



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS, FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA,
BIOTECNOLOGÍA Y MATERIALES

ESTUDIO DE VARIABLES OPERACIONALES EN UN HORNO
ROTATORIO PILOTO PARA LA EMPRESA IDIEM

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL QUÍMICO

FRANCISCO ANTONIO GALLEGUILLOS FUENZALIDA

PROFESOR GUÍA:

FRANCISCO GRACIA CAROCA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

MAXIMILIANO FERRER FERRER

GERARDO DÍAZ RODENAZ

SANTIAGO DE CHILE

2019

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE: INGENIERO CIVIL QUÍMICO

POR: FRANCISCO ANTONIO GALLEGUILLOS FUENZALIDA

FECHA: 24/06/2019

PROFESOR GUÍA: FRANCISCO GRACIA CAROCA

ESTUDIO DE VARIABLES OPERACIONALES EN UN HORNO ROTATORIO PILOTO PARA LA EMPRESA IDIEM

En el presente trabajo, se busca la puesta en marcha de un horno rotatorio, perteneciente a la empresa IDIEM, estudiando las distintas variables operacionales y como estas afectaron finalmente al clínker. Este proyecto se realizó con el fin de generar futuros servicios a empresas cementeras del país. Para esto se realizó un estudio bibliográfico, la descripción de metodología, posterior entrega y análisis de resultados, para finalizar entregando las conclusiones y mejoras al equipo.

El cemento es un material cerámico fino que, al tener contacto con agua, genera distintas propiedades hidráulicas, las cuales son entregadas principalmente por el clínker. Este, posee cuatro fases principales, alita, belita, C_3A y C_4AF , siendo las dos primeras las encargadas de entregar las principales resistencias mecánicas. Por otra parte, las fases C_3A ayuda a la velocidad de reacción y la fase C_4AF ayuda a las resistencias químicas del material. La formación del clínker depende fuertemente de como este reacciona en el horno rotatorio, necesitando una temperatura de clinkerización cercana a los 1450-1500°C.

Para esto, se estudiaron las distintas variables del horno, como los flujos de gas y aire, llegando a la conclusión de que un exceso de gas, además de generar un aumento en la temperatura en la zona de clinkerización, aumenta la temperatura en las partes posteriores del horno. Por otro lado, si se aumenta la concentración de aire, la mayoría de la combustión ocurrirá en la zona de clinkerización, disminuyendo la temperatura en otras zonas del horno. Adicionalmente, se calculó el tiempo de residencia para distintas velocidades de giro (2, 2,5, 3 y 3,5 RPM), y una formula general para el flujo de alimentación, para asegurar así, una mezcla óptica del crudo.

Luego, se replicó el proceso industrial de una empresa privada para la obtención de clínker, para luego realizar distintos análisis de laboratorio, tanto al clínker como al cemento. Aquí se obtuvo que, en comparación con el obtenido industrialmente, el de forma piloto presentó menos tiempo, y temperatura, de clinkerización, y que a su vez el enfriamiento secundario fue lento. Por lo cual, se generaron propuestas sobre el sistema de alimentación, flujo de gas, flujo de aire y enfriamiento del horno rotatorio piloto.

Tabla de Contenido

1.	Introducción	1
1.1	Antecedentes del proyecto	1
1.1.1	Contexto General	1
1.1.2	Empresa	2
1.2	Objetivos	2
1.2.1	Objetivo general	2
1.2.2	Objetivos específicos	2
1.3	Metodología	3
2.	Marco teórico	4
2.1	Cemento	4
2.1.1	Definición y componentes	4
2.1.2	Tipos de cementos en Chile	4
2.1.3	Proceso productivo	5
2.1.4	Características y sus propiedades	6
2.1.5	Usos	8
2.2	Clínker	9
2.2.1	Preparación de la mezcla cruda	9
2.2.2	Propiedades de las fases principales	10
2.2.3	Reacciones de clinkerización y formación de las fases principales	12
2.2.4	Enfriamiento	15
2.2.5	Fases minoritarias	17
2.2.6	Hidratación	18
2.3	Horno rotatorio	22
2.3.1	Definición y componentes principales	22
2.3.2	Tiempo de residencia	24
2.3.3	Combustión	24
2.3.4	Horno rotatorio piloto de IDIEM	27
3.	Procedimiento experimental	29
3.1	Horno rotatorio piloto	29
3.1.1	Tiempo de residencia	29
3.1.2	Flujo de alimentación	31
3.1.3	Perfil de temperatura exterior	31

3.1.4	Relación temperatura material-flujos	33
3.1.5	Obtención de clínker.....	34
3.2	Análisis de laboratorio	34
3.2.1	Crudo de cemento	34
3.2.2	Clínker	35
3.2.3	Cemento.....	36
4.	Variables operacionales del horno rotatorio	37
4.1.1	Tiempo de residencia	37
4.1.2	Flujo de alimentación.....	39
4.1.3	Perfil de temperatura externo	40
4.1.4	Relación temperatura material-flujos	43
4.1.5	Obtención de clínker.....	45
5.	Clínker del horno rotatorio experimental y un clínker comercial.	47
5.1	Crudo de clínker.....	47
5.1.1	Ley de Bogue	47
5.2	Clínker	47
5.2.1	Cal libre	47
5.2.2	Microscopia óptica.....	48
5.3	Cemento	52
5.3.1	Peso y superficie específica.....	52
5.3.2	Ensayo de flexión y compresión de morteros	53
6.	Mejoras de operación propuestas para el horno rotatorio	55
6.1	Sistema de alimentación	55
6.2	Flujo de gas	55
6.3	Flujo de aire	56
7.	Conclusiones	58
8.	Bibliografía.....	59
9.	Anexos.....	63
9.1	Módulos de clínker	63
9.2	Relación Frecuencia-RPM	64
9.3	Relación aire-combustible	65
9.4	Relación válvula-flujo de gas.....	67
9.5	Relación frecuencia-flujo de aire	68
9.6	Metodología	69

9.6.1	Clínker	69
9.6.2	Cemento	71
9.7	Tabla de conversión termocupla Tipo K	76
9.8	Memoria de calculo	76
9.8.1	Tiempo de residencia	76
9.8.2	Perfil de temperatura externo	79

Índice de Tablas

Tabla 1: Detalles del consumo de energía en la producción de cemento [4]	1
Tabla 2: Producción de cemento a nivel mundial (2005) [5]	1
Tabla 3: Proporción de los compuestos en la mezcla cruda[19]	9
Tabla 4: Abreviaturas utilizadas en la clinkerización[19]	10
Tabla 5: Temperaturas de ignición y llama ideal de distintos combustibles[32], [33]	26
Tabla 6: Parámetros, y consumo, del horno rotatorio piloto	28
Tabla 7: Pendiente del horno y grado de llenado [19]	31
Tabla 8: Distancia en la toma de muestras sobre el perfil de temperatura externo	32
Tabla 9: Tiempo teórico y esperado del material en un horno rotatorio	38
Tabla 10:Flujos de alimentación a distintos tiempos de residencia	40
Tabla 11: Temperatura de material en función del flujo de gas y aire, a 40 cms de la llama	43
Tabla 12: Relación entre la temperatura exterior y la temperatura del material, a 40 cms de la llama	44
Tabla 13: Relación entre la temperatura exterior y temperatura del material, en la zona de clinkerización	44
Tabla 15: Datos entregados por Fluorescencia de Rayos X, sin considerar la Pérdida por calcinación	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 16: Resultados Ley de Bogue	47
Tabla 17: Resultados obtenidos al realizar la prueba de Cal libre	47
Tabla 18: Resultados, cualitativos, del clínker obtenido por el horno rotatorio piloto	48
Tabla 19: Resultados, cualitativos, del clínker comercial (Empresa privada)	48
Tabla 20: Porcentaje másico de las fases principales, por microscopia óptica	48
Tabla 21: Longitudes promedio de los poros y las fases principales (Alita y Belita)	50
Tabla 22: Peso y superficie específica de las muestras	52
Tabla 23: Conclusiones de las operaciones realizados por Empresa privada e IDIEM	58
Tabla 24: Relación entre frecuencia del motor y RPM del horno rotatorio	65
Tabla 25: Pesos molares de compuestos que participan en la combustión de gas licuado[47][48]	65
Tabla 26: Relación entre la apertura de válvula y el flujo de gas	67
Tabla 27: Relación entre la frecuencia del motor y el flujo de aire	68
Tabla 28: Densidad de las fases mayoritarias	71
Tabla 29: Tiempo teórico en función de las RPM	77
Tabla 30: Tiempo esperado con el 95% de la masa extraída	77
Tabla 31: Tiempo esperado hipotético con el 100% de la masa extraído	78
Tabla 32: Tabla final de los tiempos de residencia	78
Tabla 33: Perfil de temperatura externo, en °C, usando un flujo de 16,8 [m ³ /h] de aire y un flujo de aire 0,5 [m ³ /h] de gas	79
Tabla 34: Perfil de temperatura externo, en °C, usando un flujo de 16,8 [m ³ /h] de aire y un flujo de aire 1,82 [m ³ /h] de gas	79
Tabla 35: Perfil de temperatura externo, en °C, usando un flujo de 16,8 [m ³ /h] de aire y un flujo de aire 3,72 [m ³ /h] de gas	80
Tabla 36: Perfil de temperatura externo, en °C, usando un flujo de 16,8 [m ³ /h] de aire y un flujo de aire 5,29 [m ³ /h] de gas	80

Tabla 37: Detalles de la normalización al perfil de temperatura en tiempo estacionario, a aire constante (16,8 [m ³ /h])	81
--	----

Índice de Ilustraciones

Figura 1: Diagrama de flujos del proceso	6
Figura 2: Principal diferencia entre morteros y hormigones[7].....	9
Figura 3: Polimorfos formados a distintas temperaturas en la fase Alita.....	11
Figura 4: Polimorfos formados a distintas temperaturas en la fase Belita.....	12
Figura 5: Reacciones de clinkerización (Menor a 700°C) [22].	12
Figura 6: Reacciones de clinkerización (700-1000°C) [22].	13
Figura 7: Reacciones de clinkerización (1000-1200°C) [22].	13
Figura 8: Reacciones de clinkerización (1300-1400°C) [22].	14
Figura 9: Reacciones de clinkerización (1400-1500°C) [22].	14
Figura 10: Reacciones de clinkerización (Enfriamiento) [22].	15
Figura 11: Dilatación del cemento según su velocidad de enfriamiento[19].....	16
Figura 12: Perfil de temperatura durante la formación del clínker[23].....	16
Figura 13: Variaciones en las fases durante la formación de clínker[24]	17
Figura 14: Progreso de las fases principales del clínker durante la hidratación [27]	20
Figura 15: Formación de las fases hidratadas en función del tiempo [27]	20
Figura 16: Grado de hidratación y fuerza de compresión de un cemento Portland en función del tiempo [26]	21
Figura 17: Fuerzas de compresión aportadas por las fases principales	21
Figura 18: Diagrama cualitativo de las resistencias mecánicas aportadas por las fases principales del clínker.....	22
Figura 19: Diagrama de un horno rotatorio[28].....	22
Figura 20: Diagrama interior de un horno rotatorio[28]	23
Figura 21: Diagrama de flujos de un horno rotatorio[29].....	23
Figura 22: Esquema en un horno rotatorio para describir la posición de la llama	25
Figura 23: Formas de la llama dentro de un horno rotatorio	26
Figura 24: Temperatura de la llama en función de su exceso de aire [34].....	27
Figura 25: Horno rotatorio piloto.....	28
Figura 26: Diagrama ejemplificando la inyección de un pulso y su posterior respuesta [35].....	30
Figura 27: Diagrama sobre la toma de muestra del perfil de temperatura externa, donde a la izquierda se encontraría la llama y a la derecha, la alimentación.	32
Figura 28: Termocupla tipo K.....	33
Figura 29: Posición de la termocupla tipo K en el horno.....	33
Figura 30: Equipo para ensayo de permeabilidad según Blaine	36
Figura 31: Distribución del efluente en el tiempo.....	37
Figura 32: Función de distribución de la masa en el tiempo	38
Figura 33: Perfil de temperatura exterior, en estado estacionario, para diferentes flujos de gas, en $[m^3/h]$, con flujo de aire constante ($16,8[m^3/h]$).	40
Figura 34: Comparación de la temperatura en el punto más alto, según el flujo de gas, en $[m^3/h]$, con flujo de aire constante ($16,8[m^3/h]$).....	41
Figura 35: Normalización del perfil de la temperatura en el estado estacionario, para distintos flujos de gas, en $[m^3/h]$, con flujo de aire constante ($16,8[m^3/h]$).	42
Figura 36: Temperatura del material en función del flujo de gas y aire, en $[m^3/h]$	43

Figura 37: Comparación de un clínker obtenido (derecha) y un clínker comercial (izquierda).....	45
Figura 38: Representación poros y fases principales del clínker (Empresa privada) (500x).	49
Figura 39: Porosidad del clínker (Empresa privada izquierda, Piloto derecha) (500x). ...	50
Figura 40: Homogeneidad del clínker (Empresa privada izquierda, Piloto derecha) (500x).	51
Figura 41: Fases intersticiales (Empresa privada Izquierda, Piloto Derecha) (500x).	51
Figura 42: Resultados ensayo de flexión, cemento Portland	53
Figura 43: Resultados ensayo de compresión, cemento Portland	53
Figura 44: Válvula de gas actualmente utilizada	56
Figura 45: Variador de frecuencia marca Danfoss modelo VLT	57
Figura 46: Relación Frecuencia-RPM	64
Figura 47: Relación Flujo de gas-Apertura de válvula	67
Figura 48: Medidor de gas instalado en las cañerías de gas	67
Figura 49: Relación entre la frecuencia del inyector de aire y el flujo de este.....	68
Figura 50: Diagrama de un matraz de Le Chetelier [49]	72
Figura 51: Equipo para ensayo de permeabilidad según Blaine [50]	73
Figura 52: Dimensión de la mezcladora y sus paletas (en mm).	74
Figura 53: Tabla de conversión termocupla tipo K [51].....	76

1. Introducción

1.1 Antecedentes del proyecto

1.1.1 Contexto General

Los constantes aumentos en construcciones civiles, especialmente en urbanización y obras de ingeniería de gran escala, han llevado a un aumento en la demanda de materias primas como aceros, materiales pétreos (piedra o arena), arcillas, materiales orgánicos (Caucho o pinturas), maderas, cementos, entre otros[1]. No menor ha sido el caso de Chile, el cual tiene un aumento promedio entre el 2-8% anual en proyectos relacionados con la construcción [2], [3]. El cemento es el material encargado de entregar las principales resistencias mecánicas a las estructuras, es por esto que su constante estudio y optimización es importante para la industria.

El consumo teórico de energía para la producción de cemento se puede calcular en base a la entalpía de formación, así 1 kg de clínker, componente base del cemento, requiere cerca de 1,76 MJ[4]. Además, se deben considerar la evaporación previa del agua, las pérdidas de calor asociadas a la radiación y convección, y la salida de gases durante el proceso. Por lo tanto, en la práctica, el consumo de energía es mayor. Los detalles de este gasto se detallan a continuación:

Tabla 1: Detalles del consumo de energía en la producción de cemento [4]

Proceso	Combustible utilizado [GJ/t de producto]	Electricidad utilizada [kWh/t de producto]
Molienda del crudo	*	16 – 22
Horno rotatorio	4,2 - 7	25 – 30
Molienda final	*	28 - 55

Adicionalmente, se presenta la producción anual de cemento en Chile, y a nivel mundial, en la siguiente tabla:

Tabla 2: Producción de cemento a nivel mundial (2005) [5]

Posición en el mundo	País	Cantidad [Mt]
1	China	1038
2	EEUU	145
3	India	100
4	Japón	69
51	Chile	3,88
-	Mundo	2310

Aquí, se destaca que el principal consumo de energía en la producción de clínker, es el horno rotatorio, responsable del 70-80% del gasto energético total[4], debido a la reacción principal en la formación del clínker, la clinkerización. Esta sucede cuando el material en su interior se encuentra cercano a los 1450-1500°C. Adicionalmente, el mayor gasto eléctrico ocurre en los procesos de molienda.

Debido a esto, y a los altos costos energéticos existentes en el país, la industria cementera ha decidido importar clíinker por el bajo costo en comparación a producirlo[6]. Esto trae distintos tipos de desventajas, como no controlar la calidad del producto importado, y/o el precio de este, por las distintas variaciones que existen en el mercado internacional.

Cabe destacar que el 5% del total de las emisiones antropogénicas de CO_2 a nivel mundial corresponden a la producción de cemento, distribuidos en la liberación de dióxido de carbono de la piedra caliza, de la electricidad utilizada y del combustible utilizada (en general, combustibles fósiles) [4].

1.1.2 Empresa

IDIEM es un centro de Investigación y Desarrollo, perteneciente a la Universidad de Chile, fundado en 1898, para cubrir las necesidades de ensayo y control de calidad de los materiales usados en las obras públicas de Chile, por lo cual se encuentra en constante contacto con las cementeras más importantes del país.

Una de sus plantas, ubicada en la comuna de Cerrillos, posee un horno rotatorio piloto, en desuso, único en Chile y de los pocos en Latinoamérica, el cual podría ser utilizado para diversas pruebas de las cementeras, como el uso de nuevos fundentes o combustibles, así como la evaluación de distintas variables operacionales (tiempo, velocidad de giro, ángulo de inclinación, etc.).

Dicho todo esto, el proyecto busca poner en marcha el horno rotatorio piloto y un análisis de las distintas variables operacionales del horno, con el fin de entregar futuros servicios a empresas cementeras.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

- Poner en marcha horno rotatorio piloto de la empresa IDIEM, para la producción de clíinker, analizando las distintas variables operacionales de este, con el fin de generar futuras prestaciones de servicios a empresas cementeras.

1.2.2 Objetivos específicos

- Analizar las distintas variables operacionales, como tiempo de residencia, flujo de alimentación, temperatura del material, entre otros, que afectan a la calidad de un material al interior de un horno rotatorio.
- Replicar las variables operacionales, en la formación de clíinker, de una operación industrial en el horno rotatorio piloto.
- Realizar pruebas de laboratorio al crudo de cemento y al clíinker obtenido, tales como cal libre, microscopía óptica, superficie específica, entre otros.
- Proponer métodos y/o equipos de mejora para la operación, y posterior optimización del horno.
- Evaluar, y dejar propuestas, las mejoras al horno rotatorio piloto.

1.3 Metodología

Para la elaboración de este proyecto se propone realizar pruebas preliminares de las variables operacionales para entender el impacto de estas en el horno. Luego, se realizarán análisis de laboratorio, tanto para el crudo de cemento (Ley de Bogue), clínker (Cal libre y Microscopia óptica) y Cemento (Peso específico, determinación de la superficie específica, y ensayo de compresión y flexión de morteros).

2. Marco teórico

2.1 Cemento

2.1.1 Definición y componentes

El cemento es una sustancia inorgánica, no metálica con propiedades de unión hidráulica. Así, mezclado con agua, forma un gel que se endurece debido a la formación de hidratos. Después del endurecimiento, el cemento conserva sus resistencias mecánicas[4].

Existen numerosos tipos de cementos debido al uso de diferentes fuentes de materias primas y/o uso de adiciones. Esto con el fin de regular sus distintas propiedades mecánicas. A continuación, se describen los principales componentes del cemento:

- Clínter: Es un producto obtenido por la sinterización de una mezcla de materias primas que contienen elementos expresados normalmente en formas de óxidos (CaO , SiO_2 , Al_2O_3 y Fe_2O_3) y otros compuestos minoritarios[7].
- Yeso: En estado natural es un sulfato cálcico dihidratado ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$), aunque por un proceso de deshidratación se utiliza de forma industrial como sulfato cálcico semihidratado, el cual posee propiedades hidráulicas[8].
- Adiciones: Son compuestos, que ya sea por composición o constitución, poseen propiedades afines con el clínter y/o la pasta aglomerante. Aquí destacan las puzolanas¹, escorias² y cenizas[8].

2.1.2 Tipos de cementos en Chile

Los tipos de cementos utilizados en Chile, bajo la NCh148 del Instituto Nacional de Normalización, son descritos a continuación[9]:

- Cemento Portland: Es el producto que se obtiene de la molienda conjunta de clínter y yeso, pudiendo aceptar hasta un 3% de materias extrañas, excluyendo el sulfato de calcio hidratado.
- Cemento siderúrgico: Es el producto que se obtiene de la molienda conjunta de clínter, escoria granulada de alto horno y yeso, pudiendo aceptar hasta un 3% de materias extrañas, excluyendo el sulfato de calcio hidratado. Una escoria granulada de alto horno es un producto que se obtiene al enfriar bruscamente la masa fundida no metálica que resulta en el tratamiento de mineral de hierro en un alto horno, está compuesto principalmente por silicatos y silico-aluminosos de calcio, los cuales deben cumplir la siguiente relación

$$\frac{CaO + MgO + Al_2O_3}{SiO_2} > 1 \quad (1)$$

¹ Materiales naturales (roca volcánica) o artificiales (arcillas activadas por tratamientos térmicos o cenizas volantes recogidas) capaces de reaccionar con la cal liberada en la nitración de minerales, como silicatos, del clínter, para posteriormente fijarse a ella a temperatura ambiente[8].

² Poseen una actividad hidráulica latente, esto destaca cuando se combina y amasa con agua, fraguando y generando endurecimiento por sí mismas, a diferencia de las puzolanas. Normalmente se obtienen como subproductos del proceso siderúrgico[8].

- **Cemento con agregado tipo A:** Es el producto que se obtiene de la molienda de clínker, agregado tipo A y yeso, pudiendo aceptar hasta un 3% de materias extrañas, excluyendo el sulfato de calcio hidratado. Un agregado tipo A es una mezcla de sustancias compuestas por material calcáreo-arcilloso, principalmente óxidos de silicio, aluminio y hierro, que ha sido calcinado a una temperatura superior a 900°C. El contenido de calcio agregado, expresado como CaO total, fluctuara entre un 5 y 30% como máximo, exigido por la norma NCh 160.
- **Cemento puzolánico:** Es el producto que se obtiene de la molienda de clínker, puzolana y yeso, pudiendo aceptar hasta un 3% de materias extrañas, excluyendo el sulfato de calcio hidratado. La puzolana es un material silíceo-aluminoso, que aunque no posee propiedades aglomerantes por si solo, las desarrolla cuando esta finamente dividido y en presencia de agua, esto debido a que reacciona químicamente con hidróxido de calcio a temperatura ambiente. La puzolana debe cumplir los requisitos exigidos por la norma NCh 161.

