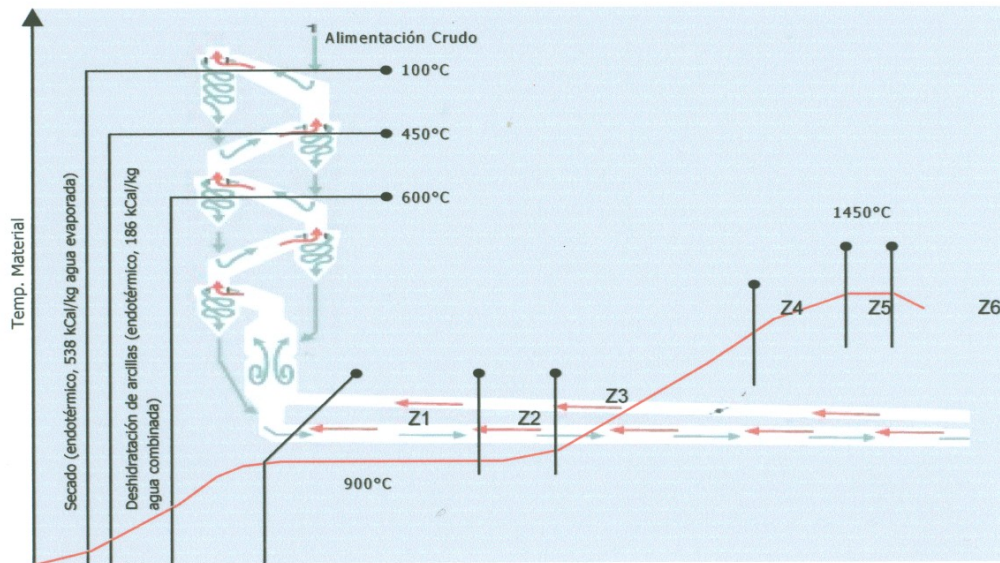


4.1 Proceso de Calcinación

En el siguiente diagrama se expone los principales procesos involucrados en producir clínker en un horno vía seca que contenga un precalentador de 4 etapas.

Diagrama 2: Etapas del proceso de calcinación



| Deshidrat. y secado | Calcinación (paso a óxidos) | Formación fase líquida o Nodulación | Sinterización | Enfriamiento |
|--|--|--|---|---|
| <p>600°C</p> <p>Ejemplos: Caolinita + agua $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O \rightarrow Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 + 2H_2O$</p> <p>Arcillas deshidratadas + Cuarzo + Carbonatos</p> | <p>900°C</p> <p>1.- Calcinación o descarbonatación de óxidos. $CO_2 \cdot Ca \xrightarrow{890^\circ C} CaO + CO_2 \uparrow$ (por arcillas, comienza a 600°C) La temperatura del material no sube pues se consume en descarbonatar. Es muy endotérmica: 393 kcal/kgCaO</p> <p>2.- Otras reacciones: $C + A, F, S \rightarrow CA, CF, CS$ Otras comienzan a 800°C: $CA, CF, CS + C \rightarrow C_2S, C_3A, C_4AF$ Algunas son exotérmicas, pero ocurren simultáneamente a la descarbonatación.</p> <p>3.- En presencia de SO_3, el C_2S formado puede dar lugar a sulfospurrita $C_2S \cdot SO_4Ca$ (incrustaciones)</p> <p>4.- Puede darse carboespurrita $C_2S \cdot CaCO_3$ (incrustaciones)</p> | <p>1160°C</p> <p>Continúan las reacciones tipo 2, 3 y 4, además de formación de C_2AS y C_12A_7.</p> <p>A 1160°C comienza la formación masiva de C_4AF y por tanto la fase líquida.</p> <p>En presencia de fluoruro, el C_3S comienza a ser estable a 1160°C.</p> <p>Algo de Cuarzo + C. Libre + C_3A + C_12A_7 + C_4AF + C_2AS + βC_2S + CS</p> <p>1338°C</p> <p>A 1200°C todo el C_2S se ha formado y han desaparecido el C_2AS y el cuarzo, y comienza el C_3S.</p> <p>A 1250°C el C_12A_7 se ha transformado en C_3A y el C_3S es estable.</p> <p>A 1338°C las fases C_3A y C_4AF ya se han fundido, adquiriendo un equilibrio eutéctico, 54.8% CaO, 22.7% SiO_2, 16.5% Al_2O_3, 6.0% Fe_2O_3: $\beta C_2S \rightarrow \alpha C_2S$ Al fundir C_3A y C_4AF ya comienza a aparecer C_3S.</p> <p>C. Libre + C_3A + C_4AF + αC_2S + algo de C_3S</p> <p>Si bien a 1338°C la mayor parte de la fase líquida se ha formado, a 1450°C se completa siempre en la zona de nodulación.</p> | <p>1450°C</p> <p>Reacción principal: sinterización Clinkerización $C_2S + CaO$ Libre \leftrightarrow C_3S endo/exo (reversible)</p> | <p>1450°C</p> <p>$C_3A, C_4AF, \alpha C_2S, C_3A$ y Ca libre sobrante de saturación.</p> <p>Constituye la congelación de la reacción, quedando las fases sólidas C_3S y C_2S atrapadas por la cristalización de la fase fundida C_3A y C_4AF, siendo crítico el llegar rápido a los 1170°C pues a esa temperatura es máxima la descomposición de C_3S a C_2S.</p> |

