

Figura 70 Principales productos obtenidos a partir de ácido nítrico

Capítulo 7

Producción de Cal



1.7. Producción de Cal

1.7.1. Calcinación

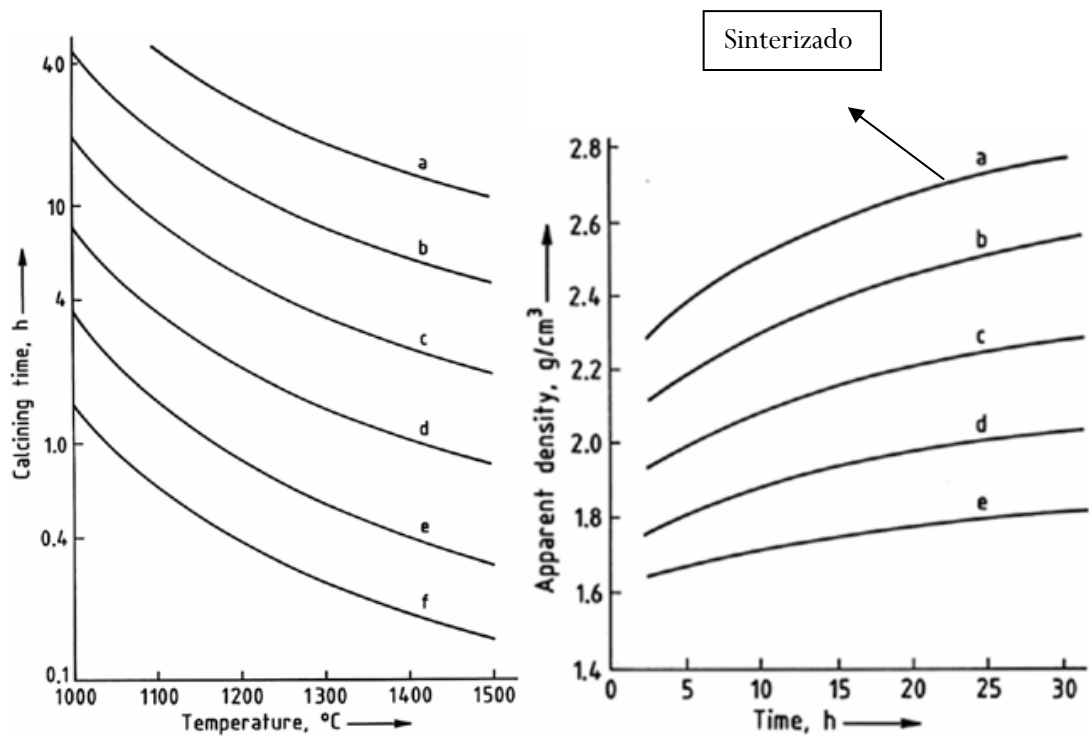


Figura 69 Izq. Tiempo de calcinación para esferas de cal con alto contenido de calcio a) 15 cm; b) 12.5 cm; c) 10 cm; d) 7.5 cm; e) 5 cm; f) 2.5 cm de diámetro. Der. Variación de la densidad

aparente con la temperatura y el tiempo para cal de alto contenido de calcio a) A 1400 °C; b) 1300 °C; c) 1200 °C; d) 1100 °C; e) 1000 °C

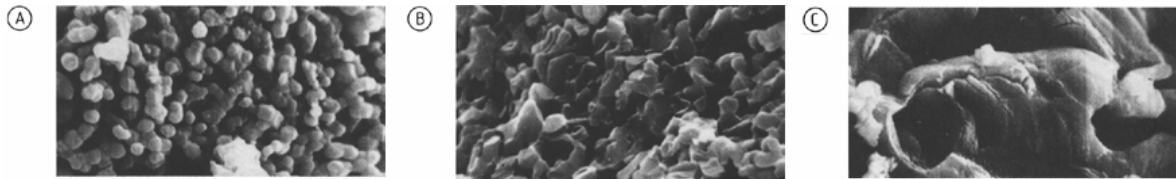
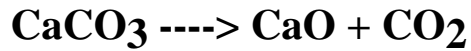


Figura 70 Micrografías de escaneo de electrones de cal: A) Densidad aparente 1.5 g/cm³; B) Densidad aparente 1.9 g/cm³; C) Densidad aparente 2.3 g/cm³

Reacción de calcinación:



