



**SEAL PLUS**<sup>®</sup>  
SEALS FOR ROTARY KILNS

## **AIRE FALSO EN EL PROCESO DE FABRICACIÓN DE CEMENTO**

Información sobre la importancia del aire falso en el proceso del horno y del molino de crudo en las fábricas de cemento.

Cálculo y medición del aire falso.

Comparación entre diversas soluciones de sellado para reducir el aire falso en los hornos.

La importancia del mantenimiento de los equipos para reducir el aire falso.

Manuel Castro  
castro@cms-cement.com.br  
São Paulo, Brasil

## ÍNDICE

1. Introducción	03
2. Datos del proceso de un horno de 3.000 t/d	04
3. Entradas de aire falso en el sistema del horno	04
4. Consecuencias del aire falso	05
5. Cantidad de aire falso	06
6. Cálculo de aire falso	07
7. Sellado del aire falso	10
8. Sellado de los ciclones en el precalentador	15
9. Sellado en el precalcinador	16
10. Ventilador principal	16
11. Sello para molinos de crudo	16
12. Operación después de una reducción de aire falso	16

## **1. INTRODUCCIÓN**

En los últimos 30 años, la industria del cemento ha mejorado mucho la producción en las plantas y ha reducido el consumo calórico y de la energía eléctrica.

Los hornos aumentaron su capacidad de 1.000 a 2.000 t/d para 3.000 a 6.000 t/d.

Los precalentadores de ciclones de 5 etapas y la precalcación no solo mejoran las condiciones de operación, sino que también permiten el uso de combustibles alternativos de bajo costo.

El aire falso en el horno, el precalentador, el precalcador y en el ventilador principal sigue siendo un problema importante que influye negativamente tanto en los costos de producción como en la operación y, en algunos casos, en la calidad del clínker.

En este documento hablaremos de los hornos en general y, como ejemplo, de un horno de 3.000 t/d con precalentador de 5 etapas y precalcador por tratarse de un tamaño actualmente frecuente.