Todos los procesos de formación de fases acaecidas en los hornos son reacciones sólido-sólido (esquematisadas en el *Diagrama 2*) que dependerán de las velocidades de difusión.

El más rápido en difundirse es el calcio, que lo hace en forma de Ca^{2+} , luego le siguen aluminio y hierro, en formas Al^{3+} , Fe^{3+} y, finalmente, el silicio, que lo hace en forma de SiO_4^{2-} .

Sin hierro ni aluminio, la reacción sólido-sólido $\text{C}_2\text{S} + \text{CaO}_L$ para dar C_3S se produce por encima de los 2000°C . Dada la relación entre los pesos moleculares del CaO y SiO_2 , se establece que la cal óptima, correspondiente a saturación sin sobrante ni faltante para la generación de C_3S .

La presencia de aluminio favorece la difusión de los sólidos en este fundente, rebajándose la temperatura a la cual se da por encima de 1470°C , siendo la relación para la cal óptima:



Finalmente, la incorporación de hierro vuelve a rebajar la temperatura de clinkerización al entorno de los 1450°C , siendo la relación óptima entre los elementos de:



Los valores 1.18 y 0.65 son valores empíricos al no ser las fases puras que se formulan en Bogue.

De esta forma se establece una relación entre el nivel de cal real y el óptimo, denominada "grado de saturación" que expresa lo saturado que se tiene a la cal respecto al resto de elementos.

FSC(Factor de Saturación de Cal) = $100 \times \text{CaO} / \text{CaO óptima}$.

$$\text{FSC} = 100 \times \text{CaO} / (2.8 \text{SiO}_2 + 1.18 \text{Al}_2\text{O}_3 + 0.65 \text{Fe}_2\text{O}_3)$$

Cuanto mayor nivel se busque del FSC, más energía se requerirá por mayor cantidad de carbonatos a descarbonatar, salvo que el CaO provenga de otros minerales distintos de los carbonatos.

La inclusión de otros elementos modifica este módulo de Lea&Parker; así:

- La presencia de magnesio eleva este grado al incorporarse (hasta un máximo del 2%) o sustituir el calcio en las redes cristalinas, formándose compuestos análogos al C_3S , C_2S , etcétera (M_3S , M_2S ...)
- Por otro lado, la presencia de sulfato cálcico en el clínker, resta cal para las reacciones de clínkerización, por lo que ha de ser considerado en su relación estequiométrica CaO/SO_3 .

De esta forma, el FSC queda corregido a la expresión:

$$\text{FSC} = 100 \times [\text{CaO}^{**} + 0.75 \text{MgO}^{**} - 0.7 \text{SO}_3] / [2.8 \text{SiO}_2 + 1.18 \text{Al}_2\text{O}_3 + 0.65 \text{Fe}_2\text{O}_3]$$

****Nota:** Sólo hasta el 2% de MgO, ya que el resto no se incorpora a las fases del clínker. Si al CaO total se le descuenta la cal libre generada, se tiene el FSC corregido, el que "disfrutó" el horno.

Esta relación entre el elemento común en todas las fases, el CaO, y el resto, no puede por sí solo caracterizar a un crudo o clínker, siendo necesaria más información relativa a la facilidad (temperatura) para combinarse. Así surgen otros dos módulos:

Módulo Silíceo o de Sílice (MS): es la relación entre los sólidos y los líquidos que favorecerán su difusión, y que por tanto rebajarán la temperatura de clinkerización.

$$MS = \frac{\text{Sólidos}}{\text{Líquidos}} = \frac{C_3S + C_2S}{C_3A + C_4AF} = \frac{SiO_2}{Al_2O_3 + Fe_2O_3}$$

Esta es una medida indirecta del porcentaje de fase líquida que se verá más adelante.

- MS inferior a 2.0: generan excesivo espesor de costra, facilidad de cocción y exceso de fase líquida.
- MS superior a 3.0: generan escaso espesor de costra, escasa fase líquida y alta carga térmica para lograr cocer.

