

Composición química y mineralógica del polvo de los hornos de cemento

SIEGBERT SPRUNG, Dr. Ingeniero *

Instituto de Investigación de la Industria del Cemento, Düsseldorf

**Revista: Tonindustrie-Zeitung und Keramische Rundschau, 90,
n.º 10, octubre 1966, págs. 441-492.**

Las investigaciones realizadas hasta ahora sobre el efecto del polvo de los hornos de cemento en las plantas han mostrado que las cualidades químicas y mineralógicas de estos polvos eran poco conocidas. Los resultados del examen químico y mineralógico y la medida del pH de 18 muestras de polvo que se separaron en los electrofiltros de diversas instalaciones de hornos, han demostrado que la reacción alcalina de un polvo con un pH superior a 10 depende, en primer término, de las fases contenidas en el clínker. La segregación de polvo en un electrofiltro conduce a un enriquecimiento de las fases del clínker en la cámara de desempolvado previo.

En consecuencia, los polvos emitidos en los gases de escape depurados, que en su composición corresponden, en el mejor de los casos, a los polvos del desempolvado posterior efectuado en el electrofiltro, no contienen o contienen pequeñas cantidades de fases del clínker y tienen, por lo tanto, reacción débilmente alcalina con valores del pH inferiores a 10.

1. INTRODUCCION

En la fabricación del cemento aparecen polvos de muy diversas composiciones, que permiten distinguirse por su procedencia según las diversas etapas de producción, como la preparación de las materias primas, proceso de cocción, molienda y envasado o carga del cemento, etc.

Uno de los focos esenciales de producción de polvo en una fábrica de cemento es la instalación de los hornos. El polvo transportado en los gases a la salida del horno, en cantidades que oscilan de 1 a 100 g/m³ de gas de escape, se recupera hoy, preferentemente, por medio de electrofiltros y se recicla de nuevo al horno. Los gases depurados sólo contienen una escasa cantidad de polvo que se deposita en las proximidades de la fábrica.

En los últimos años se han realizado estudios muy detallados sobre los efectos de este polvo en el crecimiento de las plantas y en el desarrollo del ganado de pasto; los resul-

* Nuestro agradecimiento al autor, al Instituto de Investigaciones de la Industria del Cemento de Düsseldorf y al Prof. Dr. Lehmann, director de la revista Tonindustrie-Ztg., quienes amablemente han autorizado la traslación de este trabajo.

tados han sido compendiados por H. Pajenkamp, (1), A. Th. Czaja, (2) y (4), y F. Scheffer, E. Przemek y W. Wilms, (3). En todos los experimentos realizados en el laboratorio o en los alrededores de la fábrica sobre el efecto del polvo de los hornos de cemento, la muestra de polvo utilizada se ha identificado sólo por su procedencia o por su análisis químico. Sin embargo, estos datos no bastan para explicar las causas del efecto biológico del polvo de dichos hornos. Por este motivo, en el Instituto de Investigación de la Industria del Cemento se han realizado estudios químicos y mineralógicos de muestras de polvo de diversas instalaciones, mientras que A. Th. Czaja ha investigado simultáneamente el efecto biológico de estos polvos sobre una determinada planta en el Instituto Botánico de la Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule de Aquisgrán.

En los siguientes apartados se exponen los resultados del análisis químico, de la medida del pH, del análisis roentgenográfico cualitativo y del cálculo de la composición cuantitativa de las fases. Como según los experimentos de A. Th. Czaja, (5), el valor del pH del polvo humedecido cuando es igual o mayor de 10 tiene una gran importancia, las muestras de 18 hornos de cemento, examinadas en este caso, se ordenaron según los valores crecientes del pH que muestran al sumergirlas en agua. La división del polvo en cuatro grupos permite, además, considerar el tiempo en que el pH de una muestra de polvo se reduce a valores inferiores a 10 por efecto del CO₂ del aire atmosférico. Estos experimentos y sus resultados se detallan en el apartado 3.2.

El examen de los resultados de los experimentos químicos y mineralógicos, expuestos en los apartados 3.1 y 4, muestra los fundamentos del diverso comportamiento del pH, de las muestras de polvo y permite conocer las propiedades de los polvos que pueden alcanzar con los gases las cercanías de una fábrica de cemento.

TABLA I
Procedencia del polvo examinado

Polvo n.º	Instalación	Lugar de toma	Abreviatura
1	Horno Lepol.	Electrofiltro (depuración final)	EGR-NR-Lep
2	Instalación de molienda con secado Berz.	Electrofiltro (promedio)	EGR-Ø-M
3	Horno Lepol.	Electrofiltro (depuración final)	EGR-NR-Lep
4	Horno Lepol.	Electrofiltro (depuración final)	EGR-NR-Lep
5	Horno vertical.	Electrofiltro (depuración final)	EGR-NR-S
6	Horno con intercambiador de calor en suspensión gaseosa sin aprovechamiento del gas residual.	Electrofiltro (depuración final)	EGR-NR-WT
7	Horno con intercambiador de calor en suspensión gaseosa sin aprovechamiento del gas residual.	Electrofiltro (promedio)	EGR-Ø-WT
8	Horno con intercambiador de calor en suspensión gaseosa con aprovechamiento del gas residual.	Electrofiltro (depuración final)	EGR-NR-WT
9	Horno Lepol.	Electrofiltro (depuración final)	EGR-NR-Lep
10	Horno rotatorio (vía húmeda) con concentrador.	Electrofiltro (promedio)	EGR-Ø-N
11	Horno rotatorio (vía húmeda) con concentrador.	Electrofiltro (depuración final)	EGR-NR-N
12	Horno con intercambiador de calor en suspensión gaseosa con aprovechamiento del gas residual.	Electrofiltro (promedio)	EGR-Ø-WT
13	Horno Lepol.	Electrofiltro (promedio)	EGR-Ø-Lep
14	Horno Lepol.	Electrofiltro (depuración previa)	EGR-VR-Lep
15	Horno vertical.	Electrofiltro (depuración previa)	EGR-VR-S
16	Horno Lepol.	Electrofiltro (depuración final)	EGR-NR-Lep
17	Horno Lepol.	Electrofiltro (depuración previa)	EGR-VR-Lep
18	Horno Lepol.	Electrofiltro (depuración previa)	EGR-VR-Lep

Antes de empezar estos ensayos, ya se habían realizado unos estudios previos para conocer la composición química y mineralógica del polvo de los hornos de cemento y del aire de escape de los enfriadores en el Departamento Químico-mineralógico del Instituto de Investigación de la Industria del Cemento, en colaboración con el Instituto de Rocas y Tierras de la Berg-academia Clausthal-TH, (6), que asesoró F. W. Locher. Los ensayos químicos, descritos en el apartado 3 de este trabajo, de las 18 muestras de polvo y las medidas del pH, fueron realizados por H. Pisters, mientras que W. Richartz efectuó los estudios roentgenográficos cualitativos expuestos en el apartado 4.

2. PROCEDENCIA DE LAS MUESTRAS DE POLVO

Para los ensayos se tomaron 17 muestras de polvo de electrofiltros, en los que los gases de escape de diferentes sistemas de hornos se limpiaron antes de que salieran a la atmósfera a través de la chimenea. Una muestra procedía de la instalación de un molino-secadero con combustión propia, a través de la cual no pasan los gases de escape del horno.