El sulfato de calcio hidratado se restringe en los distintos de tipos de cemento debido a que estos pueden reaccionar, ya sea durante la hidratación del cemento, formando sulfatos de calcio o con aluminatos, formando sulfoaluminato de calcio. Estas reacciones dan como resultado un incremento en el volumen de sólidos, causando la expansión y descomposición de concretos expuestos a soluciones de sulfatos[10].

2.1.3 Proceso productivo

El proceso productivo general del cemento, pudiendo variar en algunas empresas si así fuese necesario, es descrito a continuación[11]:

- **Extracción de materias primas:** La materia prima para la elaboración del cemento (caliza, arcilla y yeso) se extrae de canteras o minas, y luego de pasar por un proceso de triturado, son llevadas en camiones a la planta de cemento.
- **Recepción y almacenamiento de Materias Primas:** Una vez en la planta de cemento, las materias primas son clasificadas y almacenadas hasta que son requeridas en el proceso productivo.

Las principales materias primas son descritas a continuación:

- **Piedra Caliza:** La caliza es una roca sedimentaria formada mineralógicamente por carbonatos, en su mayoría carbonato de calcio[12].
- **Arcilla:** Las arcillas son sustancias terrosas formadas principalmente por silicatos aluminicos con materia coloidal y trozos de fragmentos de rocas. Está compuesta generalmente por sílice, alúmina y agua, aunque puede contener hierro, álcalis u otros minerales[13].
- **Fundentes:** Son productos, como aluminatos o ferrito-aluminatos, que al mezclarse con el crudo principal, piedra caliza más arcilla, disminuye considerablemente la temperatura de clinkerización acelerando la velocidad de reacción[14], [15].

- **Molienda de materias primas:** Una vez definida la dosificación de las materias primas se muelen en molinos de rodillos o de bolas, obteniendo en ellos un polvo fino, que se almacena en silos de crudo.
- **Clinkerización:** En la etapa de clinkerización es donde se producen las reacciones químicas más importantes del proceso. El crudo es calcinado en el horno rotatorio a temperaturas entre 1400-1500°C, transformándose en un nuevo material llamado clínker, el cual debe ser enfriado rápidamente al salir del horno.
- **Molienda del cemento:** El clínker, junto con otras adiciones como yeso, escoria básica de alto horno o puzolana, es molido en hornos de bolas o rodillos, reduciéndolo a un polvo fino para obtener cemento, que es almacenado en silos.
- **Envasado:** El cemento es llevado del silo de almacenamiento a la ensacadora. Aquí, una vez en sacos, se pasa a formar los pallets, que serán despachados posteriormente a las empresas.
- **Despacho:** A partir de los silos de almacenamiento, el cemento es ensacado, puede ser cargado directamente en cambiones graneleros o en carros de carga del tren, para su despacho.

A continuación, se presenta un diagrama de flujos para el proceso anteriormente descrito:

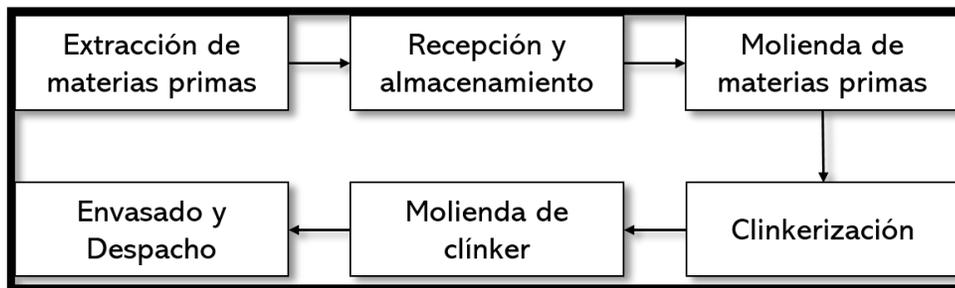


Figura 1: Diagrama de flujos del proceso

2.1.4 Características y sus propiedades

Las propiedades del cemento se pueden separar en las entregadas por sus características físicas y mineralógicas, las cuales serán enumeradas, y descritas, a continuación[16]:

➤ Físicas

- **Finura:** La finura requerida por un buen cemento se logra moliendo el clínker en el último paso de producción de cemento. Como su tasa de hidratación está directamente relacionada con el tamaño de las partículas, es una propiedad importante que controlar. Cabe destacar que, dependiendo del uso del cemento, este podría tener distintas medidas de finura, ya que no necesariamente más fino implica mejor calidad del cemento.
- **Solvencia:** Es la capacidad del cemento para no contraerse durante su endurecimiento. El cemento de buena calidad conserva su volumen después de fraguar, sin generar una expansión volumétrica tardía, lo cual es causado principalmente por el exceso de cal libre e óxido de magnesio libres.

- **Consistencia:** Capacidad de la pasta de cemento para fluir.
- **Resistencia mecánica:** Aquí se miden 3 tipos de resistencias: compresión, tracción y flexión. Varios factores afectan a la resistencia, como la relación agua-cemento, proporción de cemento y agregado fino, condiciones del curado³, tamaño y forma de la muestra, condiciones de mezcla y edad de curado. Los principales factores a considerar en las propiedades de la resistencia mecánica son:
 - La resistencia del mortero de cemento y concreto de cemento, no están directamente relacionadas.
 - La resistencia del cemento es simplemente una medida de control de calidad.
 - Las pruebas de resistencia se realizan en mezcla de mortero de cemento, no en pasta de cemento.
 - El cemento aumenta sus resistencias mecánicas con el tiempo, por lo que debe mencionarse el momento específico para realizar la prueba.

Cabe destacar que la resistencia mecánica más importante, y representativa, es la de compresión. Esto debido a que el cemento producido, principalmente utilizado en obras estructurales rígidas, será sometido a altas fuerzas de compresión, por sobre fuerzas de flexión.

- **Tiempo de fraguado:** Al agregar agua, el cemento se endurece con el pasar del tiempo. Este tiempo varía según múltiples factores, como la finura, proporción agua-cemento, composición química y aditivos. El cemento usado en la construcción debe tener un tiempo de fraguado inicial que no sea demasiado bajo, y un tiempo de fraguado final que no sea demasiado alto. En general, el tiempo de fraguado comienza cerca de los 30-45 min.
- **Calor de hidratación:** Cuando se agrega agua al cemento, esta genera calor, la cual puede afectar la calidad del cemento, aunque también puede ser beneficioso para mantener la temperatura de curado en climas más fríos. Por otro lado, cuando la generación de calor es alta, especialmente en estructuras masivas, puede causar tensiones no deseadas. Esta propiedad suele ser afectada por la relación agua-cemento, finura y temperatura de curado.
- **Perdida por calcinación:** Calentar una muestra de cemento a 900-1000°C provoca una pérdida de peso en este. Esta pérdida después del calentamiento se calcula como la pérdida de ignición. El almacenamiento, adulteración inadecuada y tiempos prolongados de transporte, pueden llevar a la prehidratación y carbonatación del cemento, lo cual puede llevar a una mayor pérdida de ignición.
- **Peso específico:** La gravedad específica, o densidad relativa, se utiliza generalmente en cálculos de proporción de mezcla. Suele ser cercana a 3,15[g/cm³], aunque existen tipos de cemento que llegan hasta 2,80[g/cm³].

➤ Mineralógicas

- **Aluminato tricálcico (C₃A):** El bajo contenido de esta fase hace que el cemento sea altamente resistente al sulfato. Por otra parte, el yeso reduce la hidratación de

³ El curado es el proceso de controlar y mantener un contenido de humedad satisfactorio, y una temperatura favorable, durante la hidratación de materiales cementantes, para mantener las propiedades de estos[52].

C_3A , que libera mucho calor en las primeras etapas de hidratación. Cabe destacar que esta fase no proporciona una resistencia mecánica de manera significativa.

- **Silicato tricálcico** (C_3S): Causa una hidratación rápida, y un posteriormente endurecimiento del cemento. Es responsable de que la resistencia del cemento inicial se establezca.
- **Silicato dicálcico** (C_2S): A diferencia del silicato tricálcico, que ayuda al aumento temprano de las resistencias mecánicas, el silicato dicálcico en el cemento ayuda a las resistencias tardías (en general, después de una semana).
- **Ferrita** (C_4AF): Esta encargada de reducir la temperatura de fusión de las materias primas. Aunque se hidrata rápidamente, no contribuye mucho a la resistencia del cemento.
- **Óxido de Magnesio** (MgO): Una cantidad excesiva de magnesio puede hacer que el cemento resulte expansivo, aunque por otro lado, una pequeña cantidad de el puede agregar ciertas resistencias mecánicas al cemento.
- **Álcalis**: Un cemento con grandes cantidades de álcali, puede causar algunas dificultades para regular el tiempo de fraguado de este. Por otra parte, un cemento con bajo contenido en álcali, puede causar decoloración. En el cemento de escoria y cal, la escoria de alto horno granulada molida no es hidráulica por si sola, si no que se “activa” mediante la adición de álcalis.
- **Cal libre**: Puede en algunos casos provocar expansiones de volumen en el cemento ya endurecido.

Cabe destacar que estas características serán detalladas con mayor extensión durante el marco teórico del presente informe.

2.1.5 Usos

Los cementos se emplean, principalmente, para elaborar morteros y hormigones, los cuales son mezclados con agua, para obtener distintos elementos constructivos, usados en pavimentos, viviendas, edificios, obras de entornos marítimos, hormigones masivos, entre otros[6][15]. La principal diferencia entre mortero y hormigón se muestra en la siguiente figura:



Figura 2: Principal diferencia entre morteros y hormigones[7].

2.2 Clínker

2.2.1 Preparación de la mezcla cruda

Los componentes principales para la formación de clínker son:

- Óxido de calcio (CaO)
- Óxido de silicio (SiO_2)
- Óxido de aluminio (Al_2O_3)
- Óxido de hierro (Fe_2O_3)

En general, el óxido de calcio y silicio son aportados por la mezcla de calizas, alcanzando cerca del 90% de la mezcla total. Por otro lado, como las piedras calizas suelen poseer bajo contenido de óxido de aluminio y hierro, se agregan arcillas y otros fundentes para suplir esta cantidad. Cabe destacar que esto último solo ocurre en el caso de ser necesario, ya que existen piedras calizas con concentraciones elevadas en óxido de aluminio y hierro, pudiendo ingresar la mezcla directamente al horno para obtener clínker[18]. Dicho esto, a continuación, se muestra una tabla con las proporciones óptimas de mezcla:

Tabla 3: Proporción de los compuestos en la mezcla cruda[19]

Componentes del clínker	Rango [% m/m]
Óxido de calcio (CaO)	58 - 67
Óxido de silicio (SiO_2)	16 - 26
Óxido de aluminio (Al_2O_3)	4 - 8
Óxido de hierro (Fe_2O_3)	2 - 5

Para más detalle sobre las proporciones específicas de los compuestos en la mezcla cruda, revisar Anexo 9.1.

2.2.2 Propiedades de las fases principales

Antes de detallar las reacciones de clinkerización, es importante definir la nomenclatura de los principales compuestos que participan en la formación de clínker. Estos son definidos en la siguiente tabla:

Tabla 4: Abreviaturas utilizadas en la clinkerización[19]

Abreviaturas a compuestos previos a la clinkerización		
Designación	Fórmula	Abreviatura
Oxido de calcio	CaO_2	C
Oxido de silicio	SiO_2	S
Oxido de aluminio	Al_2O_3	A
Óxido de hierro	Fe_2O_3	F
Abreviaturas a compuestos posterior a la clinkerización		
Designación	Fórmula	Abreviatura
Silicato tricálcico (Alita)	$3CaO \cdot SiO_2$	C_3S
Silicato dicálcico (Belita)	$2CaO \cdot SiO_2$	C_2S
Aluminato tricálcico	$3CaO \cdot Al_2O_3$	C_3A
Ferrito aluminato tetracálcico	$4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$	C_4AF

El 90-95% del cemento está compuesto por los 4 minerales principales C_3S , C_2S , C_3A y C_4AF anteriormente nombrados, y con restos de sulfato de calcio, sulfatos alcalinos, CaO sin reaccionar, MgO y otros compuestos menores sobrantes de la clinkerización y/o posterior molienda[20].

Los cuatro minerales del cemento cumplen distintas funciones en los diferentes procesos de hidratación del cemento, desde la pasta seca hasta el cemento ya endurecido. El C_3S y C_2S , ambos silicatos, contribuyen beneficiosamente al generar el producto principal de la hidratación, el gel C-S-H. Sin embargo, el C_3S se hidrata mucho más rápido que el C_2S , siendo el principal responsable en la aparición de las primeras resistencias mecánicas[20]. Por otra parte, los minerales C_3A y C_4AF , ambos aluminatos, no contribuyen en gran manera al endurecimiento del material, pero si ayudan a la liberación del calor durante la hidratación del cemento, al ser los primeros compuestos que reaccionan con el agua[21]. Más detalles sobre la formación y las características de estos minerales son descritos a continuación:

- C_3S : La alita es la fase más importante del clínker, ya que participa tanto en las resistencias mecánicas iniciales, como finales del cemento. El cemento Portland contiene cerca de un 50-70% de alita, la cual contiene 71-75% CaO , 24-28% SiO_2 y entre 3-4% de iones sustitutos, como Mg^{+2} , Al^{+3} y Fe^{+3} . Genera distintos polimorfos, dependiendo principalmente de la temperatura, los cuales pueden ser apreciados en la siguiente figura

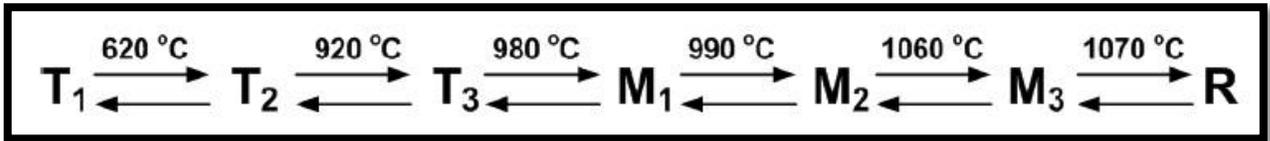


Figura 3: Polimorfos formados a distintas temperaturas en la fase Alita

Donde T_i corresponde a una estructura triclínica, M_i a una estructura monoclínica y R romboédrica. Debido a su red cristalina, las formas más comunes en el clinker industrial son la M_1 y M_3 . Por otro lado, durante el enfriamiento suele ocurrir una regresión de la forma R a las formas M_1 y M_3 , ya sea formando pequeños cristales ricos en iones sustitutos (M_3) o largos cristales pobres en iones sustitutos (M_1). Finalmente, cabe destacar, que los polimorfos no muestra gran diferencia, entre si, en las propiedades hidráulicas del cemento.

- C_2S : La belita es la segunda fase más importante en la producción de clinker, desarrolla resistencias mecánicas similares a alita, aunque en menor proporción y mucho más lenta. Se encuentra entre un 15-30% del cemento Portland y contiene un 60-65% CaO , 29-35% de SiO_2 y entre 4-6% óxidos sustitutos, principalmente Al_2O_3 , F_2O_3 , aunque posee pequeñas cantidades de K_2O , Na_2O , MgO , SO_3 y P_2O_5 . La belita cristaliza en 5 polimorfos distintos, que a diferencia de la alita si afectan en las propiedades estructurales e hidráulicas del cemento. Estos polimorfos son $\alpha - belita$, $\alpha'_H - belita$, $\alpha'_L - belita$, $\beta - belita$ y $\gamma - belita$ (H es por "high" (alto) y L es por "low" (bajo)). Los polimorfos $\alpha' - belita$ son las formas hidráulicas más importantes de la belita, mientras que la $\gamma - belita$ no aporta ninguna propiedad hidráulica, ni de endurecimiento. El polimorfo $\beta - belita$ también es un polimorfo hidráulico, pero en menor cantidad que los polimorfos $\alpha' - belita$, siendo estos últimos los más comunes en los procesos industriales de la formación de clinker. Uno de los fenómenos que es necesario prevenir en la formación de belita, es la desintegración del clinker, la cual ocurre cuando $\beta - belita$ no se estabiliza durante el enfriamiento o durante la inversión de los polimorfos $\beta - \gamma - belita$. Por otra parte, el polimorfo $\gamma - belita$ es menos denso que $\beta - belita$, la cual causa pequeñas fracturas de $\beta - belita$, formando un polvo más voluminoso. Finalmente, se muestra a continuación una imagen con la aparición de los distintos polimorfos en función de la temperatura:

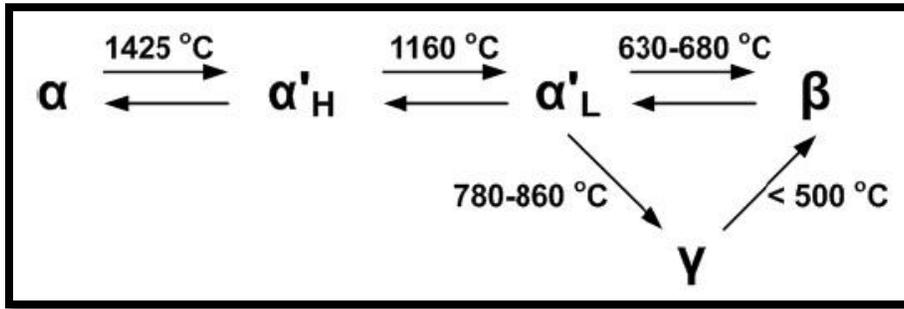


Figura 4: Polimorfos formados a distintas temperaturas en la fase Belita

- C_3A : Este es el componente más reactivo del clínker, y posteriormente del cemento Portland, el cual se encuentra entre un 5-10% de este último. Un C_3A puro contiene un 62% de CaO y un 38% de Al_2O_3 , y no existe una relación directa entre sus polimorfos y la temperatura. Sin embargo, la aparición de iones de Ca^{+2} en la estructura de la C_3A puede realizar cambios en la estructura del cristal. El Ca^{+2} puede ser sustituido por Mg^{+2} , $2K^+$ y $2Na^+$, Al^{+3} y Fe^{+3} , y Si^{+4} , pero solo los álcalis afectan la estructura del material, formando, desde un cristal cubico, un cristal ortorrómbico y monoclinico con forma de finos granos con cristales de ferrita.
- C_4AF : Esta fase constituye entre el 5-15% del cemento portland clínker, en su fase pura contiene 46% de CaO , 21% de Al_2O_3 , 33% de Fe_2O_3 . Esta fase presenta un valor hidráulico bajo y tiene pequeña participación en la resistencia a los esfuerzos mecánicos del cemento. Su propiedad principal es la resistencia a la corrosión química.

2.2.3 Reacciones de clinkerización y formación de las fases principales

A continuación, se procederá a describir las distintas reacciones de clinkerización en función de la temperatura[7]

- Antes de los 700°C: Ocurre la deshidratación de la caliza y la arcilla.

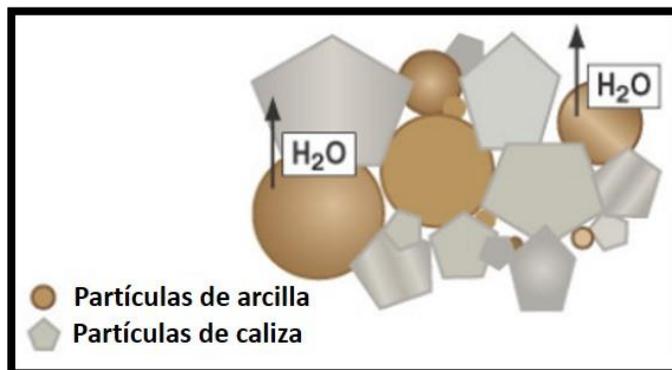


Figura 5: Reacciones de clinkerización (Menor a 700°C) [22].

- Entre 700-1000°C: Se produce la combustión de la materia orgánica y la decarbonatación de la caliza, la cual se descompone para reaccionar y convertirse en óxido.

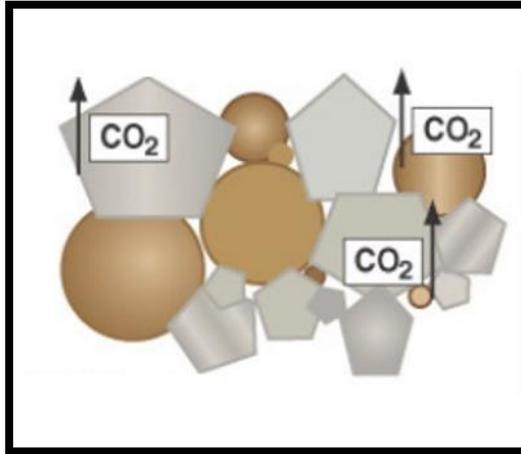


Figura 6: Reacciones de clinkerización (700-1000°C) [22].

- Entre 1000-1200°C: El óxido férrico existente y la alúmina separada de la arcilla, reaccionan con la cal originando Ferroaluminato tetracálcico y aluminato tricálcico



Estos dos compuestos forman una masa pastosa denominada lecho fundido en la cual “flotan” la sílice y la cal restantes en estado sólido. Adicionalmente, empieza la formación de belita, aunque en muy pequeñas cantidades.

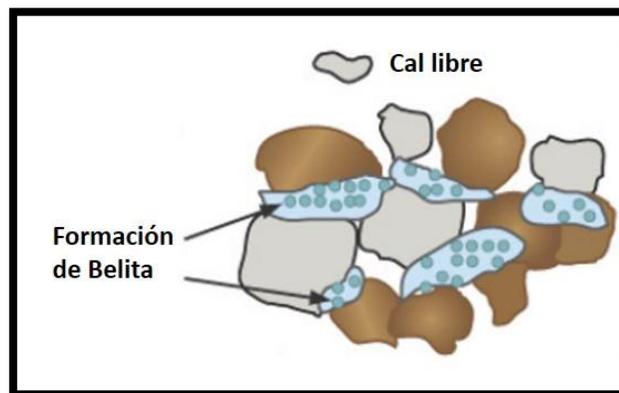


Figura 7: Reacciones de clinkerización (1000-1200°C) [22].

- Entre 1200-1300°C: Se verifica la reacción de la cal y la sílice para formar silicato bicálcico, debiendo sobrar cal:



Este compuesto tiene carácter hidráulico, pero si se detuviera el proceso a esta temperatura los cementos solamente tendrían resistencia a largo plazo. Adicionalmente, comienza la formación de alita.



Este compuesto es el componente hidráulico esencial del cemento, el cual entrega las resistencias mecánicas iniciales del cemento.