Así pues el MS está muy relacionado con la temperatura del horno a la cual se dará la clinkerización.

Módulo Aluminico o de fundentes (MA): es la relación entre los dos fundentes principales, la alúmina que funde a altas temperaturas y el hierro que lo hace a bajas temperaturas.

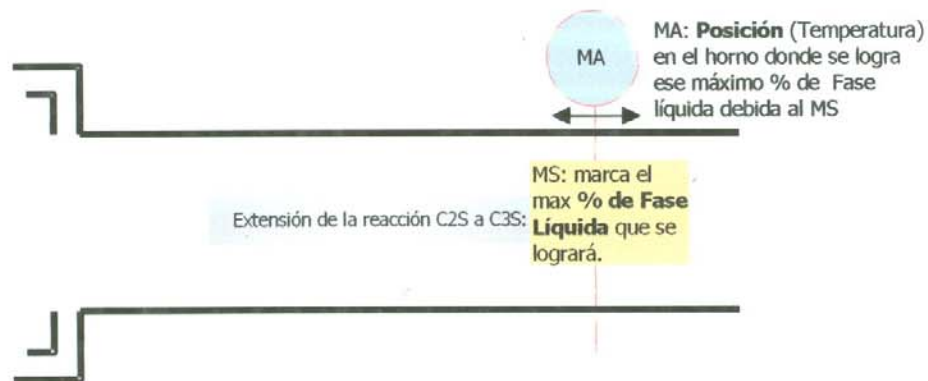
$$MA = Al_2O_3 / Fe_2O_3$$

Así pues el MA esta muy relacionado con la porción del horno donde se logrará ese porcentaje de fase líquida especificado por el MS.

- MA superior a 2.3: la Fase Líquida (F.L) comienza demasiado tarde (hacia la descarga de material del horno), la F.L. será viscosa.
- MA inferior a 1.3: la Fase Líquida comienza demasiado pronto (hacia la entrada de material del horno), la F.L. será fluida.

Resumiendo los conceptos de los módulos que caracterizan un crudo/clínker y la operación en su parte química, se tiene:

Diagrama 3: Posición de la fase líquida



Si se abusa de fundente a baja temperatura como el Fe_2O_3 y se compensa con bajada de Al_2O_3 se puede tener el mismo % F.L. pero logrado muy atrás, lo que producirá clinquerización prematura con formación de anillos a medio horno, y sobre cocimiento del clínker que le restará prestaciones. Otros elementos minoritarios son fundentes a baja temperatura, como MgO , K_2O , Na_2O y SO_3 .

La formulación de las cantidades máxima y esperada, o POTENCIAL, de las fases se debe a Bogue, quien partió de las reacciones estequiométricas de componentes puros.

Saber formularlas y llegar a las expresiones potenciales es muy importante pues la inclusión de componentes nuevos (por ejemplo la fluorita) y los compuestos que formarán harán variar las fórmulas de Bogue y la formulación de los módulos de forma que no tengan validez operativa, salvando este defecto planteando las nuevas reacciones.

Hablar de una analítica del clínker es hablar de sus tres módulos (FSC, MS y MA) y con ello de un POTENCIAL de sus fases. El conocimiento real de las fases y sus cantidades mediante Difracción de Rayos X (DRX) permite conectar horno con molienda a efectos de prever y calcular resistencias del cemento molido.

Desde el punto de vista práctico, hace falta aterrizar en el horno y estudiar etapa por etapa, pero aún no a la profundidad de parámetros de control.

Z1 – Zona de secado: El grado de humedad del crudo afectará sobre el consumo de combustible.

Z2 – Zona de deshidratación de arcillas: La energía (calor) consumido en desligar el agua combinada de las arcillas, es un mal menor por ser éstas fáciles de descomponer y hacer reaccionar. En otras palabras, la parte SiO_2 de las arcillas son más reactivas que las de SiO_2 cuarzo.

Z3 – Zona de calcinación: La descarbonatación es el proceso más costoso térmicamente hablando, de los acaecidos en el horno, por lo que todo el aporte de CaO que no provenga de carbonatos es un ahorro importante. El proceso de descarbonatación puede casi terminar antes de entrar en el tubo del horno en el caso de hornos con calcinador, manteniendo en su etapa caliente temperaturas muy altas ($\approx 900^{\circ}\text{C}$) que, salvo en torres de muchas etapas, derivará en una alta temperatura del gas de escape y por tanto en una ineficiencia térmica. En los hornos convencionales es al revés, pero la descarbonatación consume muchos metros de horno, quedando menos horno para el resto de procesos, por lo cual sus niveles de producción son ostensiblemente más bajos.