TABLA II

Composición química de los polvos

NR DEL POLVO Y PROCEDENCIA	EGR-NR-	EGR-φ-	EGR-NR-	EGR-NR-	EGR-NR-S	EGR-NR-WT	EGR-φ-WT	EGR-NR-WT	EGR-NR-Lep	EGR-φ-N	EGR-NR-N	EGR-φ-WT	EGR-φ-Lep	EGR-VR-Lep	EGR-VR-S	EGR-NR-Lep	EGR-VR-Lep	EGR-VR-Lep
	Lep	M	Lep	Lep	S	WT	WT	WT	Lep	N	N	WT	Lep	Lep	S	Lep	Lep	Lep
NR DEL POLVO COMPONENTES (% EN PESO)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1 SiO ₂	4,3	13,2	16,5	16,6	3,7	17,8	16,6	17,7	6,5	13,2	11,8	15,6	10,3	17,0	15,4	19,9	14,2	20,2
2 Al ₂ O ₃ +TiO ₂	2,1	3,9	8,1	7,6	1,4	5,8	5,4	5,7	2,6	3,8	3,9	6,0	4,5	7,3	4,7	8,2	5,6	8,4
3 Fe ₂ O ₃	6,7	1,4	3,7	5,3	0,8	1,8	1,7	1,7	1,1	1,6	1,7	2,2	2,2	11,7	3,0	4,2	2,2	5,7
4 Mn ₂ O ₃	0,06	0,09	0,08	0,09	0,05	0,10	0,09	0,11	0,05	0,08	0,07	0,24	0,07	0,09	0,10	0,08	0,09	0,09
5 CaO	5,6	43,7	23,3	25,9	12,8	38,9	40,5	39,3	13,4	43,2	42,6	42,2	22,7	29,7	46,4	29,6	31,0	34,5
6 MgO	0,4	0,8	0,8	0,7	0,4	1,0	1,0	1,0	1,2	0,9	0,9	1,6	0,9	0,9	1,2	1,1	2,3	1,2
Σ 1—6	19,2	63,1	52,5	56,2	19,1	65,4	65,3	65,5	24,9	62,8	61,0	67,8	40,7	66,7	70,8	63,1	55,4	70,1
7 SO ₃	18,8	0,3	9,8	11,4	10,4	1,2	1,2	1,1	13,3	4,7	6,8	0,7	18,5	11,8	1,8	6,8	6,6	8,8
8 S ²⁻	0,15	0,06	0,37	0,19	0,50	0,17	Sp.	0,10	0,03	0,14	0,24	Sp.	0,12	0,32	0,10	0,29	0,03	0,20
9 Cl ⁻	19,50	0,04	6,41	4,74	1,57	0,17	0,16	0,20	19,58	1,09	1,64	0,06	3,70	0,14	0,21	3,54	7,45	0,34
10 NH ₄ Cl	—	—	3,50	1,63	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1,48	—	0,27	—	0,21
O ₂ EQUIVALENTE PARA S ²⁻	-0,07	-0,03	-0,18	-0,09	-0,25	-0,08	—	-0,05	-0,01	-0,07	-0,12	—	-0,06	-0,16	-0,05	-0,14	-0,01	-0,10
Cl ⁻	-4,40	—	-1,45	-1,07	-0,35	-0,03	-0,05	-0,04	-4,42	-0,25	-0,37	-0,01	-0,83	-0,03	-0,05	-0,80	-1,68	-0,08
Σ 7—10	34,0	0,4	18,4	16,8	11,9	1,4	1,3	1,3	28,5	5,6	8,2	0,7	21,4	13,6	2,0	10,0	12,4	9,4
11 K ₂ O	35,7	0,6	14,4	10,7	36,8	1,4	1,0	1,3	33,4	5,0	7,4	1,5	23,3	4,7	5,7	8,7	14,3	4,3
12 Na ₂ O	1,9	0,1	0,9	0,7	0,4	0,2	0,1	0,2	5,0	0,6	0,8	0,2	0,6	0,3	0,2	0,7	2,3	0,4
Σ 11—12	37,6	0,7	15,3	11,4	37,2	1,6	1,1	1,5	38,4	5,6	8,2	1,7	23,9	5,0	5,9	9,4	16,6	4,7
13 C	—	—	0,68	0,56	1,12	—	—	—	0,19	0,14	0,14	0,42	0,25	0,55	2,45	0,97	0,28	0,57
14 CO ₂	2,9	34,5	10,5	11,2	23,3	29,9	30,9	30,2	6,8	24,6	21,5	25,7	10,8	10,6	16,6	14,1	14,1	12,5
15 H ₂ O	6,6	1,5	5,0	5,2	7,4	1,6	1,4	1,2	1,2	1,2	1,0	3,7	2,9	4,6	2,3	2,6	1,2	3,0
H ₂ O EQUIVALENTE PARA NH ₄ Cl	—	—	-2,36	-1,10	—	—	—	—	—	—	—	—	—	-1,00	—	-0,18	—	-0,14
Σ 13—15	9,5	36,0	13,8	15,9	31,8	31,2	32,3	31,4	8,2	25,9	22,6	29,8	14,0	14,7	21,4	17,5	15,6	15,9
Resto SIN DOSIFICAR	—	—	—	—	—	0,4	—	0,3	—	0,1	—	—	—	—	—	—	—	—
SUMA	100,3	100,2	100,0	100,3	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,1	100,0	100,0	100,1

Para disponer en los experimentos de suficiente cantidad, las muestras de polvo han de tomarse de los electrofiltros, ya que, debido al escaso contenido de polvo en los gases, no puede conseguirse la cantidad necesaria si se desea extraerlo de dichos gases a su paso por los electrofiltros. De las determinaciones analíticas se deduce que el polvo fino del electrofiltro tiene aproximadamente la misma composición que el polvo del gas depurado que sale por la chimenea del horno.

Además de las muestras de polvo de la depuración final del electrofiltro, también se tomaron muestras de la depuración previa y del centro de los electrofiltros, que ya no corresponden ni en su composición química ni mineralógica a las del polvo expulsado, tal como se indica en los apartados 3 y 4. De la tabla I puede deducirse de qué instalación proceden los polvos examinados y de qué lugar se tomó la muestra.

3. COMPOSICION QUIMICA Y ALCALINIDAD

3.1. Análisis químico

Todas las muestras de polvo se sometieron a una reacción con sosa. La solución resultante se concentró por evaporación 2 veces y se filtró el ácido silícico, se calcinó a 1100°C, se pesó y trató con ácido fluorhídrico. El residuo del tratamiento se hace reaccionar con bisulfato potásico y se une al filtrado de la separación del ácido silícico. Los componentes Fe_2O_3 , Mn_2O_3 , CaO , MgO , SO_3 , S , K_2O , Na_2O , Cl , NH_4 , CO_2 y H_2O , se determinaron según el procedimiento descrito en "Marcha analítica para cementos" (7). Sabiendo el contenido de azufre sulfuro, entre los restantes óxidos, se calculó la cantidad equivalente de oxígeno. Si el polvo contiene NH_4 , el amonio se convierte en cloruro amónico y disminuye el contenido en cloro en la correspondiente cantidad. La cantidad de oxígeno equivalente al cloro restante se calculó como con el azufre de los sulfuros. Como en la determinación del H_2O de los polvos que contienen NH_4 , el amoníaco da agua, el contenido en agua de dicho polvo se corrigió en la cantidad de agua procedente del NH_4Cl . Los resultados del análisis químico están compendiados en la tabla II.