$\Delta H = + 3010 \text{ kJ/kg a } 900 \text{ C (720kcal/kg)}$

1.7.2. Hornos de calcinación verticales

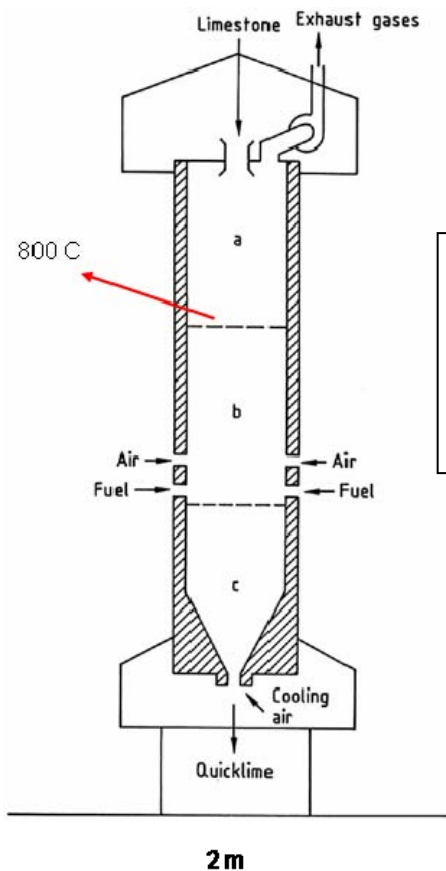


Figura 71 Esquema de un horno de calcinación vertical (kiln). a) Zona de precalentamiento; b) Zona de calcinación; c) Zona de enfriamiento. Horno de mezclado vertical; 5 a 15 cm y una relación de tamaño de 2 : 1; el calor neto usado puede ser bastante bajo 4000 kJ/kg (950 kcal/kg).

El combustible más usado es coque denso con baja reactividad y bajo contenido de ceniza. El tamaño del coque es solo un poco más pequeño que el de la caliza, por lo tanto se mueve con el y no a través de los intersticios.

Figura 72 Esquema de un horno de calcinación con inclinación doble

a) Quemadores superiores;
b) Quemadores inferiores

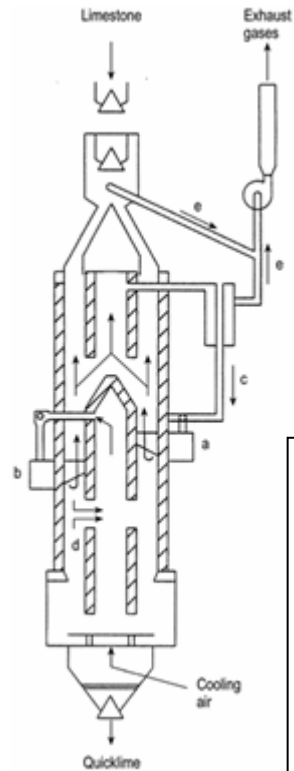
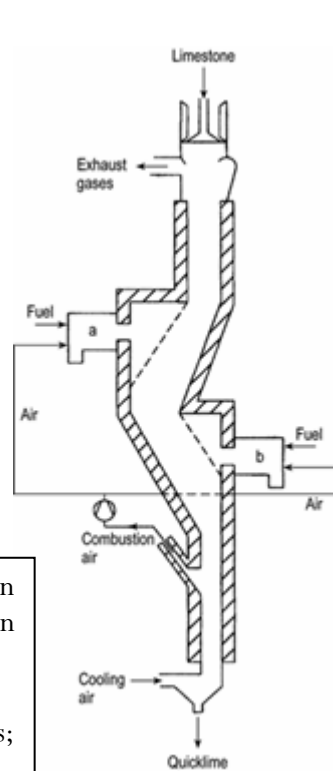
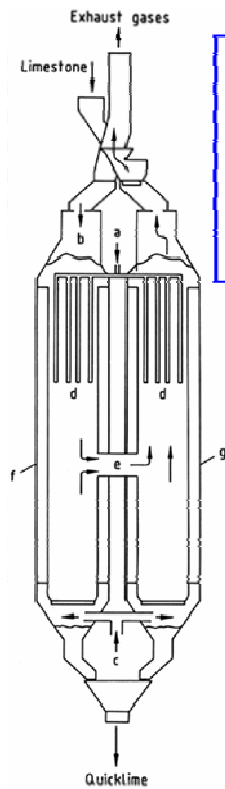


Figura 73 Esquema de un horno de calcinación anular

a) Quemadores superiores;
b) Quemadores inferiores;
c) Aire de combustión a quemadores superiores;
d) Aire de combustión a quemadores inferiores;
e) Gases de combustión