## 2. DATOS DE PROCESO PARA UN HORNO DE 3.000 T/D

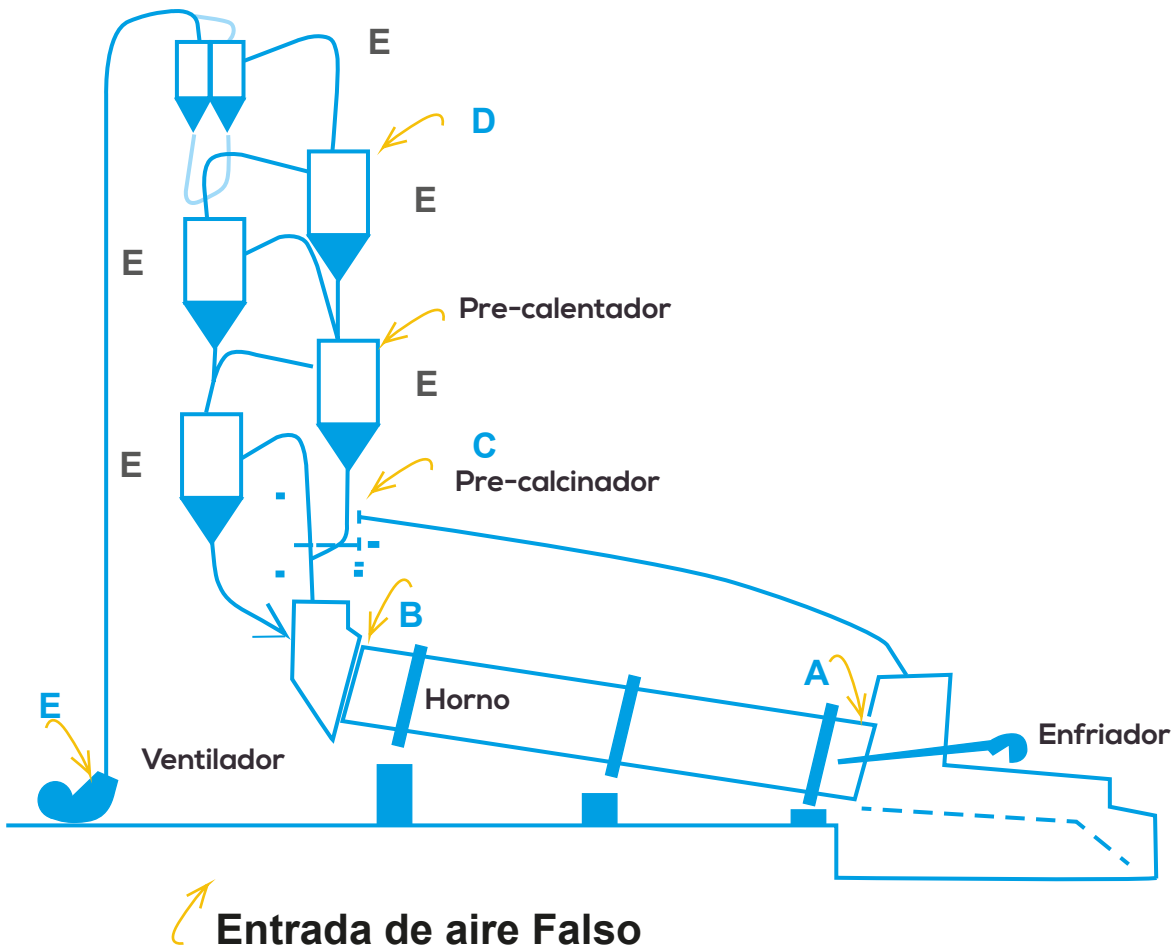
	TEMPERATURA °C	DENSIDAD Kg/m <sub>3</sub>	VOLUMEN GASES Nm <sub>3</sub> / Kg Clinker	DE VOLUMEN DE GASES M <sub>3</sub> /Kg Clinker
Precalentador Etapa 1	320	0,530	1,390	3,650
Precalentador Etapa 2	520	0,420	1,350	4,600
Precalentador Etapa 3	650	0,349	1,310	5,386
Precalentador Etapa 4	810	0,302	1,296	6,090
Precalentador Etapa 5	890	0,284	1,280	6,448

Temperatura de los gases en la descarga del precalentador: 320 a 340°C

Consumo calorífico: 770 Kcal/kg clínker

Presión del ventilador principal: aprox. 520mmCA

## 3. ENTRADAS DE AIRE FALSO EN EL SISTEMA DEL HORNO



## **Entradas de aire falso**

- A Sello de salida (descarga) del horno.
- B Sello de entrada (alimentación) del horno.
- C Precalcinador alimentación de combustible.
- D Precalentador de ciclones. Puertas de limpieza.
- E Ventilador. Sello en el eje del rotor.

En el caso del molino de crudo instalado para usar gases del horno para secar la materia prima, también puede ingresar una cantidad significativa de aire falso a través del sello de alimentación.

Las mayores entradas de aire falso se dan a través de los sellos de la alimentación B y descarga A del horno debido al gran diámetro del sello (sello) y al continuo movimiento de rotación del horno.

## **4. CONSECUENCIAS DEL AIRE FALSO EN EL SISTEMA DEL HORNO**

La entrada de aire falso provoca los siguientes problemas:

1. Mayor consumo calórico (el aire frío entrante reduce la temperatura de los gases del proceso),
2. Aumento del consumo de energía eléctrica en el ventilador de tiro debido al transporte de un mayor volumen de gases.
3. Reducción de la producción del horno, si el ventilador de tiro no tiene reserva,
4. Descontrol de la llama en el quemador principal del horno principal debido a las variaciones de presión y temperatura del aire falso,
5. Influencia en la costra de protección y en la vida útil de los refractarios,
6. En algunos hornos fue constatada la variación de cristales C3S, C4AF, C3A debido a alteraciones en la zona de enfriamiento,
7. Formación de anillos en la alimentación del horno,
8. Avalanchas en la alimentación del horno,
9. Pérdida de material fino que debe ser retirado,
10. Problemas de limpieza y mantenimiento,
11. Peligro de accidentes debido a la alta temperatura del material,
12. Descontrol de la quema durante la precalcinación,
13. Obstrucción en los ciclones del precalentador,
14. Pérdida de capacidad del ventilador de tiro (eje),
15. Afecta a la estabilidad de todo el proceso en general.