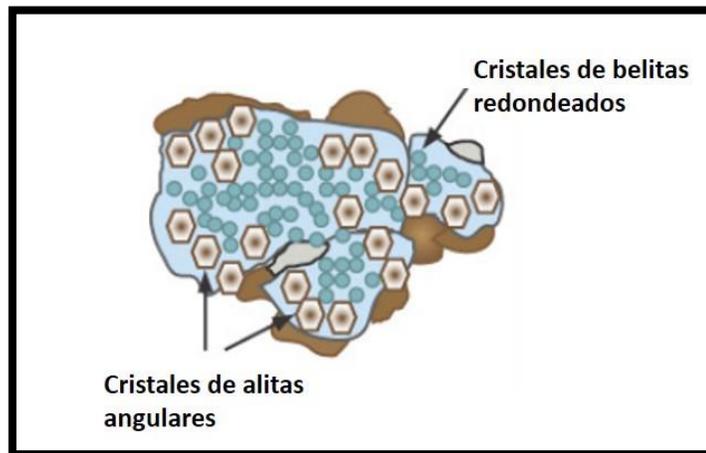


Figura 8: Reacciones de clinkerización (1300-1400°C) [22].

- Entre 1400-1500°C: Las partículas de belita disminuyen en cantidad y tamaño, mientras que las de alita crecen.

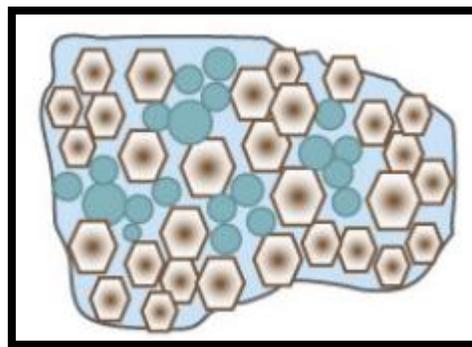


Figura 9: Reacciones de clinkerización (1400-1500°C) [22].

- Enfriamiento: La fase líquida cristaliza, mientras que las fases alita y belita forman una estructura lamelar.

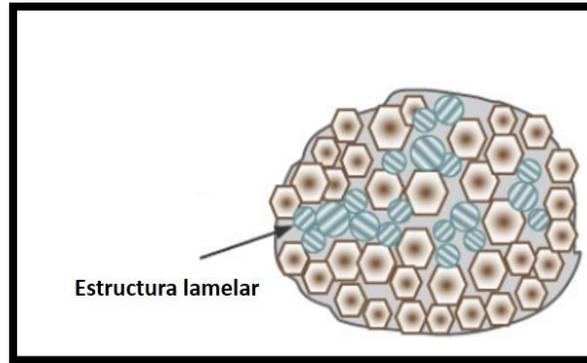


Figura 10: Reacciones de clinkerización (Enfriamiento) [22].

2.2.4 Enfriamiento

Posterior a las reacciones mencionadas en la sección anterior, las cuales ocurren dentro del horno rotatorio, existen dos fases de enfriamiento, la primaria y la secundaria. La primera ocurre cuando el material pasa por debajo de la llama dentro del reactor, mientras que la segunda ocurre por algún equipo externo, ya sea un tambor rotatorio, secador tipo parrilla o secador tipo planetario. Es importante destacar que el enfriamiento del clínker afecta directamente sobre su calidad, específicamente sobre su estructura, composición mineralógica y molturabilidad del cemento[19]. Adicionalmente, el enfriamiento del clínker es necesario por las siguientes razones

- El clínker rojo, nombrado así debido a sus altas temperaturas, no es transportable.
- El clínker caliente influye desfavorablemente sobre la molienda del cemento.
- Un proceso de enfriamiento adecuado perfecciona las propiedades del cemento.

Este último punto puede ser visto en la siguiente figura, donde se destaca la dilatación sufrida por dos prismas de hormigón conservados, fabricados con el mismo clínker, en solución al 5% de sulfato de magnesio



Figura 11: Dilatación del cemento según su velocidad de enfriamiento[19]

La principal diferencia vista en la figura anterior se debe a que en el enfriamiento lento, el C_3A estaba totalmente cristalizado, mientras que en el enfriamiento rápido, se encuentra en un estado vítreo, el cual es poco sensible al ataque de las soluciones de sulfato de sodio y/o magnesio.

Finalmente, el perfil de temperatura señalado durante esta sección puede ser visto en la siguiente figura:

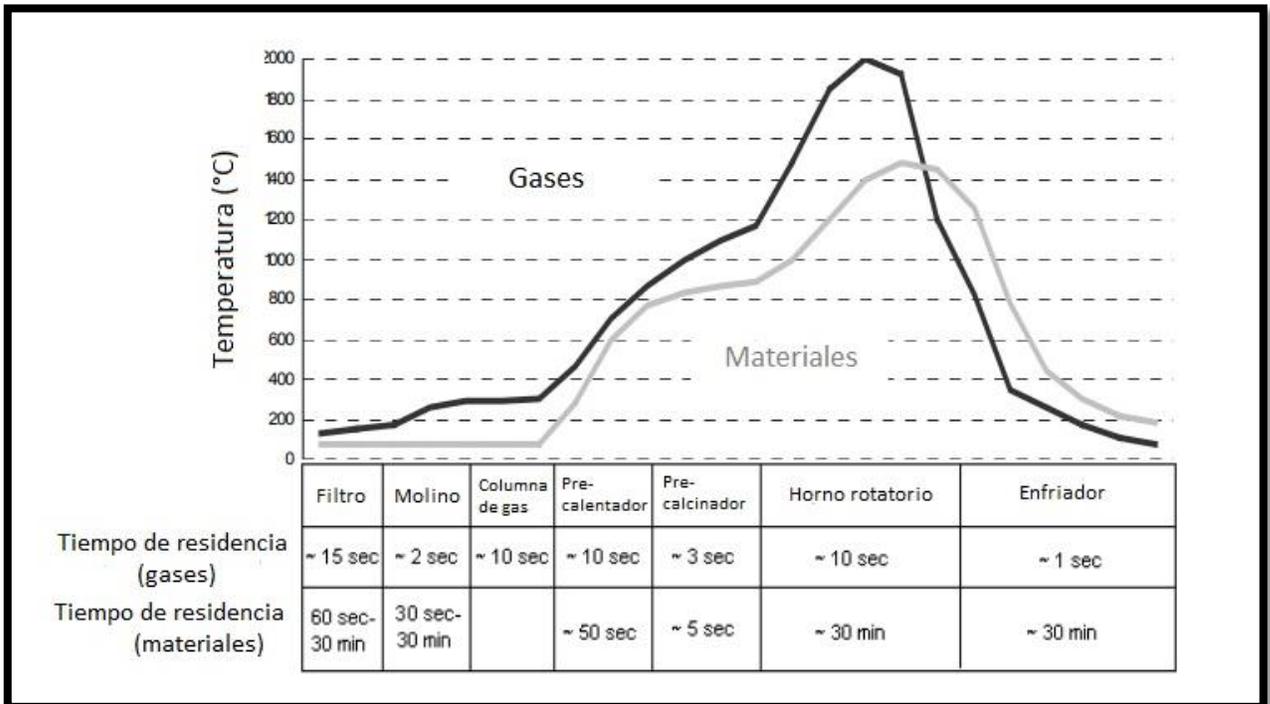


Figura 12: Perfil de temperatura durante la formación del clinker[23]

2.2.4.1 Distribución de masa y de fases durante la clinkerización

A continuación, es posible visualizar la variación de fases producto de la temperatura:

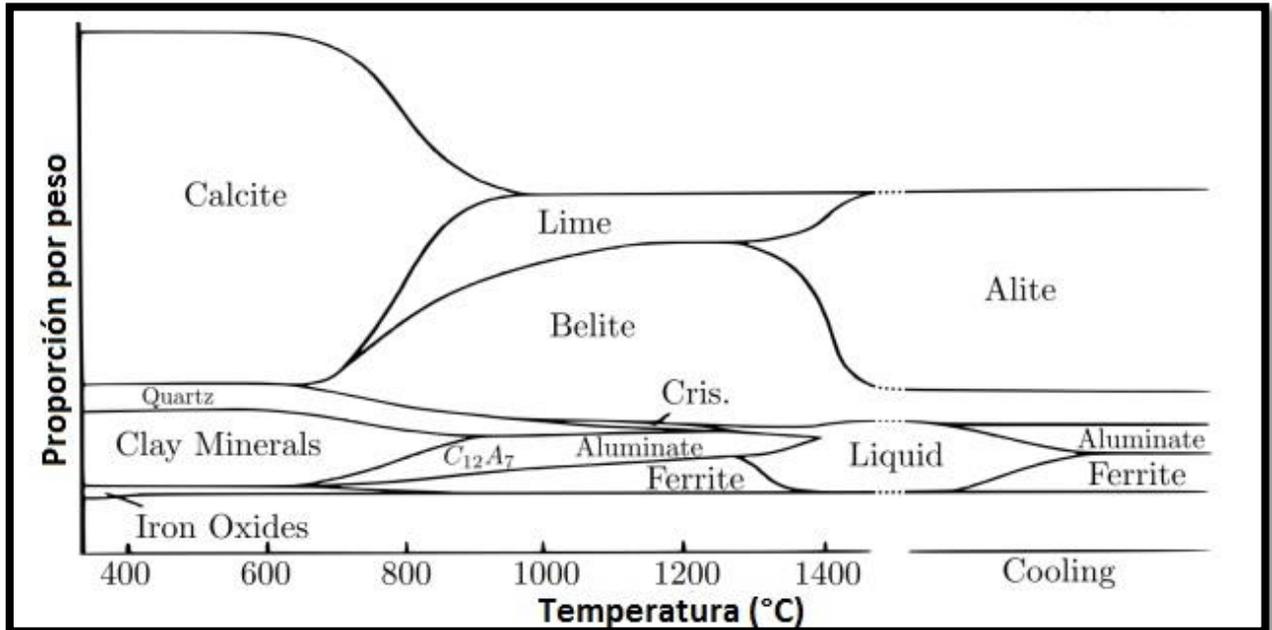


Figura 13: Variaciones en las fases durante la formación de clínker[24]

2.2.5 Fases minoritarias

Además de las 4 fases principales, el clínker posee fases en menor proporción que las anteriores, las cuales serán denominadas fases minoritarias. Estas fases dependen directamente de la composición presente en las materias primas, generando así, impurezas en el clínker. Dentro de estas fases minoritarias se encuentran el óxido de calcio (CaO), óxido de Magnesio (MgO), álcalis (K₂O, Na₂O), sulfuros, cloruros, fluoruros, fósforo, óxido de titanio y metales pesados.

Es importante controlar estas fases minoritarias por las siguientes razones:

- Pueden influir en las distintas reacciones durante la formación de clínker en el horno, a través de una reducción de temperatura en la fase líquida y diversas modificaciones en las reactividades de la fase sólida.
- Pueden causar problemas de operaciones en las instalaciones (hornos, chimeneas, etc.) formando anillos, incrustaciones, etc.
- Pueden afectar el medio ambiente por medio de las emisiones provenientes de la chimenea.
- Pueden afectar a las propiedades del clínker producido, causando cambios en la cantidad de las fases principales o en las reactividades de estas.

Dentro de todas las fases anteriormente nombradas, es importante nombrar el CaO, ya que representa que la cal inicial no reacciona completamente al formar C₃S:



Si esta cal libre permanece en grandes cantidades, durante el posterior proceso de hidratación reaccionara con el agua formando hidróxido de calcio:



De la misma manera, la acumulación de oxido de calcio puede formar hidróxido de magnesio, de la siguiente manera:



Esta reacción posee una velocidad lenta, y tiene lugar cuando las fases mayoritarias ya se han endurecido casi en su totalidad, por lo cual podría generar un aumento de volumen pudiendo aparecer distintas grietas, reduciendo considerablemente la resistencia mecánica del hormigón o mortero.

2.2.6 Hidratación

La hidratación del cemento es un fenómeno químico por el cual un aglomerante hidráulico e inorgánico, se mezcla con agua, formando una pasta. Esta, fragua y endurece debido a distintos procesos y reacciones químicas, los cuales dependen fuertemente de las fases principales del clínker, descritas en la sección 2.2.2 [25]. A continuación, se describirán los hitos más importantes a conocer en la hidratación del cemento:

2.2.6.1 Principales factores que influyen en la hidratación

Los principales factores que afectan el proceso de hidratación del cemento son:

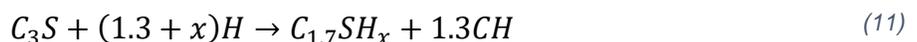
- La composición de las fases del cemento y la presencia de iones externos.
- La finura del cemento, en particular la distribución de tamaño de partículas y la superficie específica.
- La relación agua-cemento usada.
- La temperatura de curado del cemento.
- La presencia de aditivos químicos, por ejemplo, sustancias químicas en pequeñas cantidades que puedan afectar la velocidad de hidratación y las propiedades del cemento.
- La presencia de aditivos físicos, por ejemplo, materiales inertes que puedan provenir del horno rotatorio, como cenizas o escorias.

2.2.6.2 Reacciones químicas

A continuación, se destacan las principales reacciones que ocurren durante la hidratación

➤ Hidratación de los silicatos de calcio

Como se ha dicho anteriormente, la fase C_3S es la mas abundante e importante en la formación de cemento, contribuyendo a las resistencias mecánicas iniciales. La hidratación de la fase C_3S puede ser escrita como



Donde $C_{1.7}SH_x$ es el silicato de calcio hidratado, en fase gel, y CH es el hidróxido de calcio, mineral normalmente conocido como portlandita. La variable x en la ecuación anterior representa la cantidad de agua asociada al gel CSH , el cual varía entre 1.4 y 4, dependiendo principalmente de la humedad relativa en la pasta. Esta reacción ocurre durante los primeros días, generando las principales resistencias mecánicas iniciales y reduciendo considerablemente la porosidad capilar[26].

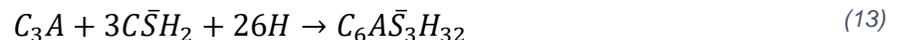
Por otra parte, la fase C_2S reacciona de la siguiente manera



Los productos de hidratación de la ecuación anterior son los mismos que en la fase C_3S , aunque se genera mucho menos hidróxido de calcio. La fase C_2S es mucho menos soluble que la fase C_3S , por lo tanto, su velocidad de reacción es mucho menor. Finalmente, la hidratación de la fase C_2S contribuye, de menor manera, a las resistencias mecánicas iniciales, pero de manera significativa, a las resistencias futuras del cemento y concreto[26].

➤ Hidratación de las fases C_3A y C_4AF

La hidratación del C_3A ocurre inmediatamente cuando este entra en contacto con el agua, haciendo que el cemento frague al instante. Para evitar esto, se añade yeso ($2H_2O \cdot CaSO_4$ o $C\bar{S}H_2$), que reacciona con el aluminato, formando etringita ($C_6A\bar{S}_3H_{32}$), de la siguiente manera:



Por último, el C_4AF se hidroliza formando aluminato tricálcico hexahidratado y ferrito monocálcico. Esto se muestra en la siguiente reacción:



Dicho esto, la cinética de un cemento Portland estándar puede ser descrito con los siguientes gráficos

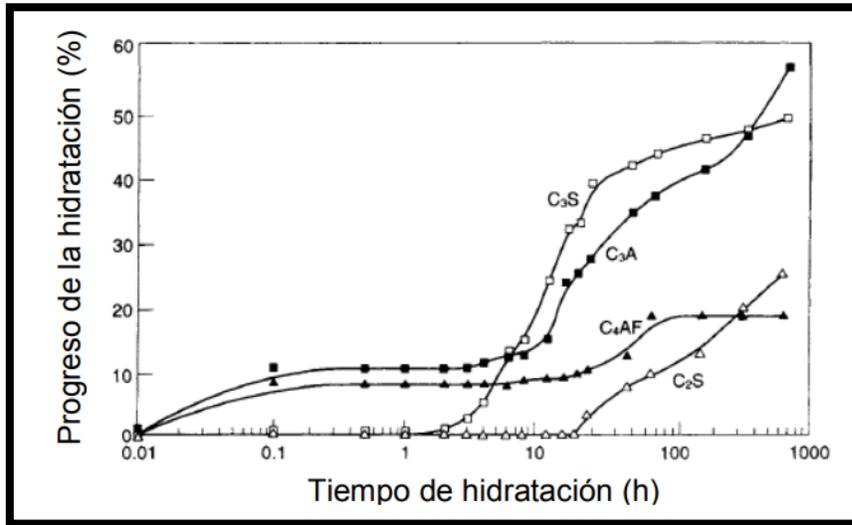


Figura 14: Progreso de las fases principales del clinker durante la hidratación [27]

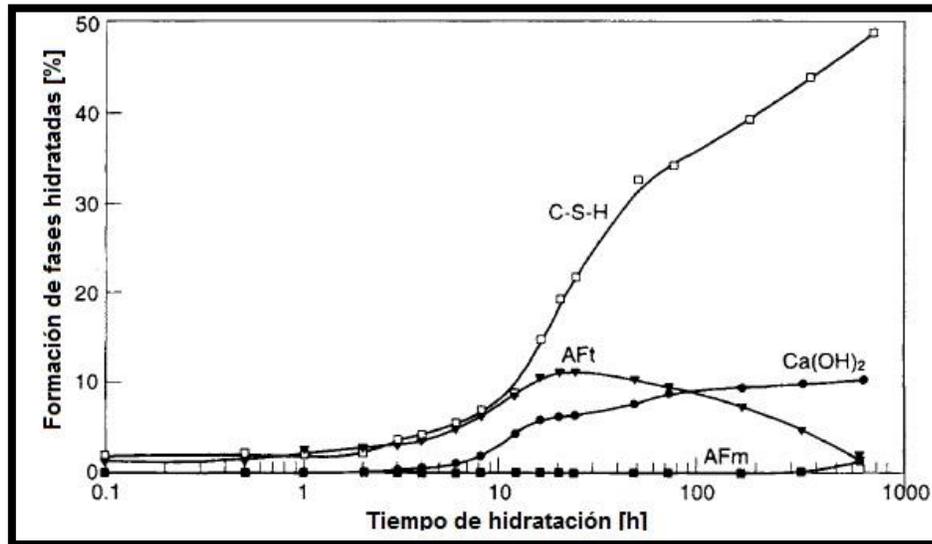


Figura 15: Formación de las fases hidratadas en función del tiempo [27]

2.2.6.3 Resistencias mecánicas en el tiempo

A continuación, se presenta un gráfico del grado de hidratación y la fuerza de compresión que resiste el cemento, en función del tiempo

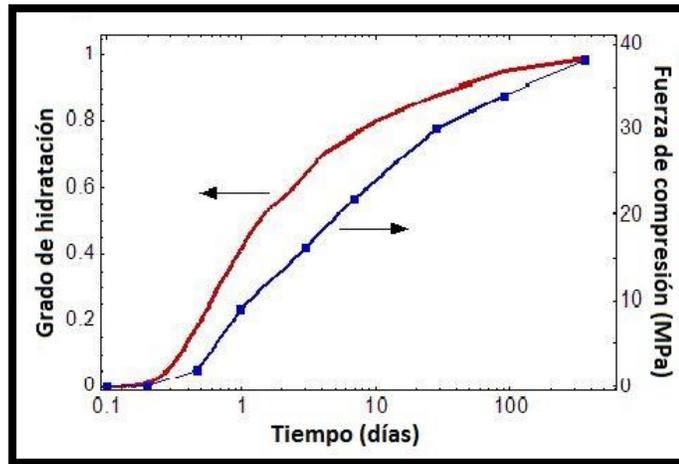


Figura 16: Grado de hidratación y fuerza de compresión de un cemento Portland en función del tiempo [26]

Aquí, se puede apreciar que el grado de hidratación y la fuerza de compresión aumentan proporcionalmente. Esto se debe a que la resistencia de la pasta de cemento depende principalmente de la cantidad de poros capilares, y la cantidad de poros capilares disminuye en proporción a la cantidad de hidratación que ha tenido lugar en la pasta. Esta disminución se produce porque la fase de gel *CSH* (incluidos sus poros internos de gel) ocupa un volumen significativamente mayor que los minerales de cementos con los cuales se formó en un inicio.