Esquema de un horno con regeneración de flujo paralelo

a) Combustible;
b) Aire de combustión;
c) Aire de enfriamiento;
d) Quemadores; e) Ducto de cruce; f) Cámara 1;
g) Cámara 2

Dos hornos con regeneración de flujo paralelo de 300 t/d

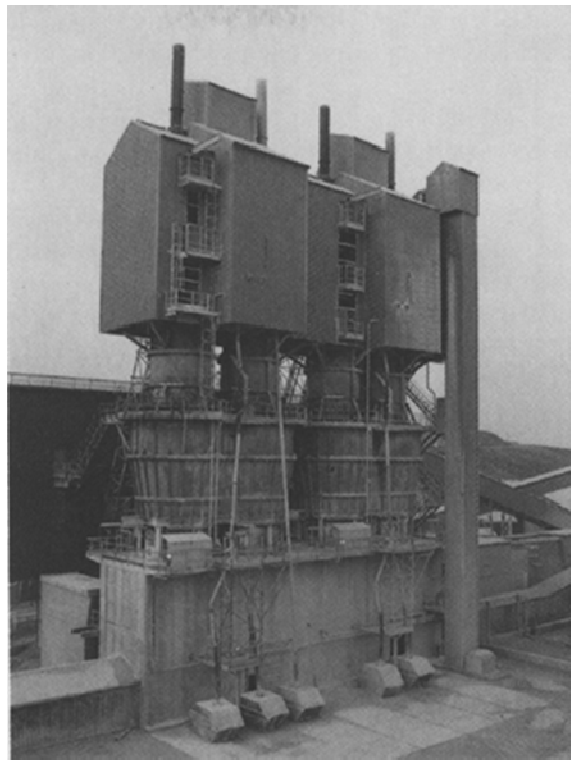


Figura 74 Horno de flujo paralelo y regenerador

1.7.3. Hornos de calcinación horizontales

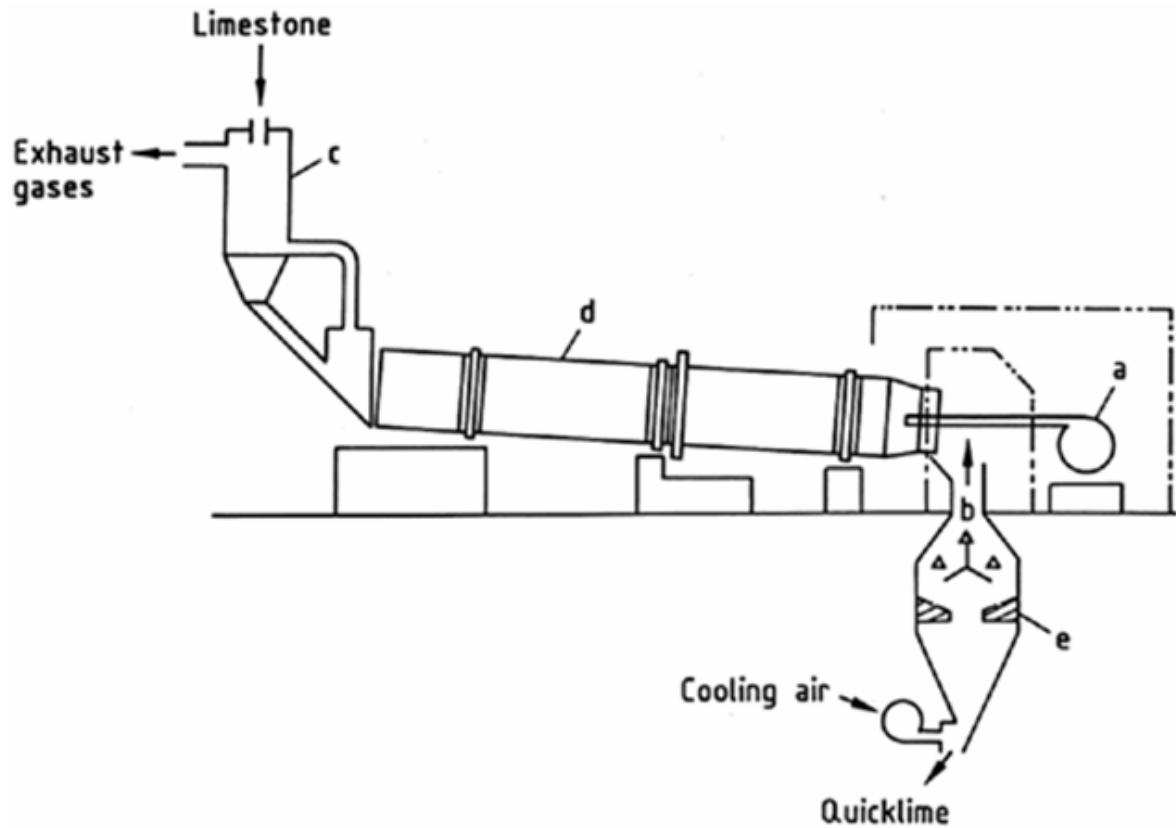


Figura 75 Esquema de un horno rotatorio a) Quemador; b) Aire de combustión; c) Pre-calentador; d) Horno; e) Enfriador

En los hornos de calcinación las variaciones en la distribución de calor, temperatura, y tiempo de residencia de los sólidos complica más aún el proceso de calcinación. Como resultado las partículas de cal descargadas pueden ser agrupadas en tres categorías:

1. Partículas que no son totalmente calcinadas (e.g., con un núcleo de CaCO_3), la capa de cal posee densidad aparente baja y una alta reactividad con agua.
2. Partículas que son calcinadas totalmente de forma adecuada y tienen baja densidad aparente y alta reactividad con agua.
