

Mejor Tesis: ESCUELA DE QUÍMICA^a

"DESARROLLO DE UN MÉTODO PARA EVALUAR EN EL LABORATORIO LA QUEMABILIDAD DE LA HARINA CRUDA EN LA PRODUCCIÓN DE CLINKER"

Cano, F.¹ y Velásquez, L.²

RESUMEN

Se determinó la quemabilidad de la harina cruda por un período de 30 días, con lo que se obtuvo información acerca de cómo se relaciona la cal libre real del proceso, la cal libre teórica y el consumo de combustible con la utilización de la cal libre relativa para el horno número 2 de la planta San Miguel de Cementos Progreso, S.A. durante el período comprendido del 10 de marzo del 2001 al 12 de abril del 2001. De esta forma se estableció la fórmula que reduce la cantidad necesaria de combustible utilizado (hunner) y su eficiencia para determinada cal libre relativa, optimizando de esta forma el proceso de producción de clinker sin afectar la calidad del mismo.

Se evaluó la relación entre las variables químicas LSF (índice de saturación de cal), Ms (modulo de sílice) y la finura del material utilizado, por medio de la preparación de muestras de diferente finura y parámetros químicos LSF y Ms, para luego quemar a 1400°C y determinar el contenido de óxido de calcio (CaO). Con esto se obtuvo el modelo de quemabilidad teórico ($LCaO_{teórico} = 0.2914LSF + 0.2037A_{45} + 0.0992T_{125} - 29.9663$), con un coeficiente de correlación $R = 0.9935$ y un error estándar de 0.1861.

Este modelo proporciona información sobre la naturaleza mineralógica de la materia prima y a la vez permite determinar los valores de las variables necesarias para obtener una optimización en el consumo térmico sin alterar la calidad del clinker producido.

INTRODUCCIÓN

El clinker, como componente principal del cemento, es producto de la reacción de materiales de origen natural, como el esquistos, el cual posee un alto

contenido de óxido de silicio y caliza (Harina Cruda). Estos materiales son expuestos a una temperatura máxima de clinkerización de 1350°C en un horno horizontal rotatorio. La proporción de los componentes para el proceso está determinada por la relación del óxido de calcio y los óxidos de sílice, aluminio y hierro (LSF); y también por la relación del óxido de sílice con los óxidos de aluminio y hierro (Ms).

La fineza óptima de la harina cruda para una operación estable de producción y calidad del clinker, es determinada por la mineralogía del material crudo y los parámetros químicos LSF (índice de saturación de cal) y Ms (modulo de sílice). Una molienda insuficiente puede producir una porción indefinida de tamaño de partícula que requiere de mayor combustible para el quemado y, asimismo, una molienda excesivamente fina, a la vez permite bajas temperaturas de clinkerización y una restricción de salida del clinker como resultado del incremento de la pérdida del polvo o reciclaje del mismo dentro del sistema, así como aglomeraciones en el sistema que pueden ocasionar paradas indeseables.

No existe ningún modelo en la empresa cementera nacional que pueda determinar mediante un método confiable y reproducible, a nivel de laboratorio, la relación existente entre la fineza del material, los parámetros químicos LSF y Ms con la cantidad de óxido de calcio libre luego de la reacción de clinkerización y el consumo de combustible para el proceso.

La quemabilidad de la harina cruda puede definirse como la facilidad de convertir harina cruda en clinker, la cual se mide teniendo en cuenta el porcentaje de óxido de calcio que no reaccionó (cal libre) de acuerdo a un procedimiento de quemado específico. La quemabilidad de la harina cruda predice valores de cal libre, los cuales a su vez permiten hacer cambios en la química del material o en la molienda

¹ Investigador Químico, autor² Investigador Químico, asesor^a El Comité CICC se seleccionan dos trabajos como la mejor Tesis de esta Escuela

del mismo, para mantener una operación constante, optimizando así la energía en los hornos.

Se han presentado modelos estadísticos basados en parámetros químico-mineralógicos (1) que tratan de predecir la cantidad de cal libre en el proceso de clinkerización, así como también la fineza de la harina cruda, que determina las porciones de tamaño mayor de caliza y cuarzo que a su vez difícilmente se queman. En base a pruebas de laboratorio, se determinó la aplicabilidad del modelo teórico propuesto y la relación del mismo al proceso que se realiza actualmente a nivel industrial.

MATERIALES Y MÉTODOS

1. Universo y muestra.

a. Universo de trabajo:

Harina cruda de los alimentadores de los hornos de la planta San Miguel de Cementos Progreso, S.A.

b. Muestra:

Se utilizaron muestras de promedios diarios de harina cruda de los alimentadores de los hornos, durante un período no superior a 30 días.

2. Materiales.

a. Equipo:

- Equipo de Fluorescencia de Rayos X.
- Mufla Thermoline.
- Tamices 45 μm y 125 μm .
- Agitador magnético.
- Bureta automática.
- Molino de discos Hertzog.
- Soportes de metal.
- Crisol de platino/oro de 25 ml.
- Molde de platino/oro de 30 mm de diámetro.
- Recipiente de vidrio de 10 ml de capacidad.

b. Cristalería.

- Beakers de 500 ml.
- Erlenmeyer de 250 ml.
- Beakers de 250 ml.
- Vidrios de reloj.
- Agitadores de vidrio.

c. Reactivos.

- Etilenglicol.
- Acido acético.
- Acetato de amonio.
- Fenolftaleína.
- Etanol.
- Metaborato de litio. (Flux)
- Yoduro de potasio.

3. Metodología.

3.1 Método de Residuo insoluble en 125 μm . T_{125}
Significancia y uso: este método determina la proporción de calcita mayor a 125 micrones presente en la harina cruda.