Por último, se presentan los siguientes gráficos sobre las resistencias aportadas por las fases principales del clínker:

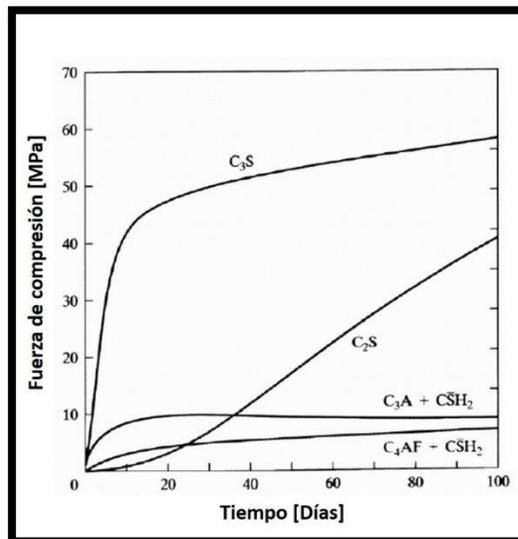


Figura 17: Fuerzas de compresión aportadas por las fases principales

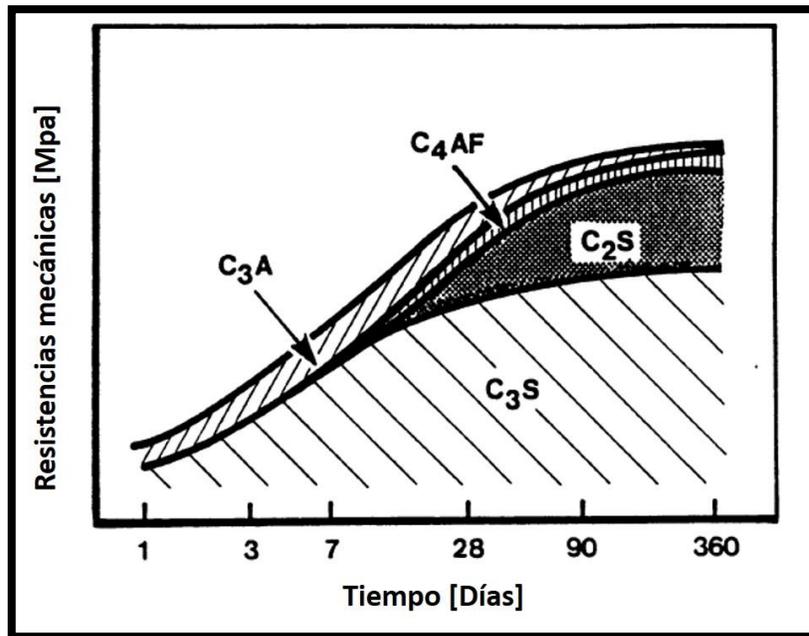


Figura 18: Diagrama cualitativo de las resistencias mecánicas aportadas por las fases principales del clínker

2.3 Horno rotatorio

2.3.1 Definición y componentes principales

Un horno rotatorio es el principal equipo involucrado en la formación de clínker, y por lo tanto del cemento. Consiste en un tubo con un diámetro de hasta 6 [m] y un largo capaz de llegar hasta los 200 [m]. Este es instalado de forma horizontal con un ángulo entre 3-4°, y posee una rotación entre los 1-4 RPM[4]. El material se desliza directamente hacia la llama, como se puede ver en la siguiente figura

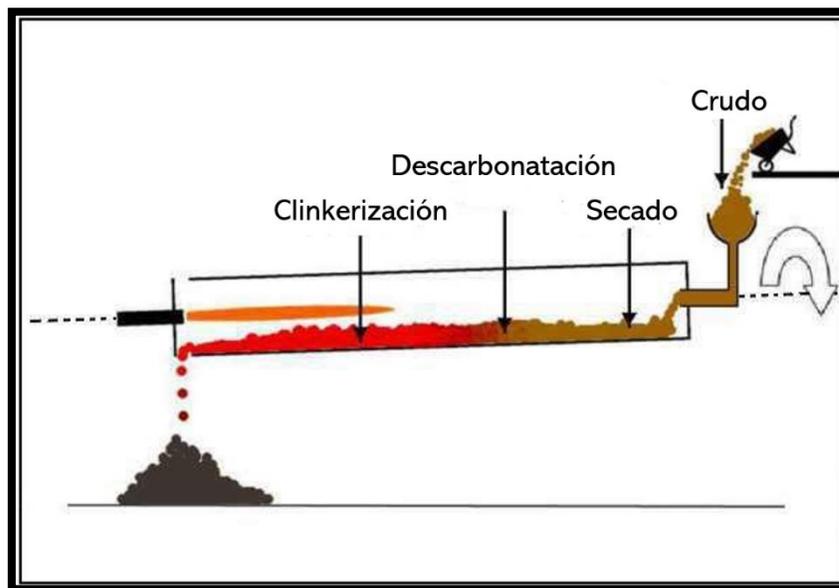


Figura 19: Diagrama de un horno rotatorio[28]

Adicionalmente, los hornos rotatorios suelen tener una capa externa de acero, y en su interior, una gran cantidad de ladrillo refractario, encargado de disminuir la transferencia de calor hacia el exterior. Esto se puede mostrar en la siguiente figura

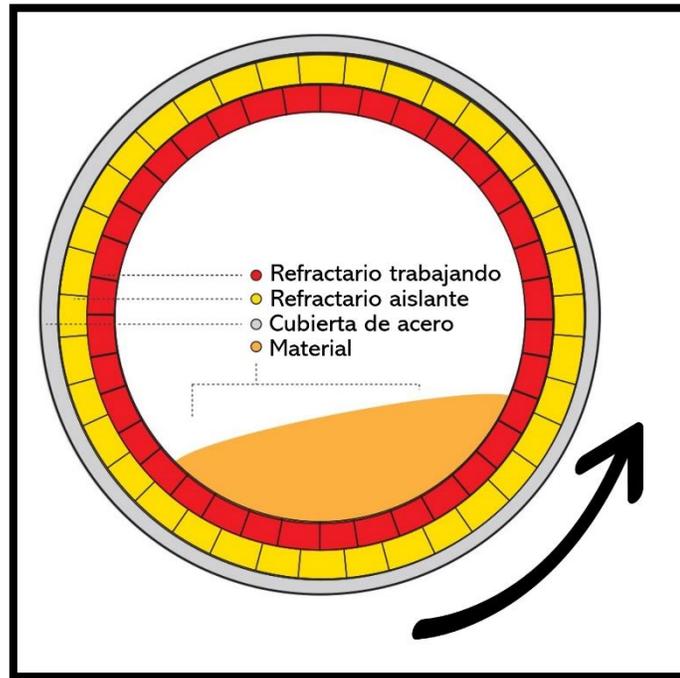


Figura 20: Diagrama interior de un horno rotatorio[28]

Cabe destacar que el volumen de llenado de un horno rotatorio suele variar entre un 9 – 13%, mientras que la relación L/D (largo/diámetro) puede variar entre 10 – 40, siendo el rango más aceptado entre 15 – 20 [19].

Finalmente, un diagrama de flujos de un horno rotatorio estándar puede ser visto a continuación:

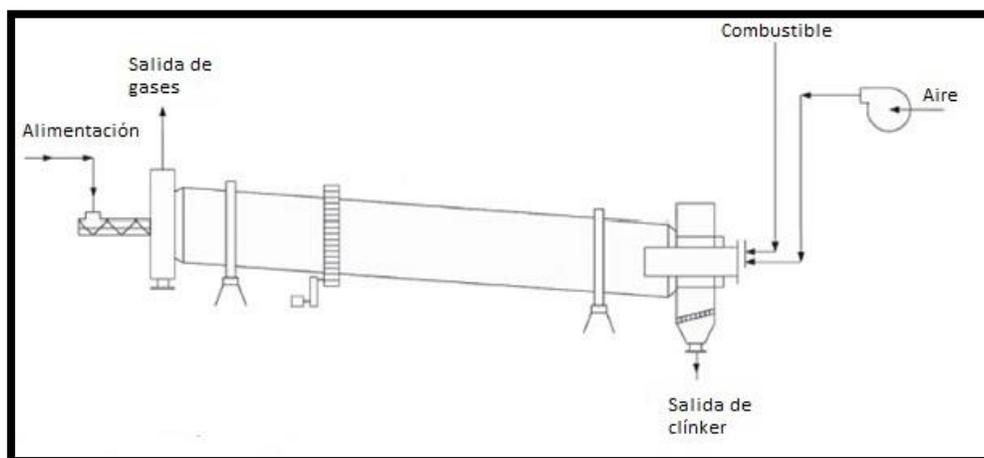


Figura 21: Diagrama de flujos de un horno rotatorio[29]

Adicionalmente, cabe destacar que sus principales variables operacionales a modificar son:

- RPM (velocidad en la cual gira sobre su propio eje).
- Angulo de inclinación.
- Flujo de gas.
- Flujo de aire.

Aquí, las RPM y el ángulo de inclinación definen el tiempo de residencia del material dentro del horno, ya que el diámetro y largo son constantes por cada horno. Por otro lado, la relación aire-gas define la temperatura del material en las distintas zonas.

2.3.2 Tiempo de residencia

La fórmula general, utilizada por las empresas cementeras del mundo, que representa el tiempo de residencia del material en un horno rotatorio es la siguiente[30]

$$t = \frac{1,77 \cdot L \cdot \sqrt{\theta}}{P \cdot D \cdot N} \quad (15)$$

donde t : tiempo, L : largo del horno, θ : Angulo de talud natural del material seco⁴, P : pendiente en grados sexagesimales, D : diámetro interior y N : revoluciones por minuto.

Considerando que el ángulo θ es conocido para el crudo, e igual a 40° [19], es posible reescribir el tiempo de residencia de la siguiente manera

$$t = \frac{23 \cdot L}{P \cdot D \cdot N} \quad (16)$$

Cabe destacar que como el largo y diámetro del horno son conocidos, el tiempo de residencia del material solo depende de las RPM y la pendiente. Considerando que este último en general suele mantenerse constante durante su operación, el tiempo de residencia dependería casi en su totalidad del control de RPM.

2.3.3 Combustión

La combustión es una de las variables más importantes dentro de la formación de clínker, esto ya que es necesario alcanzar altas temperaturas y formar un perfil adecuado de temperatura, como ya se describió anteriormente en la sección 2.2.3. Para esto es necesario controlar su posición dentro del horno, su forma y longitud del horno y, por supuesto, su temperatura. Esta última se controla principalmente con la relación aire-combustible y la cantidad de combustible inyectada al horno.

⁴ Pendiente máxima de un material sin que se produzca un deslizamiento[53].

2.3.3.1 Posición de la llama

Para describir la posición de la llama se presentará la siguiente figura

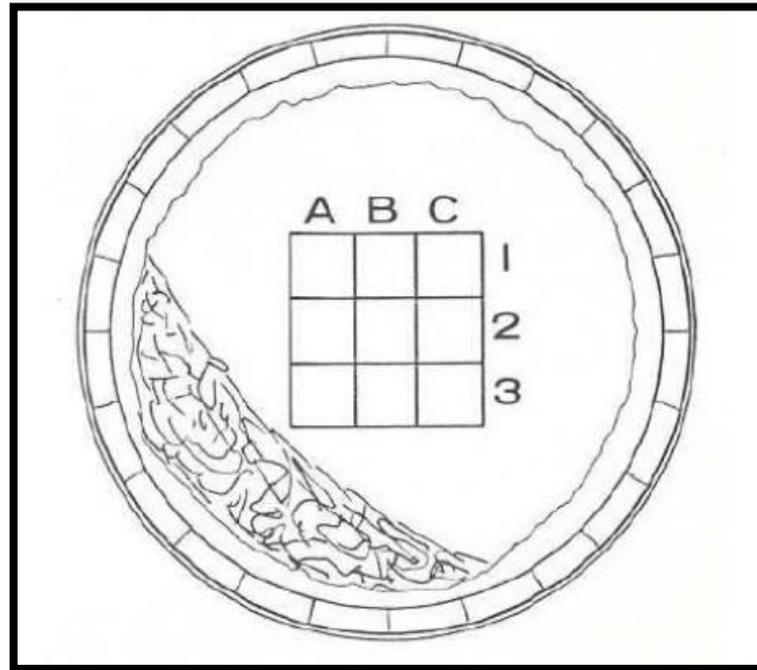


Figura 22: Esquema en un horno rotatorio para describir la posición de la llama

Aquí, el mejor posicionamiento de la llama debería ubicarse en las coordenadas A1, B1 y B2, ya que se asegura una buena transferencia de calor entre la llama y el material. Por otro lado, si la llama está muy cerca del material, véase casillas A2 o A3, hay peligro de que el crudo se pueda “quemar”, o que el combustible sin reaccionar quede incrustado en el material. Finalmente, si la llama está muy inclinada a las paredes superiores, véase casillas C1 o C2, puede atacar directamente el ladrillo refractario, disminuyendo su tiempo de vida útil[31].

2.3.3.2 Forma de la llama

La variable que tiene mayor influencia en la longitud de la llama es el porcentaje de aire presente en la zona de quemado. Esto se debe a que el combustible debe reaccionar con el oxígeno para su combustión, por lo que una falta de aire inyectado causaría que la llama se volviese muy larga, ya que el combustible tiende a buscar oxígeno más allá de la parte de quemado. A continuación, se presentan distintas formas de llamas obtenidas en un horno rotatorio

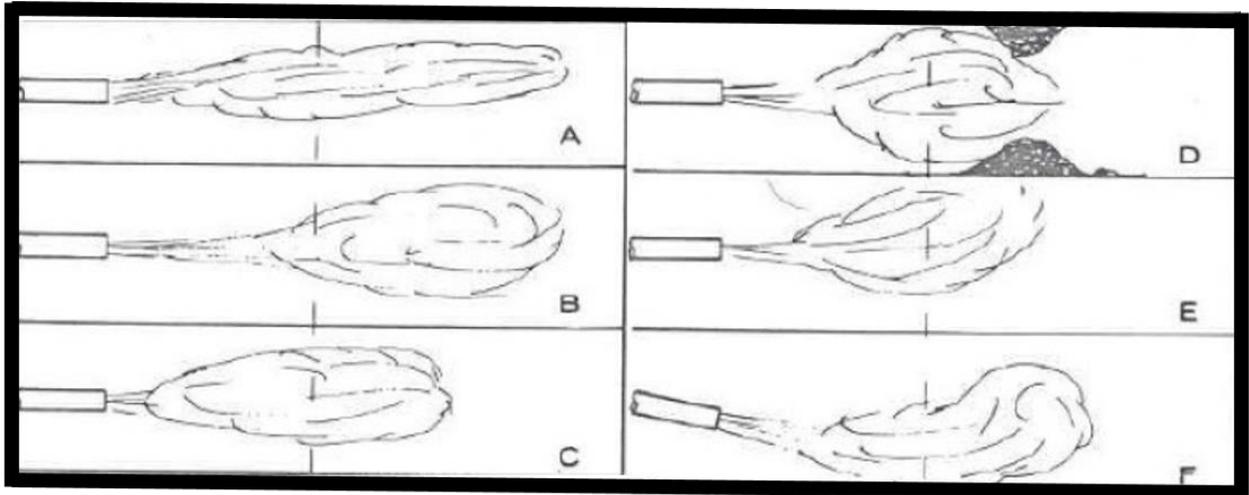


Figura 23: Formas de la llama dentro de un horno rotatorio

Como se explicó anteriormente, se busca una longitud de llama corta, ya que esta extiende la zona de calcinación del horno, la cual frecuentemente conlleva a incrementar la capacidad de producción del horno. De aquí, se escoge la llama C debido a que posee un mejor “cuerpo”, tendiendo a permanecer en una posición constante, reaccionando mejor a los cambios de flujo, tanto de aire como de gas. Por otro lado, las llamas A y B tienden a flotar sobre la atmósfera del horno de manera inestable, lo cual podría afectar la costra del horno, o el mismo material. De la misma manera, las llamas D, E y F se descartan por su contacto directo con el material y/o refractario[31].

Finalmente, cabe destacar que un incremento en el flujo de combustible no siempre incrementa el calor liberado de la llama, y no siempre la reducción de flujo de combustible disminuye el calor de esta. La razón de esto es que la combustión del combustible depende altamente de las cantidades de aire (oxígeno) disponible y de las temperaturas internas, tanto de los gases como de las paredes del horno.

2.3.3.3 Relación aire-combustible

En la actualidad existen distintos combustibles para la formación de clínker, entre los cuales destacan el uso de carbón, petróleo, gas natural y gas licuado[32].

Por temas de seguridad, y de control de procesos, es importante conocer la temperatura de ignición del combustible, así como su temperatura de llama adiabática. Esta información se presenta en la siguiente tabla

Tabla 5: Temperaturas de ignición y llama ideal de distintos combustibles[32], [33]

Combustible	Temperatura de ignición [°C]	Temperatura de llama adiabática [°C]
Carbón	200 – 300	2155
Petróleo	300 – 550	2120
Gas Natural	480	1960
Gas Licuado	600 – 700	2050

Para alcanzar las temperaturas ideales de llama, es necesario generar una combustión completa por parte del combustible a utilizar. Como el combustible utilizado en este caso es gas licuado (10% propano- 90% butano), es necesario tener una relación aire-combustible igual a 30,86:1 [v/v], aunque se recomienda un exceso de aire entre un 10-25% para hornos refractarios que trabajan con materiales cerámicos[34], por lo cual la relación aire-combustible debiese encontrarse en el rango [34-38]:1 [v/v]. El detalle de cálculo de esta sección puede ser visto en el anexo 9.3.

Finalmente, cabe destacar que el exceso de aire es esencial para asegurar una combustión completa. Una relación aire-combustible estequiométrica, aunque asegura la máxima eficiencia y temperatura de la llama, en la práctica lleva a una combustión incompleta, ya que difícilmente se logran las condiciones de mezcla óptima. Dicho esto, se presenta la siguiente imagen que muestra la temperatura de una llama en función de su exceso de aire

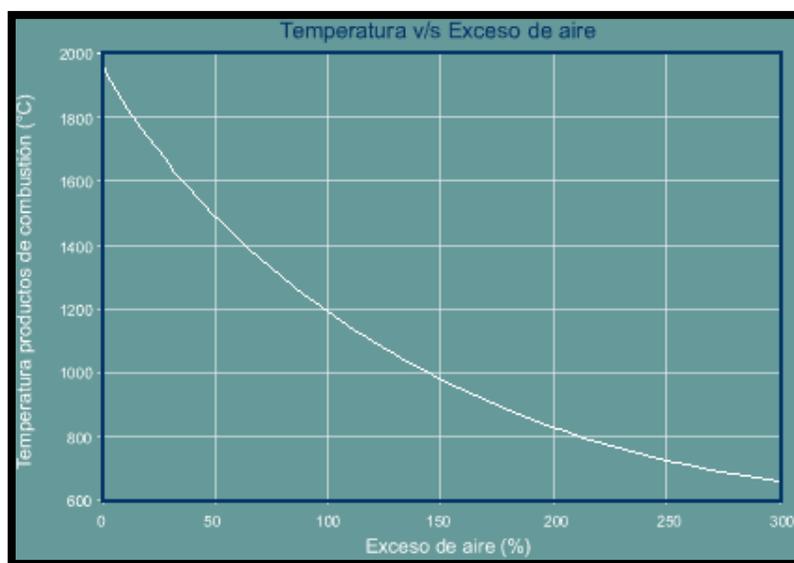


Figura 24: Temperatura de la llama en función de su exceso de aire [34]

2.3.4 Horno rotatorio piloto de IDIEM

El horno rotatorio piloto de IDIEM, de escala piloto, es un equipo de prueba tipo Labor de la casa "Polysius", Alemania, fabricado en la década de los 50. Posee una cubierta de acero exterior y ladrillos refractarios en su interior. Posee un largo total de 7 [m], un largo útil de 5 [m], un diámetro exterior de 0,42 [m] y un diámetro interno de 0,29 [m]. Adicionalmente posee un sistema de regulación de gas, inyector de aire, inclinación regulable, motorreductor (el cual permite el giro del horno) y una chimenea. Dicho esto, a continuación se muestra una imagen del horno rotatorio piloto

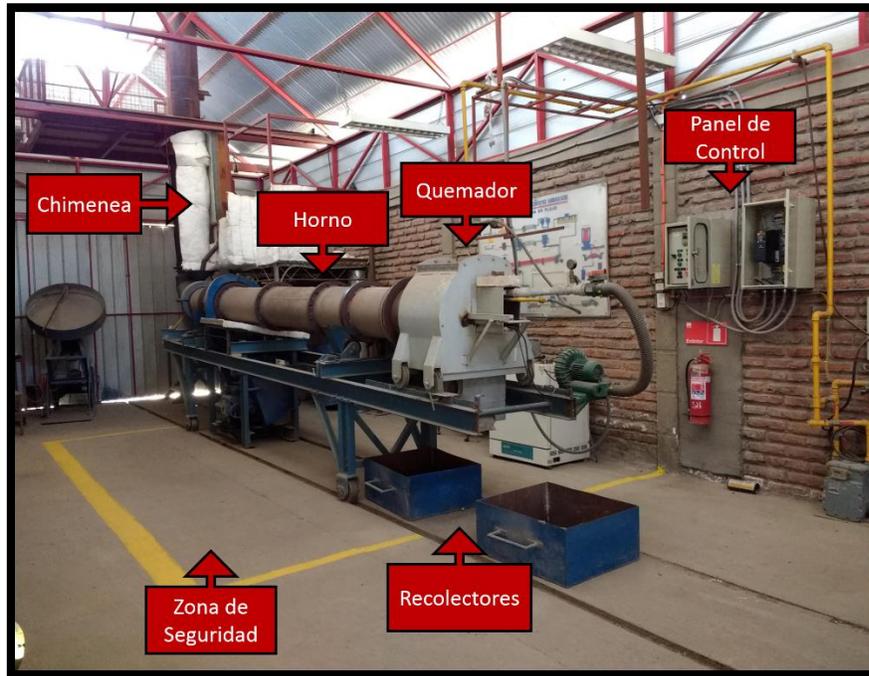


Figura 25: Horno rotatorio piloto

Finalmente, se detallan las distintas variables operacionales del horno, junto a su consumo energético

Tabla 6: Parámetros, y consumo, del horno rotatorio piloto

Parámetro	Valor	Unidad
RPM máximo	12	[1/min]
Pendiente mínima	2	[–]
Pendiente máxima	6	[–]
Consumo de energía eléctrica	3,5	[kW/h]

3. Procedimiento experimental

3.1 Horno rotatorio piloto

3.1.1 Tiempo de residencia

Para calcular el tiempo de residencia se usa la siguiente formula, detallada en la sección 2.3.2:

$$t = \frac{1,77 \cdot L \cdot \sqrt{\theta}}{P \cdot D \cdot N} \quad (17)$$

La cual será contrastada con la función de distribución del tiempo de residencia (DTR), y específicamente con su función de tiempo esperado de residencia [35]. Ambas ecuaciones se describen a continuación:

$$E(t) = \frac{C(t)}{\int_0^{\infty} C(t) \cdot dt} \approx \frac{C(t)}{\sum C(t) \cdot \Delta t} \quad (18)$$

$$t_m = \frac{\int_0^{\infty} t \cdot E(t) \cdot dt}{\int_0^{\infty} E(t)} = \int_0^{\infty} t \cdot E(t) \cdot dt \approx \sum t \cdot E(t) \cdot \Delta t \quad (19)$$

donde:

$E(t)$: Función de distribución del tiempo de residencia en un tiempo t .

$C(t)$: Concentración de masa en un tiempo t .

t : Tiempo.

t_m : Tiempo de residencia promedio.