## 5. CANTIDAD DE AIRE FALSO

Con el aumento del costo de la energía térmica y eléctrica en los últimos años, reducir la cantidad de aire falso que entra en el proceso se ha vuelto cada vez más importante para reducir los costos de producción y mejorar la operación.

En una serie de sistemas de hornos con una capacidad cercana a las 3.000 t/d se realizaron mediciones en Alemania y otros países de la UE y se obtuvieron los siguientes resultados: No se ha medido la entrada de aire falso a través del sello del eje del ventilador principal.

<b>PORCENTAJE DE AIRE FALSO %</b>		
	<b>Antes de mejorar el sellado</b>	<b>Después de mejorar el sellado</b>
<b>Alimentación del horno</b>	<b>7 a 6</b>	<b>3 a 2</b>
<b>Descarga del horno</b>	<b>6 a 5</b>	<b>2 a 1</b>
<b>Pre-calcinador</b>	<b>6 a 5</b>	<b>3 a 2</b>
<b>Pre-calentador</b>	<b>3 a 2</b>	<b>1</b>
<b>TOTAL AIRE FALSO</b>	<b>22 a 18</b>	<b>9 a 6</b>

Como se puede observar en la tabla anterior, la reducción de aire falso con unos sellos adecuados en la alimentación y descarga del horno y con un buen mantenimiento general en el precalentador y en el precalcinador puede alcanzar en el caso más favorable el 16% (del 22% al 6%) y en el caso menos favorable el 9% (del 18% al 9%).

Los mayores volúmenes de aire falso se producen en la alimentación y la descarga del horno. Hay casos extremos, en los que los valores llegan al 10% en la alimentación y al 8% en la descarga, dependiendo del estado de los sellos y de la calidad del mantenimiento.

En un caso concreto, un horno de 3.000 t/d con 5 etapas, antes de la mejora de los sellos, el aire falso representaba el 18% del volumen total de gases, de los cuales el 11% correspondía a la alimentación y descarga del horno, el 5% al precalcinador y el 2% al precalentador.

Después de modificar los sellos del horno y el mantenimiento del precalentador y el precalcinador, el aire falso se redujo en un 8%. Esto representó una reducción del 3,5% en el consumo de combustible y del 12% en el consumo eléctrico del ventilador. Como resultado, el costo anual se redujo en 340.000 euros (dependiendo de los costes locales).

Teniendo en cuenta que cada cambio de un sello puede costar 180.000 euros, en menos de un año se recuperó la inversión.

## 6. CÁLCULO DE AIRE FALSO

### 6.1 Cálculo a partir de la abertura de entrada de aire falso

Este cálculo se realiza con base en la presión negativa dentro de los equipos de proceso (horno, ciclones, etc.).

Este método no es muy preciso porque la superficie de paso del aire falso es difícil de medir debido al gran diámetro del horno (sello) y a las variaciones durante la rotación. Y especialmente en el caso del horno tener ovalidad.

La velocidad de paso del aire es fácil de calcular con el valor de la presión negativa, pero para llegar al volumen de aire falso hay que conocer el área de paso, que como ya se ha indicado anteriormente es difícil de determinar. Y lo más complicado es el cálculo de la pérdida de presión, porque aquí hay que aplicar un coeficiente que representa la dificultad del paso del aire, que es diferente para cada tipo de abertura.

### 6.2 Cálculo a partir de los datos del proceso

Como ejemplo, el cálculo se hará para un horno de 3.000 t/d utilizando los datos del proceso indicados en el punto 2 y el volumen de aire falso indicado en el punto 5. Tratase de un horno instalado en Brasil.

Con un nuevo sello o la modificación del existente, la reducción del aire falso sería del 4% en la alimentación del horno (letra B en el dibujo del punto 3).