3. Partículas con varios grados de sinterizado, las cuales presentan un incremento de la densidad aparente y una reactividad con agua reducida

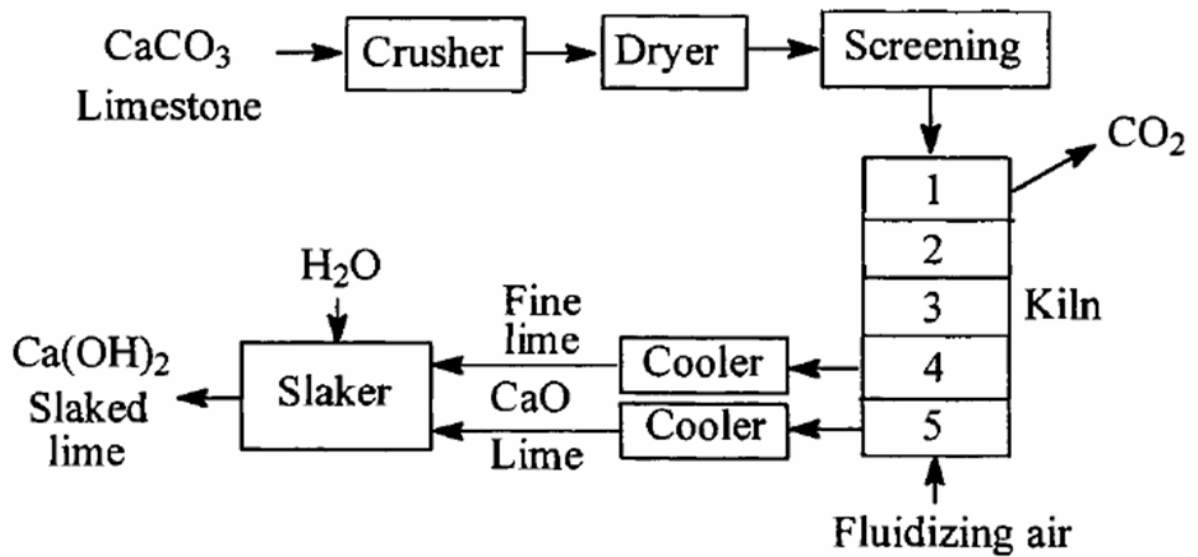


Figura 76 Diagrama de bloques del proceso de producción de cal apagada

Capítulo 8

Producción de Cemento

1.8. Producción de Cemento Portland

1.8.1. Composición



Tabla 8 Composición del Clinquer de cemento Portland

Constituent	Formula (abbreviation)	Content, wt %	
		Range	Average
Tricalcium silicate	3 CaO · SiO ₂ (C ₃ S)	46 – 79	61
Dicalcium silicate	2 CaO · SiO ₂ (C ₂ S)	5 – 30	15
Calcium aluminoferrite	2 CaO · (Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃) [C ₂ (A, F)]	4 – 16	8
Tricalcium aluminate	3 CaO · Al ₂ O ₃ (C ₃ A)	6 – 18	12
Free calcium oxide	CaO (C)	0.1 – 4	
Free magnesium oxide	MgO (M)	0.7 – 1.5	1.5

El clinker de cemento Portland se obtiene de tres materias primas: Calcita, Sílice (Arena) y Arcilla (Alumino-Silicatos ricos en Al₂O₃, Fe₂O₃).

