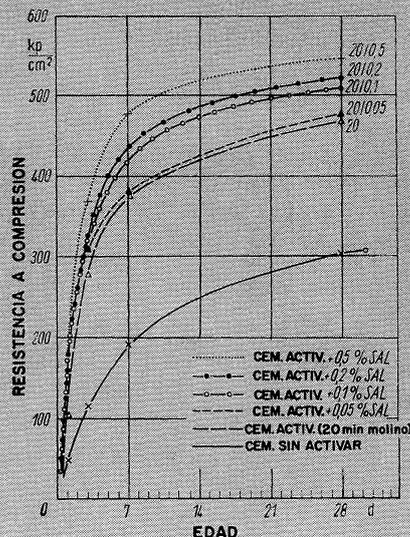


Fig. 8.—Molienda con vibración y adición de 0,05 a 0,5 % de lejía sulfúrica a un cemento almacenado.

3.3.3. El empleo del auxiliar de molienda —lejía sulfúrica— en el tratamiento por vibración de cemento PZ 400 después de un almacenaje de medio año en sacos de papel

Reinsdorf (39) describe el empleo ventajoso de coadyuvantes para la molienda por vibración. Para el mencionado cemento almacenado y molido por vibración era posible un aumento adicional de las resistencias de un 31 %, que asciende en comparación con el cemento de partida, hasta un 179 %. Se han realizado los ensayos con cantidades diferentes de lejía sulfúrica entre 0,05 ... 0,5 % (figura 8). Como las adiciones de lejía sulfúrica en forma desleída se distribuyen difícilmente, era complicado conseguir valores reproducibles.

4. DETERMINACION DE UNA CONSTANTE DE MOLIENDA AL ACTIVAR EL CEMENTO

Para averiguar los coeficientes óptimos de los molinos empleados se examinaron, con producción constante de 15 kg/h, las consecuencias cambiando el número de revoluciones, las excentricidades y la carga de bolas, estableciéndose los correspondientes consumos de energía. Con cargas de bolas de 70 y 80 % se establecieron aceleraciones de 50, 60, 70, 80 y 90 ms^{-2} y se examinó el cemento molido en cuanto a resistencias y superficie Blaine (figura 9).

De la observación de los ensayos resultó que con una carga de bolas de 70 % y con la mínima excentricidad, se consigue la mayor resistencia inicial con una aceleración de $r\omega^2 =$

= 70 ms^{-2} . Con una carga de bolas de un 80 % y con la mínima excentricidad, los mejores resultados se consiguieron para una aceleración de $r\omega^2 = 90 \text{ ms}^{-2}$, teniendo que hacer notar que un aumento de la carga de bolas a un 80 % del espacio disponible contribuye considerablemente al aumento de la resistencia a las primeras edades.

En los diagramas de las figuras 10, 11 y 12 puede observarse la influencia de la aceleración del molino. Se ven claramente las diferencias entre las posiciones de distinta excentricidad, representando la posición 6 la excentricidad más pequeña. Los datos se refieren a las resistencias a 3, 7 y 28 días, y muestran diferencias notables entre las resistencias iniciales y finales.

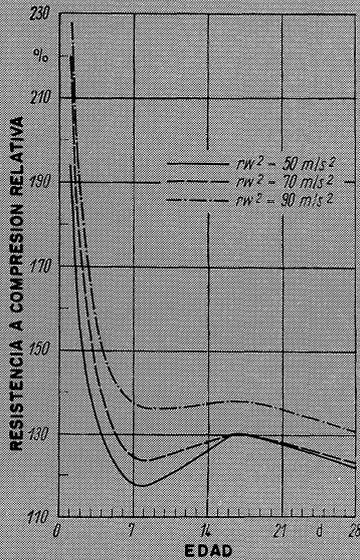


Fig. 9.—Resistencia a compresión relativa del cemento PZ 350 activado, frente al PZ 350 normal, en función de la edad (80 % de carga de bolas, excentricidad mínima y aceleraciones $r\omega^2 = 50, 70$ y 90 ms^{-2}).