Para usar las ecuaciones, es necesario obtener datos experimentales del material en el horno rotatorio. Para esto se simula un pulso corto de alimentación, analizando su comportamiento en función del tiempo. Esto puede ser visto en la siguiente figura:

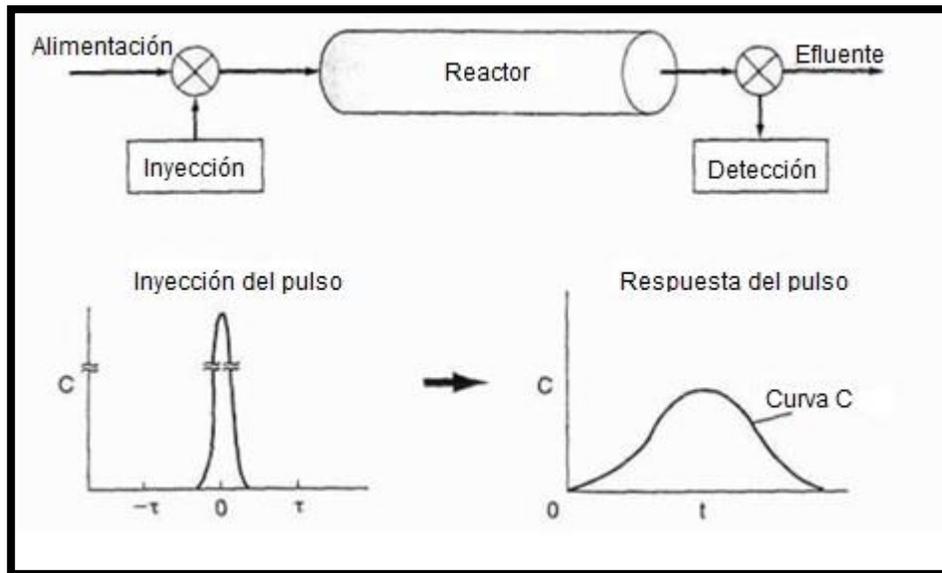


Figura 26: Diagrama ejemplificando la inyección de un pulso y su posterior respuesta [35]

Así, la metodología de este experimento es:

- Encender el horno rotatorio a una velocidad de 2 RPM.
- Introducir 3650 gramos de crudo de cemento en un tiempo determinado (un minuto). Si es posible, el mismo crudo de cemento a estudiar.
- Medir en la salida, con la ayuda de una balanza analítica, la masa que sale del horno cada 20 segundos.
- Detenerse cuando haya salido un total del 95% de la muestra. Se decide detenerse en este valor debido a que existen una pequeña fuga en la zona de alimentación del horno, y además hay material que se queda en las zonas internas del horno, específicamente en los poros de los ladrillos refractarios, es por esto que se considerará que un 95% será representativo del comportamiento del material.
- Replicar este experimento para 2,5, 3 y 3,5 RPM.

Para la configuración de RPM es necesario conocer las distintas frecuencias a la cual puede ser configurado el motor, para detalles sobre esto revisar Anexo 9.2.

Adicionalmente, se realiza un cálculo, teórico y aproximado, del tiempo en que hubiese salido el 100% de la masa del horno. Este se representa con la siguiente formula

$$t_{m,100\%} = \frac{t_{m,95\%}}{0,95} \quad (20)$$

donde

$t_{m,95\%}$: Tiempo de residencia calculado con un 95% de la muestra total.

$t_{m,100\%}$: Tiempo de residencia estimado con un 100% de la muestra total.

3.1.2 Flujo de alimentación

Para calcular el flujo de alimentación, en masa por unidad de tiempo, se considero la siguiente tabla de porcentaje de llenado, que depende directamente de la inclinación del horno.

Tabla 7: Pendiente del horno y grado de llenado [19]

Pendiente del horno [%]	Grado de llenado correspondiente [%]
4,5	9
4	10
3,5	12
3	12
2,5	13

Dicho esto, se utilizará la formula estándar de flujo másico de alimentación para ver cuando material cargar al horno

$$F_t = \frac{m}{t_r} = \frac{V_{ll} \cdot \rho_m}{t_r} \quad (21)$$

Donde

F_t : Flujo de alimentación total [Kg/min].

m : Masa [Kg].

t_r : Tiempo de residencia [min].

V_{ll} : Volumen de llenado [m^3].

ρ_m : Densidad del material [Kg/ m^3].

3.1.3 Perfil de temperatura exterior

Primero que todo, cabe destacar que para para alcanzar las temperaturas ideales de llama, descritas en la sección 2.2.3, es necesario generar una combustión completa por parte del combustible a utilizar. Como el combustible utilizado en este caso es gas licuado (10% propano- 90% butano), es necesario tener una relación aire-combustible igual a 31:1 [v/v], aunque se recomienda un exceso de aire entre un 10-25% para hornos refractarios que trabajan con materiales cerámicos [34], por lo cual la relación aire-combustible debiese encontrarse en el rango [34 - 39]:1 [v/v]. El detalle de cálculo de esta sección puede ser visto en el Anexo 9.3.

Para realizar este experimento, es necesario conocer la relación válvula de gas del horno rotatorio, y su respectivo flujo, en el Anexo 9.4. De la misma manera, se presenta la relación frecuencia-flujo de aire en el Anexo 9.5.

Dicho esto, los pasos para medir la temperatura exterior del horno son:

- Asignar una velocidad cercana a las 2 RPM al horno rotatorio.
- Imponer un flujo de gas conocido y calcular el aire necesario para tener 0% de exceso.

- Tomar la temperatura de 10 puntos externos del horno, vistos en la Figura 27 y detallados en la Tabla 8, cada 15-20 minutos, hasta llegar a un seudo estado estacionario (se considerará un seudo estado estacionario cuando hayan pasado 20 minutos entre toma de datos, y este tenga una diferencia menor a 1% con los anteriores). Cabe destacar que en la Figura 27, la llama se encuentra a la izquierda, y la alimentación a la derecha.
- Registrar los datos, anotando el tiempo en que se realizaron y su respectiva posición fuera del horno.
- Se repetirá esta metodología para un 250% y 750% de exceso (calcular según el flujo de aire impuesto).

Tabla 8: Distancia en la toma de muestras sobre el perfil de temperatura externo

Posición	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Distancia [cm]	20	60	85	120	175	230	290	325	405	465

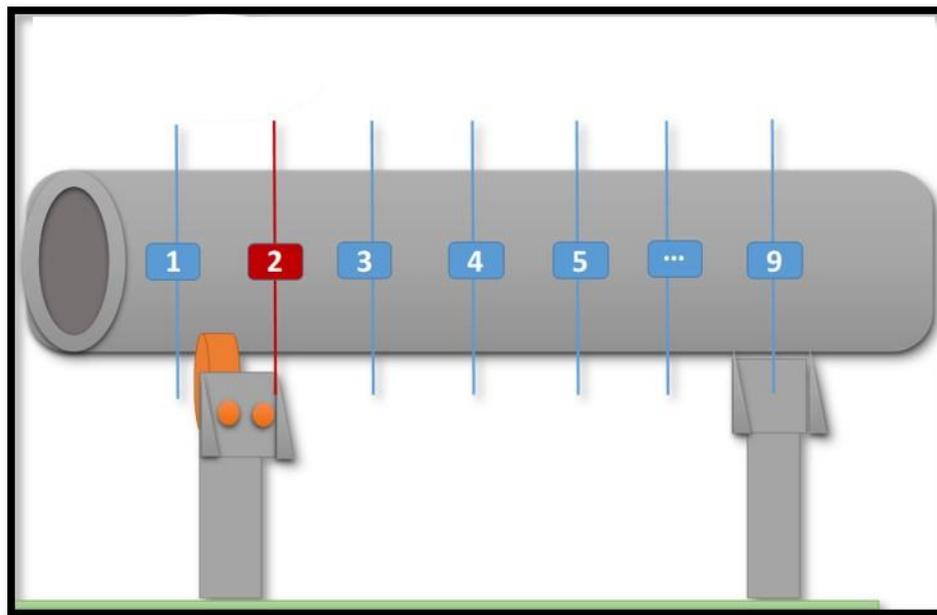


Figura 27: Diagrama sobre la toma de muestra del perfil de temperatura externa, donde a la izquierda se encontraría la llama y a la derecha, la alimentación.

Cabe destacar que este experimento se realizará para obtener la localización del máximo punto de temperatura dentro del horno a las distintas temperaturas. Esto con el fin de conocer la zona de clinkerización del horno.

Adicionalmente, se entregarán gráficos sobre la normalización de la temperatura en función de la temperatura de clinkerización.

3.1.4 Relación temperatura material-flujos

Para la obtención de la relación entre la temperatura del material y el flujo de gas del horno rotatorio, se utilizará una termocupla tipo K, vista en la Figura 28, que tendrá contacto directo con el material. Esta se introducirá por una ranura del horno, cercana a la zona de la llama, como se ve en la Figura 29, entregando resultados en forma de diferencia de potencial, la cual, utilizando la tabla vista en el Anexo 9.7, entrega la temperatura del material. Esto se realizará para distintos flujos de gas y de aire, con el fin de una posterior optimización de parámetros.



Figura 28: Termocupla tipo K



Figura 29: Posición de la termocupla tipo K en el horno

Así, el procedimiento será el siguiente:

- Encender el horno a 2 RPM de velocidad. Esta normalmente es una velocidad baja, por lo que se asegura una buena de transferencia del material.
- Adicionalmente, se configurará la llama en una posición de gas en 1,5 ($3,72 \text{ (m}^3/\text{h)}$) con un flujo de aire igual a $16,8 \text{ [m}^3/\text{h]}$.
- Se introducirá 350 [gr] de crudo de clínker cada 20 segundos por la zona de alimentación por un total de 15-20 minutos, dando un total de material cercano a los 16-21 [kg].
- Se introducirá la termocupla tipo K por el orificio mostrado en la Figura 29, hasta la zona demarcada en la termocupla, cuidando en todo momento que esta no toque con la pared interior del horno, ya que podría romperse la termocupla o desgastar el refractario interior.
- 15 minutos después de que el material comience a salir, tomar la diferencia de potencia promedio del material hasta que este no sufra ningún cambio de valor durante dos minutos. Esto con el fin de asegurar una temperatura en estado estacionario del material.
- Repetir este procedimiento para posiciones de válvula de gas en 2, 3 y 4, flujos $5,29, 6,79$ y $7,25 \text{ [m}^3/\text{h]}$ respectivamente, y un flujo de aire igual a $28,9 \text{ [m}^3/\text{h]}$. Si la temperatura no fuera la óptima aun, aumentar el flujo de aire dependiendo de la capacidad del variador de frecuencia.

3.1.5 Obtención de clínker

Para la obtención de clínker se replicará la metodología utilizada en Relación temperatura material-flujo, imponiendo las variables necesarias, de flujo de gas y flujo de aire, para llegar a 1450°C .

Los resultados de esta sección serán analizados en Análisis de laboratorio, para mostrar las diferencias obtenidas entre el material industrial de una Empresa privada y el obtenido por el horno rotatorio piloto de IDIEM.

3.2 Análisis de laboratorio

3.2.1 Crudo de cemento

3.2.1.1 Ley de Bogue

Uno de los métodos más utilizados sobre el control del crudo a utilizar para la formación de clínker, es la Ley de Bogue. Esta ley postula que se puede estimar la composición mineralógica de un clínker conociendo previamente la cantidad de óxidos principales presentes en el crudo[36], [37]. Esta aproximación asume que:

- La composición de los cuatro componentes principales (CaO , SiO_2 , Al_2O_3 y Fe_2O_3) reaccionan completamente de manera estequiométrica.
- Todo el Fe_2O_3 se transforma en C_4AF de forma estequiométrica.
- El Al_2O_3 , que queda, se transforma en C_3A .
- El CaO que queda sin reacciona se transformara en C_3S y C_2S .

Dicho esto, las ecuaciones propuestas por Bogue son:

$$C_3S = 4,07CaO - 7,6SiO_2 - 6,72Al_2O_3 - 1,43Fe_2O_3 \quad (22)$$

$$C_2S = -3,07CaO + 8,6SiO_2 + 5,07Al_2O_3 + 1,08Fe_2O_3 = 2,87SiO_2 - 0,75C_3S \quad (23)$$

$$C_{3A} = 2,50Al_2O_3 - 1,69Fe_2O_3 \quad (24)$$

$$C_4AF = 3,04Fe_2O_3 \quad (25)$$

Cabe destacar que el contenido total de estas 4 fases no suma el 100%, esto debido a que no considera los óxidos minoritarios (otro supuesto es que el óxido de magnesio presente se encuentra en forma de periclasa).

Dicho esto, se determinará la composición de óxidos en el crudo de clínker por Fluorescencia de rayos X.

Finalmente, aunque esta es una aproximación realizada hace cerca de 90 años, y destacando que se han realizado diversas variaciones durante este tiempo[38], aún tiene validez al día de hoy, siendo utilizada por diversas plantas productoras de cemento para tener un estimado de la composición mineralógica del clínker.

3.2.2 Clínker

3.2.2.1 Cal libre

La determinación cuantitativa de la cal libre en el clínker constituye un control industrial importante, ya que representa la regularidad del proceso de producción de clínker, en específico, cuanto carbonato de calcio reacciona dentro del horno. Esta determinación se lleva cabo normalmente con procedimientos químicos basados en la extracción selectiva del óxido de calcio y en la subsiguiente valoración [39].

El procedimiento se basa en la determinación volumétrica del óxido de calcio después de separar el dióxido de silicio y los grupos de hidróxido de amonio, precipitando el calcio en forma de oxalato.

3.2.2.2 Microscopia óptica

Este procedimiento busca establecer un análisis cuantitativo y cualitativo del clínker. Para esto, se rellena un 50% de un molde con clínker, para luego llenar este con resina epóxica. Esta resina se deja solidificar un día, para luego ser lijada y pulida, dejando en una cara visible los granos de clínker. Estos son analizados en el microscopio óptica, obteniendo datos estadísticos sobre la longitud de los granos, cantidad de fases principales, etc.

Los detalles de esta metodología pueden ser vistos en el Anexo 9.6.1.1.

3.2.3 Cemento

Para la obtención de cemento se utilizará un 95% de clínker y un 5% de yeso (másico), entregado por una Empresa privada, simulando un cemento Portland tradicional. Estos serán sometidos a una molienda, en un molino de bolas, hasta obtener una superficie específica similar, con lo cual se procederá a obtener los distintos resultados de laboratorio.

3.2.3.1 Peso específico

El método para calcular el peso específico consiste en establecer una relación entre una masa de cemento y el volumen de líquido que esta desplaza en el matraz de Le Chatelier.

Los detalles de esta metodología pueden ser vistos en el Anexo 9.6.2.1.

3.2.3.2 Determinación de la superficie específica, según el método de permeabilidad de Blaine

Para determinar la superficie específica según el método de Blaine, se utilizará una muestra pequeña de cemento, la cual será masada y puesto en el equipo de ensayo de permeabilidad según Blaine, visto en la Figura 30. Aquí, se procederá a insertar la muestra en el tubo superior del equipo, para luego calcular el tiempo en el que el aceite se mueve de un nivel a otro. Así, el tiempo calculado será una función de la finura del material.

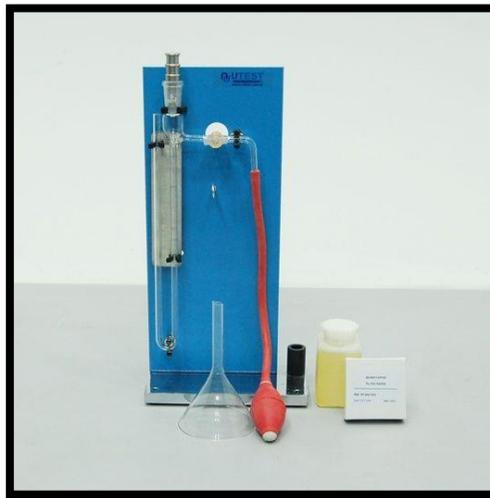


Figura 30: Equipo para ensayo de permeabilidad según Blaine

Los detalles de esta metodología pueden ser vistos en el Anexo 9.6.2.2.

3.2.3.3 Ensayo de flexión y compresión de morteros

En este ensayo se procederá a crear una probeta RILEM de mortero normalizado, con cantidades específicas de cemento, arena y agua, el cual se dejará en una cámara húmeda por una cantidad de tiempo conocida, pudiendo ser 1, 3, 7, 14 y/o 28 días. Cuando el período requerido termine, se procederá a poner la probeta de mortero en una prensa de compresión y flexión, la cual entregará la carga a la rotura del material.

Los detalles de esta metodología pueden ser vistos en el Anexo 9.6.2.3.

4. Variables operacionales del horno rotatorio

4.1.1 Tiempo de residencia

Es importante señalar que los resultados fueron realizados a un ángulo de inclinación constante, igual a 1,94% o 3,4 grados sexagesimales. Dicho esto, la masa total medida a la salida del horno, en función del tiempo, puede ser vista en el siguiente gráfico:

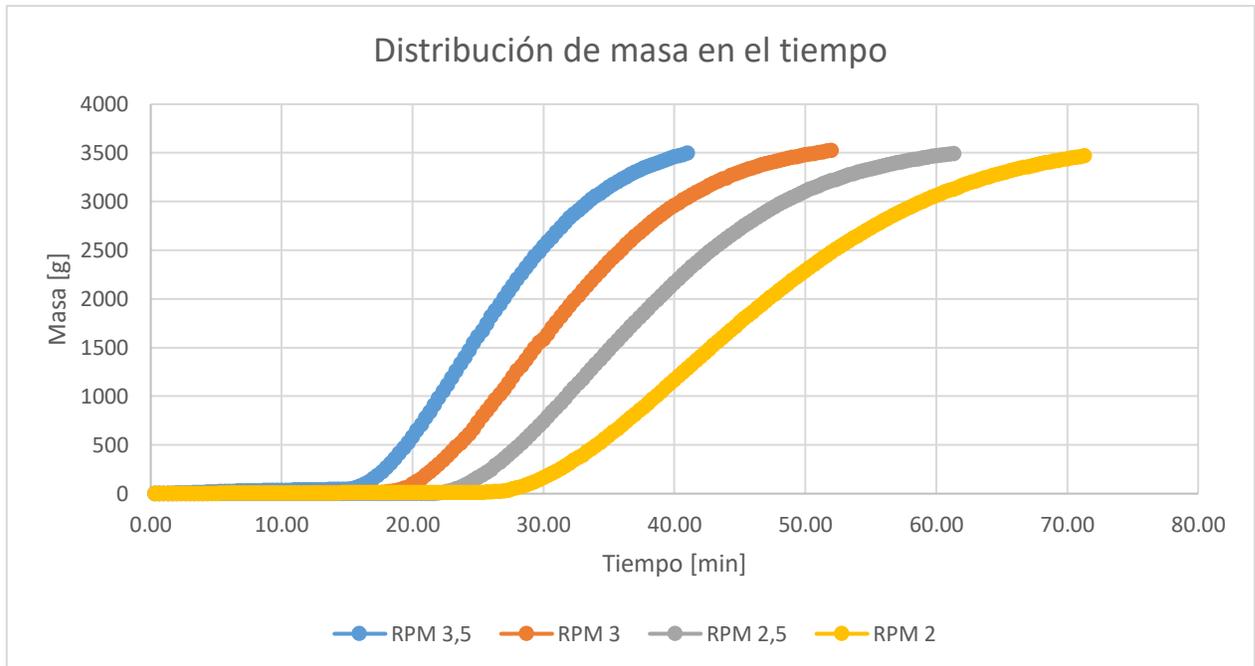


Figura 31: Distribución del efluente en el tiempo

De la Figura 31 se puede deducir que, a mayor velocidad de giro, menor es el tiempo que pasa el material dentro del horno. Adicionalmente, se puede observar que el material se demora más tiempo en comenzar a salir, mientras menor es la velocidad de giro.

Por otra parte, con los datos obtenidos en la figura x, se puede obtener la función de distribución del material, mostrada en el siguiente gráfico:

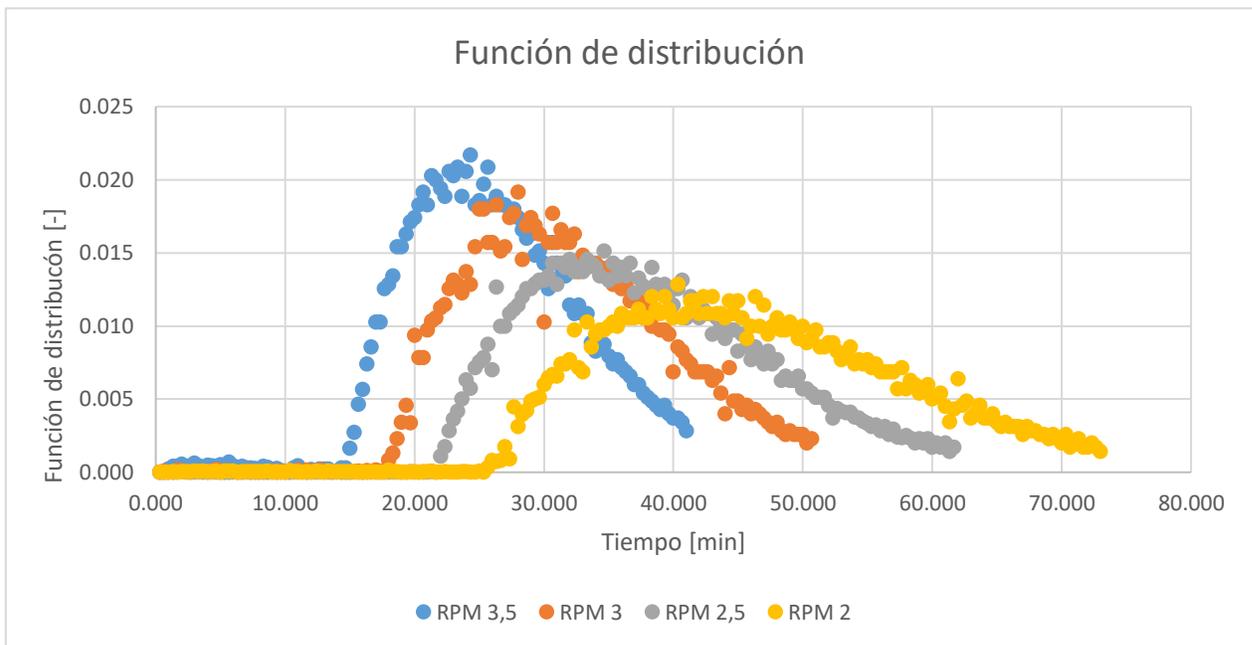


Figura 32: Función de distribución de la masa en el tiempo

Aquí, se puede observar que, a mayor velocidad de giro, mayor es la cantidad de material que sale del horno. Por otra parte, mientras menor es la velocidad de giro, menor es la cantidad de material que sale del horno. Esto también puede ser visto en las pendientes de cada curva, donde las que poseen mayor velocidad de giro, están más inclinadas que las curvas con menor velocidad de giro.

Por último, como ya se obtuvo la función de distribución del material a distintas velocidades de giro, es posible obtener el tiempo teórico esperado del material, expresado en la siguiente tabla:

Tabla 9: Tiempo teórico y esperado del material en un horno rotatorio

RPM [1/min]	3,50	3,00	2,50	2,00
Tiempo teórico [min]	28,4	33,1	39,7	49,7
Tiempo esperado 95% [min]	26,1	32,0	38,2	46,2
Diferencia porcentual 95% [%]	8,2	3,4	4	6,9
Tiempo esperado imponiendo 100% [min]	27,4	33,7	40,2	48,7
Diferencia porcentual 100% [%]	3,4	1,7	1,1	2,0

En la Tabla 9 se observa que la diferencia entre el tiempo teórico esperado y el tiempo obtenido experimental, generan diferencias máximas de un 3,4%, en caso del 100% impuesto teóricamente, y 8,2% para el 95% extraído experimentalmente, por lo cual se puede hablar de que los tiempos obtenidos son representativos, pudiendo ser de gran ayuda en la realización de experimentos a nivel piloto.