Calibración: se utiliza un estándar NIST 1004a, pesando la totalidad del contenido del frasco, transfiriendo cuantitativamente el material, y luego moviendo el tamiz de forma circular, obteniendo en un papel limpio el material de diámetro menor. Pesar el residuo y calcular el factor de acuerdo a los valores presentados por el certificado de dicho estándar.

Procedimiento: seleccionar 5 g de harina cruda seca. Lavar el material a través del tamiz con el uso de una corriente de agua. La velocidad del agua puede incrementarse, pero no debe aumentarse de tal manera que produzca pérdidas de material por salpicaduras. Continuar el lavado durante 3 minutos exactos. Secar el residuo en el tamiz a una temperatura entre 100 y 110°C durante 20 minutos. Enfriar el tamiz y luego con una brocha de cerdas suaves remover el residuo del tamiz y pesarlo en una balanza con una exactitud de 0.0001 g.

Cálculos: Calcular el porcentaje de residuo retenido, basado en el peso original del material, de la siguiente forma:

$$A_{45} = \frac{Pr}{Pm} \times F$$

En donde

T_{125} = porcentaje de retenido en 125 micrones.

Pr = peso del residuo.

Pm = peso de la muestra y

F = factor del Tamiz utilizado.

3.2 Método de Residuo ácido-insoluble en 45 μm .

Significancia y uso: este método determina la

proporción de cuarzo mayor a 45 micrones. Calibración: se utiliza un estándar NIST 1004a pesando la totalidad del contenido del frasco, transfiriendo cuantitativamente el material, el tamiz se mueve de forma circular y se obtiene, en un papel limpio, el material de diámetro menor. Pesar el residuo y calcular el factor de acuerdo a los valores presentados por el certificado de dicho estándar.

Procedimiento: pesar 5 g de harina cruda seca. Transferir la muestra a un erlenmeyer de 250 ml y agregar 50 ml de agua y 50 ml de ácido acético glacial. Calentar la mezcla en una estufa Corning hasta que no se produzca más CO_2 (aproximadamente 4 horas). Transferir cuantitativamente el material al tamiz de 45 micrones. Lavar, moviendo el tamiz de forma circular, con una corriente de agua proveniente del grifo. Mantener la velocidad del agua constante y evitar que se produzcan pérdidas de material por salpicaduras, durante 2 minutos exactos. Secar la muestra en un horno de convección entre 100 y 120°C durante 20 minutos. Enfriar el tamiz y luego con una brocha de cerdas suaves remover el residuo del tamiz y pesarlo en una balanza con una exactitud de 0.0001 g.

Cálculos: el retenido se calcula de la siguiente manera:

$$\% \text{CaOR} = \frac{\% \text{CaO}_{1400^\circ (\text{teol})}}{\% \text{LCaO}}$$

$\%_{45}$ = porcentaje del residuo ácido-insoluble en 45 micrones.

W_r = peso del residuo.

W_m = peso de la muestra y

F_t = factor del tamiz utilizado.

3.3 Cal libre en clinker. Método con acetato de amonio/etilenglicol, ASTM C1141.

En los ensayos con clinker, el parámetro principal que indica que la reacción de clinkerización se ha llevado a cabo es la cantidad de óxido de calcio o cal libre, la cual se determina de la siguiente manera:

El clinker debe molerse durante 2 minutos y agregarse 50 ml de etilenglicol (calentado a 80°C) y 2 ml de fenolftaleína al 0.1%, calentando y agitando la solución. Luego se titula con una

solución valorada de acetato de amonio hasta observar un cambio de color (rosa a gris).

3.4 Análisis de óxidos por Fluorescencia de Rayos X.

Para este método, se pesa 1.53 g de harina cruda y el Flux de acuerdo a su pérdida al fuego, utilizando una relación de Flux: muestra igual a 5 : 1. Se mezcla y se homogeneiza en un frasco de vidrio, luego se agregan dos gotas de una solución de yoduro de potasio al 10 % al crisol, distribuyéndolo completamente y agregándolo al material. El crisol se introduce en la mufla a una temperatura de 1100°C durante 3 minutos, después de 5 minutos se introduce el molde dentro de la mufla y en el minuto 7 se agrega el material fundido dentro del molde. Se enfría la pastilla y se analiza en el programa correspondiente (QCX). Los resultados son reportados en porcentaje p/p y se calculan los valores LSF Y Ms.

3.5 Método de quemabilidad teórica:

Inicialmente se determinó la forma adecuada de preparación de la muestra. Utilizando 2 g de harina cruda se prepararon pastillas de 10 mm de diámetro y 5mm de alto agregando una cantidad suficiente de alcohol para formar una pasta, la cual es colocada en una prensa marca Parr, para formar la pastilla. Con la misma cantidad de muestra se prepararon nódulos (esferas) de aproximadamente 5 mm de diámetro, utilizando alcohol y formando la pasta en un vidrio de reloj; se le dió forma esférica a ésta con una espátula. Ambas muestras se secaron a 100 °C y se quemaron a una temperatura de 1400 °C durante 30 minutos. Analizando la cantidad de cal libre remanente (inciso 3.5) se obtuvo la mejor forma de preparación de la harina cruda.

3.5.3 La temperatura óptima de quemabilidad se determinó quemando pastillas de harina cruda a 1200 °C, 1300 °C, 1400 °C durante lapsos de tiempo de 30 minutos, 60 minutos y 90 minutos a cada temperatura y se evalúa el porcentaje de cal libre como variable respuesta.