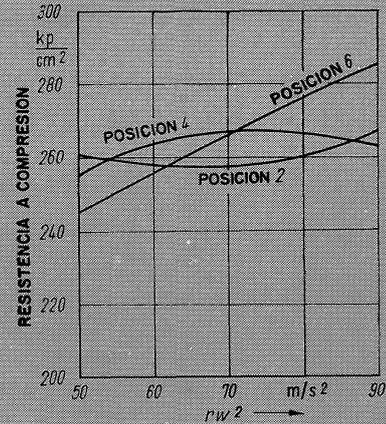


Fig. 10.—Resistencia a compresión a 3 días del cemento PZ 350 activado, en función de la aceleración.

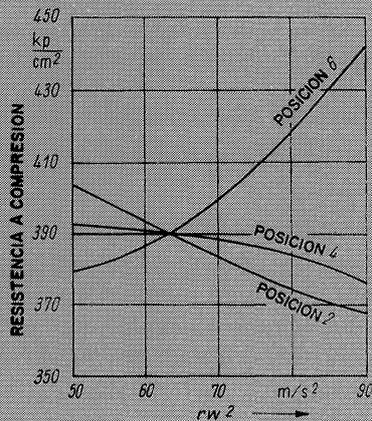


Fig. 11.—Resistencia a compresión a 7 días del cemento PZ 350 activado, en función de la aceleración.

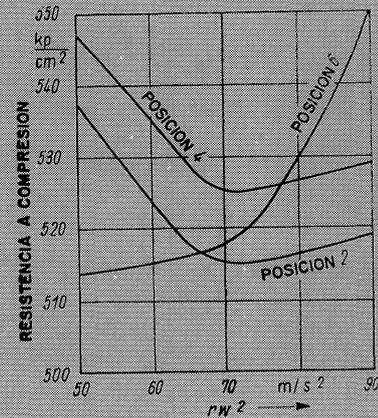


Fig. 12.—Resistencia a compresión a 28 días del cemento PZ 350 activado, en función de la aceleración.

Otros ensayos se refieren a la definición de la amplitud óptima de vibración. Para una carga de bolas de un 70 % y una aceleración de 70 ms^{-2} , se dio un radio óptimo de 3 mm; y para una carga de bolas de un 80 % y aceleración de 70 ms^{-2} , el radio es de $r = 3,4$ milímetros.

El consumo de energía aumenta cuando crece la aceleración. Cuanto mayor es la excentricidad tanto mayor es el rendimiento. Con radios menores, baja el consumo de energía. Como el óptimo de la activación de cemento también requiere radios reducidos, estas averiguaciones pueden tener una influencia favorable en este método. No se tomaron en consideración las cantidades de cemento en los tubos del molino en función de la posición de la excentricidad. Como se trata de medidas hechas durante la molienda continua en molinos tubulares de vibración, al cambiar las condiciones del ensayo, manteniendo constante la carga, cambia la cantidad de cemento que se encuentra en los tubos.

5. EXAMEN TECNOLÓGICO DEL CEMENTO MOLIDO POR VIBRACION EN LA INDUSTRIA DE HORMIGON

Los resultados favorables conseguidos en el laboratorio y en escala semitécnica requerían, para su confirmación, una comprobación en escala técnica en una fábrica de piezas prefabricadas de hormigón. Aquí son de extraordinario interés las altas resistencias iniciales del hormigón, ya que una fábrica de hormigón de tipo medio sin instalación de curado al vapor propia tiene que adaptar su capacidad de producción a las condiciones del fraguado. Para vaciar rápidamente los lugares de producción es necesaria una resistencia en el apilado de los productos de por lo menos 100 kp/cm^2 . Este valor al emplear PZ 350 normal solamente se alcanza después de 2 ... 3 días.

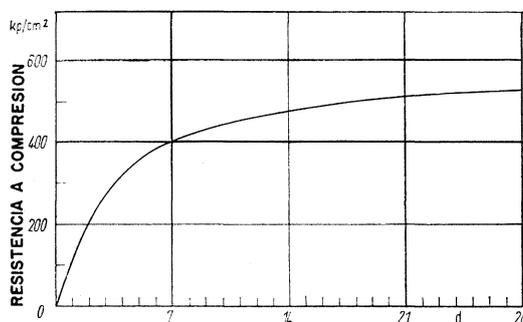


Fig. 13.—Resistencia a compresión, en función de la edad, en el cemento PZ 350 activado en molino industrial.