Adicionalmente, se destaca la importancia de poder controlar el tiempo esperado del material dentro del horno, ya que se podría aumentar, o disminuir, el tiempo de residencia del material para optimizar las distintas reacciones del crudo dentro del horno.

Por último, cabe destacar que, aunque se cambiaron las RPM del horno, el ángulo de inclinación tuvo que mantenerse constante por las razones anteriormente nombradas, pero sería bueno en algún futuro obtener estos datos, ya sea para optimizar el horno, al disminuir el gasto energético que genera el motor del horno, o también para lograr generar mayores tiempos de residencia en otras zonas del horno.

La memoria de cálculo realizada para la obtención de los tiempos anteriores puede ser visto en el Anexo 9.8.1.

4.1.2 Flujo de alimentación

El desarrollo de la formula mostrada en la sección 3.1.2, se puede ver a continuación, donde se utilizó el porcentaje de llenado visto en la Tabla 7.

$$F_t = \frac{V_u \cdot \rho_m}{t_r} \quad (26)$$

$$F_t = \frac{V_t \cdot \%_{ll} \cdot \rho_m}{t_r} \quad (27)$$

$$F_t = \frac{L \cdot A_i \cdot \%_{ll} \cdot \rho_m}{t_r} = \frac{L \cdot r_i^2 \cdot \pi \cdot \%_{ll} \cdot \rho_m}{t_r} \quad (28)$$

$$F_t = \frac{5[m] \cdot 0,12^2[m^2] \cdot \pi \cdot 0,11 \cdot \rho_m}{t_r} \quad (29)$$

$$F_t = \frac{0,23[m^3] \cdot \rho_m}{t_r} \quad (30)$$

Donde

F_t : Flujo de alimentación total [kg/min].

V_u : Volumen utilizado [m^3].

ρ_m : Densidad del material [kg/m^3].

t_r : Tiempo de residencia [min].

V_t : Volumen total [m^3].

$\%_{ll}$: Porcentaje de llenado, extraído de la Tabla 7 [-].

L : Largo del horno [m].

A_i : Área interna del horno [m^2].

r_i : Radio interno del horno [m].

Utilizando la fórmula anterior, la densidad entregada por una empresa privada y los tiempos calculados en la sección anterior a distintas RPM, es posible presentar una tabla con los flujos de alimentación necesarios para distintos tiempos de residencia:

Tabla 10: Flujos de alimentación a distintos tiempos de residencia

RPM	3,5	3,0	2,5	2,0
Tiempo teórico [min]	28,4	33,1	39,7	49,7
Flujo de alimentación [kg/h]	8,1	6,9	5,8	4,6

Cabe destacar que es importante conocer la densidad del material previamente, debido a que en las industrias se suele trabajar con flujos máscicos, y no con flujos volumétricos. Esto es una prueba cotidiana en las industrias, por lo tanto, no debiese ser complejo conocer los valores para alimentar del horno.

La importancia de este resultado, conociendo ya la densidad, es que se puede obtener un flujo determinado de material, solo imponiendo el tiempo esperado del material horno, el cual fue calculado, y expresado en función de la velocidad de giro, en la sección anterior.

Por último, cabe recordar que la fórmula entregada es para el ángulo fijo definido anteriormente (3,4°).

4.1.3 Perfil de temperatura externo

Primero que todo, cabe señalar que antes de cada experiencia se genero una costra de material en el horno, asegurando así, que las pruebas fueran replicables. Dicho esto, se determino el perfil de temperatura externo del casco del horno a diferentes flujos de gas, manteniendo constante el aire, entregando los siguientes resultados:

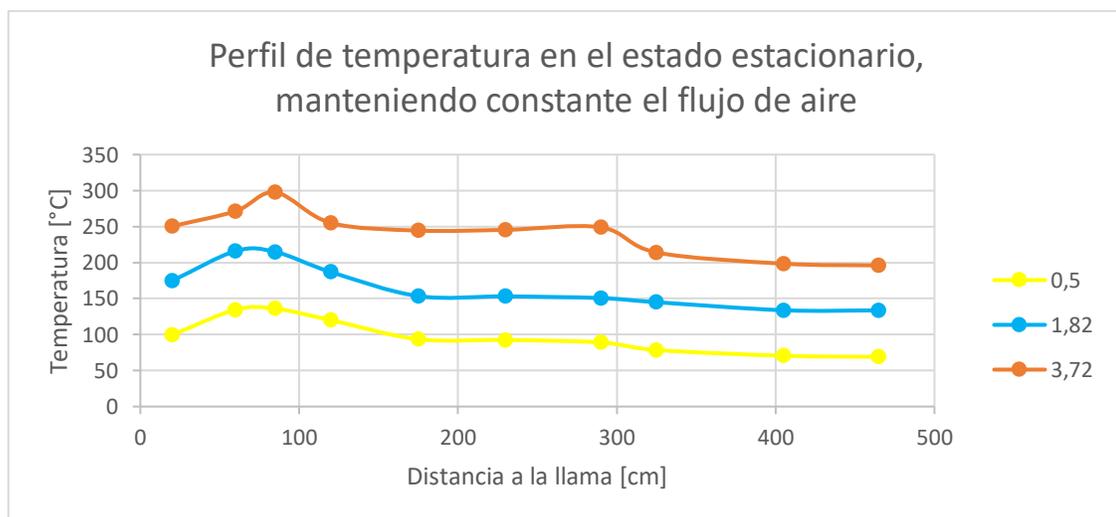


Figura 33: Perfil de temperatura exterior, en estado estacionario, para diferentes flujos de gas, en [m³/h], con flujo de aire constante (16,8[m³/h]).

Antes que todo, cabe recordar que la relación entre aire-gas debiese ser 33:1 [v_{aire}/v_{gas}]. Así, los valores 0,5, 1,82 y 3,72 [m^3/h], corresponden al 0, 250 y 750%, respectivamente, de exceso de gas.

Dicho esto, en la figura anterior, se puede observar claramente las 3 zonas de reacción que existen en un horno rotatorio (clinkerización, descarbonatación y deshidratación, o secado, del crudo). Adicionalmente, a mayor flujo de gas, mayor es la temperatura externa del casco. Esto se debe a que, a mayor concentración de gas, mayor es la temperatura del crudo, ya que existe una mayor transferencia de calor en el sistema. Como la temperatura del crudo es mayor, por conducción de las paredes internas del horno, la temperatura del caso exterior aumenta a medida que el nivel de gas sube.

Por otra parte, se puede observar que el peak de temperatura siempre ocurre en la misma zona, independiente del exceso de gas. Esto se atribuye a que es la zona mas cercana a la combustión de la llama y a la existencia de un ladrillo refractario de mayor calidad en la zona de clinkerización, asegurando así, una mayor retención de calor. Este peak de temperatura puede ser visto en la siguiente figura:

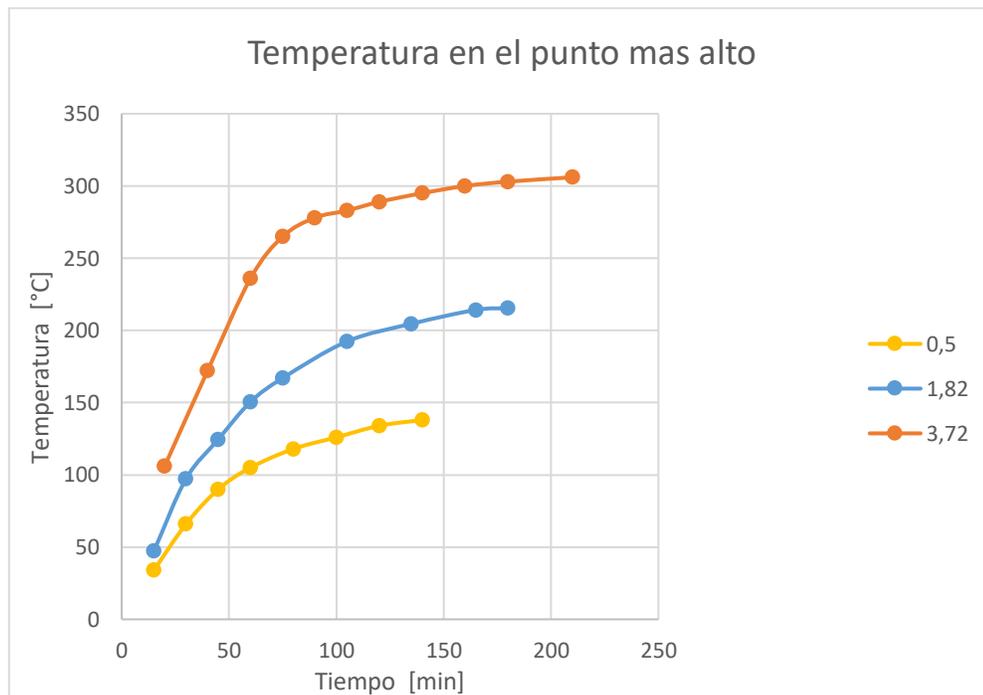


Figura 34: Comparación de la temperatura en el punto más alto, según el flujo de gas, en [m^3/h], con flujo de aire constante ($16,8[m^3/h]$).

En la Figura 34, se puede observar que la temperatura crece de manera asintótica, llegando finalmente a una temperatura estable. Esto se debe a que el calor generado por la llama, y el sistema (horno), llegan a un estado estacionario, el cual aumenta a medida que sube la cantidad de gas en el sistema.

Adicionalmente, se presenta una normalización de los datos obtenidos en el punto máximo, en estado estacionario. Esta información se entrega en la siguiente figura:

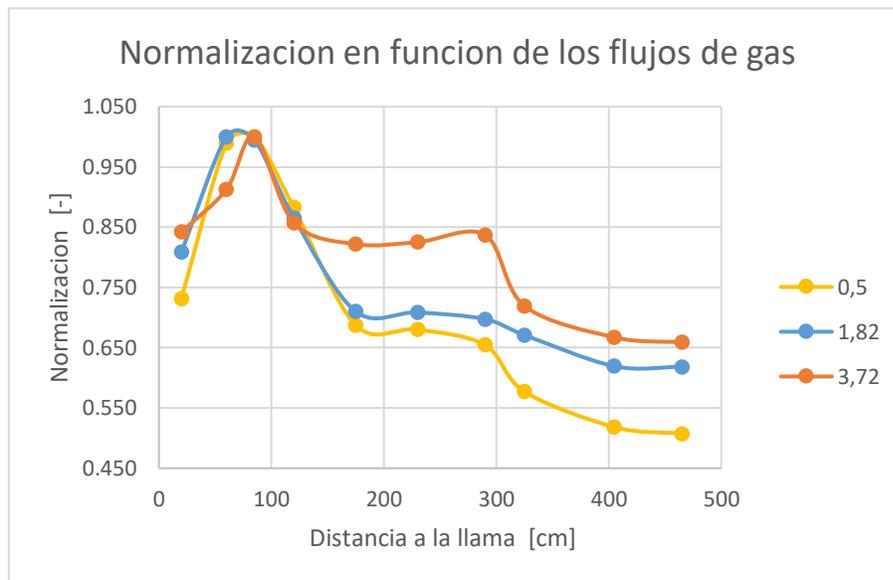


Figura 35: Normalización del perfil de la temperatura en el estado estacionario, para distintos flujos de gas, en $[m^3/h]$, con flujo de aire constante ($16,8[m^3/h]$).

De aquí se puede extraer que, a mayor cantidad de gas, la temperatura en el resto del horno crece en función de la temperatura de la clinkerización, aunque pierde calor de clinkerización. Es por eso que se necesita controlar la razón de aire-gas que se introduce al sistema, ya que cuando la relación es cercana a lo óptimo, las zonas cercanas a la temperatura de clinkerización poseen temperaturas similares, mientras que si el gas aumenta demasiado en concentración, el calor de clinkerización se desplaza a lo largo de todo el horno.

Lo anterior ocurre ya que, al existir una cantidad mayor de gas, y no el suficiente aire para realizar la combustión, el gas se desplaza buscando aire secundario en el horno, desplazando el calor generado en los alrededores de la zona de clinkerización.

Una de las finalidades de este experimento, es que, en caso de no existir una termocupla para medir la temperatura del gas, o del material interior, se podría conocer una relación entre la temperatura externo, el flujo de aire y de gas, y el material. Esto último se realiza en las siguientes secciones del informe.

Los datos sobre los datos entregados en esta sección pueden ser vistos en la en el Anexo 9.8.2.

4.1.4 Relación temperatura material-flujos

Los primeros resultados de esta experiencia son el calculo de la temperatura del material a 40 centímetros de la llama. Estos, se pueden ver en la siguiente tabla, y posterior gráfico:

Tabla 11: Temperatura de material en función del flujo de gas y aire, a 40 cms de la llama

Flujo de gas [m^3/h]	Temperatura del material a 16,8 m^3/h de aire [$^{\circ}C$]	Temperatura del material a 28,9 m^3/h de aire [$^{\circ}C$]
1,82	350	220
3,72	755	575
4,52	940	730
5,29	1050	860
5,97	1120	1005
6,79	1150	1125
7,25	1175	1220

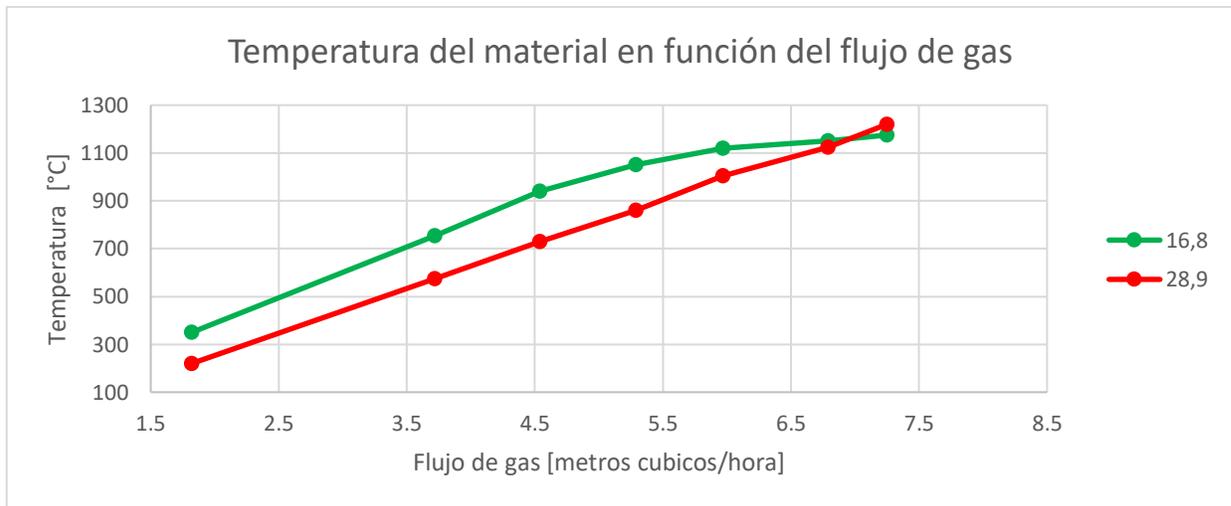


Figura 36: Temperatura del material en función del flujo de gas y aire, en [m^3/h].

Como se puede observar en la Figura 36, la temperatura del material parece presentar un comportamiento asintótico. Esto se puede notar más en la curva de 16,8 [m^3/h] de aire, donde pareciera estar llegando a un estado estacionario, aunque esto no se puede afirmar completamente debido a que no se puede aumentar mas el flujo de gas. Por otra parte, la curva de 28,9 [m^3/h] de aire, tiene aun un comportamiento lineal, aunque se esperaría, tomando mas datos sobre el flujo de gas, que empezara a tener un comportamiento asintótico. Este fenómeno se podría asociar a que como se mantiene fijo el flujo de aire, llega un momento en que el gas consume en totalidad este, y busca reaccionar a lo largo del horno con el aire secundario.

Adicionalmente, se puede observa que las curvas se cruzan, sobrepasando la de mayor flujo de aire a la de menor flujo de aire. Esto se puede asociar a que en un inicio el aire

enfria la llama, gracias a sus inertes, mientras que a menor aire este comienza a reaccionar en su totalidad. Por otra parte, la curva con mayor flujo de aire, en su etapa final, suele concentrar mas la combustión ya que existe una cantidad mayor de gas en la zona, mientras que la curva con menor flujo de aire, ya no posee concentración de aire que aportar a la combustión, y el gas busca aire secundario en el resto del horno.

Como anteriormente se calculó la temperatura externa a distintos flujos de gas, es posible establecer una relación del material y la temperatura exterior en un estado estacionario. Esto se ve en la siguiente tabla:

Tabla 12: Relación entre la temperatura exterior y la temperatura del material, a 40 cms de la llama

Flujo de gas [m³/h]	Temperatura exterior ± 10°C (zona clinkerización) [°C]	T° material [°C]
1,82	215	420
3,72	305	755
4,52	440	915
5,29	545	1050
5,97	550	1120
6,79	560	1150
7,25	565	1175

Como los datos no fueron calculados en la zona de clinkerización máxima, entre lo 80 y 90 cms desde la llama, pero si se conoce la temperatura exterior en este punto, se puede realizar una aproximación de la temperatura interior del material, para conocer la máxima temperatura de este. Esto se demuestra en la siguiente tabla:

Tabla 13: Relación entre la temperatura exterior y temperatura del material, en la zona de clinkerización

Distancia a la llama [cm]	40	85	40	85⁵
Flujos de gas – aire [m³/h]	Temperatura exterior		Temperatura material	
1,82 - 16,8	182	215	350	385
3,72 - 16,8	242	305	755	830
5,29 – 28,9	350	410	1005	1105
5,29 - 16,8	458	545	1050	1155
6,79 – 28,9	470	555	1125	1220
6,79 - 16,8	483	565	1150	1270
7,25 – 28,9	490	580	1220	1340
7,25 – 33,6	540	630	1320	1450

Cabe destacar que aquí se asume que las resistencias existentes por el casco del horno y ladrillos refractarios interiores son iguales a los 40 y 85 cms de la llama, lo cual no se aleja mucho de la realidad, ya que el casco y ladrillo son del mismo material en toda la primera zona.

⁵ Temperatura teórica calculada.

Así, se presenta la realización entre la temperatura exterior y la temperatura del material a distintos flujos de aire y de gas, aunque se recomienda que esto solo sea utilizado cuando no existan termocuplas, debido a que la temperatura del material, y las paredes internas, llegan a un estado estacionario mucho antes que las paredes externas.

La idea de los cálculos realizados en esta sección es reducir el gasto de gas llegando a la relación óptima entre gas y aire, pero se comprobó que esto no sería posible ya que el aire máximo que puede entregar el inyector de aire no era el suficiente para llegar a las temperaturas deseadas. De hecho, el último dato tomado en la Tabla 13, fue calculado sobrepasando el máximo permitido, usando un variador de frecuencia, esto llevo a un calentamiento excesivo del equipo luego de unas horas, por lo que se evitó tomar datos a estas flujos de aire. Aun así, fue necesario, ya que a este flujo fue posible llegar a los 1450 °C. La mejora propuesta sobre la inyección de aire puede ser vista en la sección 6.3.

4.1.5 Obtención de clínker

A continuación, se presenta el clínker obtenido (derecha) y un clínker comercial proporcionado por una Empresa privada (izquierda), ver Figura 37, para su posterior comparación de calidad a nivel de laboratorio.



Figura 37: Comparación de un clínker obtenido (derecha) y un clínker comercial (izquierda).

A primera vista, el clínker obtenido de manera piloto tiene una menor cocción que el obtenido por una empresa privada, lo cual se puede ver directamente en el color de ambos clínker. Por otra parte, es posible apreciar que el clínker obtenido de manera piloto

tiene menor tamaño de partículas que el obtenido industrialmente, lo cual puede ser asociado a que no existió una mezcla adecuada del material.

Por otra parte, cabe destacar que, aunque se utilizaron parámetros similares a una Empresa privada en la formación de clínker, la calidad final del material no se asegura, por factores de mezcla del material o equipos de soporte, como pre calentadores o enfriadores. Para esto se analizará la producción de clínker a nivel laboratorio, donde se observarán las principales diferencias del producto, y las causas de estas.

5. Clínter del horno rotatorio experimental y un clínter comercial.

5.1 Crudo de clínter

5.1.1 Ley de Bogue

A continuación, se entregan los resultados de la Ley de Bogue:

Tabla 14: Resultados Ley de Bogue

Fase	Porcentaje másico [%]	Rango normal
C_3S	63,91	50-70%
C_2S	18,07	15-30%
C_3A	5,63	5-10%
C_4AF	9,26	5-15%
Total	96,87	

Como se nombró durante la metodología, la ley de Bogue suele ser un método estimativo de la composición final del clínter. Esto con el fin de conocer si es necesario adicionar componentes para la obtención de un clínter de calidad. Como se ve en la Tabla 14, no sería necesario añadir componentes de ningún tipo al crudo de clínter para encontrarse en el rango exigido.

Cabe destacar se pueden generar mayores discusiones en torno a la Ley de Bogue, con los resultados obtenidos por Microscopía óptica, aunque estos serán vistos en la sección 5.2.2.

Por último, es necesario notar que las fases principales del clínter no suman 100%, debido a que no considera otros óxidos minoritarios, como óxido de magnesio o calcio, remanentes en el clínter.

5.2 Clínter

5.2.1 Cal libre

Los resultados obtenidos al realizar la prueba de cal libre se expresan en la siguiente tabla:

Tabla 15: Resultados obtenidos al realizar la prueba de Cal libre

Muestra	% Cal libre
Empresa privada	0,41
Piloto	1,45

Como se nombró en el marco teórico, los clínter de buena calidad presentan valores inferiores al 1%, como es el caso del clínter obtenido industrialmente por una Empresa privada, aunque esto no quiere decir que el cemento obtenido de forma piloto sea de baja calidad, si no que no todo el óxido de calcio pudo reaccionar, formando las principales fases principales del clínter. Por esto, aunque este dato da una indicación que faltó tiempo y/o temperatura en la zona de clínterización, es necesario contrastarlo con otros datos para dar conclusiones.