1.8.2. Formación del Clinker de cemento Portland

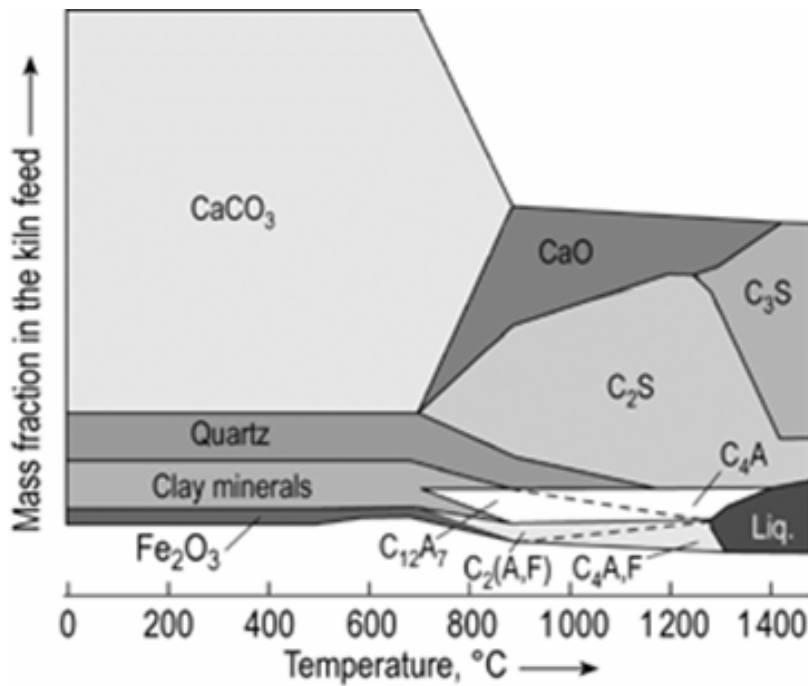


Figura 77 Descomposición de las materias primas y formación de las fases que componen el Clinker al incrementar la temperatura. El C4AF y el C3A se forman con mayor rapidez que el C3S.

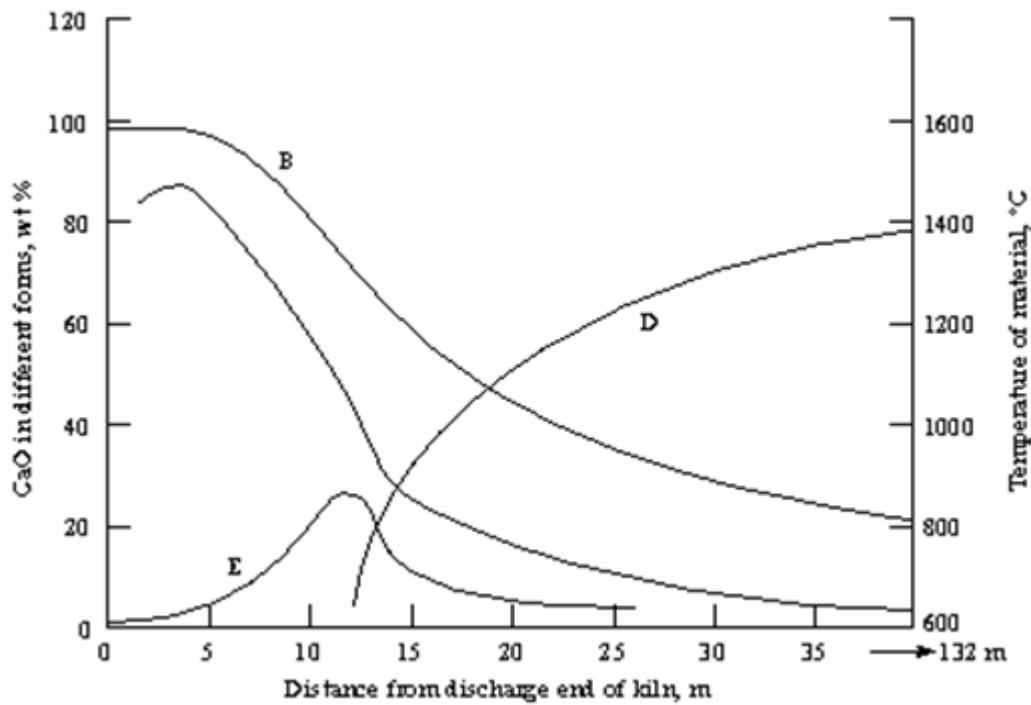


Figura 78 Temperaturas y progreso de las reacciones en un horno de calcinación (kiln) de 132 metros. El área B representa CaO en nuevos compuestos; D, CaO como CaCO3 y E CaO libre