COMPOSICION QUIMICA DEL POLVO (%)	LUGAR DE TOMA DE LA MUESTRA		
	EGR ELECTROFILTRO DEPURACION POSTERIOR	EGR ELECTROFILTRO MUESTRA MEDIA	EGR ELECTROFILTRO DEPURACION PREVIA
$\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$	2—38	1—24	5—17
$\text{SO}_3 + \text{S} + \text{Cl}$	1—34	0—21	2—14
$\text{SiO}_2 + \text{R}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{MgO}$	19—65	41—68	55—71

TABLA III
Composición química del polvo del horno de cemento extraído de diferentes puntos

De ello se deduce que la composición química de los polvos oscila entre límites muy amplios y que los polvos de las diversas cámaras de un electrofiltro se diferencian entre sí considerablemente. Los polvos de filtros situados tras los hornos verticales y Lepol son siempre más ricos en sulfatos, cloruros y álcalis que los hornos con intercambiadores de calor. La tabla III permite apreciar que los polvos finos de la cámara de depuración posterior contienen sustancialmente más sulfatos, cloruros, sulfuros y álcalis y, por lo tanto, menos SiO_2 , R_2O_3 , CaO y MgO que los polvos de grano más grueso, que se separan en la cámara de depuración previa.

Esta segregación en el filtro del polvo arrastrado por los gases a la salida del horno de cemento se puede apreciar claramente en los análisis químicos de la tabla II, comparando las muestras de polvo 17 y 9 y las muestras 15 y 5, respectivamente.

Los polvos de las muestras 17 y 9 proceden, respectivamente, de la depuración previa y posterior del electrofiltro del mismo horno Lepol, mientras que las muestras 15 y 5 se tomaron de la depuración previa y posterior de un mismo grupo de hornos verticales. Por lo tanto, se puede suponer que el polvo expulsado se aproxima en sus propiedades físico-químicas y mineralógicas al de la cámara de depuración posterior, pero no al de las muestras medias o al separado en la cámara de depuración previa de un electrofiltro.

3.2. Medida del pH

Los polvos que contienen cemento y cal viva, así como los procedentes de hornos de cemento, presentan reacción alcalina cuando se ponen en contacto con la humedad. Esta alcalinidad se crea esencialmente por la formación de hidróxido cálcico al apagarse el CaO, al hidrolizarse los silicatos cálcicos del clínker y en la hidrólisis de sales formadas por ácido débil y base fuerte. El pH de una suspensión-solución de polvo depende, pues, de la cantidad de estos componentes, de su velocidad de reacción con el agua y del grado de hidrólisis de las sales. Si esta suspensión se deposita en el aire atmosférico que contiene anhídrido carbónico disminuye el pH, ya que el hidróxido cálcico es neutralizado por dicho ácido carbónico. Los experimentos de A. Th. Czaja, (5), demostraron que el pH de las suspensiones de polvo de cemento se aproximan lentamente al valor límite de $\text{pH} = 10$, y que éste y las alcalinidades menores no producen daños biológicos.

Hasta ahora no se han realizado análisis exactos sobre la evolución del pH de los lodos acuosos de polvo. Por este motivo, mediante los ensayos descritos a continuación se debía hallar qué alcalinidad producen las 18 muestras tomadas de los electrofiltros, cuando se han humedecido, y cómo varía su pH cuando se exponen al aire y, por lo tanto, al efecto del dióxido de carbono contenido en él. Además debía comprobarse si existe alguna relación entre la alcalinidad de los lodos y la composición química y la procedencia o lugar de toma de la muestra de polvo.

3.2.1. Técnica experimental

El valor del pH se midió electroquímicamente con un electrodo de vidrio. El campo de medición del aparato oscilaba entre $\text{pH} = 2$ y $\text{pH} = 12$, y con una exactitud de 0,02 unidades de pH podía desplazarse en el campo alcalino hasta un $\text{pH} = 14$.

En primer lugar se halló el pH de suspensiones de polvo en agua formadas por 40 g de polvo y 40 g de agua destilada; esta determinación se realizó inmediatamente después de la mezcla. Para conocer la influencia del CO_2 del aire en la alcalinidad, se distribuyeron uniformemente sobre cada una de las cuatro placas de vidrio secas, de 35 cm de longitud de contorno, 40 g de cada muestra de polvo pasada por un tamiz de 0,5 mm de luz de malla. El espesor de la capa fue de 1 a 1,5 mm. Las placas, seguidamente, en una balanza se rociaron con 40 g de agua destilada y se depositaron en una sala climatizada a 20°C y 65 % de humedad relativa. La humidificación de las muestras se repitió diariamente. Después de 1, 3, 7 y 28 días de estancia en dicha sala, las muestras se separaron de las placas, se pasaron a un vaso de vidrio y se mezclaron con 40 ml de agua destilada. Tras una buena agitación se midió el pH de la suspensión a una temperatura de 22°C .

3.2.2. Resultados experimentales

Los resultados de las medidas de pH se resumen en la tabla IV. De ésta se deduce que las 18 muestras pueden dividirse en cuatro grupos considerando la disminución de su alcalinidad hasta un $\text{pH} = 10$.

Al grupo 1 pertenecen las muestras de polvo de la 1 a la 5, que se extrajeron de la depuración posterior del electrofiltro de hornos Lepol y del electrofiltro de una instalación de molienda con secado simultáneo y calefacción independiente. El pH de los lodos de estos polvos fue menor de 10. Las muestras 1, 3, 4 y 5 se caracterizan por su elevada proporción de azufre en forma de sulfatos (9,8 a 18,8 % SO_3) y de álcalis (11,3 a 37,6 % de $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$). El contenido en cloruros osciló entre 1,6 y 19,5 %. La muestra 2 de la instalación de molienda con secado simultáneo no contiene polvo de horno, sino que está compuesta esencialmente de polvo crudo.

El grupo 2 abarca los polvos 6-9, que al principio mostraron un pH de 11 a 12 en agua destilada, pero después de 1 día de permanencia al aire el pH descendió por debajo de 10. Las muestras se tomaron de la depuración posterior del electrofiltro de hornos Lepol y de hornos con intercambiadores de calor; la muestra 7 es una prueba media de un electrofiltro.

El análisis químico (tabla II) muestra que los polvos 6, 7 y 8 procedentes de electrofiltro de hornos con precalentadores del polvo crudo contienen mucho CaO , SiO_2 , R_2O_3 y CO_2 y pocos álcalis, es decir, que según el análisis químico tienen composición parecida a la del polvo crudo. La muestra 9, que procede del desempolvado posterior de un horno Lepol, tiene una composición similar a la de los polvos de horno Lepol del grupo 1; sin embargo, debido a su alcalinidad inicial se incluye en el grupo 2. Como a la vista del análisis químico no puede deducirse el comportamiento final, se ha de determinar la composición de las fases, tal y como se indica en el apartado 4.

El grupo 3 abarca las muestras 10-14, cuyo pH al principio era de 11 a 12,5 y después de 3 días de exposición al aire descendió hasta valores próximos a 10. De estas muestras sólo la 11 procede de la depuración final de un horno rotatorio de vía húmeda; las otras son muestras medias o muestras de la limpieza preliminar de un electrofiltro. Estos polvos contienen, tal como muestra la tabla II, CaO , SiO_2 y R_2O_3 en cantidades relativamente grandes, pero menos CO_2 que los polvos 6, 7 y 8 del grupo 2. Por esto se puede suponer que aunque la mayor parte sea polvo crudo, ya presentan mayores cantidades de componentes del clínker. En relación con los grupos 1 y 2 procedentes del desempolvado final de los electrofiltros, es menor el contenido en combinaciones alcalinas.