En la alimentación del horno, la temperatura medida es de 870°C y el flujo de gases es de 6,360 m<sup>3</sup>/kg de clínker y el 4% es 0,254 m<sup>3</sup>/kg de clínker y la densidad de los gases 0,279 kg/m<sup>3</sup> (valores muy próximos a los de la etapa 5 de los ciclones del precalentador).

La pérdida de energía térmica por la entrada de aire falso con una temperatura ambiente de 25 °C es:

$$E_c = V \times d \times C_a \times \Delta T$$

V = Volumen de aire falso 0,254 m<sup>3</sup>/kg de clínker

d = Densidad de los gases 0,279 kg/m<sup>3</sup>

C<sub>a</sub> = Calor específico del aire 0,24 Kal/kg °C

ΔT = Diferencia de temperatura 870 - 25 = 845 °C

$$E_c = 0,254 \times 0,279 \times 0,24 \times 845$$

$$= 14,37 \text{ Kcal/kg de clínker}$$

Como la producción del horno es de 3.000 t/d, es decir, 3.000.000 kg de clínker/día x 14,37 Kcal/kg de clínker = 43.110.000 Kcal

Suponiendo un poder calorífico medio de los combustibles de 7.600 Kcal/kg, un precio de R\$ 500/t de combustible y 320 días de producción del horno, llegamos a:

### **Reducción de R\$ 907.200,00 / año**

El ventilador principal tendría que tirar además de los gases de proceso otro 4% de aire falso.

La relación entre la potencia consumida y el caudal es:

$$\frac{P}{P1} = \left( \frac{V}{V1} \right)^3$$

Para un caudal de ventilador de 3.650 a 320 °C, la cantidad de aire falso sería de 0,146 m<sup>3</sup>/kg de clínker y si el consumo actual del ventilador es de 1.100 kW

$$P1 = \frac{P}{\left( \frac{V}{V1} \right)^3} = 937,3 \text{ KW}$$

Con un costo estimado de R\$ 0,22 por kWh, la reducción del costo de la electricidad sería:

$$Ce = 0,22 \times (1100 - 937,3) \times 24 \times 320 = \text{R\$ } 274.898 / \text{año}$$

Y la reducción total de costos debido a un 4% menos de aire falso en la alimentación del horno es:

R\$ 1.182.098 / año.

Teniendo en cuenta la reducción de aire falso también en la descarga del horno, en el precalentador y en el precalcinador, puede llegar a una reducción de R\$ 2.500.000 a R\$ 2.800.000 / año.

Como el costo de instalación de un sello eficiente es de aproximadamente R\$ 1.000.000 a R\$ 1.300.000, la recuperación de la inversión es muy rápida.

Como el costo de instalación de un sello eficiente es de aproximadamente R\$ 1.000.000 a R\$ 1.300.000, la recuperación de la inversión es muy rápida.

Estos valores son del mes de noviembre de 2019 para un horno en Brasil, fácilmente es posible calcularlos para cualquier horno tomando los costos actuales locales.

### **6.3 Cálculo a partir de O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> en los gases**

Los valores de O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> se miden mediante analizadores de gases instalados en los circuitos de flujo.

En un horno es muy importante que la combustión sea completa. La cantidad de aire debe ser suficiente para que todo el carbono se transforme en CO<sub>2</sub>.