1.8.3. Cinética de formación del Clinker de cemento Portland

$$\log t = \log \frac{D}{A} + 0.43 \frac{E}{RT}$$

t en minutos, D es el diámetro de partícula en mm, A es una constante, T es la temperatura absoluta, y E es la energía de activación teniendo un valor de 607 kJ/mol (146 kcal/mol). Por ejemplo, partículas de 0,05 mm requieren 59 min para reaccionar a 1340°C pero solo 2,3 min a 1450°C.

1.8.4. Estructura del cemento Portland

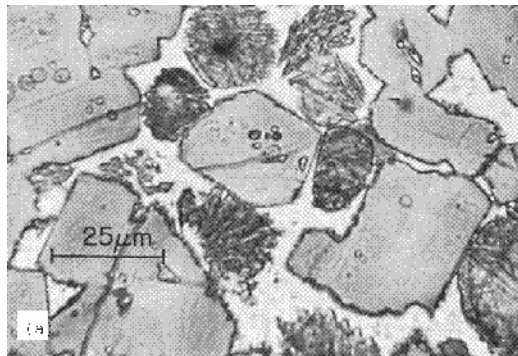


Figura 79 Microfotografía de un clinker de cemento Portland: El C3A aparece como un material intersticial oscuro, el C4AF es el material intersticial claro.

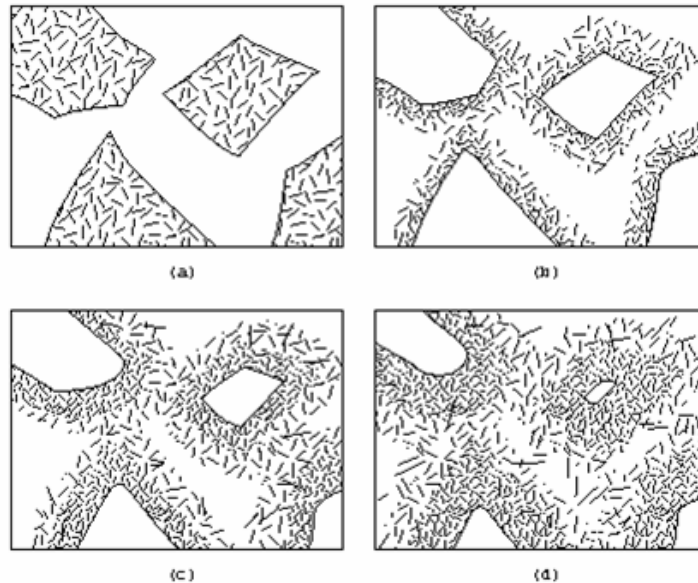


Figura 80 Cuatro etapas en el asentamiento y endurecimiento del cemento Portland: representación simplificada de la secuencia de cambios. (a) Dispersión de clinker que no ha reaccionado en agua. (b) Después de varios minutos; los productos de hidratación crece se hinchan y crecen fuera de la superficie de cada grano. (c) Después de varias horas; el recubrimiento de diferentes granos de clinker

ha comenzado a unirse, convirtiéndose el gel en una fase continua (asentamiento). (d) Después de varios días; se produce mayor desarrollo del gel (endurecimiento).