Z4 – Zona de nodulización o de formación de fase líquida o de fusión: Como su nombre indica es la zona donde se forman los compuestos (C3A, C4AF) que en su fusión darán lugar a la fase líquida que favorecerá las difusiones de los sólidos CaO_L y C_2S para su combinación en C_3S .

En esta zona se forma C_2S y comienza a aparecer C_3S , en forma de nódulos cuyo tamaño depende de lo largo que se haga esa zona.

La eficiencia de la sinterización (Clinkerización) es mayor cuando ocurre en nódulos, por lo que es muy importante nodular antes de que se llegue a las temperaturas de sinterización.

Cuanto más corta es esta zona (propio de hornos de pequeño diámetro) antes comienza la nodulización por lo que es más fácil encontrar clínker en bola en hornos pequeños, que en los de gran diámetro, lo cuales son muy propensos a generar polvo de clínker y por tanto también muy sensibles a cambios en el módulo MA.

Por lo mismo, niveles altos en fundentes a baja temperatura (Fe_2O_3 , K_2O , Na_2O , MgO , SO_3) provocan nodulización muy temprana que puede derivar en enconstramiento y formación de bolas que por esa obstrucción pueden terminar siendo enormes, saltando el obstáculo y avanzando con peligro de dañar al quemador.

Por estas razones, y cuando se elevan los niveles de estos elementos, por ejemplo el SO_3 con el uso de coque, hay que compensarlo con la bajada de otro como el Fe_2O_3 .

Así pues, la relación MA se hace escasa debiéndose evaluar el porcentaje de Fase Líquida a 1338°C y mover los niveles de los elementos individuales según sus influencias relativas que en esa expresión se contempla. Así por ejemplo la relación $\text{Fe}_2\text{O}_3 : \text{SO}_3$ es 6.1 Fe_2O_3 vs 1 SO_3 .

Los efectos de los álcalis K_2O y Na_2O todavía son más delicados pues son fundentes a 800°C , con lo cual pueden generar nodulización selectiva a bajísimas temperaturas.

La inclusión de otros fundentes como F_2Ca ha de tenerse en cuenta en la misma línea, si bien parece trabajar más hacia la línea del Al_2O_3 y, por tanto, a zonas de horno más cercanas a la salida.

Z5 – Zona de clinkerización: La cantidad de C_3S que se forme dependerá de todos los factores que afectan a la extensión de su reacción sólido-sólido en medio líquido ($\text{C}_2\text{S}_{(s)} + \text{CaOL}_{(s)} \xrightarrow{T^\circ\text{C}(\text{líquido})} \text{C}_3\text{S}_{(s)}$), esto es:

1) Relación entre los elementos (Módulos): a mayores módulos (FSC, MS) mayor potencial C3S pero peor quemabilidad, por lo que en algunos casos puede ser conveniente bajar el FSC para poder combinar y subir C3S.

2) Tiempo de residencia: que se define como el tiempo necesario de permanencia para la obtención de una cal libre igual a 1.5%. Este tiempo de residencia lo definen algunos autores como:

$$t(\text{min}) = 19 * L / (n * D * i)$$

donde:

L = longitud del horno (m)

D = diámetro efectivo interno del horno, sin contar el refractario (m)

i = inclinación en porcentaje

n = velocidad de giro del horno en rpm

Con todo esto se ve que la elección de una química adecuada para una mineralogía dada no es una cosa que se limite a seleccionar los tres módulos, ni en elegirla en vías de un máximo de potencial de Bogue, pues llega un punto en el que la relación del FSC, para un MS dado, con el consumo calorífico del horno se hace exponencial, debiéndose conocer el límite económico para el C₃S (que suele ser FSC de 95 a 99) y en esa búsqueda tener claro que los movimientos en décimas de MS equivalen, en dureza a la quema, en puntos de FSC.

Esto es, como algunos autores han descrito la quemabilidad química en la forma: $BF = FSC + 10 * MS - 3 * (MgO + K_2O + Na_2O)$, entre 100 y 120 con ideal 108. Lo que viene a decir que para mantener una misma quemabilidad, si se incrementa una décima el MS habría que bajar 1 punto al FSC.

Por otro lado no olvidar que en todos estos movimientos los perfiles de costra podrán variar en posición y grosor, debiendo ser un punto importante, la costra y el aseguramiento de la campaña del horno, a la hora de seleccionar los módulos.

Así un MS por encima de 2.5, además de dificultar la quemabilidad por escasez de fundente y de generar un clínker muy polvoriento (cuyos efectos se verán más adelante), provocan una escasa costra.

Esta alta carga a que obliga un MS alto es menos importante en hornos con calcinador por estar más repartidos los trabajos entre tubo y torre. No obstante la operación del horno en MS altos se hace más dificultosa.