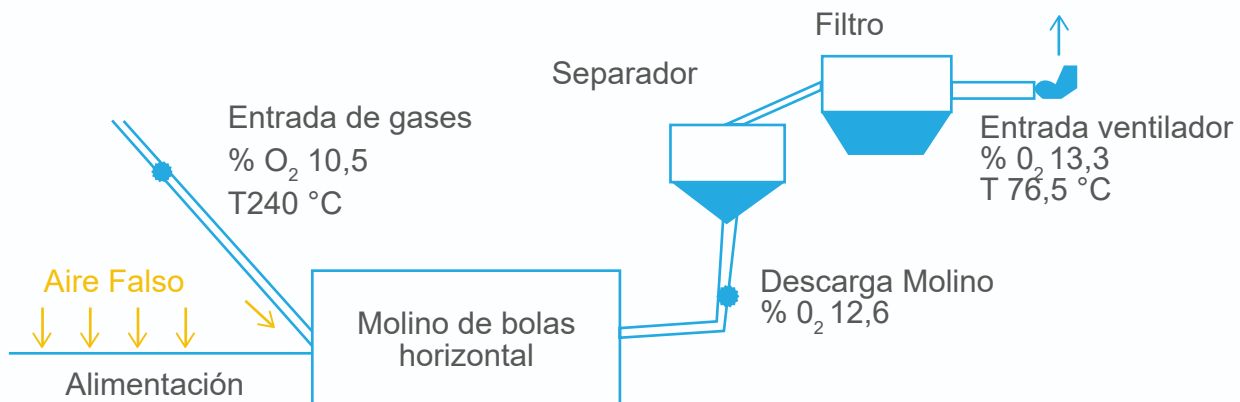


Un exceso de aire bien controlado en la combustión permite un funcionamiento normal y evita desperdicio de combustible.

En la operación de los hornos de cemento, la cantidad de exceso de aire varía entre el 5% y el 15%, lo que representa un porcentaje en los gases de salida del precalentador del 1,5% al 3,5% de O<sub>2</sub>.

El CO se produce cuando falta el O<sub>2</sub>. Para evitar un aumento del consumo de combustible, el CO<sub>2</sub> debe mantenerse a la salida del precalentador en un valor inferior al 0,2% (según el combustible 0,1%).

A modo de ejemplo, calculemos el aire falso de una instalación de molienda de crudo que utiliza gases calientes del proceso para el secado de la harina cruda.



### Cáculo de aire falso decarga de molino

$$Af = \frac{\% O_2 - \% O_1}{21 - \% O_2} \times 100$$

O<sub>2</sub> = % O<sub>2</sub> Descarga  
O<sub>1</sub> = % O<sub>2</sub> Alimentación

$$Af = \frac{12,6 - 10,5}{21 - 12,6} \times 100 = 25\%$$

Cálculo en la alimentación del ventilador

$$Afv = \frac{13,3 - 10,5}{21 - 13,3} \times 100 = 36\%$$

Cálculo del aire falso en Nm<sup>3</sup>/h

$$Aq = Q_1 \frac{\% Af}{100}$$

Q<sub>1</sub> = Volumen de gases de proceso a la alimentación del molino en Nm<sup>3</sup>/h (Q<sub>1</sub> se conoce para cada molino y es diferente en cada caso)

$$An = \frac{Aq}{Q_1 + Aq} \times 100$$

Y la cantidad de gases a la salida del molino:

$$Q_2 = Q_1 + An \text{ em Nm}^3/\text{h}$$

Conociendo la cantidad de gases a la alimentación del molino, el cálculo de la reducción de los costos de combustible y energía eléctrica en el ventilador se realiza como en el punto 6.2.

En el molino del ejemplo, sería necesario mejorar reemplazando el sello de alimentación con un sello de laminillas, así como mejorar el mantenimiento del resto de la instalación.

En un molino FLS de 2.500 mm de diámetro y 12.400 mm de longitud de una planta de Cementos de Argos en Colombia fue instalado un sello de laminillas externas tipo SEAL PLUS.

Los resultados fueron muy positivos:

La producción de molino tuvo una mejora del 4% en promedio, con una reducción del aire falso en la alimentación del 20% y la reducción del 7% en el consumo de energía del ventilador.

## 6.4 Medición del flujo de gases

Es una manera muy directa de comprobar el volumen de gas del proceso y su variación en el tiempo.

La medición del caudal se realiza mediante un sistema Venturi o con modernos medidores de flujo que dan una precisión del 2%, lo que es suficiente para comprobar la evolución del aire falso en el proceso.

Para obtener valores más precisos y calibrar los medidores de flujo, las mediciones de caudal deben ir acompañadas de cálculos del proceso por alguno de los métodos expuestos anteriormente.