Para la realización del ensayo en gran escala era necesaria la activación de 15 t de PZ 350. Para ello se empleó el molino de vibración industrial (descrito en la tabla 1) del VEB KEFAMA Katzhütte en el centro técnico de molienda de la Academia de Minas de Freiberg. Como se trataba de la primera vez que se empleaba, no pudo lograrse un rendimiento óptimo. No eran posibles aceleraciones por encima de 50 ms^{-2} , y el número de revoluciones máximo era de 1.000 min^{-1} . Por razones constructivas, el grado de llenado era de 40 a 50 %. Estas condiciones tenían una considerable influencia en el rendimiento y en el efecto de activación del molino, de manera que al emplear PZ 350 las resistencias a

compresión, a los 28 días, sólo podían ascender a 530 kp/cm^2 aproximadamente (figura 13). El cemento así tratado se transformó, en una fábrica de hormigón de tipo medio, en piezas prefabricadas con las calidades de hormigón de B 225 y B 300.

En los diagramas de las figuras 14 y 15 se ven mejor las características más destacadas del cemento activado por vibración. Ya después de 22 h se alcanzó la resistencia para el apilado de las piezas fabricadas, de forma que pudo realizarse el transporte de los elementos constructivos del lugar de fabricación al lugar de pila. La resistencia final alcanzada en la calidad de hormigón 300 al emplear PZ 350, después de 28 días, era de 341 kp/cm^2 , lo que demuestra que los valores alcanzados en escala semitécnica también se consiguen en

la práctica industrial. Durante el ensayo en gran escala las temperaturas bajaron hasta $-6,5^{\circ}\text{C}$, lo cual no llevó consigo ningún daño en las piezas fabricadas. En resumen, como resultado de estos ensayos industriales puede decirse que los cementos altamente activados pueden producirse en molinos de vibración con las siguientes características:

- aceleración: hasta cerca de 100 ms^{-2} ;
- grado de carga con bolas de acero de $10 \text{ mm } \varnothing$: 80 %, por lo menos;
- número de revoluciones: 2.000 min^{-1} ;
- amplitud: hasta 6 mm;
- duración de la carga en el molino: aproximadamente 20 min.

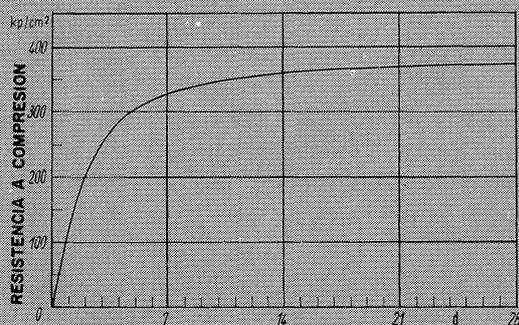


Fig. 14.—Resistencia a compresión, en función de la edad, en el hormigón B 300 (activación en molino vibratorio semi-industrial).

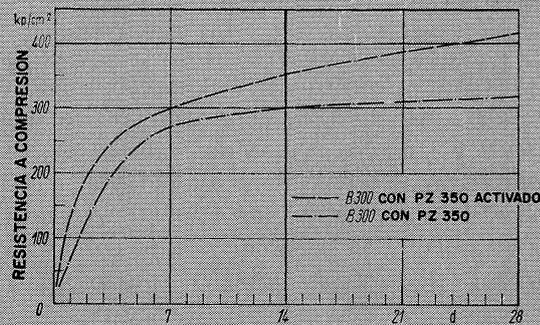


Fig. 15.—Resistencia a compresión, en función de la edad, en el hormigón B 300 con cemento PZ 350 normal y activado (activación en molino vibratorio industrial).