Para los casos en que escaseen fundentes en la zona y se requiera operar con FSC y MS altos, se recomienda el uso de fluorita, que adicionada en cantidades muy pequeñas generará gran cantidad de fase líquida como se verá más adelante.

Por el contrario, módulos MS bajos (< 2.0) si bien favorecerán las operaciones en baja carga térmica, producen un clínker muy granulado, o incluso con formación de bolas grandes, duro de moler y costra en demasía que no sólo come sección libre en el tubo y por tanto producción, sino que el peso de la costra disminuye la vida del refractario y el horno se inestabiliza por continuos encostres-descostres.

En bibliografía se suele usar como índice de encostrabilidad (AW), la siguiente expresión:

$$AW = C_3A + C_4AF + 0.2 C_2S + 2 Fe_2O_3 \text{ (*nota: } C_2S \text{ en caso de } MA < 0.64)$$

Siendo AW normales entre 20 (menor es escaso) y 35 (mayor forma costra excesiva).

O el índice de costra i_c de Turbain:

$$i_c = 2.8 (SiO_2 - 20) + Fe_2O_3$$

Si $i_c < 7$ se tiene dificultad para generar costra, siendo lo óptimo entre 10 y 15.

La encostrabilidad es una relación muy ligada al MA por estar muy influenciada la adherencia del material al refractario al nivel de Fe_2O_3 .

Así pues un MS bajo unido a escaso Fe_2O_3 (MA alto) produce mayor inestabilidad en el horno pues cualquier movimiento en el MA generará gran cambio en la cantidad de material que se incorpore o abandone a la costra.

El MA juega un papel muy importante, siendo sus niveles recomendados los cercanos a 1.63 ya que es en esa relación a la cual se funde todo el Fe_2O_3 y Al_2O_3 a la más baja temperatura $1338^\circ C$ al constituir el EUTECTICO. Por encima de 1.63 todo el Fe_2O_3 se funde a esa temperatura, pero no todo el Al_2O_3 , y por debajo de dicho valor ocurre lo contrario.

Z6 – Zona de enfriamiento:

Ya se vio la importancia de un enfriamiento efectivo en la congelación de la reacción reversible de formación de C_3S .

El llegar lo más rápido posible a bajar la temperatura del clínker formado hasta los 1170°C permitirá cristalizar a la fase líquida y atrapar así a las fases C₃S formadas y a las C₂S y CaO sin combinar, impidiendo que se invierta la reacción. De tener un enfriamiento muy lento la descomposición se da y se generan C₂S y CaO secundarios, que en caso de C₂S ya no sería en estructura con potencial de resistencias, como la fase β (beta), sino que se transforma en la γ (gamma) que es estable por debajo de esa temperatura y que no tiene propiedades hidráulicas. Según la bibliografía, esta rapidez del enfriamiento es más crítica en el caso de clinker activados con fluorita.

Está comprobado industrialmente, salvo casos de operaciones extremadamente enrarecidas puntualmente, que tanto en los enfriadores de parrilla como los de satélites la congelación es efectiva, corriéndose más riesgo en los de satélites por cuanto el intercambio es peor y por comenzar el enfriamiento bastante antes ya en el tubo del horno.

La teoría establece que cuanto más rápido es dicho enfriamiento:

- Los tamaños de cristales son más pequeños y con mayor acumulación de tensiones, que harán más molturable al clínker.
- El mineral de C₃S es mayor al congelarse más efectivamente su reacción de formación.
- Más MgO se incorpora a las fases del clínker, quedando menos como magnesia libre expansiva. Esta comprobado que fruto de un enfriamiento rápido, el MgO se solidifica en estado vítreo en tamaños muy pequeños (< 5micras) que no generan fenómenos expansivos en el cemento. De lo contrario, por enfriamiento lento, adquirirá tamaños más grandes que sí afectarán.
- El C₃A es menos reactivo al fraguado, disminuyendo la tendencia al fraguado rápido o relámpago.

También es cierto, que a nivel industrial hay pocas diferencias justificadas por el tipo de enfriamiento, mientras que en ensayos de laboratorio, probando distintas velocidades de enfriamiento, las informaciones (proporcionadas por artículos) son contradictorias sobre todo en términos de cantidad de C_3S .

Tanto a la flama, en cuanto a su facilidad de transmitir calor por radiación, como al enfriamiento, en cuanto a la efectividad del intercambio de calor entre el aire y el clínker, les afecta mucho el nivel de polvo en el clínker, sobre todo en hornos con enfriador de satélites, más propenso a reintroducir en el horno el polvo del clínker.