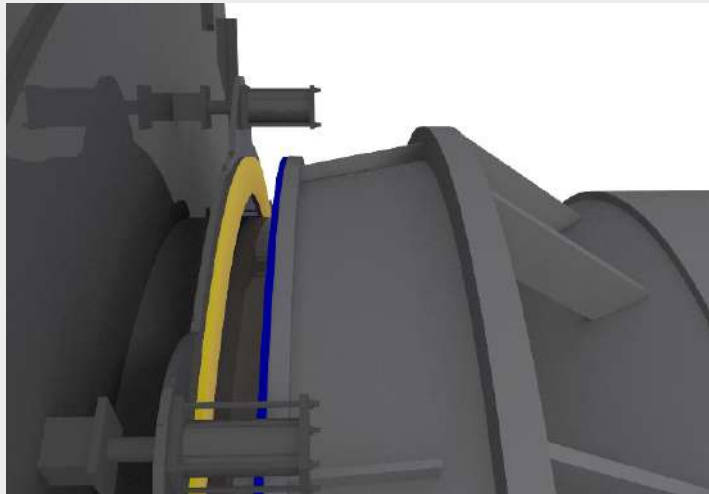
## 7. SELLADO DEL AIRE FALSO

### 7.1 Sellos para hornos

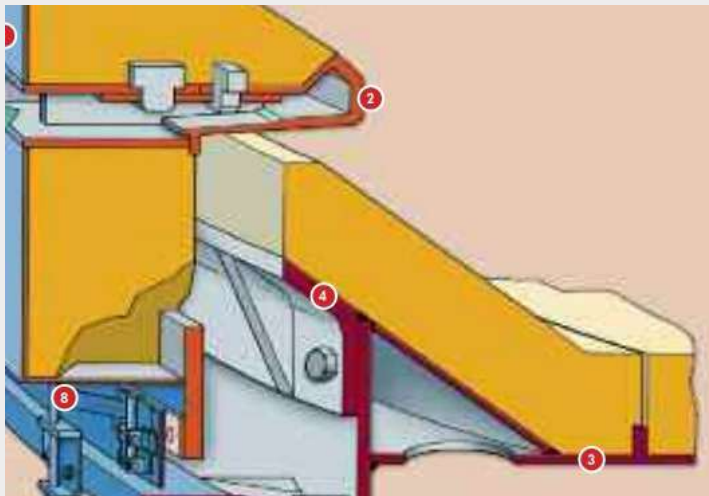
La solución para reducir la entrada de aire falso en el horno es la instalación de un sello de calidad entre la parte móvil y la parte fija en la alimentación y en la descarga. Esto ayudará a mejorar los problemas mencionados anteriormente.

## 7.2 Tipos de sellos para hornos

### A. Sellos de presión axial con cilindros neumáticos



### B. Sellos de presión axial con muelles



### C. Sellos de grafito con presión por contrapeso



### D. Sello de laminillas flexibles con presión por contrapeso

#### D.1 Alimentación



## D.2 Descarga



	Sello con cilindro	Sello con Muelles	Sello de grafito	Sello de laminillas
Tiempo de instalación	8	9	9	10
Mantenimiento	7	8	9	9
Disponibilidad	7	8	8	10
Desgaste de elemento	8	8	8	9
Variaciones axiales y radiales	7	7	8	10
Substitución de otro tipo de sellos	7	8	9	10
Total	44	48	51	58

## 7.3 Comparación entre tipos de sellos

### A continuación una comparación entre los tipos de sello:

El precio de los sellos no fue comparado porque depende de los costos de fabricación, montaje, importación e impuestos, que son diferentes en cada caso.

Explicación de la comparación:

#### Tiempo de instalación

Un sello de laminillas nuevo tiene un tiempo de instalación de 12 días. En caso de adecuación de un sello de laminillas existente, el tiempo es menor. Tanto los sellos de grafito como los de cilindros tienen elementos adicionales, como el ventilador de refrigeración para el sello de grafito y el sistema de aire comprimido para el sello de cilindros, que complican la instalación.

## Mantenimiento

Como las laminillas son externas, son muy fáciles de sustituir. El cambio se hace solamente con tornillos. En el sello de grafito es un poco más complicado debido al ventilador de refrigeración. Con los sellos de cilindros, el sistema neumático con válvulas y tuberías es más complicado. Con los sellos de resorte, la fuerza de presión disminuye poco a poco hasta ser insuficiente.