Las capacidades de los molinos al emplearlos en fábricas de hormigón tendrán que ser de 3 ... 5 t/h. De este trabajo se deduce que los molinos pueden asimismo emplearse en la industria de cemento. Sin embargo, a consecuencia de la gran producción, las capacidades tendrían que ser de más de 10 t/h. De la tabla 1 se desprende que los molinos con capacidades de producción de hasta 5 t/h son corrientes y que los de mayor capacidad quedan todavía por desarrollar.

bibliografía

- (1) KIESSKALT, S.: *Aus der Entwicklung schwingender Arbeitsmaschinen für die Verfahrenstechnik*. VDI-Ztschr. Beih. Verf.-Techn. 1. (1936) S. 1.
- (2) FREUDENBERG, R.: *Erfahrungen beim Bau von Schwingmühlen*. VDI-Ztschr. Beih. Verf.-Techn. (1941). S. 106/107.
- (3) BACHMANN, D.: *Bewegungsvorgänge in Schwingmühlen*. VDI-Zeitschr. Beih. Verf.-Techn. (1940). Nr. 2. S. 43.
- (4) BACHMANN, D.: *Untersuchung von naß arbeitenden Schwingmühlen*. VDI-Zeitschr. Beih. Verf.-Techn. (1940) Nr. 3, S. 82.
- (5) BACHMANN, D.: *Die Entwicklung der Schwingmühle*. Chem. Technik 15 (1942) S. 195.
- (6) GRÜNDER, W., u. STUCKMANN, H.: *Die Grenzen der Mahlbarkeit von Steinkohle in Schwingmühlen*. Der Bergbau (1940) S. 107.
- (7) LINKE, G.: *Entwicklung der Schwingmühle für größere Mahlungen unter besonderer Berücksichtigung der Mahlkörperbewegung in schwingenden Behältern und der Form des Mahltröges*. Dissertation, Freiberg/Sa. 1943.
- (8) GRÜNDER, W.: *25 Jahre Schwingmühle*. Staub 49 (1957) S. 214.
- (9) BATEL, W.: *Einfluß der Gasatmosphäre auf den Zerkleinerungsvorgang in Schwing- u. Rohrmühlen*. Chem.-Ing.-Techn. 30 (1958) S. 651.
- (10) GWOSDAROW, E.: *Die Schwingmahlung — ein neuer Erfolg der sowjetischen Technik*. Stroit. mat. 5 (1955) S. 12.
- (11) SAPOSHNIKOW, M.: *Die Konstruktion der Schwingmühle und die Grundlage ihrer Berechnung*. Stroit. mat. 5 (1955) S. 12.
- (12) GRIMME, H.: *Schwingmühlen und ihr Einsatz bei der Herstellung von Bindemitteln*. Zement — Kalk — Gips 9 (1956) S. 362.
- (13) LANDSBERG, L.: *Anforderungen an die Feinung der Bindemittel und an die Schwingmühlen*. Baustoffindustrie 4 (1961) 8, S. 212, 213.
- (14) VEB KEFAMA Katzhütte, Firmenprospekt.
- (15) SMEKAL, A.: *Über den Reaktionbeginn bei Umsetzungen zwischen festen Phasen*. Angew. Chem. A. 60 (1948) S. 255.
- (16) KOWALEW, G. A.: *Einfluß der trockenen Verreibung einer Substanz auf den Charakter des Debyogrammms*. Chem. Zbl. (1958) S. 4711.
- (17) SCHRADER, R., und TETZNER, G.: *Die mechanische Aktivierung von natürlichem Magnetit gegenüber Schwefelwasserstoff*. Z. anorg. allg. Chem. 309 (1961) S. 55.
- (18) NASER, G., und SCHOLZ, W.: *Aktivierung und Passivierung von chemischen Reaktionen und Sintervorgängen durch mechanische Bearbeitung*. Ber. Dtsch. Keram. Ges. 39 (1962) S. 107.
- (19) MATZKIN, B. M.: *Das Nachmahlen von Zement auf Vibrationsmühlen in einem Eisenbetonwerk*. Beton u. Eisenbeton (UdSSR) (1958) März, S. 111.
- (20) SHTACHERMANN, J. J.: *Vibroaktivierung von Zement und Beton*. Gidrotechn. stroi. 29 (1959) S. 18.
- (21) BABUSCHKINA, M. I., u. BRINDY, G. R.: *Einfluß einer zusätzlichen Vibrationsmahlung auf die Erhärtungsgeschwindigkeit und die Festigkeit von Betonen*. Beton und Eisenbeton (UdSSR) (1958) Nov. S. 432.
- (22) REHBINDER, P. A.: *Schwingmahlung, die wirksamste neuzeitliche Feinzerkleinerungsmethode*. Stroit. mat. 2 (1956) S. 8 — 10.
- (23) REHBINDER, P. A.: *Mitteilungen der Akademie der Wissenschaften der UdSSR* 32, Nr. 10 (1957).
- (24) WOLSHENSKI, A. M., u. POPOW, L. N.: *Nachgemahlene gemischte Portlandzemente und auf dieser Grundlage hergestellte Betone*. Staatsverlag für Baustoffe, Moskau 1961.
- (25) SOKOLOW, J. G.: *Sammelwerk über die Chemie und Technologie der Silikate*. Staatsverlag für Baustoffe, Moskau 1957.
- (26) WOLSHENSKI, A. W., u. POPOW, L. N.: *Bericht über die wissenschaftliche Forschungsarbeit des Lehrstuhls für Technologie der Bindemittel*. Beton u. Keramik (NISI), Moskau 1956/57.
- (27) BUDNIKOW, P. P.: *Sammelwerk über Chemie u. Technologie der Silikate*. Staatsverlag für Baustoffe, Moskau 1957.