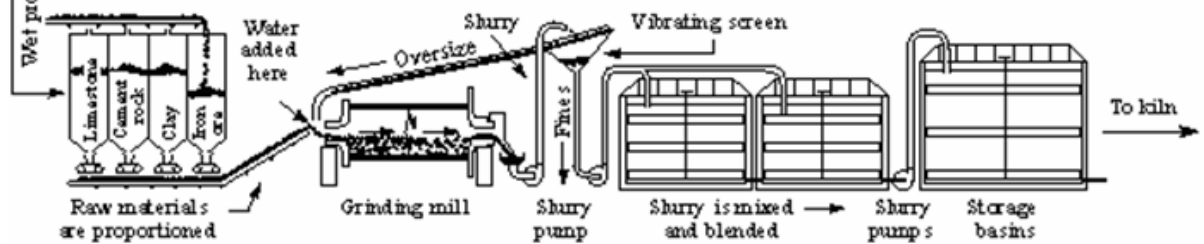
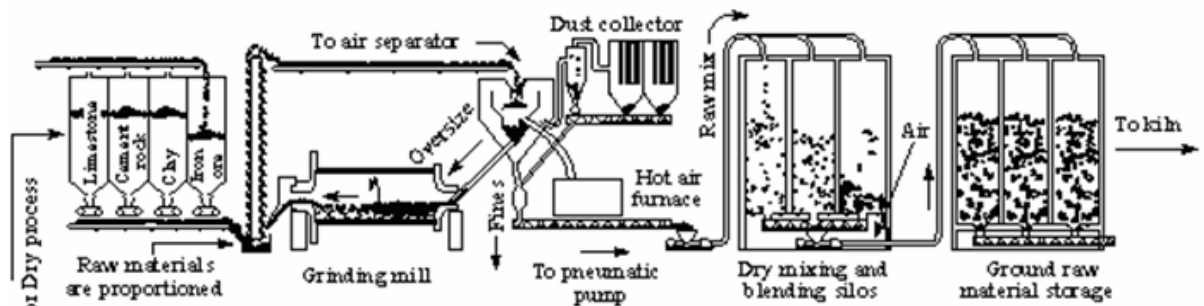
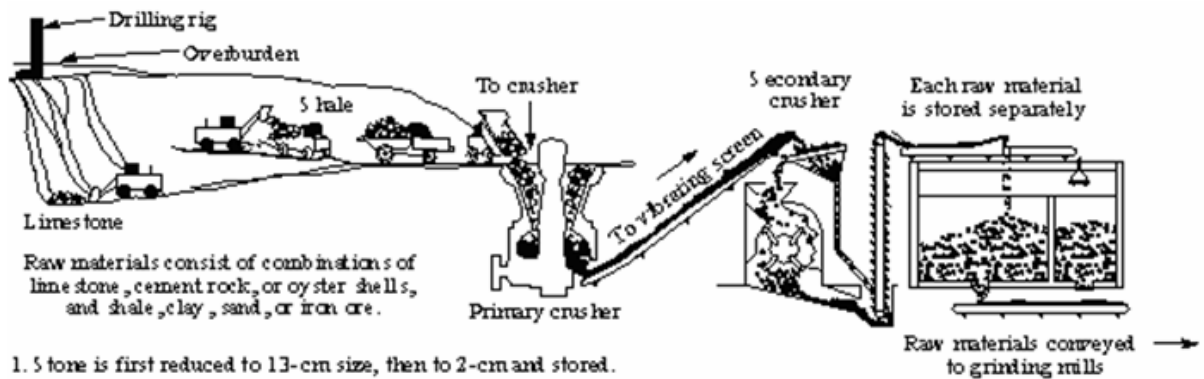
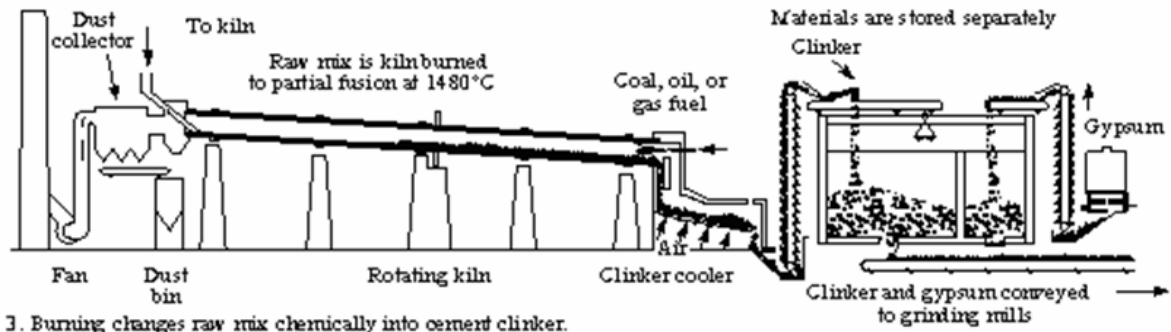