## Disponibilidad

El mejor sello es el de laminillas, ya que es autoajustable con láminas flexibles y contrapesos que siempre están activos sin ningún otro elemento externo. El sello de grafito depende de un ventilador, es decir, de un motor que puede dejar de funcionar, aumentando el desgaste del elemento de sellado. El sello de cilindros depende del funcionamiento del aire comprimido y el sello de resortes del estado de desgaste de estos.

## Desgaste de los elementos

El sello con cilindros presenta un desgaste creciente con el tiempo debido a la dificultad de mantener la misma presión constante sobre las placas. El sello con resortes es similar. En el de grafito, el sellado puede desgastarse más rápido cuando la refrigeración por aire del ventilador no funciona con regularidad. Las laminillas tienen un desgaste uniforme controlado por el diseño de estas y por el contrapeso.

## Variaciones axiales y radiales del horno

En el caso de los sellos de cilindro o de resortes, al tratarse de sistemas más rígidos, las variaciones son mal absorbidas, provocando la deformación de los elementos. Con los sellos de grafito, el desgaste aumenta porque el esfuerzo radial va directamente al elemento de sellado. En el caso de los sellos de laminillas, tanto el esfuerzo axial como el radial son compensados por la flexibilidad de estas.

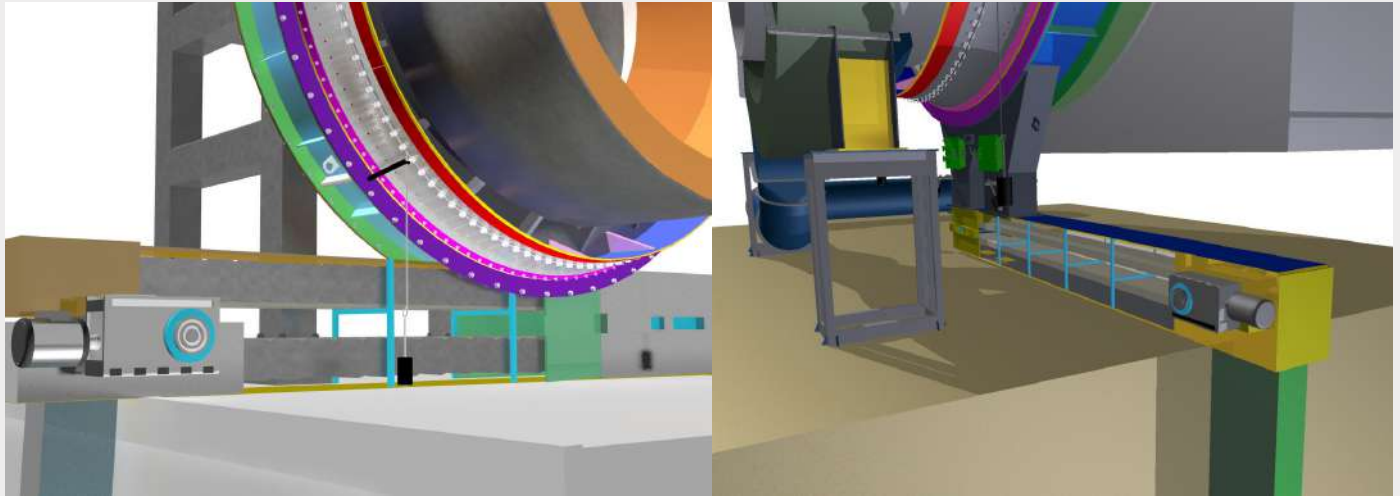
## Sustitución de otro tipo de sello

El sello de laminillas es el más fácil de aplicar para sustituir sellos de otros tipos debido a la facilidad de montaje y a la flexibilidad del sistema, a veces incluso utilizando piezas existentes del sello anterior. Otros sellos son más difíciles de adaptar porque son diseños muy específicos.

## 7.4 Transporte de evacuación de material

Los sellos del horno no son herméticos, ya que una parte es fija y la otra móvil (giratoria). Como ya se ha mencionado, la fuerza de sellado la proporcionan contrapesos, resortes o cilindros neumáticos. En condiciones normales de funcionamiento, no debería salir material por los sellos, pero cuando los anillos de material que se forman se rompen o hay avalanchas, se produce una sobrepresión momentánea en el sello y se escapan pequeñas cantidades de material fino.