Ese polvo no sólo interfiere en el horno obligándolo a mayor consumo de combustible, sino que además inestabiliza la costra, amén de aumentar las pérdidas de producto en almacenes abiertos y en los remanejos de este clínker.

El tamaño o clasificación por tamaño en el clínker suele expresarse en términos de nivel de polvo, entendiendo éste como el formado por partículas menores de 1 mm, siendo una clasificación habitual:

Tabla 1: Clasificación de tamaño de clínker

| % pasante a 1 mm | Tipo de clínker |
|------------------|---------------------|
| < 1 | muy grueso |
| ≈ 6 | Grueso |
| ≈ 28 | fino con poco polvo |
| ≈ 50 | muy polvoriento |
| > 80 | puro polvo |

Siendo un clínker óptimo, bajo esta premisa, el de pasante a 1 mm del orden de 15 a 20%. Desde el punto de vista molturabilidad del clínker, la bibliografía es bastante contradictoria, solo coincidiendo en una regla general: A mayor calidad, mayor molturabilidad.

Esto es, la molturabilidad aumenta al aumentar el % de C_3S y bajar el de C_2S , al disminuir los tamaños de las alitas (C_3S) y belitas (C_2S) y al disminuir la fase líquida, parece que el MgO es un facilitador de cara a la molturabilidad.

La densidad del clínker (Cuanto mas poroso mejor) y la distribución de poros (Cuanto mas distribuidos mejor) juegan un papel importante, y en este aspecto una mala homogeneización del crudo provocará clínkeres mas duros de moler. Un exceso de fase líquida aumentará la densidad y con ello perjudicará la molienda, al igual que sobre cocción y flamas largas y débiles que hacen crecer a los cristales de Belita (fig. 2) y de $CaO_{(L)}$ formando menos Alitas (fig. 3) y de mayor tamaño.

Figura 2 : Cristales de Belita

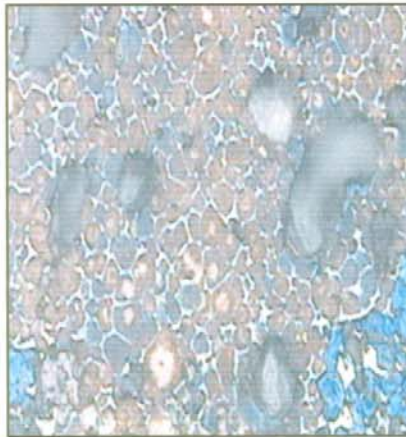


Figura 3: Cristales de Alita.



Según la bibliografía el tamaño de las partículas de alita es tanto menor cuanto mayor es el contenido de cal en la mezcla cruda y más finamente fue molida. No confirmándose en todos los casos que las resistencias del cemento aumenten al disminuir el tamaño de las alitas, y de hacerlo es en edades tempranas y no en edades finales.

Respecto a la duración y temperatura en la zona de sinterización, los cristales “suelen” hacerse más grandes al mantener mayores tiempos de residencia y mayores temperaturas, se usa el término “suelen” pues según otros autores, la duración (alto tiempo de residencia) en la zona de preparación (800 °C – 1300 °C) genera cristales grandes, pero en la zona de sinterización (1300 °C – 1450 °C) los genera pequeños, por lo que se constituye un balance.

4.2 Combustión y Combustibles

En esta sección expone brevemente los conceptos más esenciales y suministrar una herramienta de cálculo que solo demande datos simples de fácil obtención dejando los anexos para describir los modelos de cálculo.

Combustión

Es la combinación de un combustible con un oxidante (típicamente aire) para desprender calor. La principal reacción involucrada es la oxidación del carbono hasta dióxido de carbono pasando siempre por monóxido de carbono.



La reacción puede no completarse por diferentes causas como:

Falta de oxígeno:



Esta reacción es de baja exotermicidad y se cuenta con el riesgo de explosiones

Contacto del carbono incandescente (activado) con otros compuestos generados en la combustión o presentes en el ambiente:

Gases de combustión:



Humedad:



Carbonato de calcio por descarbonatar:



Las otras 2 reacciones de combustión que siguen en importancia son las del hidrógeno ($\text{H}_2 + \frac{1}{2}\text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}$ 58 Kcal/mol) y las del azufre ($\text{S} + \text{O}_2 \rightarrow \text{SO}_2$ 71 Kcal/mol).