3.6.4 Relación de las variables LSF, MS, residuos en 45 μm y 125 μm con la cal libre como variable respuesta:

Se quema la harina cruda (tomada del proceso real) utilizando amplios rangos de composición química y fineza de la harina cruda. Las pastillas se colocan

en el centro de una base de ladrillo refractario introduciéndolo en una mufla Thermoline 46100 a 1400 °C. En el momento de introducir las muestras, la temperatura de la mufla desciende a 1200 °C con lo que se emplean 30 minutos para que la mufla alcance de nuevo los 1400 °C, y después de alcanzar dicha temperatura, la muestra se deja otros 30 minutos, con lo que el total de permanencia en la mufla asciende a 60 minutos. Los análisis de la harina cruda correspondientes son realizados según incisos 3.2, 3.3 y 3.5 para las finezas respectivas y los módulos LSF y Ms. La cal libre del clinker resultante se calcula por el método de etilenglicol/acetato de amonio (inciso 3.4). Esto determina la correlación existente entre las variables propuestas y la cal libre obtenida luego del quemado.

3.7 Quemabilidad óptima para el horno:

3.7.1 Muestra:

La muestra de harina cruda se obtiene del alimentador del horno con muestras compuestas de promedios de 24 horas, durante 30 días. También se prepararan muestras compuestas de clinker con promedios de 24 horas.

3.7.2 Para el horno de producción, se mide la cal libre real del clinker (inciso 3.4) y se determina los retenidos en 45 µm y 125 µm (incisos 3.2 y 3.3) y los parámetros químicos LSF y Ms de la harina cruda (inciso 3.5) del alimentador del horno No.2.

Finalmente, se determina la relación de la cal libre

teórica con la cal libre real medida en laboratorio, a la que se denomina Cal Libre Relativa (%CaOR), de acuerdo a la formula:

$$\%CaOR = \frac{\%CaO_{1400^{\circ}(real)}}{\%LCaO}$$

Lo que proporciona información sobre el comportamiento del proceso en particular y sobre la variabilidad del clinker producido.

RESULTADOS

1. Método de quemabilidad teórica:

1.1 Los ensayos de quemabilidad con pastillas y nódulos fueron expuestos a 1400 °C durante 30 minutos, dando como resultado los valores de cal libre siguientes:

Tabla 1

Preparación de Muestra	Cal libre %
Pastilla/etanol	8.456
Nódulo/etanol	9.125

1.2 Temperatura óptima de quemabilidad.

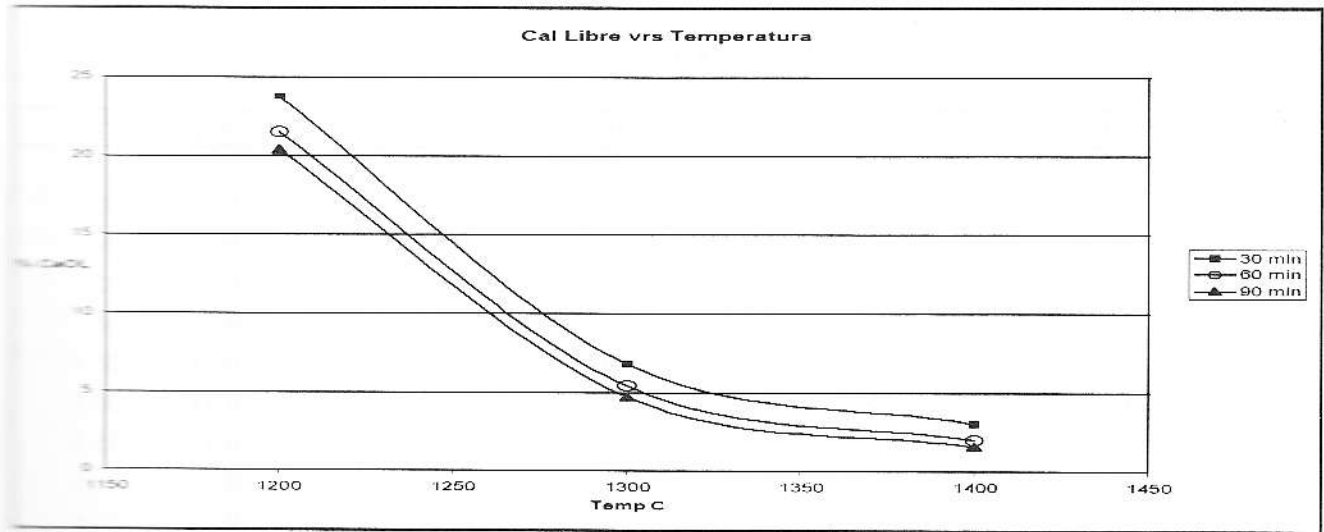
La relación entre la cal libre y la temperatura se muestra en la tabla siguiente:

Tabla 2

TIEMPO min	1200 °C			1300 °C			1400 °C		
	CaOL	prom	stdev	CaOL	prom	stdev	CaOL	prom	stdev
30.000	23.699			6.851			2.977		
30.000	23.712			6.759			3.126		
30.000	23.800	23.74	0.05	6.785	6.80	0.05	2.992	3.03	0.08
60.000	21.606			5.354			2.024		
60.000	21.336			5.422			1.976		
60.000	21.483	21.47	0.13	5.445	5.41	0.05	1.968	1.99	0.03
90.000	20.343			4.519			1.647		
90.000	20.336			4.910			1.454		
90.000	20.402	20.36	0.04	4.748	4.73	0.20	1.569	1.56	0.10