Para evitar que se acumule el material debajo del horno, que suele ser peligroso debido a la alta temperatura, se debe instalar un pequeño transportador metálico resistente a las altas temperaturas para descargar el material en una tolva situada en la lateral del horno.



## 8. SELLADO EN LOS CICLONES DEL PRE-CALENTADOR

Los ciclones y las tuberías del precalentador disponen de aberturas con puertas para la verificación y la limpieza de los equipos. También en la caja de humos (alimentación del horno).

Las puertas tienen que ser revisadas y ajustadas para evitar entradas de aire falso, que además de incrementar los costos energéticos, pueden aumentar la formación de atascos por el enfriamiento del material que recircula en el flujo de los gases.

La pérdida de finos a alta temperatura a través de las aberturas de las puertas ya ha provocado accidentes peligrosos para el personal de operación y mantenimiento.

También se debe verificar la alimentación de la materia prima cruda.

## 9. SELLADO EN EL PRE-CALCINADOR

Existen varios sistemas de pre-calcinación, siempre adaptados al proceso y al tipo de combustible.

Dado que cada vez se utilizan más combustibles distintos a los clásicos petróleo, gas y carbón, que tienen otras características (como la viscosidad, la granulometría, etc.), la forma de introducirlos en el proceso tiene que ser la más adecuada.

En algunos casos, se utilizan compuertas múltiples, en otros, alimentadores parcial o totalmente cerrados.

Todo este equipo requiere un buen mantenimiento, una revisión continua y la realización de los ajustes necesarios.

## 10. VENTILADOR PRINCIPAL

Hay dos posibilidades de la caída de la eficiencia del ventilador principal. La primera es el desgaste de los alabes del rotor tras un largo periodo de uso. La segunda es la entrada de aire falso a través del sello del eje del rotor.

En ambos casos, el resultado es un aumento del consumo de energía eléctrica y, a veces, una disminución de la producción del horno cuando no hay reserva de capacidad en el ventilador.

En el caso de los alabes del rotor es posible hacer una reforma, que es bastante complicada, ya que con pequeñas modificaciones pueden cambiar las curvas características del ventilador de forma importante.

En el caso del sellado del eje, un cambio de los elementos de sellado puede resolver el problema.

En ambos casos, al tratarse de un equipo de primera importancia, es aconsejable consultar al fabricante del ventilador y, en función de su estado, sustituirlo por uno nuevo.

## 11. SELLO PARA MOLINOS DE CRUDO

Como ya se trató en el punto 6.3, en los molinos de bolas de crudo que utilizan gases calientes del proceso o de un quemador auxiliar, el aire falso es un problema porque aumenta el consumo de energía y puede reducir la producción.

El sello de laminillas se ha utilizado con éxito y el principio es el mismo que el sello de los hornos.

Sólo puede instalarse cuando hay espacio suficiente en la alimentación del molino. Por lo tanto, debe ser verificado en detalle para cada caso.

La siguiente imagen muestra una instalación en un molino de Colombia.



## 12. OPERACIÓN TRAS LA REDUCCIÓN DEL AIRE FALSO

Como el caudal de gases tras la reducción del aire falso será menor tanto en el horno como en el molino de crudo, aparecen dos oportunidades para el proceso:

- mantener la producción y reducir los costos energéticos
- aumentar la producción con la reducción del costo específico

Para aumentar la producción, hay que revisar el conjunto de equipos que influyen en ella, como la alimentación, el transporte, etc.

En el horno será necesario adaptar los parámetros de funcionamiento a las nuevas condiciones; O<sub>2</sub>, CO, temperaturas y presiones en el precalentador y en la descarga de este y verificar la calidad del clínker producido. Especialmente cuando se realiza una mejora completa (2 sellos, ciclones, etc.).

En el caso del molino de crudo también es necesario realizar las adaptaciones a las nuevas condiciones, siendo mucho más sencillo que en el caso del horno.