Los combustibles utilizados en la industria cementera son derivados de compuestos orgánicos (Carbón) y petróleo (Coque, Combustóleo y Gas) y los dividimos por su estado físico en Sólidos, Líquidos y Gas donde se incluirán los distintos combustibles alternos. Teniendo cada uno diferentes características de flama:

Tabla 2: Tipo de flama

| Combustible | Tamaño de partícula | Flama | | |
|-------------|---------------------|-------------------|-------------|------------|
| | | de Longitud | Luminosidad | Emisividad |
| Coque | Micras | Larga ≈ 25 mts | Bastante | Alta |
| Combustóleo | Micras | Media ≈ 20 mts | Mucha | Media |

Por otra parte el aire tiene una composición principal de 79 % N_2 y 21 % O_2 en porcentaje volumen y 77 % N_2 y 23 % O_2 en porcentaje masa.

Coque

El coque es el residuo concentrado en carbón no fijo del craqueo térmico del residuo de la destilación del petróleo (concentrado en carbón fijo) en el que se busca extraer el resto de componentes volátiles y de alto valor del petróleo (Gases y gasolinas). Durante la destilación del petróleo se van liberando los componentes más volátiles hasta llegar al residuo de destilación (Alquitranes), para finalmente elevar su temperatura para liberar el resto de los volátiles y obtener el residuo sólido o coque. El coque también puede obtenerse por pirogénesis (Roturas por calor) de carbones, normalmente antracitas. Se le pueden aplicar los mismos análisis que a los carbones.

Estos combustibles por su naturaleza sólida tendrán un comportamiento distinto en su combustión según sea su granulometría. De cara a la molienda de estos combustibles hay que secar al combustible, pero dejando su humedad higroscópica, ya que este proceso requiere una cantidad de calor que podría llegar a encender al combustible. Por ello se recomienda que la humedad residual del producto de molienda sea aproximadamente igual a la humedad higroscópica más 1.5:

$$\text{H}_2\text{O residual} = 1.5 + \text{H}_2\text{O higroscópica}$$

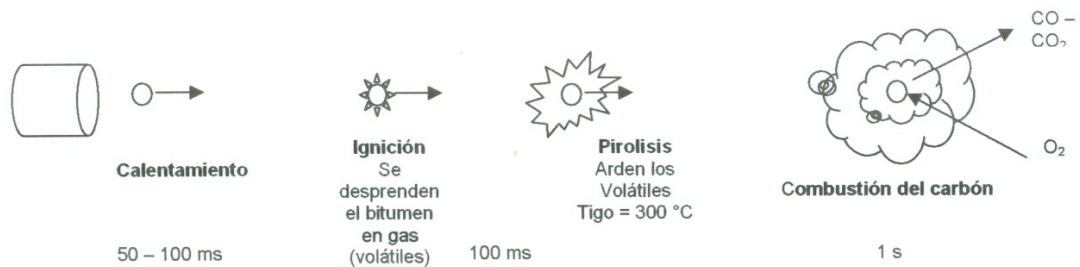
Por el lado de la combustión en el horno se buscará una finura de molienda en función de los volátiles (Que son los primeros en quemar) con la siguiente aproximación:

$$\% \text{ pasante } 90 \text{ micras} = 100 - 0.50 * \% \text{ volátiles}$$

$$\% \text{ pasante } 75 \text{ micras} = 100 - 0.85 * \% \text{ volátiles}$$

El proceso de combustión es un proceso físico – químico, donde las velocidades en las que ocurren el calentamiento, liberación e ignición de los volátiles y la combustión del coque o carbón dependen del tamaño de partícula.

Diagrama 4: Proceso de combustión del coque



El tiempo de quemado se puede expresar en función del diámetro medio de partícula (d_{50}), el cual oscila entre 20 y 30 (μm) de la siguiente forma:

$$t \text{ (s)} = 10^{[2 \cdot \log_{10}(d_{50}) - 5]}$$

La molturabilidad del combustible sólido depende, de la edad del carbón y del proceso de craqueo del cual fue obtenido el coque. En el carbón a mayor edad se va perdiendo la parte bituminosa hasta llegar a las antracitas con bajos contenidos de volátiles y alta dureza. En el caso del coque estos pueden ser producidos por lotes (Retardado) dando como resultado un producto variado dependiendo del tiempo de craqueo con durezas HGI (Índice de Hardgrove) entre 35 y 70. El coque fluido (o Flexicoque) es producido de manera continua y es mas duro con, HGI menor a 40. La composición del combustible es importante para definir la cantidad de oxidante a usar para obtener combustión completa (O_2 estequiométrico, aire estequiométrico);

Tabla 3: Composición del combustible por análisis elemental

| % Masa_{BS} | Kg Aire Mínimo/Kg combustible | Nm³ Aire Mínimo/Kg combustible |
|----------------------------|--------------------------------------|--|
| % C | 11.42*%C/100 | 8.83*%C/100 |
| %H ₂ | 34.33*%H ₂ /100 | 26.55*%H ₂ /100 |
| %S | 4.28*%S/100 | 3.31*%S/100 |
| %O ₂ | - 4.29*%O ₂ /100 | -3.31*%O ₂ /100 |
| A _{min} | Sumatoria | Sumatoria |

b) De forma aproximada por poder calorífico inferior en base seca (Expresado en Kcal/kg)