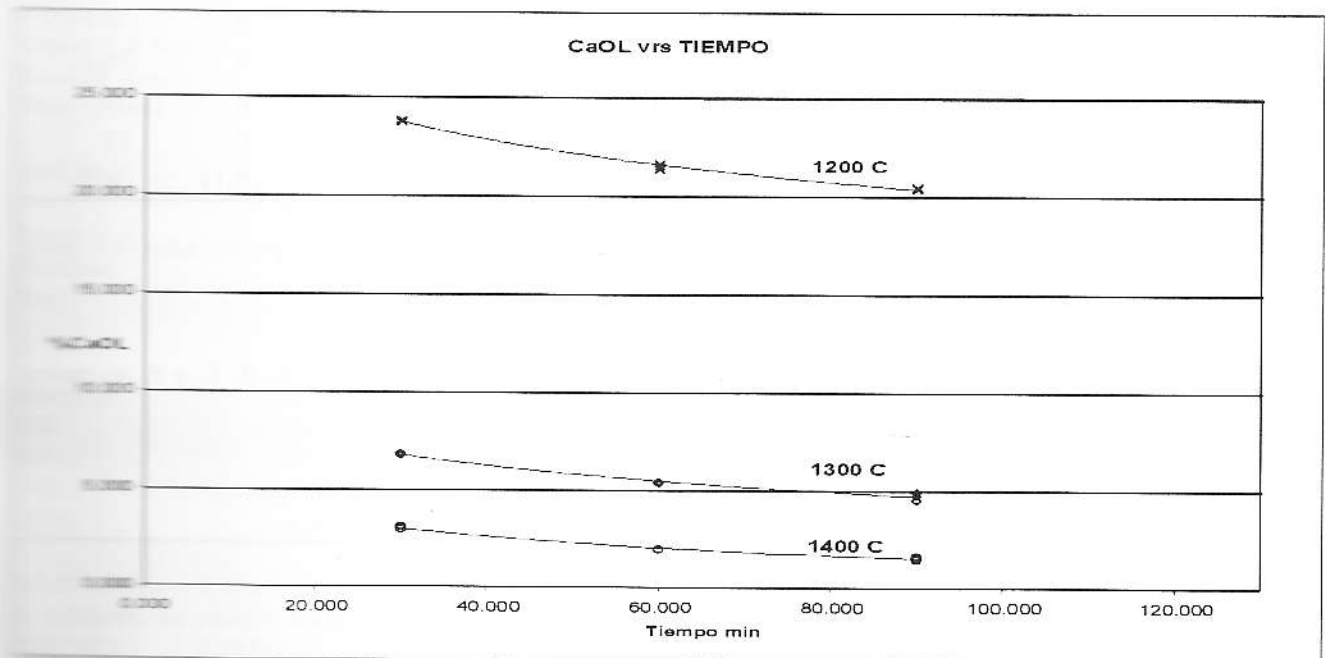
En la siguiente gráfica se observa el comportamiento de la temperatura y la cal libre en el clinker a diferentes tiempos de reacción.

Gráfica 1



El comportamiento de la cal libre en el clinker a diferentes tiempos de reacción y a determinada temperatura se muestra en la siguiente gráfica:

Gráfica 2



1.3 Resultado de los análisis de óxidos por XRF para las muestras del Horno No. 2 y el molino No.2 con fecha 09/03/01.

Fecha alimentador: 10/03/2001 a 12/04/2001

Tabla 3

FECHA	SiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	Fe ₂ O ₃ %	CaO%	MgO%	K ₂ O%	Na ₂ O%	SO ₃ %	PF%
03.13.01	15.44	3.39	2.61	42.30	1.68	0.29	0.21	0	35
03.14.01	16.72	3.61	2.85	41.43	1.79	0.3	0.23	0	34
03.15.01	17.23	3.71	2.97	41.08	1.85	0.31	0.24	0	35
03.22.01	15.44	3.32	2.56	42.30	1.71	0.28	0.2	0	36
03.23.01	11.90	2.42	1.55	45.90	1.09	0.22	0.23	0.11	36.4
03.24.01	11.50	2.37	1.54	46.10	1.07	0.21	0.21	0.11	36.6
03.28.01	14.98	3.17	2.50	43.00	1.30	0.3	0.33	0.11	35.8
03.29.01	15.52	3.08	2.64	42.97	1.35	0.28	0.34	0	36.6
03.30.01	14.07	2.88	2.36	44.31	1.22	0.26	0.29	0	36.6
03.31.01	14.09	2.76	2.27	44.01	1.23	0.26	0.28	0	36
04.01.01	14.77	2.92	2.51	43.67	1.35	0.26	0.33	0	36.6
04.03.01	15.48	3.06	2.58	42.94	1.34	0.28	0.33	0	35
04.04.01	14.76	3.66	3.00	42.51	1.58	0.36	0.42	0.11	36.6
04.07.01	14.62	3.52	2.92	42.65	1.56	0.34	0.4	0.02	36.7
04.08.01	14.77	2.92	2.50	43.00	1.30	0.3	0.33	0.11	35.8
04.09.01	15.48	3.06	2.64	42.97	1.35	0.28	0.34	0	36.6
A 09.03.01	14.76	3.66	2.36	40.10	1.22	0.26	0.29	0	36.6
B 09.03.01	13.36	3.66	2.27	42.00	1.23	0.26	0.28	0	36
E 09.03.01	12.98	3.52	2.58	45.10	1.34	0.28	0.33	0	35
F 09.03.01	11.99	3.66	3.00	46.12	1.58	0.36	0.42	0.11	36.6

Estos resultados se utilizaron para la determinación de los valores de LSF Y MS presentados en la tabla 9, de acuerdo a las ecuaciones 1 y 2.

1.4 Ecuación de Quemabilidad.

Las muestras se obtuvieron del alimentador del Horno 2, a excepción de las muestras A, B, E, y F, las cuales fueron tomadas del molino No. 2 con fecha 09/03/01.