Las muestras comprendidas entre la 15 y la 18 comprenden el grupo 4, y están caracterizadas por un elevado valor inicial del pH, de 11 a 12, que desciende por bajo de 10 después de exponerlas al aire entre 7 y 28 días. Los polvos 15, 17 y 18 se tomaron de la depuración previa de electrofiltros, mientras que el 16 procedía de la depuración final de un electrofiltro colocado tras un horno Lepol.

Resumiendo, puede concretarse que el polvo de los hornos de cemento puede dividirse en cuatro grupos por su alcalinidad y la disminución de la misma al exponerlo al aire. Al primer grupo pertenecen los polvos, cuyos lodos acuosos tienen un pH inferior a 10. Proceden de la depuración final de electrofiltros de hornos Lepol y del electrofiltro de una instalación de molienda con secado simultáneo.

El grupo 2 abarca los polvos cuyo pH, después de 1 día de exposición al aire, desciende de un valor comprendido entre 11 y 12 a uno inferior a 10. Se trata preferente-

mente de polvos procedentes de la depuración final de electrofiltros de hornos con precalentadores de crudo. Los polvos de los grupos 3 y 4, cuya alcalinidad después de un plazo entre 3 y 28 días desciende por debajo de $\text{pH} = 10$, proceden generalmente de la depuración previa de electrofiltros y, en general, no son expulsados. Sin embargo, en estos grupos también se incluyen 2 muestras de la depuración final de electrofiltros. Como para explicar este comportamiento no basta el análisis químico, se determinó también la composición de fases en los polvos.

TABLA IV

Valores del pH de las suspensiones de polvo en agua

GRUPO DE POLVO	1					2				3					4			
VALOR DEL pH- DE LAS MUESTRAS DE POLVO																		
EXPOSICION DE LAS MUESTRAS DE POLVO EN AMBIENTE DE HUMEDAD CONTROLADA (DIAS)	EGR- NR- Lep	EGR- ϕ - M	EGR- NR- Lep	EGR- NR- Lep	EGR- NR- S	EGR- NR- WT	EGR- ϕ - WT	EGR- NR- WT	EGR- NR- Lep	EGR- ϕ - N	EGR- NR- N	EGR- ϕ - WT	EGR- ϕ - Lep	EGR- VR- Lep	EGR- VR- S	EGR- NR- Lep	EGR- VR- Lep	EGR- VR- Lep
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
0	8,4	9,2	9,4	9,6	9,7	11,2	11,4	11,3	12,0	12,5	12,4	12,5	11,6	10,9	12,0	11,1	12,6	12,4
1	7,5	8,6	8,5	8,8	9,7	8,7	8,8	8,9	10,4	10,8	11,2	11,5	10,7	10,5	11,2	10,9	11,2	10,8
3	7,3	8,6	8,5	8,7	9,8	8,0	8,2	8,3	10,0	9,5	9,6	9,5	10,0	10,3	10,3	10,5	11,0	10,9
7	7,3	8,6	8,2	8,5	10,1	8,0	8,1	8,3	9,7	8,8	8,8	8,2	9,7	9,9	10,1	10,1	10,4	10,8
28	7,3	8,2	8,1	8,2	9,3	8,0	7,8	8,0	9,4	8,4	8,7	8,2	9,2	8,6	10,3	8,3	9,6	9,6

4. COMPOSICION DE FASES

4.1. Visión esquemática

Como para conocer la composición de fases del polvo se excluyen los métodos microscópicos normales debido a la finura de las partículas, sólo se ha podido aplicar para este objeto el análisis por difracción de rayos X. No obstante, experimentos previos habían demostrado que no es posible determinar cuantitativamente la composición de las fases por el procedimiento roentgenográfico, pues las combinaciones están muy mal ordenadas y finamente granuladas, y se presentaban muchas interferencias. Por ello, el examen roentgenográfico quedó limitado a un análisis de fases cualitativo. Sin embargo, fue posible calcular la composición de las fases partiendo del resultado cualitativo y del análisis químico.

4.2. Análisis de fases roentgenográfico

4.2.1. Técnica experimental

La determinación roentgenográfica se realizó, en primer término, con polvos tal como se recibían de fábrica. Además, 10 g de cada muestra de polvo se trataron con 250 ml de agua destilada y ácido acético diluido (1:1) o ácido clorhídrico (1:4), y se calentó de 50 a 60°C. Después de 1 hora, el residuo de la digestión se filtró a través de un filtro de placa, se lavó y se secó a 50°C hasta peso constante. La diferencia de peso se debía a la parte de polvo soluble en agua, ácido acético y ácido clorhídrico y pudo expresarse en porcentaje en peso. El residuo de la solución se examinó de nuevo por rayos X, mientras

que en el filtrado se determinaron R_2O_3 , CaO, SO_3 , Cl, K_2O y Na_2O por vía química. En experimentos preliminares se había demostrado que, en primer lugar, se disuelven en agua los carbonatos, sulfatos y cloruros alcalinos, así como la cal libre y el hidróxido cálcico. Con ácido acético se puede además separar la calcita del cuarzo, componentes arcillosos y fases del clínker y una parte de los minerales arcillosos que ya se habían expuesto a una temperatura superior a $600^\circ C$.

De esta forma los componentes insolubles del polvo pudieron concentrarse paulatinamente y, por consiguiente, identificarse mejor. Para la interpretación del diagrama de difracción de rayos X se utilizó el fichero de la ASTM.

4.2.2. Resultados experimentales

Por el procedimiento descrito en el apartado 4.2.1 pudieron determinarse las fases roentgenográficas expuestas en la tabla V. Los componentes se reunieron en 3 grupos según su origen.

Bajo la denominación de "sales" de la primera columna se engloban las combinaciones que se forman en la fase gaseosa de un horno partiendo de los óxidos alcalinos vaporizados y O_2 , SO_2 , CO_2 , NH_3 y H_2O , se condensan en las partes más frías del horno, llegan hasta los electrofiltros con otros componentes volátiles del polvo contenidos en los gases de salida, y allí se separan. A las sales hay que añadir también el yeso, la anhídrita y el sulfuro cálcico, que pueden proceder en parte de la materia prima y que se forman por reacción del SO_2 y O_2 y también del H_2S con la calcita.

La segunda columna comprende los minerales que generalmente están contenidos en la harina cruda. Aquí no se tiene en cuenta si la calcita se presenta en su forma primitiva o se formó por reacción del CO_2 con el CaO.

TABLA V
Fases comprobadas roentgenográficamente en los polvos del electrofiltro

SALES	COMPONENTES DEL CRUDO	FASES DEL CLINKER
$CaSO_4$	CALCITA	FASES PRINCIPALES DEL CLINKER
$CaSO_4 \cdot 2H_2O$	CUARZO	(PREFERENTEMENTE SILICATOS)
CaS	ILLITA	CaO_{fe} (LIBRE) o
NaCl	CAOLINITA	$Ca(OH)_2$
NH_4Cl	DOLONITA	
Na_2CO_3	FELDESPATO	
K_2CO_3	HEMATITES	
$NaHCO_3$		
$KHCO_3$		
K_2SO_4		
Na_2SO_4		

En la columna tercera se encuentran las fases que aparecen en el clínker cocido y acabado. En este caso se cuentan la cal libre y el hidróxido cálcico que procede de ella. Las fases del clínker no permitieron identificarse con más detalle, por lo que hay que suponer la existencia de silicatos de calcio.