- (28) PANTELEJEW, A. S.: *Bericht über die Tagung: Anwendung der Vibrationsmahlung in der Baustoffindustrie*. Staatsverlag für Baustoffe, Moskau 1957.
- (29) SKRAMTJAJEW, S. G., u. BUDILOW, A. A.: *Neue Angaben über die Herstellung von schnellerhärtendem hochfestem Beton aus steifen Betongemischen*. Beton u. Eisenbeton (UdSSR) 6 (1955) S. 1.
- (30) WASILJEW, N. I., u. ANTONOW, J. A.: *Oriliche Baustoffe auf der Grundlage des Vibromahlens — Erfahrungen des Wegebaustrusts der Turkestanisch-Sibirischen Eisenbahn*. Staatsverlag für Transport- und Eisenbahnwesen, Moskau 1957.
- (31) MENDE, K.: *Nachfeinung von Zement in Betonwerken*. Silikattechnik 7 (1956) S. 303 — 304.
- (32) SCHUMANN, H.: *Interner Reisebericht über den Besuch des Laboratoriums für phys.-chem. Mechanik der Abteilung für disperse Systeme im physikalisch-chemischen Institut der Akademie der Wissenschaften der UdSSR, Coswig 1965*.
- (33) CHOLIN, I. I.: *Frühhochfester Zement*. Silikattechnik 7 (1956) S. 431 bis 435.
- (34) GRIMME, H.: *Schwingmahlung von Mörtelbindemitteln*. Silikattechnik 7 (1956) S. 109 — 112.
- (35) WEIGERT, K.: *Mahlhilfsmittel in der Zementindustrie*. Bauzeitung 7 (1957) S. 197.
- (36) PIWORAROW, W. I., u. AKIMOW, L. P.: *Der Einfluß von oberflächenaktiven Stoffen auf die Klinkerzerkleinerung*. Cement (Leningrad) 31 (1965) S. 18.
- (37) ZIEGLER, E.: *Schriftenreihe der Zementindustrie Heft 19* (1956).
- (38) ROJAN, S. M., PIROCKI, V. Z., MACUSO, N. S.: *Intensivierung des Prozesses der Klinkermahlung durch oberflächenaktive Mittel*. Cement (Leningrad) 30 (1964) S. 5.
- (39) REINSDORF, S.: *Über die Technologie schneller härtender hochfester Betone*. Schriftenreihe Baustoffe Heft 8 (1956).
- (40) BEKE, B.: *Über einige Fragen des Vermahlens von Zement*. Epiöanyag 17 (1965) S. 7.
- (41) SCHRADER, R., u. HENNEK, H.: *Die mechanochemische Reaktionen von Kiesabbrand mit Gasreinigungsmasse*. J. prakt. Chem. 14 (1961) 4, S. 234.
- (42) SCHRADER, R.: *Gewinnung eines hochaktiven Eisenoxids als Gasreinigungsmasse aus Kiesabbränden*. Chem. Techn. 11 (1959) S. 157.
- (43) SCHRADER, R., u. KOLLING, W.: DWP 50043.
- (44) SCHRADER, R., u. MARCY, H.: *Über die thermische Dissoziation von mechanisch aktiviertem Kalkstein*. Dechema-Monographie 41 (1962) S. 287.