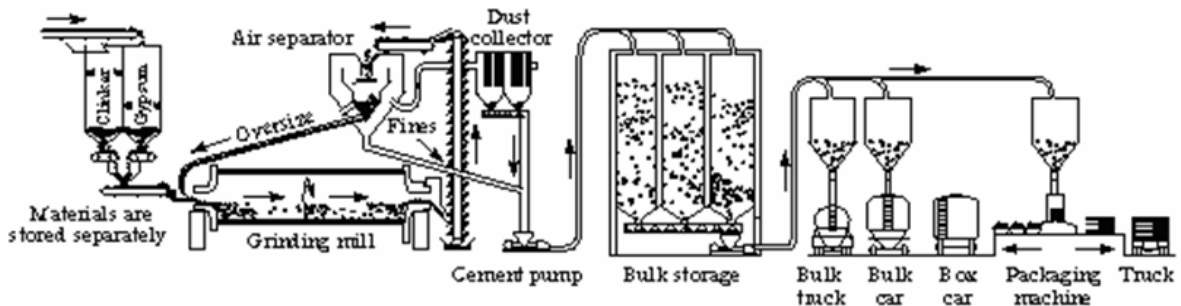
Figura 81 Diagrama de bloques del proceso de producción de cemento Pórtland.

Etapa 1. 5 Toneladas son reducidas a 13 cm de tamaño, luego a 2 cm y almacenadas.

Etapa 2. Proceso seco: la materia prima es triturada a polvo y mezclada. Proceso húmedo: La materia prima es triturada, mezclada con agua para formar una suspensión y mezclada.



3. Burning changes raw mix chemically into cement clinker.



4. Clinker with gypsum is ground into Portland cement and shipped.

Figura 82 Diagrama de bloques del proceso de producción de cemento Pórtland.
 Etapa 3. El horno cambia la mezcla de materia prima cruda en clínquer de cemento.
 Etapa 4. El clínquer con yeso es triturado en cemento Pórtland y transportado.

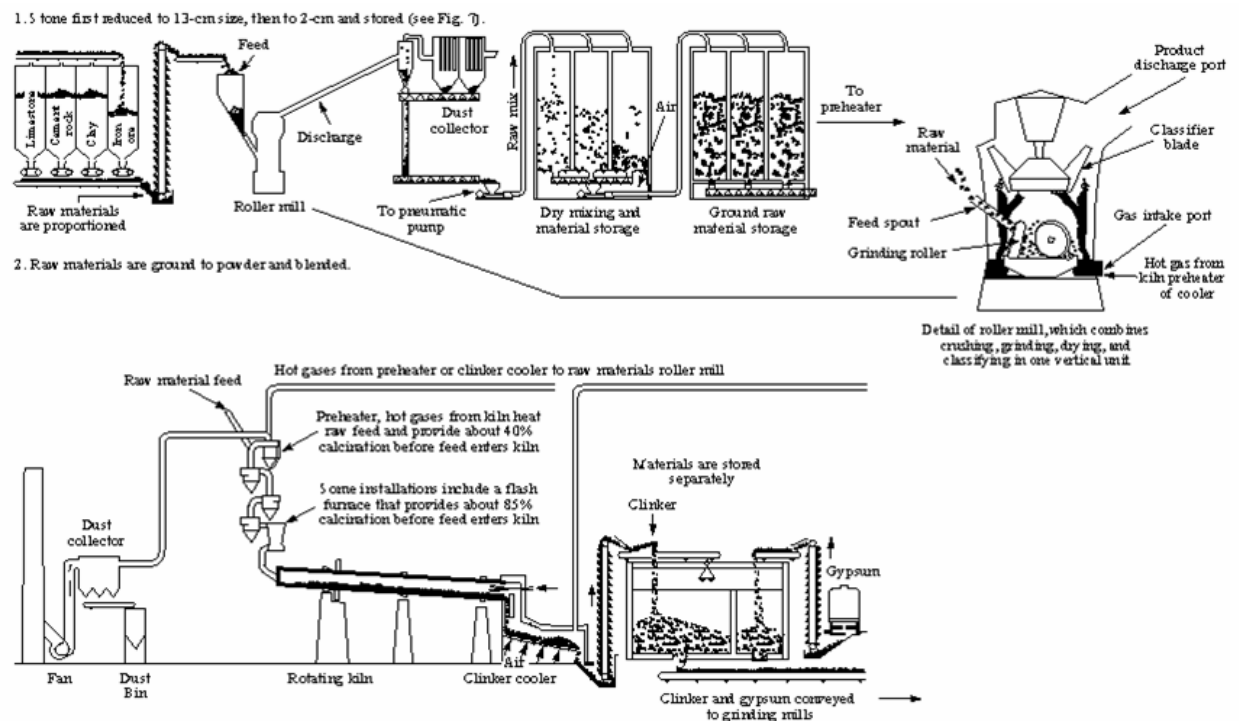


Figura 83 Diagrama de bloques del proceso de producción de cemento Pórtland por vía seca.