En la tabla VI se resume la composición de fases cualitativa de las 18 muestras de polvo examinadas. La primera columna indica los grupos en los que se ordena el polvo

**resultados
del estudio roentgenográfico**

TABLA VI
Resultados del estudio roentgenográfico

Grupo	Polvo		Fases minerales comprobadas roentgenográficamente				
	Núm.	Procedencia	Muestra original	Residuos insolubles en			Composición global
				Agua	Acido acético 1:1	Acido clorhídrico 1:4	
1	1	EGR-NR-Lep	Calcita (Cuarzo) KCl, (K,Na) ₂ SO ₄	Calcita, Cuarzo, (Illita)	Cuarzo (Illita)	Cuarzo, Illita, Caolinita, Hematites	Calcita, (K,Na) SO ₄ , Caolita, Illita, Cuarzo KCl, Hematites
	2	EGR-Ø-M	Calcita, Cuarzo, Illita	Calcita, Cuarzo, Illita	Cuarzo, Illita	Cuarzo, Illita, Hematites	Calcita, Cuarzo, Illita, Hematites
	3	EGR-NR-Lep	Calcita, Cuarzo, Anhídrita, KCl	Calcita, Cuarzo, Anhídrita, (Yeso),	Cuarzo, Illita, Anhídrita, (Yeso)	Cuarzo, Illita, Hematites	Calcita, Cuarzo, Illita, Anhídrita, KCl, Hematites
	4	EGR-NR-Lep	Calcita, Cuarzo, Anhídrita, Yeso KCl	Calcita, Cuarzo, (Illita), Anhídrita, Yeso,	Cuarzo, Illita, Anhídrita, Yeso	Cuarzo, Illita, Hematites	Calcita, Cuarzo, Illita, Yeso, Anhídrita, KCl, Hematites
	5	EGR-NR-S	Calcita, Cuarzo, K ₂ SO ₄ , KHCO ₃ , KCl, (NaCl)	Calcita, Cuarzo, Illita	Cuarzo, Illita	Cuarzo, Illita	Calcita, Cuarzo, Illita, KHCO ₃ , K ₂ SO ₄ , KCl, (NaCl)
2	6	EGR-NR-WT	Calcita, Cuarzo, Illita, (fases de clinker)	Calcita, Cuarzo,	Cuarzo, Illita	Cuarzo, Illita, Caolinita, Hematites	Calcita, Cuarzo, Illita, Caolinita, Hematites, (fases de clinker)
	7	EGR-Ø-WT	Calcita, Cuarzo, Illita, (fases de clinker)	Calcita, Cuarzo, Illita	Cuarzo, Illita	Cuarzo, Illita, Caolinita, Hematites	Calcita, Cuarzo, Illita, Hematites, (fases de clinker)
	8	EGR-NR-WT	Calcita, Cuarzo, Illita, (fases de clinker)	Calcita, Cuarzo, Illita	Cuarzo, Illita	Cuarzo, Illita, Hematites	Calcita, Cuarzo, Illita, Hematites, (fases de clinker)
	9	EGR-NR-Lep	Calcita, Cuarzo, KCl, NaCl, (K,Na) ₂ SO ₄	Calcita, Cuarzo	Cuarzo, (Illita)	Cuarzo, Illita, Feldespato, (Hematites)	Calcita, Cuarzo, Illita, Feldespato, KCl, (K,Na) SO ₄ , NaCl, (Hematites)
3	10	EGR-Ø-N	Calcita, Cuarzo, (Illita), KCl, (K,Na) ₂ SO ₄ , fases de clinker, CaO libre	Calcita, Cuarzo, Illita fases de clinker	Cuarzo, Illita	Cuarzo, Illita, Caolinita, (Hematites)	Calcita, Cuarzo, Illita, Caolinita, KCl, (K,Na) SO ₄ , (Hematites), fases de clinker, CaO libre
	11	EGR-NR-N	Calcita, Cuarzo, KCl, (K,Na) ₂ SO ₄ , fases de clinker, CaO libre	Calcita, Cuarzo, (Illita), fases de clinker	Cuarzo, Illita	Cuarzo, Illita, Hematites	Calcita, Cuarzo, Illita, KCl, (K,Na) ₂ SO ₄ , Hematites, fases de clinker, CaO libre
	12	EGR-Ø-WT	Calcita, Cuarzo Illita, Dolomita, Ca(OH) ₂ , (fases de clinker)	Calcita, Cuarzo, Illita, Dolomita	Cuarzo, Illita, Dolomita	Cuarzo, Illita, Caolinita, Feldespato, Hematites	Calcita, Cuarzo, Illita, Caolinita, Feldespato, dolomita, Hematites (fases de clinker), Ca(OH) ₂
	13	EGR-Ø-Lep	Calcita, Cuarzo, KCl, K ₂ SO ₄ , KHCO ₃	Calcita, Cuarzo, Illita	Cuarzo, Illita	Cuarzo, Illita, (Hematites)	Calcita, Cuarzo, Illita, K ₂ SO ₄ , KCl, KHCO ₃ , (Hematites)
	14	EGR-VR-Lep	Calcita, Cuarzo, Yeso, Anhídrita, fases de clinker, CaO libre	Calcita, Cuarzo, Yeso, Anhídrita	Cuarzo, Yeso	Cuarzo, Illita, Hematites	Calcita, Cuarzo, Illita, Yeso, Anhídrita, Hematites, fases de clinker, CaO libre
4	15	EGR-VR-S	Calcita, Cuarzo, Illita, (Anhídrita), KHCO ₃ , K ₂ CO ₃ , (K ₂ SO ₄), fases de clinker, CaO libre	Calcita, Cuarzo, Cuarzo, Illita,	Cuarzo, Illita	Cuarzo, Illita, Hematites	Calcita, Cuarzo, Illita, (Anhídrita) KHCO ₃ , K ₂ CO ₃ , (K ₂ SO ₄), Hematites, fases de clinker, CaO libre
	16	EGR-NR-Lep	Calcita, Cuarzo, Anhídrita, KCl, (K ₂ SO ₄), fases de clinker (CaO libre)	Calcita, Cuarzo, Anhídrita	Cuarzo, Illita	Cuarzo, Illita, Hematites	Calcita, Cuarzo, Illita, Anhídrita, KCl, (K ₂ SO ₄), Hematites, fases de clinker, (CaO libre)
	17	EGR-VR-Lep	Calcita, Cuarzo, (Illita), KCl, (NaCl), (K,Na) ₂ SO ₄ , fases del clinker, CaO libre	Calcita, Cuarzo, fases de clinker	Cuarzo, Illita, Feldespato	Cuarzo, Illita, Feldespato, (Hematites)	Calcita, Cuarzo, Illita, Feldespato, KCl, (NaCl), (K,Na) ₂ SO ₄ , (Hematites), fases de clinker, CaO libre
	18	EGR-VR-Lep	Calcita, Cuarzo, Anhídrita, fases de clinker	Calcita, Cuarzo, Anhídrita, fases de clinker	Cuarzo, (Illita), Anhídrita	Cuarzo, Illita, Hematites	Calcita, Cuarzo, Illita, Anhídrita, Hematites, fases de clinker

considerado según el comportamiento del pH; la segunda columna señala el número de las muestras, y en la tercera puede verse la procedencia de las mismas. En la cuarta columna se especifican las fases que pueden localizarse en las muestras originales. Las tres columnas siguientes indican la composición de los insolubles después del tratamiento con agua, ácido acético y ácido clorhídrico. La última columna es un resumen de la composición total de cada una de las muestras. En este caso las fases están ordenadas según la concentración decreciente; las situadas entre paréntesis quieren indicar que no pudieron comprobarse con seguridad. De aquí se deduce que todos los polvos contienen componentes del crudo y sales. La calcita es en casi todas las muestras la fase predominante. Las sales están especialmente concentradas en los polvos procedentes de la depuración final de electrofiltros de hornos verticales y Lepol. La nota destacada de los cuatro grupos de polvo es el contenido en fases de clínker. Los polvos del grupo 1, cuyo pH se encontró por debajo de 10 después de humedecerlos, no contienen ninguna fase del clínker comprobada roentgenográficamente. Los polvos del grupo 2 con pH superiores a 10, pero que después de 1 día de exposición al aire descendieron a pH inferiores a 10, contienen únicamente pequeñas cantidades de fases de clínker. Por el contrario, en los polvos de los grupos 3 y 4, junto a las fases del clínker apreciadas claramente, se presentan cal libre o hidróxido cálcico. La muestra 13 no tiene fases de clínker, pero igual que la muestra 15 presenta inequívocamente cierta cantidad de carbonato y de bicarbonato potásicos. Como las fases del clínker se hidratan al humedecerlas con agua formándose $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y el carbonato y bicarbonato potásicos tienen reacción fuertemente alcalina, esto permite dar una explicación de la elevada alcalinidad y de la lenta reducción del pH de estos polvos.