5.2.2 Microscopía óptica

Los resultados obtenidos, cuantitativamente, por el método de microscopía óptica se presentan en las siguientes tablas:

Tabla 16: Resultados, cualitativos, del clínker obtenido por el horno rotatorio piloto

Fase	Cantidad	Porcentaje del total [%]	Porcentaje fases principales [%]	Error [%]
Alita	669	-	54,86	4,91
Belita	314	-	25,72	4,31
C3A	70	-	5,77	2,30
C4AF	166	-	13,65	3,38
Poros	506	29,31	-	
Total	1725		100,00	

Tabla 17: Resultados, cualitativos, del clínker comercial (Empresa privada)

Fase	Cantidad	Porcentaje del total [%]	Porcentaje fases principales [%]	Error [%]
Alita	926	-	62,48	4,59
Belita	278	-	18,76	3,70
C3A	88	-	5,94	2,24
C4AF	190	-	12,82	3,17
Poros	386	20,58	-	
Total	1866		100,00	

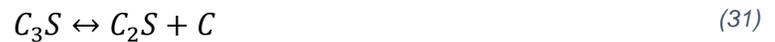
Como estos porcentajes de fases principales son volumétricos, se expresan los resultados obtenidos en porcentaje másico:

Tabla 18: Porcentaje másico de las fases principales, por microscopía óptica

Fase	Porcentaje másico clínker piloto [%]	Porcentaje másico clínker comercial [%]	Rango
Alita	53,37	60,99	50-70%
Belita	25,65	18,77	15-30%
C3A	5,34	5,51	5-10%
C4AF	15,64	14,74	5-15%

De la Tabla 16 y la Tabla 17 se puede observar que las composiciones de C_3A y C_4AF son similares entre ambos clínker, y cercanas a las obtenidas en la Tabla 14, usando la Ley de Bogue. Esto tiene sentido ya que se utilizó el mismo crudo en ambas experiencias. Adicionalmente, las fases C_3A y C_4AF son las primeras en reaccionar, y a bajas temperaturas, por lo cual se suele asegurar su total reacción en el horno.

Por otro lado, se puede observar que las composiciones de C_3S y C_2S son distintas entre ambos compuestos, aunque la obtenido de manera industrial se aproxima bastante a la estimación realizada por la Ley de Bogue, lo que quiere decir que reacciono casi completamente. En cambio, el clínker obtenido de manera piloto muestra mayor concentración de belita, lo cual puede ser asociado a que la fase C_3S , al no tener un enfriamiento rapido y homogéneo, se vuelve inestable, específicamente bajo los $1250^{\circ}C$, descomponiéndose en C_2S y cal libre (ver reacción a continuación). Esto se ve en el aumento en la concentración de belita en el clínker, visto en la Tabla 18, y de cal libre, visto en la Tabla 15. Este enfriamiento se podría mejorar instalando otro ventilador y una parrilla en la zona final del horno.



A continuación, se presenta un ejemplo de los poros y las principales fases del clínker, observadas a través de microscopia óptica. Las fases principales serán: Alita (A), Belita (B), C_3A (C) y C_4AF (D). Por otro lado, los poros son definidos con la letra E.

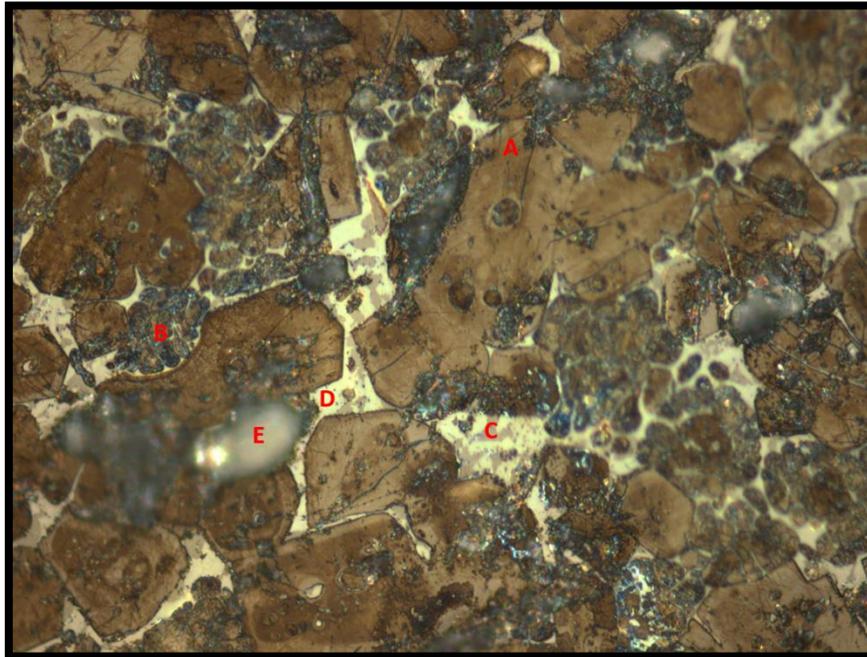


Figura 38: Representación poros y fases principales del clínker (Empresa privada) (500x).

Adicionalmente, se entregan los siguientes resultados cualitativos, en torno a la longitud de los poros y las principales fases del clinker (Alita y Belita), en la siguiente tabla e imagen:

Tabla 19: Longitudes promedio de los poros y las fases principales (Alita y Belita)

Fase	Empresa privada	Desviación estandar	Piloto	Desviación estándar	Unidad
C3S	51,20	7,33	22,78	3,14	micrometros
C2S	42,45	5,86	19,06	3,05	micrometros
Poros	106,25	38,54	83,83	39,14	micrometros

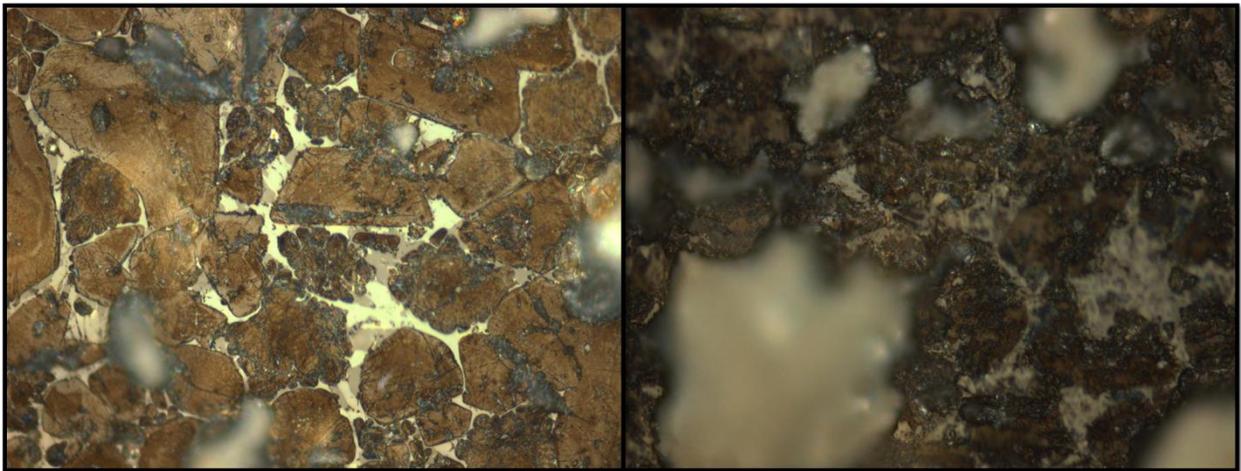


Figura 39: Porosidad del clinker (Empresa privada izquierda, Piloto derecha) (500x).

Cabe destacar que, para el cálculo de tabla anterior, se calcularon 200 puntos al azar en cada muestra de clinker.

La principal consecuencia del tamaño de los poros en el clinker suele ser en la posterior molienda del material. Esto ya que, en general, mientras mas poroso sea el material, menor será la energía requerida en la molienda. El clinker obtenido por una empresa privada muestra altos niveles de porosidad, pero dentro de un rango aceptable, mientras que los poros obtenidos de manera Piloto, son excesivamente grandes en diámetro, lo cual afecta directamente a la formación de alitas y belitas, ya que suele interferir con el crecimiento, y desarrollo, de las fases principales[40].

Adicionalmente, se presenta la homogeneidad del material. Esta puede ser vista en la siguiente figura:

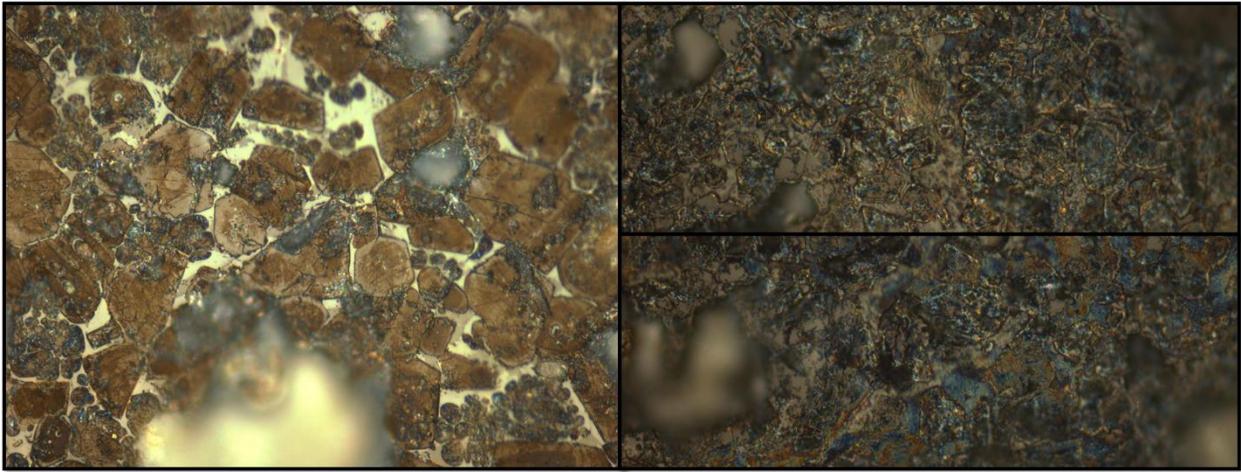


Figura 40: Homogeneidad del clínker (Empresa privada izquierda, Piloto derecha) (500x).

La figura anterior sirve para discutir sobre otra posible causa para la mayor cantidad de belita en el clínker piloto, es la homogeneidad del clínker⁶, ya que uno de buena calidad tiene zonas de belitas cercanas a la alita, mientras que uno de baja calidad muestra zonas donde la belita se encuentra separada de otras fases principales, como en la Figura 40. Por esto, se deduce que no existió una mezcla adecuada de los minerales dentro del horno rotatorio piloto.

Por otro lado, se muestran las fases intersticiales de ambos clínker:

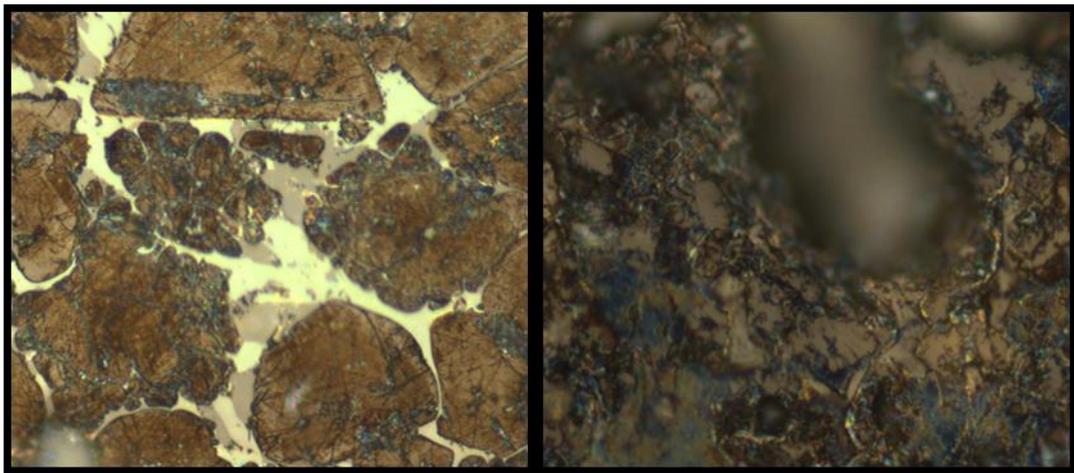


Figura 41: Fases intersticiales (Empresa privada izquierda, Piloto Derecha) (500x).

En la Figura 41, se pueden apreciar las fases intersticiales del clínker, cuando esta es homogénea y sin distinción entre la fase C_3A y C_4AF , como es el caso del clínker obtenido por Empresa privada, se considera vítrea y es causada por condiciones favorables de enfriamiento. Por otro lado, si se presentan diferencias entre las fases anteriormente mencionadas, como es el caso del clínker producido de manera piloto, la fase se considera cristalizada, siendo consecuencia de un enfriamiento secundario lento, en

⁶ Se define la homogeneidad del clínker como la distribución de alitas y belitas en el clínker. No confundir con homogeneidad del crudo, lo cual se refiere a la dosificación del crudo antes de entrar al horno .

comparación al producido por Empresa privada. Este se considera lento, debido a que existe una mala convección del aire

Por último, se realizan análisis sobre la temperatura, y el tiempo de clinkerización, utilizando la información anteriormente mostrada:

- La temperatura de clinkerización puede ser analizada utilizando los datos de la Tabla 19, específicamente los que hacen referencia a la longitud de las alitas. Esto ya que se considera que, a mayor diámetro promedio de alitas, mayor fue temperatura de clinkerización, y por ende, el transporte de los iones en la formación de silicatos cálcicos. Se considera un clinker de calidad cuando este se encuentra entre los 70-80 micrones, para temperaturas de clinkerización cercanas a los 1500°C. Como la temperatura de clinkerización utilizada fue de 1450°C, se esperan granos de alita más pequeños, aunque sin afectar los estándares de calidad del clinker [41]. Como el diámetro promedio de las alitas de Empresa privada es de 52,42 micrones, y el obtenido de manera Piloto es de 22,78 micrones, se puede deducir que la temperatura de clinkerización fue menor. Esto puede ser solucionando aumentando la cantidad de gas en el equipo, lo que aumentara la temperatura en las distintas zonas del horno.
- Aunque existen pruebas experimentales en las cuales se obtuvo clinker a 1300°C [42], manteniendo un alto tiempo de clinkerización, lo óptimo no es recurrir a estos métodos, ya que los minerales se encuentran poco desarrollados y el clinker posee un alto volumen de poros. Por otra parte, pequeños tiempos de clinkerización generan cristales de alitas poco desarrollados, cercanos a 20 micrones, como es el caso del clinker obtenido de manera piloto, demuestra que el tiempo de cocción en el horno rotatorio piloto fue bajo, lo cual se puede solucionar disminuyendo las RPM del equipo.

5.3 Cemento

5.3.1 Peso y superficie específica

Los resultados obtenidos para peso y superficie especifican del material son

Tabla 20: Peso y superficie específica de las muestras

Material	Peso específico [g/cm ³]	Superficie específica [cm ² /g]	Tiempo de molienda [min]
Cemento Portland Empresa privada	3,15	3900	72
Cemento Portland Piloto	3,15	4000	77

Los pesos específicos de los cementos son similares debido a que ambos clinker poseen valores similares en las fases intersticiales, C_3A y C_4AF , cambiando solo en los valores de las composiciones de alita y belita. Aunque las densidad de estos compuestos poseen valores similares, la densidad de la belita es mayor, por lo cual se esperaría que el peso

específico del cemento producido de forma piloto, pero este al tener una mayor cantidad de poros, genera que ambos clínter tengan un peso específico similar. De igual manera, la superficie específica de ambas muestras es similar, debido a que su tiempo de molienda fue parecido.

5.3.2 Ensayo de flexión y compresión de morteros

Los resultados obtenidos para flexión y compresión son los siguientes

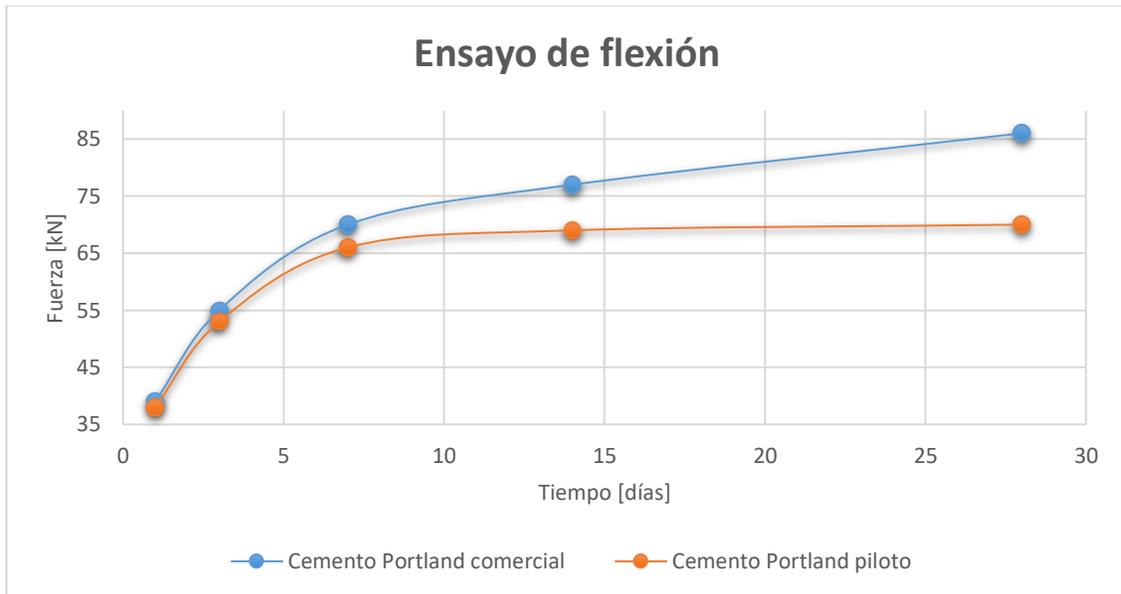


Figura 42: Resultados ensayo de flexión, cemento Portland

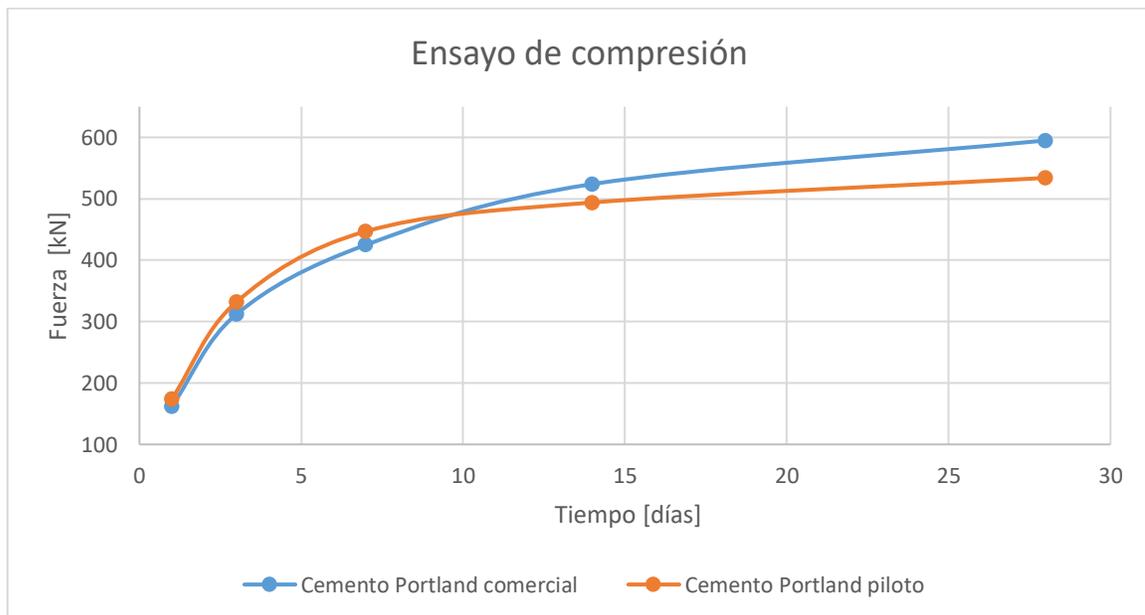


Figura 43: Resultados ensayo de compresión, cemento Portland

Como se puede ver en la Figura 42 y Figura 43, las resistencias mecánicas iniciales de los cementos son similares, esto se puede asociar a la alta cantidad de alita, en el caso del cemento producido por Empresa privada, y aunque es menor la cantidad de alita en

el cemento piloto, su menor longitud favorece su rápida difusión con el agua [19], compensando su resistencia inicial. Esto ocurre ya que mientras menor longitud tengan las partículas, más rápidas serán las reacciones.

Con respecto a las resistencias tardías, producidas finalmente por la belita en conjunto con la alita, se pudo apreciar en sección 5.2.2, que la belita del clínker obtenido de manera piloto, es de baja calidad, principalmente al tener alta digitación en sus cristales, lo que causa inestabilidad y poca reactividad con el agua al ser hidratado. Por otro lado, la belita de Empresa privada mostro formas regulares y circulares, lo cual es consecuencia de un cristal de belita de buena calidad. Cabe recordar que una alta cantidad de belita, no implica altas resistencias mecánicas, ya que existen polimorfos inertes o con bajas propiedades hidráulicas.

6. Mejoras de operación propuestas para el horno rotatorio

Aquí se buscó resolver los problemas operacionales con los que actualmente cuenta el horno rotatorio y proponer mejoras, o en el mejor de los casos, instalar y dejar operativas estas. Para esto se realizó un análisis técnico-económico en las distintas falencias presentadas por el horno rotatorio.

La empresa solicitó realizar propuestas, o mejoras, en los siguientes aspectos del horno rotatorio:

- Sistema de alimentación
- Flujo de gas
- Flujo de aire

6.1 Sistema de alimentación

El sistema de alimentación actualmente utilizado consiste en una carga manual por parte de algún operario, con la ayuda de una poruña graduada. Para esto, el operario utilizaba un cronómetro y cada 15 o 20 segundos, echaba una carga, conocida, de material crudo al interior del horno. Este sistema claramente no es el óptimo debido a que, durante largas jornadas de trabajo, el operario puede sufrir de deshidratación, o peor aún, de quemaduras causadas por las posibles fugas de gases a altas temperaturas en la zona de alimentación.

Para esto, se propone un sistema de alimentación por tornillo sin fin ubicado en la tarima donde se realiza la alimentación. Las ventajas sobre esto serían que el operario solo tendría que cargar el estanque de almacenamiento del material, cada 15 o 20 minutos, disminuyendo las posibilidades de sufrir accidentes causados por la temperatura del horno. Adicionalmente, se podría asegurar un flujo continuo a los clientes.