Aire mínimo o estequiométrico:

$$A_{\min} = 1.01*PCI/1000 + 0.05$$

Volumen de gases de combustión estequiométrica:

$$V_{R0} = 0.89*PCI/1000 + 1.65 \text{ (Con una composición de 18 \% de CO}_2 + \text{SO}_2\text{)}$$

El exceso de aire con respecto al mínimo estequiométrico (Lamda, λ) hace variar el total de aire disponible para la combustión:

Aire total

$$A_{\text{total}} = \lambda * A_{\min}$$

Volumen total de gases de combustión

$$V_R = \lambda * V_{R0}$$

Con una densidad aproximada de los gases de combustión de $1.5 - 0.01 \cdot O_2$ (Kg/Nm³)

$\lambda = 1/[1-(79 \cdot O_2)/(21 \cdot N_2)]$ (Requiere análisis de orsat $N_2 = 100 - CO_2 - CO - O_2$)

$\lambda = 1+0.09 \cdot O_2$ (O_2 = oxígeno después de la combustión, en exceso.)

Para pasar a exponerlos en términos por kilogramo de clinker solo multiplicamos por la relación entre el poder calorífico del combustible y el consumo específico del horno:

V_R (Nm³/kg clinker) = V_R (Nm³/kg combustible) * (PCI/CEH) (Kg clinker/kg combustible)

Finalmente, y como dato necesario para balances de calor, el consumo específico a presión constante (C_p) para carbón y coque es:

$C_p = 0.262 + 390 \times 10^{-6} T(^{\circ}C)$; Kcal/kg^oC

Así mismo, los puntos de rocío para los gases de combustión varían de 50 °C para lignitos y 30 °C para antracitas y coque.

Combustóleo

Es una fracción del petróleo que se obtiene como residuo en la destilación fraccionada, es el combustible más pesado de los que se puede destilar a presión atmosférica. El combustóleo es el combustible más común en el uso de plantas de energía eléctrica, calderas y hornos. Son hidrocarburos de composición muy cerrada para gasoil, aceite ligero y pesado.

Las densidades ρ tienen una variación importante la cual no varía mucho con la temperatura:

Gasoil $\approx 0.88 \text{ g/cm}^3$

Aceite ligero $\approx 0.9 \text{ g/cm}^3$

Aceite pesado $\approx 0.95 \text{ g/cm}^3$

Sin embargo se puede relacionar el poder calorífico de los diferentes tipos de acuerdo a su densidad mediante la siguiente fórmula:

$$\text{PCI (Kcal/kg)} = [12400 - (2100 * \rho^2)] - 800$$

En cuanto al aire mínimo, aunque es muy próximo a los 11 Nm³/kg combustible se puede expresar como:

$$\begin{aligned} \text{Amin (Nm}^3\text{/kg combustible)} &= 10.8 * (\text{PCI}/9750) \\ &= 0.85 * (\text{PCI}/1000) + 2 \end{aligned}$$

$$\text{V}_{\text{R0}} \text{ (Nm}^3\text{/kg combustible)} = 1.11 * (\text{PCI}/1000); \text{ Con aproximación de } 14 \% \text{ CO}_2 + \text{SO}_2$$

Las viscosidades y las temperaturas de ignición van muy ligadas:

| | Viscosidad (Cst) | T de ignición °C |
|----------------|------------------|------------------|
| Gasoil | < 10 | < 30 |
| Aceite ligero | 10 – 60 | 30 – 50 |
| Aceite mediano | 60 – 150 | 50 – 60 |
| Aceite pesado | > 150 | > 60 |

Siendo muy importante la variación de la viscosidad con la temperatura de cara a una buena atomización y por lo tanto una buena combustión.

Así, si un aceite pesado a 120 °C tiene una viscosidad ($3^{\circ}E \approx 23$ Cst) en el rango de los aceites ligeros, que le permiten ser transportado e inyectado a una presión de trabajo de 35 – 40 Kg/cm², generará por una atomización adecuada, una flama adecuada para el horno.

Otra característica de otros tipos de combustibles es el punto de rocío de sus gases de combustión muy cercano a 50 °C. El calor específico a presión constante C_p es aproximadamente:

$$C_p = (0.403 + 0.008 \cdot T) \cdot (1/\rho^{0.5}) \quad (T = \text{Temperatura en } ^{\circ}\text{C} \text{ y } \rho = \text{densidad en g/cm}^3 \text{ a } 15 \text{ } ^{\circ}\text{C})$$