Como los polvos de los grupos 3 y 4 son casi exclusivamente muestras medias de electrofiltros y muestras de la depuración preliminar de aquéllos, se deduce, por experiencia, que las fases del clínker se separan en gran parte en la primera cámara del electrofiltro y, por consiguiente, apenas existen en los polvos de la depuración final y en los polvos de los gases de escape.

4.3. Cálculo de la composición de fases

4.3.1. Procedimiento de cálculo

Para el cálculo de la composición de fases se aplicaron los resultados del examen roentgenográfico, la composición química de los polvos y el análisis químico de los extractos acuosos. A la vista de estos valores se calculó, en primer lugar, la proporción de sulfatos y cloruros alcalinos solubles en agua, así como la anhidrita y el yeso. Como los carbonatos y bicarbonatos alcalinos también son solubles en agua, los iones alcalinos, que exceden del cálculo de los iones SO_4^- y Cl^- , se han de considerar como carbonatos. Por lo tanto, dichos iones alcalinos se combinaron con la proporción equivalente de CO_2 en la muestra del polvo original. El resto de CaO en solución acuosa, en la que ya no existían más iones disponibles, se consideró, en concordancia con los resultados del examen roentgenográfico, como cal libre o, según el caso, como hidróxido cálcico para la estimación de las fases del clínker. Los restos de SO_3 , CO_2 y H_2O , para los que no había ya cationes disponibles, se consideraron como parte de las sales.

Después de restar los porcentajes de los componentes solubles en agua del total obtenido en el análisis químico, pueden calcularse las restantes fases. Además pudo calcularse, en una parte de los polvos, el agua sobrante del cálculo del yeso considerándola como agua de hidratación de los minerales arcillosos caolinita e illita, comprobados en la observación roentgenográfica. Para los minerales arcillosos se supuso, como composición media de la caolinita, la fórmula $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ y de la illita, $2\text{K}_2\text{O} \cdot 3\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 24\text{SiO}_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$. Seguidamente se efectuó el cálculo de los componentes del polvo crudo, CaCO_3 , MgCO_3 y feldespato (ortoclasa). El carbonato magnésico no se presenta

como magnesita, sino que aparece como componente de la dolomita, comprobada también roentgenográficamente. El azufre de sulfuros del análisis químico se consideró bajo la forma de CaS, que pertenece a los componentes salinos del polvo.

Sin embargo, los polvos contenían, según el análisis roentgenográfico, carbonatos y bicarbonatos alcalinos, por lo que tuvo que suponerse, como ocurrió por ejemplo en los polvos 3, 4, 13 y 16, una proporción de mineral arcilloso de un 10 %, ya que el agua determinada químicamente fue necesaria para el cálculo de los carbonatos ácidos y de la illita. Por otra parte, no fue posible calcular directamente la proporción de cuarzo y hematites, comprobadas roentgenográficamente, ni la cantidad de fases del clínker, por el análisis químico. Como consecuencia de dicho análisis químico sobraba un notable resto de SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , Mn_2O_3 y CaO, que corresponde a fases del polvo crudo, como cuarzo y minerales arcillosos deshidratados, y a las nuevas fases del clínker. Para obtener un valor aproximado de qué proporción de las fases del clínker pudiera existir como valor mínimo, se supuso que el exceso de CaO del análisis no incluido en los cálculos de la calcita, sulfuro de calcio, anhidrita, yeso o cal libre estaba comprendido en las fases de dicho clínker. Del producto de la relación del CaO restante a la CaO total de la muestra de polvo obtenida por análisis químico, por la suma de los óxidos sobrantes no incluidos en otras fases, se obtiene la proporción en que forman parte las fases del clínker.

De esta manera se puede desdoblar la suma de los restantes óxidos en partes, que se han de imputar a las fases del clínker o a los minerales arcillosos del polvo crudo que se ha disgregado. En la tabla VII del apartado 4.3.2. se designan estas partes como “fases del clínker” o “componentes residuales del polvo crudo”.

De dicha descripción se deduce que el cálculo se basa esencialmente en el resultado del examen roentgenográfico cualitativo, a pesar de que se hayan hecho diversas suposiciones que probablemente no tengan lugar en todos los casos. Por esta razón, en algunos casos se obtuvieron numéricamente pequeñas proporciones de fases salinas, que no pudieron comprobarse por rayos X, o bien, no pudo calcularse la proporción en las fases roentgenográficas comprobadas, ya que los componentes químicos correspondientes habían sido utilizados para el cálculo de otras fases. Como consecuencia se ha de tener en cuenta que la proporción de cada una de las sales puede ser mayor o menor según los gustos o predilección por otras sales. Sin embargo, se ha de suponer que la suma total de las sales y de los componentes del polvo crudo o del clínker que se obtiene por esta forma se aproxime a la composición real de fases.

4.3.2. Resultado del cálculo de fases

La composición de fases calculada para las 18 muestras se resume en la tabla VII. Las muestras, lo mismo que en las tablas precedentes, se han dispuesto en 4 grupos según su alcalinidad. En la exposición se han reseñado sumas parciales que indican las cantidades totales de sales, componentes de polvo crudo y fases del clínker. De dicha tabla VII se deduce que las muestras de polvo comprendidas entre la 1 y la 5 del grupo 1 de alcalinidad mínima constan principalmente de sales y componentes del polvo crudo.

Los polvos 1, 3, 4 y 5 procedentes de la depuración final de los electrofiltros de los hornos vertical y Lepol contienen del 36 al 79 % de sales y sólo del 22 al 59 % de componentes de polvo crudo. En los polvos 3 y 4 existen además del 5 al 7 % de fases del clínker calculadas numéricamente que, con relación al polvo 1 (sin fases del clínker) que al principio muestra un $\text{pH} = 8,4$, originan un pH superior (de 9,4 a 9,6). Este pH desciende, sin embargo, a valores inferiores a 9 después de 1 día de exposición a la humedad.

Los polvos de horno Lepol 1 y 5, que tienen el mayor contenido en sales, muestran ciertas diferencias en la alcalinidad según las fases salinas predominantes. El polvo 1 contiene en su mayor parte cloruros y sulfatos alcalinos y su pH inicial de 8,4 desciende después de 3 días a 7,3. Por el contrario, en el polvo de horno vertical 5, procedente de la depuración final del electrofiltro, los componentes salinos principales son: sulfatos alcalinos en un 22 % y carbonatos y bicarbonatos alcalinos en un 40 %. Como los carbonatos y bicarbonatos alcalinos se hidrolizan algo, en principio elevan el pH a 9,7, que no baja esencialmente después de 28 días de exposición a la humedad. Sin embargo, en los polvos de los grupos 3 y 4, se demuestra que aún grandes cantidades de carbonatos y bicarbonatos alcalinos sólo pueden elevar el pH del polvo a valores comprendidos entre 9 y 10 y que sólo se presentan valores superiores del pH en presencia de componentes del clínker.