Fecha alimentador: 10/03/2001 a 12/04/2001

Datos:

Tabla 4

REACTA	LSF	MS	A45%	T125%	LCaO%						
03.30.01	101.680	2.740	4.311863	5.859552	4.085536	03.30.01	103.57	2.74	4.339469	8.300739	4.38188
03.31.01	102.320	2.660	4.462255	8.441434	4.14373	03.31.01	102.610	2.770	4.067487	8.4452	4.307728
04.01.01	102.920	2.720	4.674195	9.069544	4.600284	04.01.01	102.480	2.770	4.374815	8.362784	4.115647
04.03.01	101.910	2.790	4.726808	9.499583	4.500824	04.03.01	102.240	2.780	4.518659	8.084213	4.060365
04.04.01	103.250	2.680	3.568203	6.681945	4.209146	04.04.01	101.960	2.760	4.257457	8.406685	4.007023
04.07.01	101.450	2.760	4.658404	8.778422	3.969162	04.07.01	101.49	2.74	4.062462	8.138611	4.174743
04.08.01	102.640	2.760	4.366739	8.86957	4.690363	04.08.01	102.14	2.73	4.214089	8.527571	4.341495
04.09.01	103.370	2.780	4.54922	9.002918	4.94223	04.09.01	101.71	2.75	4.10951	8.191853	4.033879
						A 09.03.01	86.67	2.78	6.539883	12.91094	0.682079
						B 09.03.01	92.17	2.73	3.617588	4.594552	0.664912
						E 09.03.01	110.79	2.72	5.169419	12.79593	7.269336
						F 09.03.01	111.2	2.69	3.319991	5.461368	6.311654

El análisis estadístico de los datos para obtener el modelo de quemabilidad teórico se resume en la siguiente tabla:

Tabla 5

SUMMARY OUTPUT

Regression Statistics

Multiple R	0.9935
R Square	0.9870
Adjusted R Square	0.9836
Standard Error	0.1861
Observations	20

ANOVA

	df	SS	MS	F	Significance F
Regression	4	39.4886	9.8721	285.0154	0.0000
Residual	15	0.5196	0.0346		
Total	19	40.0081			

	Coefficients	Standard Error	t Stat	P-value	Lower 95%	Upper 95%
Intercept	-29.9663	4.16E+00	-7.20E+00	3.09E-06	-3.88E+01	-2.11E+01
LSF	0.2914	1.24E-02	2.35E+01	3.03E-13	2.65E-01	3.18E-01
MS	0.9885	1.36E+00	7.28E-01	4.78E-01	-1.91E+00	3.88E+00
A45	0.2037	1.91E-01	1.07E+00	3.02E-01	-2.03E-01	6.10E-01
T125	0.0992	5.70E-02	1.74E+00	1.02E-01	-2.22E-02	2.21E-01

CalPredica = 0.2914LSF + 0.9885Ms + 0.2037A₄₅ + .0992T₁₂₅ - 29.9663

mediante un arreglo matemático para obtener un intercepto en 0, para su posterior comparación: = 0.2914

(LSF-47) 0.9885(MS-1.6)0.203*A45 0.0992*T125

1.5 Resultado de los análisis de óxidos por XRF para las muestras del alimentador 2.

Tabla 6

FECHA	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	PF
3/28	16.23	3.71	2.97	44.08	1.85	0.31	0.24	0.0	35
4/13	15.44	3.32	2.56	42.30	1.71	0.28	0.2	0.0	36
3/30	15.90	2.42	1.55	45.90	1.09	0.22	0.23	0.11	36.4
4/9	16.50	2.37	1.54	46.10	1.07	0.21	0.21	0.11	36.6
4/10	14.98	3.17	2.50	43.00	1.30	0.3	0.33	0.11	35.8
4/8	15.52	3.08	2.64	42.97	1.35	0.28	0.34	0.00	36.6
3/29	15.48	3.06	2.58	42.94	1.34	0.28	0.33	0.00	35
3/27	14.77	2.92	2.50	43.00	1.30	0.3	0.33	0.11	35.8
4/3	14.76	3.66	2.36	40.10	1.22	0.26	0.29	0.00	36.6
4/2	16.72	3.61	2.85	43.43	1.79	0.3	0.23	0.0	34
3/24	15.44	3.39	2.61	42.30	1.68	0.29	0.21	0.0	35
3/9	14.07	2.88	2.36	44.31	1.22	0.26	0.29	0.0	36.6
3/25	14.09	2.76	2.27	44.01	1.23	0.26	0.28	0.0	36
3/8	14.77	2.92	2.50	43.00	1.30	0.3	0.33	0.11	35.8

Con estos resultados se calcularon los valores de LSF Y Ms utilizando las ecuaciones 1 y 2, para luego calcular la quemabilidad óptima del Horno 2 (tabla 12).

2. Quemabilidad óptima para el horno.

En la tabla siguiente se presentan los datos de los análisis químicos y físicos realizados a la harina cruda del alimentador del horno 2 y el análisis de cal libre real del clinker producido.

Datos:

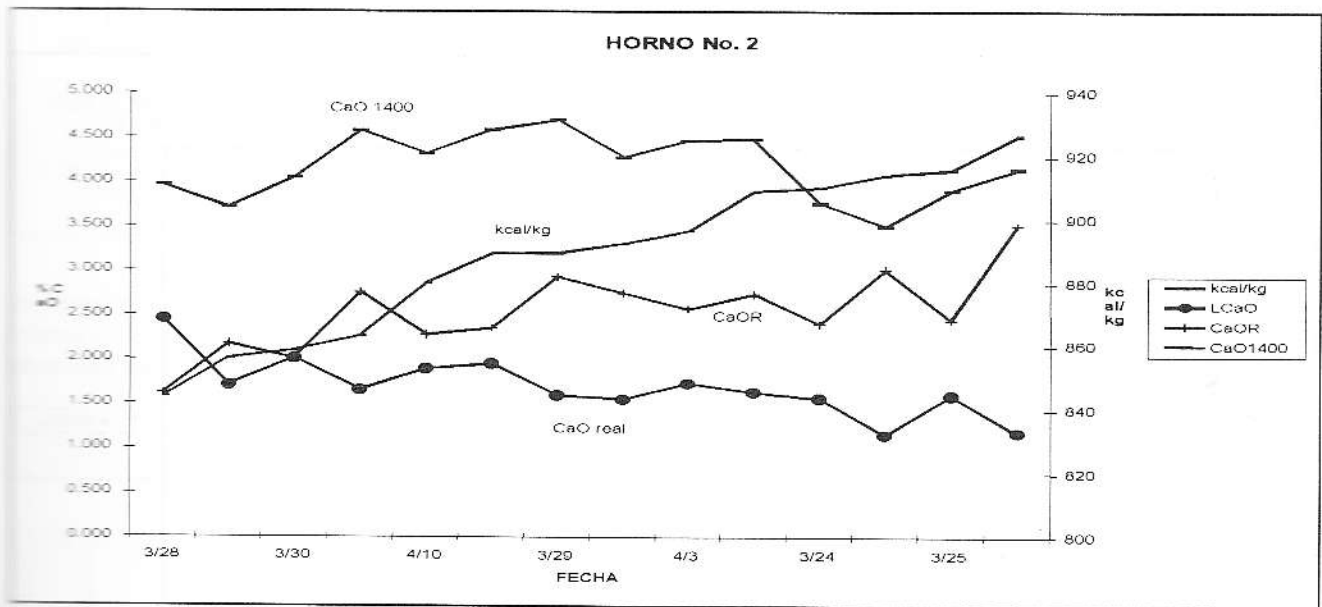
Tabla 7

FECHA	LSF	Ms	T125	A45	LCaO	CaOR	kcal/kg	CaO1400
3/28	101.270	2.790	8.801	4.0712	2.450	1.6173	844.069	3.962
4/13	100.200	2.810	8.949	4.0100	1.710	2.1707	856.420	3.711
3/30	101.300	2.820	8.430	4.1601	2.012	2.0143	858.730	4.052
4/9	102.630	2.800	9.343	4.4696	1.660	2.7567	863.425	4.576
4/10	102.120	2.800	8.835	4.2871	1.894	2.2807	880.128	4.319
4/8	102.930	2.800	9.107	4.2393	1.950	2.3516	889.449	4.586
3/29	104.300	2.620	8.580	4.1376	1.600	2.9380	889.656	4.701

3/27	101.870	2.790	8.299	4.5969	1.558	2.7507	892.702	4.285
4/3	102.850	2.820	8.115	4.0866	1.735	2.5755	896.667	4.469
4/2	102.810	2.810	8.470	4.2329	1.635	2.7411	909.245	4.482
3/24	100.590	2.780	8.160	4.1455	1.570	2.3977	910.276	3.764
3/9	99.660	2.760	8.268	4.0223	1.160	3.0219	914.358	3.505
3/25	101.030	2.800	7.842	4.0871	1.600	2.4448	915.837	3.912
3/8	101.710	2.770	8.355	4.1818	1.180	3.5143	926.441	4.147

En la gráfica que a continuación se presenta, se observa el comportamiento de la cal libre teórica, el consumo de combustible en kcal/kg, la Cal Libre Relativa y la cal libre real:

Gráfica 3



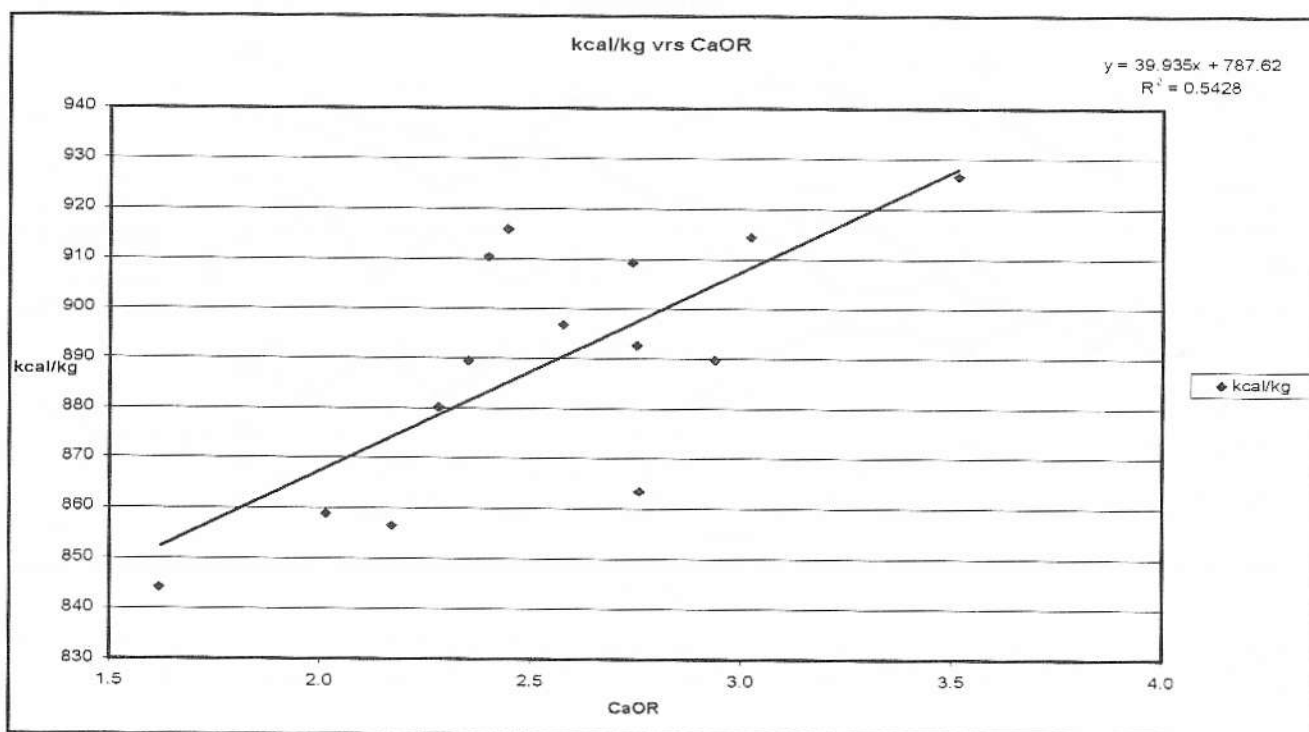
Los datos fueron ordenados de tal manera que el consumo de combustible muestre una tendencia ascendente. El coeficiente de correlación (r); entre el consumo de combustible (kcal/kg), la cal libre teórica (CaO1400), cal libre real (CaO Real) y Cal Libre Relativa (CaOR); se presenta en la siguiente tabla:

Tabla 8

r	CaO Real	CaOR	kcal/kg	CaO1400
CaO Real	1			
CaOR	-0.89572	1		
Kcal/kg	-0.49158	0.73675	1	
CaO1400	0.18464	0.19565	-0.06169	1

La distribución de los valores del combustible utilizado en función de la Cal Libre Relativa se observa a continuación:

Gráfica 4



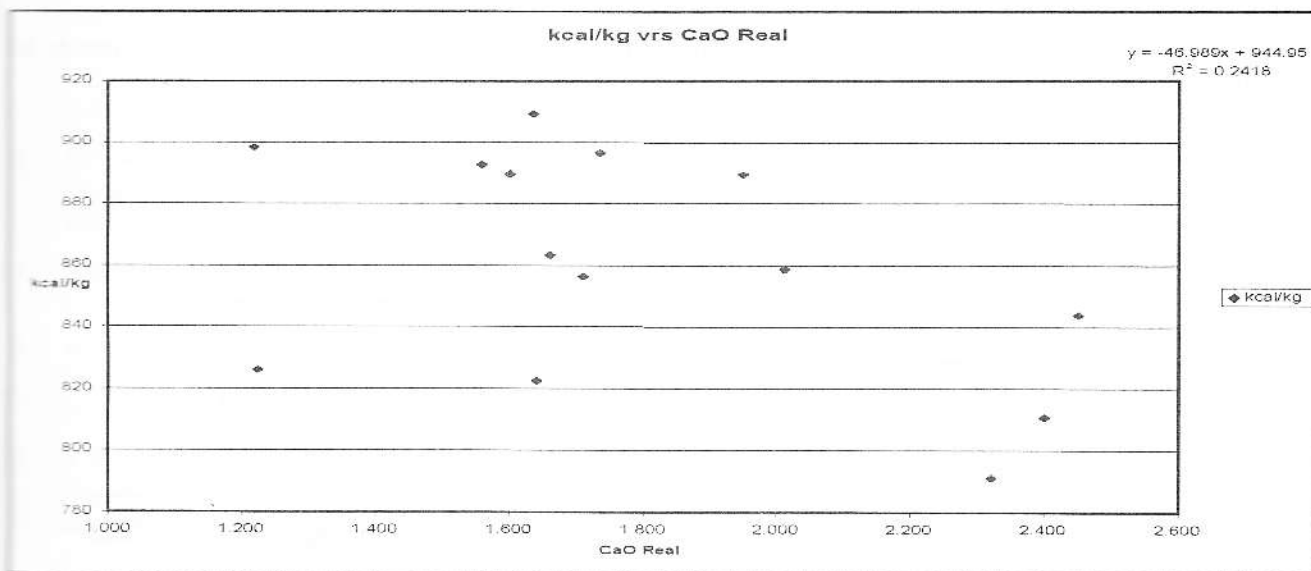
La siguiente ecuación describe la relación entre la Cal Libre Relativa y el combustible utilizado en el proceso:
 $Kcal/kg = 39.935(CaOR) + 787.62$ $r = 0.7367$

$$r^2 = 0.5428$$

Con la cual se puede predecir el consumo de combustible en el horno midiendo la Cal Libre Relativa.

A continuación se muestra la distribución de los valores de cal libre real (CaO real) en función de la cantidad de combustible utilizado.

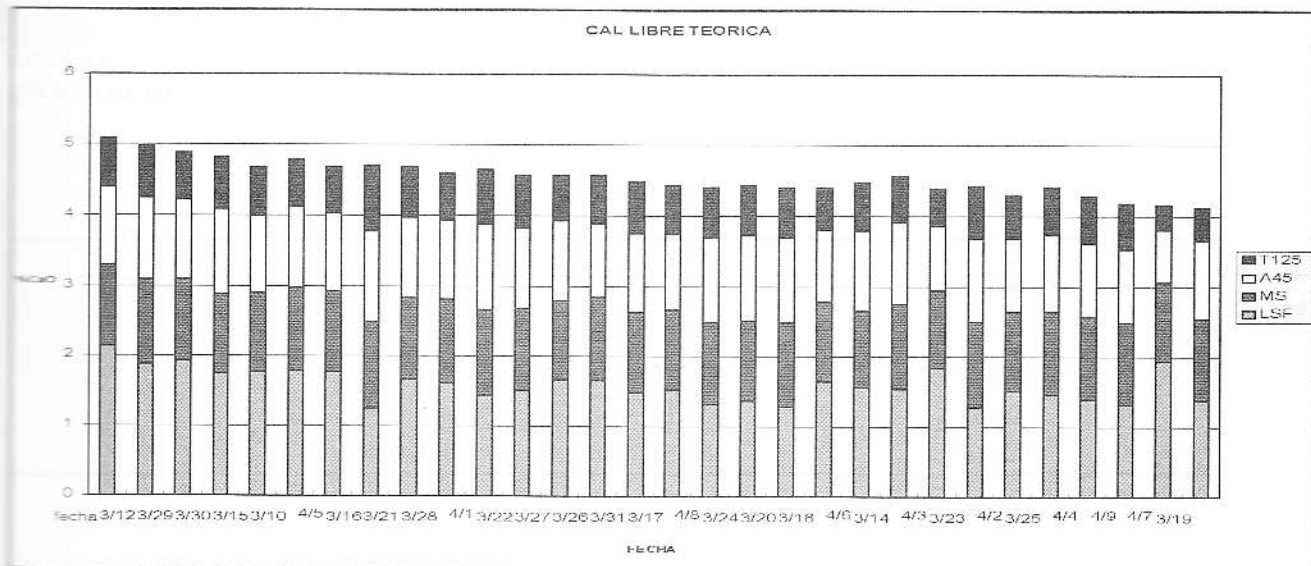
Gráfica 5



$r = -0.49158$

Se observa que no existe una buena relación entre los valores de las dos variables. El comportamiento de los valores de cal libre teórica de la harina cruda durante 30 días de producción, ordenados de forma creciente, se presentan en la gráfica siguiente:

Gráfica 6



En donde:

A_{45} = residuo insoluble total de la harina cruda del retenido en 45 μm , por vía húmeda, luego de la digestión en ácido acético al 20%.

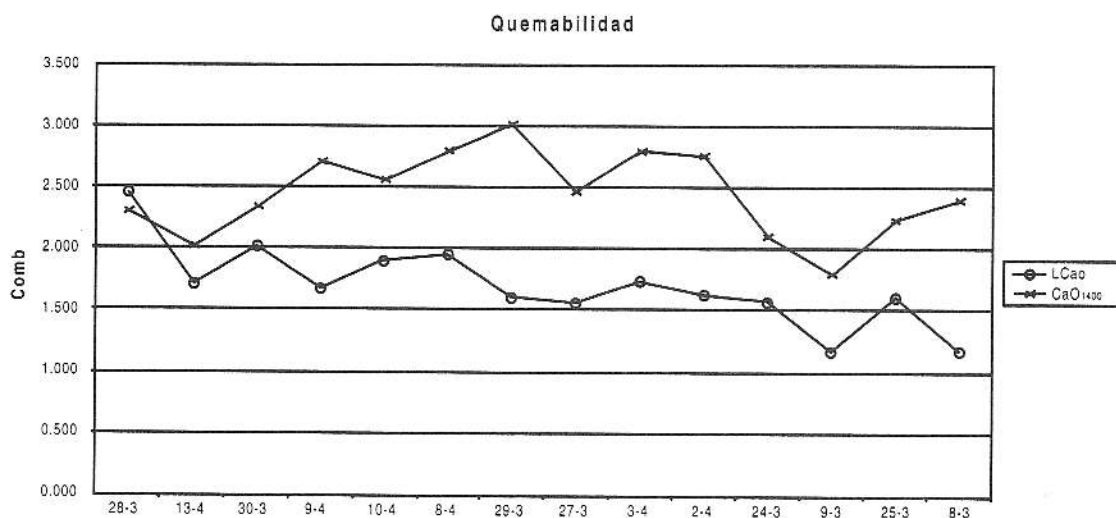
T_{125} = residuo total de la harina cruda en 125 μm por vía húmeda.

LSF: índice de saturación de cal.

MS: módulo de sílice.

A continuación se presenta el comportamiento de la cal libre teórica (% LCaO_{1400}), sin la contribución de las variables mineralógicas (A_{45} y T_{125}), y la cal libre real del proceso (LCaO).

Gráfica 7



Con los nuevos valores de la cal libre teórica se obtienen los coeficientes de correlación (r); entre el consumo de combustible (kcal/kg), la cal libre teórica (CaO_{1400}), la cal libre real (CaO real) y la Cal Libre Relativa (CaOR).

Tabla 9

	CaO Real	CaOR	kcal/kg	CaO1400
CaO Real	1			
CaOR	0.7832	1		
kcal/kg	-0.1798	-0.7114	1	
CaO1400	0.2149	-0.4339	-0.0399	1

REFERENCIAS.

1. Graeme Moir. 1997. Influence of Raw Mix Heterogeneity on Ease of Combination and Clinker Strength potencial. Em "Proceeding of The 10TH International Congress on the Chemistry of Cement". Clinker and Cement Production. Amarkai AB and Congrex Göteborg AB. Sweden. 1997. Volume 1. li041.
2. Hewlett C. Peter. Lea's Chemical of Cement and Concrete. Fourth Edition. Arnold publishers. United Kingdom. 1998.
3. Holderbank. Cement Seminar: "Material Technology 1". Switzerland. 1995. Section 13.
4. Kirk, Raymond. Enciclopedia de Tecnología Química. 4a. Edi. Editorial Hispano-Americana. México. 1985. Vol 10.
5. S.C. Ahluwaia, R.K. Goswami and S. Harsh. 1997. Burnability of Cement Raw Mixes at 1400° C. Em "Proceeding of The 10TH International Congress on the Chemistry of Cement". Clinker and Cement Production. Amarkai AB and Congrex Göteborg AB. Sweden. 1997. Volume 1. li045.
6. Johansen, Vagn. Curso Avanzado: "Microscopía del Clinker". Portland Cement Association (PCA). Skokie, Chicago Illinois. U.S.A. Marzo 2000. (material inédito).
7. Williams, Frederick. Razonamiento Estadístico. 2da. Edición. Nueva Editorial Interamericana. México. 1982.
8. Annual Book of ASTM Standards: Cement; Lime; Gypsum. 1995. U.S.A. 25-95.
9. Smith, J.M., H.C. Van Nes & M.M. Abott. Introducción a la Termodinámica en Ingeniería Química. 5ta. Edición. Editorial McGraw Hill. México. 1996.
10. Campbell H. Donald. Microscopical Examination and Interpretation of Portland Cement and Clinker. Portland Cement Association. U.S.A. 1986.
11. International Cement Microscopy Association. Proceedings for the Twentieth International Conference on Cement Microscopy. México. 1998.
12. International Cement Microscopy Association. Proceedings for the Twenty-first International Conference on Cement Microscopy. U.S.A. 1999.