La muestra 2 incluida también en el grupo 1, procedente de una instalación de mollienda con secado simultáneo y hogar propio, tiene casi el 100 % de componentes del crudo. Su pH inicial de 9,2 desciende al cabo de 28 días de exposición al aire hasta 8,2. Por esto los componentes del polvo crudo y las sales concentradas de los polvos extraídos de las cámaras de depuración final tienen reacción débilmente alcalina.

Los polvos 6, 7 y 8 del grupo 2, que se tomaron de los electrofiltros situados detrás de los hornos con intercambiadores de calor en suspensión de gases, contienen, en contraposición al polvo de los hornos Lepol, casi un 98 % de componentes del polvo crudo y sólo un 2 ó 3 % de sales. Los polvos del grupo 2 no se diferencian mucho en cuanto a la alcalinidad de las muestras comprendidas en el grupo 1. El pH inicial de 11 a 12, que después de 1 día de exposición a la humedad desciende ya hasta valores inferiores a 10, se debe a un mayor contenido en fases de clínker.

Se acusa la presencia de fases de clínker en el análisis roentgenográfico, pero sin embargo, con excepción del polvo 9, el cálculo no dio cantidades apreciables de dichas fases. El polvo 9 contiene, según el cálculo, un 4 % de fases del clínker y, por lo tanto, presenta un pH inicial algo mayor.

Los polvos de los grupos 3 y 4, cuyo pH después de un período de exposición al aire comprendido entre 3 y 28 días descendió a valores inferiores a 10, tienen, con un 6-24 %, mayor contenido en fases del clínker que los polvos de los grupos 1 y 2. Cuanto más elevada es la alcalinidad de estos polvos y más lentamente desciende al exponerlos a la humedad, significa que contienen mayor cantidad de fases del clínker, de CaO libre y de $\text{Ca}(\text{OH})_2$. De aquí se deduce que estas fases son las que determinan, en primer término, la alcalinidad del polvo de cualquier horno de cemento.

Los resultados del análisis químico permiten saber que los cloruros y sulfatos alcalinos se concentran en el desempolvado final del electrofiltro. El examen roentgenográfico mostró, además, que los componentes del clínker se separan preferentemente en las primeras cámaras del electrofiltro. También se llega al mismo resultado mediante el cálculo de la composición de las fases. Esto puede apreciarse perfectamente en la composición de las fases de seis polvos, que procedían de la depuración previa y posterior del electrofiltro de tres instalaciones diversas de hornos. Los resultados se resumen en la tabla VIII.

De ésta se deduce que en las primeras cámaras del electrofiltro se separan principalmente los componentes del polvo crudo y las fases del clínker, y que en la depuración final se precipitan las sales de grano fino. Esto significa que los componentes, a los que se achaca la elevada y permanente alcalinidad del polvo, se retienen en su mayor parte en el electrofiltro y no se expulsan por la chimenea.

Para los hornos con cambiadores de calor en suspensión de gases no puede establecerse una comparación similar teniendo en cuenta el presente estudio, pues las muestras proceden de diversas instalaciones de hornos. No obstante también puede ocurrir que en los electrofiltros situados detrás de los hornos con intercambiador de calor se separen los componentes del clínker en el desempolvado preliminar, en cuyo caso puede compararse la muestra 8 con la 12. La muestra 8 tomada de la depuración final del electrofiltro sólo contiene pequeñas cantidades de las fases del clínker. La muestra 12, que no procedía de otra instalación y que como prueba media del electrofiltro contenía polvo de la depuración final y de la separación previa, presenta, por el contrario, una proporción de fases del clínker del 7 por ciento.

TABLA VII

Composición de fases de los polvos procedentes del electrofiltro

GRUPO DE POLVOS	1					2				3					4			
	EGR-NR-Lep	EGR-φ-M	EGR-NR-Lep	EGR-NR-Lep	EGR-NR-S	EGR-NR-WT	EGR-φ-WT	EGR-NR-WT	EGR-NR-Lep	EGR-φ-N	EGR-NR-N	EGR-φ-WT	EGR-φ-Lep	EGR-VR-Lep	EGR-VR-S	EGR-NR-Lep	EGR-VR-Lep	EGR-VR-Lep
FASES	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
CaSO ₄	4,6	—	10,1	7,8	0,2	1,9	2,0	1,6	3,4	2,5	3,5	1,1	18,1	7,1	0,3	10,7	0,8	8,1
CaSO ₄ · 2 H ₂ O	—	—	2,3	11,0	—	—	—	—	2,2	—	—	—	—	12,4	—	—	—	7,3
CaS	0,2	—	0,8	0,4	1,1	0,4	—	0,2	—	0,3	0,5	—	0,3	0,7	0,3	0,7	—	0,5
NaCl	3,6	—	1,6	1,2	0,7	0,1	0,1	0,1	3,4	0,4	0,7	0,1	1,2	—	0,3	0,8	0,5	0,2
KCl	36,7	—	11,5	8,5	2,4	0,3	0,1	0,2	36,3	1,8	2,6	—	6,3	0,3	—	6,5	15,1	0,4
NH ₄ Cl	—	—	3,5	1,6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1,5	—	0,3	—	0,2
Na ₂ CO ₃	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
NaHCO ₃	—	—	0,3	0,2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,5	0,3	0,8	—	0,8
K ₂ CO ₃	—	—	—	—	17,5	—	—	—	3,0	—	—	—	11,5	—	1,8	—	—	—
KHCO ₃	—	—	3,0	2,0	22,9	—	—	—	—	—	—	—	2,6	2,8	3,0	3,1	—	3,4
Na ₂ SO ₄	—	0,1	—	—	—	—	—	—	6,9	1,1	1,1	—	—	0,4	—	—	—	4,7
K ₂ SO ₄	23,1	—	6,1	3,6	22,4	0,2	—	0,3	14,0	5,8	9,0	0,2	17,2	3,6	3,5	1,2	6,2	1,4
RESTO (SALES)	10,6	1,0	—	—	4,0	—	—	0,1	—	—	—	—	—	—	—	0,2	—	—
SUMA DE LAS SALES	78,8	1,1	39,2	36,3	71,2	2,9	2,2	2,5	69,2	11,9	17,4	1,4	57,2	29,3	9,5	24,3	28,7	22,3
CAOLINITA	5,4	—	—	—	—	0,9	—	—	—	2,4	—	5,4	—	—	—	—	—	—
ILLITA	—	7,3	10,4	10,4	2,7	14,4	11,1	13,2	6,9	8,6	9,8	15,6	10,4	—	12,2	10,4	8,9	11,5
CaCO ₃	6,5	78,5	21,9	24,1	20,6	67,7	70,3	68,2	11,3	55,2	48,1	56,8	13,2	20,1	33,6	28,9	27,4	25,1
MgCO ₃ (EN DOLOMITA)	1,3	0,8	0,3	0,2	0,5	0,4	—	0,5	1,6	0,8	0,7	1,4	0,4	2,0	0,9	0,9	3,7	1,1
FELDESPATO	—	—	—	—	—	—	—	—	1,1	—	—	1,0	—	—	—	—	3,9	—
CARBONO	—	—	0,7	0,6	1,1	—	—	—	0,2	0,1	0,1	0,4	0,3	0,6	2,5	1,0	0,3	0,6
RESTO DE COMPONENTES DEL POLVO CRUDO	8,5	13,2	21,4	23,3	4,1	14,0	16,0	15,7	6,3	15,4	16,0	11,1	11,3	31,1	17,1	25,2	14,2	24,0
SUMA DE LOS COMPONENTES DEL POLVO CRUDO	21,7	99,8	54,7	58,6	29,0	97,4	97,4	97,6	27,4	82,5	74,7	91,7	35,6	53,8	66,3	66,4	58,4	62,3
FASES DEL CLINKER	—	—	6,7	5,4	—	—	0,1	0,2	3,8	4,3	6,2	1,8	5,7	16,7	24,2	9,3	12,6	16,5
CaO _{lr} LIBRE	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1,6	2,0	—	—	0,6	0,1	0,2	0,5	0,4
Ca(OH) ₂	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	5,3	—	—	—	—	—	—
SUMA DE LAS FASES DE CLINKER	—	—	6,7	5,4	—	—	0,1	0,2	3,8	5,9	8,2	7,1	5,7	17,3	24,3	9,5	13,1	16,9
SUMA TOTAL	100,5	100,9	100,6	100,3	100,2	100,3	99,7	100,3	100,4	100,3	100,3	100,2	98,5	100,4	100,1	100,2	100,2	101,5

Las causas de las que depende la separación del polvo crudo del gas no fueron investigadas. Sin embargo, se puede suponer que desempeñan un papel importante el tamaño de grano de cada uno de los componentes del polvo, la velocidad del gas, las proporciones del flujo en el electrofiltro y la resistencia eléctrica de cada uno de los componentes del polvo.

TABLA VIII

Variación producida en la composición de las fases de los polvos del horno de cemento por la separación del electrofiltro

POLVO Nº	LUGAR DE LA TOMA DE MUESTRA	SALES (%)	COMPONENTES DEL POLVO CRUDO (%)	FASES DEL CLINKER (%)
17	EGR- DESEMPOLVADO PREVIO DEL ELECTROFILTRIO HORNO LEPOL	28,7	58,4	13,1
9	EGR- DESEMPOLVADO FINAL DEL ELECTROFILTRIO	69,2	27,4	3,8
18	EGR- DESEMPOLVADO PREVIO DEL ELECTROFILTRIO HORNO LEPOL	22,3	62,3	16,9
3	EGR- DESEMPOLVADO FINAL DEL ELECTROFILTRIO	39,2	54,7	6,7
15	EGR- DESEMPOLVADO PREVIO DEL ELECTROFILTRIO HORNO VERTICAL	9,5	66,3	24,3
5	EGR- DESEMPOLVADO FINAL DEL ELECTROFILTRIO	71,2	29,0	0,0

5. CONCLUSIONES

Los análisis químicos y mineralógicos han demostrado que los polvos que se tomaron del desempolvado final del electrofiltro, como muestra media o del desempolvado previo del electrofiltro, se diferencian claramente en su composición química, en su pH al humedecerlos en agua y en su composición mineralógica. Estas diferencias se deben a la separación de las fases del clinker, especialmente en la depuración previa del electrofiltro. Por consiguiente, la mayor parte de los polvos procedentes de la depuración final del electrofiltro, que por sus propiedades pueden asemejarse al polvo expulsado por los gases, no contiene o sólo contiene pequeñas cantidades de fases de clinker. Por esto su alcalinidad es relativamente baja. El pH de una solución acuosa se encuentra por debajo de 10 o desciende por debajo de este valor al cabo de 1 día de exposición al aire. Debido a esto, cabe esperar que los polvos expulsados por los gases de los hornos de cemento no influyan en el crecimiento de las plantas de los alrededores de las fábricas.

6. RESUMEN

Las experiencias realizadas hasta la fecha sobre el efecto del polvo de los hornos de cemento en el crecimiento de las plantas y animales, han demostrado que las propiedades químicas y mineralógicas de dichos polvos eran poco conocidas y que por el efecto producido por una muestra convencional tomada de un electrofiltro se sacaron conclusiones generales sobre el comportamiento del polvo expulsado por los gases que no coincidían con el comportamiento real.

Por esto se determinó la composición química y mineralógica de 18 muestras de polvo procedentes de la depuración previa y final del electrofiltro de diferentes instalaciones de hornos y se analizó la alcalinidad correspondiente a sus lodos acuosos.

El análisis químico de los polvos permitió saber que en la depuración final del electrofiltro se concentran álcalis, sulfatos y cloruros. La medición del pH de las suspensiones agua-polvo se efectuó directamente después de mezclarlos y después de una exposición en ambiente húmedo de duración variable efectuada en una sala climatizada, de forma que las 18 muestras pudieron clasificarse en cuatro grupos. Los polvos de los grupos 1 y 2, que procedían en general de la depuración final del electrofiltro, tienen en solución acuosa un pH inferior a 10 ó bien descienden por debajo de este valor después de 1 día de exposición en ambiente húmedo. Por el contrario, los polvos de los grupos 3 y 4 dieron un pH comprendido entre 11 y 12, que descendió hasta valores inferiores a 10 después de una exposición al aire libre comprendida entre 3 y 28 días; dichas muestras se tomaron de la depuración previa del electrofiltro como muestras medias.

Mediante el análisis roentgenográfico de todos los polvos y el cálculo de las proporciones de fases presentes, se comprobó que la distinta reacción alcalina se debía esencialmente al contenido de fases del clínker. Los polvos con pH elevado y de lenta disminución del mismo contenían de 6 a 10 % de fases del clínker. Debido a la separación de polvos llevada a cabo en el electrofiltro, las fases del clínker se separaron en mayor cuantía en la depuración preliminar del electrofiltro. Por consiguiente, cabe esperar que los polvos expulsados por los gases, que en su composición y propiedades se asemejan en todos los casos a los polvos separados en la depuración final del electrofiltro, no contengan o contengan sólo pequeñas cantidades de fases del clínker y que, por lo tanto, tengan una reacción débilmente alcalina, con pH inferiores a 10, en presencia de humedad.

bibliografía

- (1) PAJENKAMP, H.: "Efecto del polvo de los hornos de cemento en las plantas y animales". Serie de publicaciones de la industria del cemento (1961), cuaderno 27, págs. 23-41.
- (2) CZAJA, A. Th.: "Críticas sobre el trabajo de Fritz Scheffer, E. Przemeck y W. Wilms. Ensayos sobre la influencia del polvo de los hornos de cemento en el suelo y en las plantas". Staub, 21 (1961), págs. 471-476.
- (3) SCHEFFER, F.; PRZEMECK, E.; WILMS, W.: "Respuesta a las críticas de A. Th. Czaja". Staub 21 (1961), pág. 476.
- (4) CZAJA, A. Th.: "Sobre el problema del efecto del polvo de cemento en las plantas". Staub, 22, (1962), págs. 228-232.
- (5) CZAJA, A. Th.: "El efecto de los polvos de cal y cemento sobre las plantas". Qualitas Plantarum et Materiae Vegetabilis, 7 (1960), págs. 184-212.
- (6) LEWERENZ, D.: "Trabajo del Instituto de Rocas y Tierras de la Bergakademie Clausthal-TH". Director: Prof. Dr. Ing. H. Lehmann.
- (7) "Marcha analítica para cementos", editada por Verein Deutscher Zementwerke. Düsseldorf, 1961.