Este sistema propuesto fue cotizado en la empresa Fabrinox, dando un costo cercano a las 75 UF, el cual considera la fabricación e instalación del equipo solicitado.

6.2 Flujo de gas

El actual sistema utilizado, visto en la Figura 44, posee una válvula de bola, la cual utilizaba un sistema de medición por medio de una manilla que se movía manualmente por un sistema enumerado.

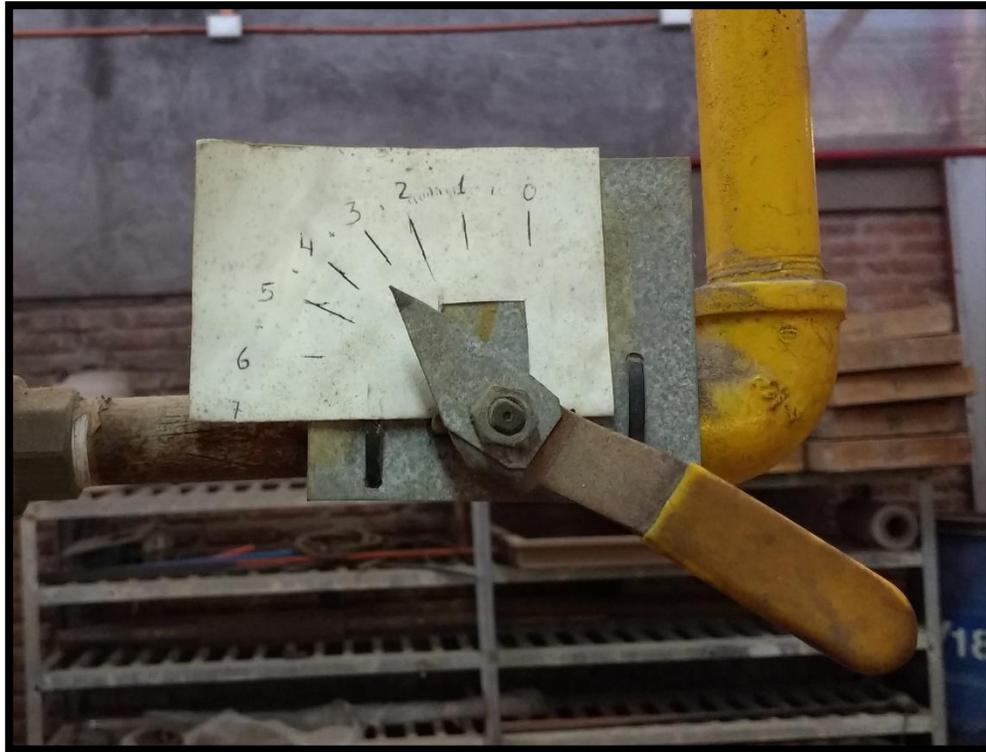


Figura 44: Válvula de gas actualmente utilizada

El problema con este tipo de válvula es que el sistema de medición no era muy exacto y las válvulas de bolas presentan comportamientos de apertura rápida, lo que dificulta utilizar flujos bajos de gas.

Para esto se postuló un sistema de válvula tipo mariposa, ya que este es utilizado cuando se desea un comportamiento lineal de apertura. Adicionalmente se recomienda utilizar un actuador eléctrico para controlar la apertura de la válvula, asegurando una precisión menor al 0,5% de error de flujo de gas [46].

6.3 Flujo de aire

Al analizar el inyector de aire se pudo apreciar que este entregaba un flujo constante al equipo, equivalente a $1,3 [m^3/h]$, lo cual no es óptimo para el proceso. Debido a esto se propuso instalar un variador de frecuencia en el equipo, visto en la Figura 45, con el cual se podría variar el flujo de aire que se inyectaba al equipo.



Figura 45: Variador de frecuencia marca Danfoss modelo VLT

Para esto se consultó con una empresa externa, sobre la compra e instalación del variador de frecuencia. Adicionalmente la empresa arreglaría el traslado de otro variador de frecuencia del motor del horno rotatorio a una zona más segura, ya que este se encontraba muy cerca del horno y sufría sobrecalentamientos constantes. Dicho esto, la cotización fue por los siguientes objetivos

- Traslado de variador de frecuencia de velocidad del motor del horno rotatorio.
- Instalación de un variador de frecuencia para el inyector de aire.
- Calibración de velocidad del flujo de aire del inyector.

Todo esto con un precio total de 56 UF (24 UF costo del servicio y 32 UF costo de los equipos e insumos).

7. Conclusiones

Las primeras conclusiones que se pueden sacar del trabajo realizado es que se logró hacer clinker. Para esto, se entregaron las variables operacionales necesarias para variar el tiempo de residencia, pudiendo ser adaptado simplemente al cambiar la velocidad de giro en el variador de frecuencia del horno rotatorio. Con esto, se expresa el flujo de alimentación en función del tiempo de retención que se quiera aplicar, y la densidad del material, asegurando así una mezcla óptima del material dentro del horno. Todo esto dio paso al correcto funcionamiento del horno rotatorio para la formación de clinker.

Adicionalmente, se entrega una relación entre los flujos de aire y gas, la temperatura externa del horno y la temperatura del material. Aquí se destaca que la temperatura del material va de 400°C a 1450°C, y la máxima temperatura del material se encuentra entre los 70-100 centímetros desde la salida de la llama. También se concluye que si la relación gas-aire tiene mayor flujo de gas que lo óptimo, el calor extra hará que aumente la temperatura en el resto del horno. Por otro lado, si la relación gas-aire se encuentra cerca del óptimo, el calor se concentrará en la zona de clinkerización.

Por otra parte, se pudo replicar un proceso industrial, específicamente el realizado por Empresa privada, fabricando clinker experimental. Aquí, se realizaron distintos análisis de laboratorios al crudo, clinker y cemento. Los principales resultados de esta sección se pueden expresar en la siguiente tabla:

Tabla 21: Conclusiones de las operaciones realizados por Empresa privada e IDIEM

Parámetro	Empresa privada - Industrial	IDIEM - Piloto
Grado de molienda del crudo	Normal	Normal
Porosidad del clinker	Baja	Normal
Temperatura de clinkerización	Normal	Baja
Tiempo de clinkerización	Normal	Baja
1° Enfriamiento	Normal	Normal-Lenta
2° Enfriamiento	Normal	Lenta

Aquí se destaca la información obtenida por la microscopía óptica, donde se calculó la cantidad aproximada de las fases principales del clinker, con lo cual se pudo realizar distintos análisis con respecto a la operación del horno y sus efectos en la calidad del clinker final.

Por esto, es necesario añadir mejoras al sistema, las cuales se enfocaron principalmente en el sistema de alimentación, flujo de gas y flujo de aire. Cabe destacar que estas mejoras podrían mejorar considerablemente el proceso, específicamente el inyector de aire, con el cual se podría lograr mayores temperaturas.

Por último, se destaca que se cumplió el objetivo principal, el cual consistía en poner en marcha el horno rotatorio dejando un estudio sobre los parámetros y variables operacionales de este.

8. Bibliografía

- [1] Termiser, “Los 3 materiales más usados en la construcción,” 2015. [Online]. Available: <https://www.termiser.com/materiales-mas-usados-en-la-construccion/>. [Accessed: 16-Jan-2019].
- [2] Patricio San Juan, “La construcción completó 12 meses de aumentos consecutivos y el gremio anticipa un mejor 2019,” *La Terc.*, 2019.
- [3] E. M. S.A.P., “Actividad de la construcción registró un aumento de 8,6% en Chile durante noviembre | Emol.com,” 2013.
- [4] E. Worrell, L. Price, N. Martin, C. Hendriks, and L. O. Meida, “CARBON DIOXIDE EMISSIONS FROM THE GLOBAL CEMENT INDUSTRY *,” 2001.
- [5] Indexmundi, “Hydraulic Cement: World Production, By Country,” 2015. [Online]. Available: https://www.indexmundi.com/en/commodities/minerals/cement/cement_t22.html. [Accessed: 01-Apr-2019].
- [6] MCH, “Los nuevos actores en el mercado del cemento - Minería Chilena,” 2009.
- [7] J. A. Polanco, M. Jesús, and S. Marquínez, “Cementos, morteros y hormigones DPTO. DE CIENCIA E INGENIERÍA DEL TERRENO Y DE LOS MATERIALES,” 2015.
- [8] Jose Calleja, “Adiciones y cementos con adiciones,” Madrid-España, 1983.
- [9] INN-Chile, “NORMA CHILENA OFICIAL NCh Cemento - Terminología , clasificación y especificaciones generales Cemento - Terminología , clasificación y especificaciones,” *Instituto Nacional de Normalización*. pp. 2–3, 1999.
- [10] IMCYC, “El Concreto en la Obra: Problemas, Causas y Soluciones,” *Instituto mexicano del cemento y del concreto*, 2006. [Online]. Available: <http://www.imcyc.com/revistact06/oct06/PROBLEMAS.pdf>. [Accessed: 29-Nov-2018].
- [11] Cementos Bio Bio, “Proceso Productivo - Bio Bio Cementos : Bio Bio Cementos,” 2017. [Online]. Available: <https://biobiocementos.cl/recursos/proceso-productivo/>. [Accessed: 13-Jan-2019].
- [12] Quiminet, “Extraído desde las rocas calizas: el carbonato de calcio | QuimiNet.com,” 2012. [Online]. Available: <https://www.quiminet.com/articulos/extraido-desde-las-rocas-calizas-el-carbonato-de-calcio-2887801.htm>. [Accessed: 23-Jan-2019].
- [13] Quiminet, “¿Qué son las arcillas? | QuimiNet.com,” 2006. [Online]. Available: <https://www.quiminet.com/articulos/que-son-las-arcillas-10078.htm>. [Accessed: 23-Jan-2019].
- [14] F Bardisa, “Composición del cemento Portland,” 2010.
- [15] Mario Alberto Montante Garz, “Uso de aditivos en la producción de clinker de cemento portland,” Universidad autónoma de Nuevo León, 1999.
- [16] Civiltoday, “Properties of Cement- Physical and Chemical,” 2018. [Online].

Available: <https://civiltoday.com/civil-engineering-materials/cement/111-properties-of-cement-physical-chemical-properties>. [Accessed: 01-Mar-2019].

- [17] Cementos Bio Bio, "Productos - Bio Bio Cementos: Bio Bio Cementos," 2017. [Online]. Available: <https://biobiocementos.cl/productos-y-servicios/productos/>. [Accessed: 13-Jan-2019].
- [18] Alicia Carneado Moreno, "Estudio técnico-económico para la fabricación de cemento Portland," Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, 2010.
- [19] I. W. H. Duda, *Manual Tecnológico del Cemento*, Editores T. Barcelona, 1977.
- [20] ITI, "Properties of the major cement minerals," *Infrastructure Technology Institute*, 2018. [Online]. Available: http://iti.northwestern.edu/cement/monograph/Monograph3_5.html. [Accessed: 29-Nov-2018].
- [21] Dr. Abbas Oda Dawood, "Hydration of Cement," Amarah, Iraq, 2018.
- [22] Halit Yazici, "The Cement Matrix Cement: produces a crystalline structure binds aggregates together Water causes chemical reaction to occur produces workability," 2015.
- [23] B. Fabrellas *et al.*, "NON-THERMAL SOURCES AND SOURCE INVENTORIES GLOBAL ASSESMENT OF PCDD/F EMISSIONS FROM THE SPANISH CEMENT SECTOR. EFFECT OF CONVENTIONAL/ALTERNATIVE FUELS," 2004.
- [24] F. Glasser, M. N. Bannerman, T. Hanein, F. P. Glasser, and M. Bannerman, "Thermodynamics of Portland Cement Clinkering," 2015.
- [25] L. Aite, "HIDRATACION DEL CEMENTO," 2019. [Online]. Available: http://www.academia.edu/9477874/HIDRATACION_DEL_CEMENTO. [Accessed: 28-Feb-2019].
- [26] H. J. Jeff Thomas, "Hydration and microestructure of Portland Cement Paste," 2014. [Online]. Available: http://iti.northwestern.edu/cement/monograph/Monograph5_.html. [Accessed: 28-Feb-2019].
- [27] P. C. Hewlett, *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*. 2003.
- [28] Nicholas B Winter, "The cement kiln," 2005. [Online]. Available: <https://www.understanding-cement.com/kiln.html>. [Accessed: 12-Feb-2019].
- [29] H.P. Kritzinger and T.C. Kingsley, "Modelling and optimization of a rotary kil direct reduction process," Sudafrica, 2015.
- [30] A. N. P. Elias, "Cálculo, Diseño y Operación de un Horno Rotativo de Vía Húmeda para la Producción de ISO Toneladas / Día de Clínter," Universidad Nacion de Ingeniería, Lima, Perú, 1982.
- [31] Holcim, "EVERYTHING YOU NEED TO KNOW ABOUT CEMENT KILN FLAME - INFINITY FOR CEMENT EQUIPMENT," 2019. [Online]. Available: <https://www.cementequipment.org/home/firing-systems/everything-need-know-cement-kiln-flame/>. [Accessed: 13-Feb-2019].

- [32] USON, “Combustibles y llamas,” 2000.
- [33] Indura, “HOJA DE DATOS DE SEGURIDAD NCh 2245,” 2005.
- [34] Metrogas, “Combustión gas,” 2019. [Online]. Available: http://www.metrogas.cl/industria/asesoria_tecnica_1. [Accessed: 13-Feb-2019].
- [35] H. Scott Fogler, “Elements of chemical reaction engineering,” *Chem. Eng. Sci.*, 2002.
- [36] R. H. Bogue, “Calculation of the Compounds in Portland Cement,” *Ind. Eng. Chem. Anal. Ed.*, vol. 1, no. 4, pp. 192–197, Oct. 1929.
- [37] María de los Ángeles Gómez de la Torre, “Estudio de cementos y materiales relacionados por el método de Rietveld,” Universidad de Malaga, 2003.
- [38] H. F. W. Taylor, “Cement chemistry. 2nd ed.,” *Acad. Press*, 1997.
- [39] F. Massazza, “Determinación rápida de la cal libre,” España, 1971.
- [40] B. Felekoğlu, K. Tosun, B. Baradan, and A. Altun, “Effects of porosity and related interstitial phase morphology difference on the grindability of clinkers,” *Mater. Struct.*, vol. 43, no. 1–2, pp. 179–193, Jan. 2010.
- [41] J. P. Instituto Eduardo Torroja de la Construcción y del Cemento., H. Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja (Consejo Superior de Investigaciones Científicas), and G. Socroun, *Materiales de construcción.*, no. 132. Institut Eduardo Torroja de la Construcción y del Cemento, 1968.
- [42] A. Y. Al-Otoom, “Utilization of oil shale in the production of Portland clinker,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 28, no. 1, pp. 3–11, Jan. 2006.
- [43] G. R. Gouda, “Effect of clinker composition on grindability,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 9, no. 2, pp. 209–218, Mar. 1979.
- [44] M. A. Trezza and A. N. Scian, “Burning wastes as an industrial resource: Their effect on Portland cement clinker,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 30, no. 1, pp. 137–144, Jan. 2000.
- [45] M. Röβler and I. Odler, “Investigations on the relationship between porosity, structure and strength of hydrated portland cement pastes I. Effect of porosity,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 15, no. 2, pp. 320–330, Mar. 1985.
- [46] Schneider Electric, “Actuadores americanos para válvulas de HVAC | Schneider Electric,” 2019. [Online]. Available: <https://www.schneider-electric.cl/es/product-range-presentation/7763-actuadores-americanos-para-válvulas-de-hvac/>. [Accessed: 23-Mar-2019].
- [47] MAPA, “Tabla de pesos atomicos,” España, 2016.
- [48] Valvias, “Densidad de Gases - Valvias,” 2013. [Online]. Available: <http://www.valvias.com/prontuario-propiedades-materiales-densidad-gases.php>. [Accessed: 14-Feb-2019].
- [49] LADICIM, “Practicas de laboratorio,” 2006. [Online]. Available:

<https://ocw.unican.es/pluginfile.php/280/course/section/206/1-Densidades.pdf>.
[Accessed: 26-Feb-2019].

- [50] Utest, "Aparato de Blaine para Permeabilidad tipo con Aire - Finura (Superficie Específica)," 2018. [Online]. Available: <http://www.utest.com.tr/es/25868/Aparato-de-Blaine-para-Permeabilidad-tipo-con-Aire>. [Accessed: 23-Mar-2019].
- [51] Arian, "Tablas de termocuplas y Pt100," 2019.
- [52] Concremax, "Recomendaciones para el curado del concreto - CONCREMAX," 2015. [Online]. Available: <http://www.concremax.com.pe/noticia/curado-concreto>. [Accessed: 01-Mar-2019].
- [53] Parro, "Definición de ángulo de talud natural | Diccionario de arquitectura y construcción," 2019. [Online]. Available: <http://www.parro.com.ar/definicion-de-%E1ngulo+de+talud+natural>. [Accessed: 11-Feb-2019].

9. Anexos

9.1 Módulos de clínker

Comparando los análisis químicos del cemento Portland se ha descubierto que existen determinadas relaciones en los porcentajes de cal, por un lado, y los de silicatos, alúminas y óxidos de hierro[19]. Algunas de estas relaciones son descritas a continuación:

- Módulo hidráulico: Tiene la siguiente forma

$$HM = \frac{CaO}{SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3} \quad (32)$$

Los cementos de buena calidad tienen un módulo hidráulico del orden de 2. Los cementos con $HM < 1,7$ suelen presentar resistencias mecánicas insuficientes, mientras que los cementos con $HM > 2,4$ no presentan un volumen estable. Se encontró que un módulo hidráulico creciente era debido a la mayor cantidad de calor para la cocción de clínker, y que las resistencias, especialmente iniciales, aumentaban. Por otra parte, el calor de hidratación también aumentaba y disminuía la resistencia química.

Los módulos introducidos a continuación complementan, en cierto sentido, al módulo hidráulico, ayudando a obtener un mejor criterio de calidad sobre el clínker.

- Módulo de silicatos: Tiene la siguiente forma

$$SM = \frac{SiO_2}{Al_2O_3 + Fe_2O_3} \quad (33)$$

El valor del módulo de silicatos varía entre 1,9 y 3,2, aunque los valores favorables están entre 2,2 y 2,6. Un módulo de silicato creciente implica empeoramiento de las condiciones de cocción del clínker por descenso de fase líquida y baja tendencia a la formación de costra. Además, los cementos con módulos de silicatos altos suponen cementos de fraguado y endurecimiento lento. Por deceso de módulo de silicatos crece la cuantía de fase líquida, condicionando la buena aptitud a la cocción del clínker y la formación del clínker.

- Módulo silícico: Posee la siguiente forma

$$Mussgnung = \frac{SiO_2}{Al_2O_3} \quad (34)$$

En la cocción del clínker del horno rotatorio se obtienen buenas condiciones de formación de costras en la zona de cocción si el valor de ese cociente está situado entre 2,5 y 3,5 y si, simultáneamente, el valor del módulo de alúmina se halla entre los límites de 1,8 y 2,3.

- Módulo de alúmina:

$$TM = \frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3} \quad (35)$$

En general, el módulo de alúmina exhibe valores entre 1,5 y 2,5. Hay cementos con contenidos bajos en alúmina con módulos de alúmina debajo de 1,5, llamados ferrocementos). El módulo de alúmina es decisivo para la fase líquida del clínker. Si el módulo es 0,637, coexisten los dos óxidos en proporciones molares y en clínker solo habrá ferrito alúmina tetracálcico; tal clínker no puede contener, según cálculos, nada de aluminato tricálcico (caso del cemento Ferrari). Un módulo de alúmina alto para módulo de silicato bajo da como resultado, entre otras cosas, un cemento de fraguado rápido ya que exige mayor cantidad de yeso para su regulación.

9.2 Relación Frecuencia-RPM

La relación entre la frecuencia del motor y las RPM del horno se calcularon con un sencillo experimento, se colocó una marca en el casco del horno y se calculó el tiempo al cual se demoraba en dar una vuelta a distintas frecuencias. El resultado de esto se puede apreciar en la siguiente figura y tabla

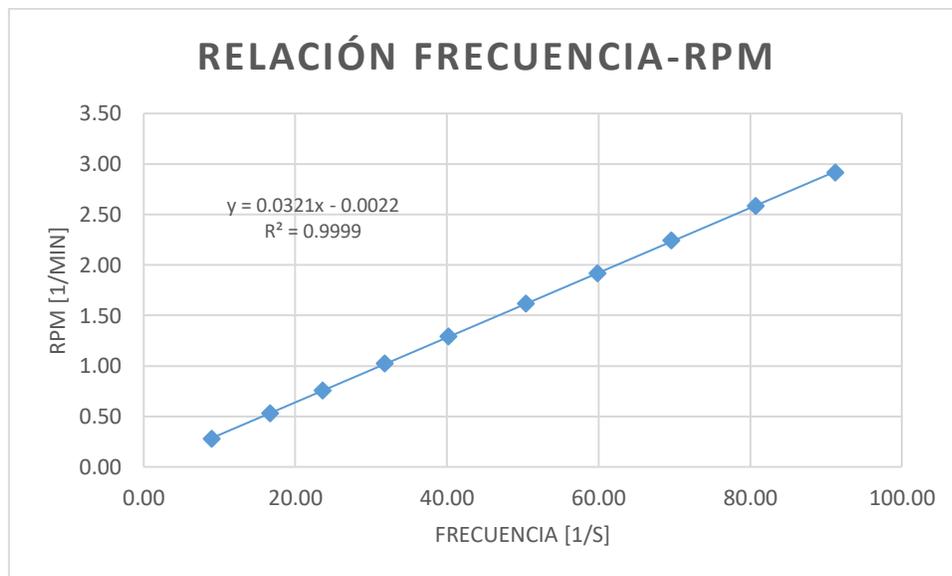


Figura 46: Relación Frecuencia-RPM

Tabla 22: Relación entre frecuencia del motor y RPM del horno rotatorio

Relación Frecuencia-RPM					
RPM [1/min]	Frecuencia [Hz]	RPM [1/min]	Frecuencia [Hz]	RPM [1/min]	Frecuencia [Hz]
0,00	0,07	1,50	46,80	3,00	93,53
0,20	6,30	1,70	53,03	3,20	99,76
0,40	12,53	1,90	59,26	3,40	105,99
0,60	18,76	2,10	65,49	3,60	112,22
0,80	24,99	2,30	71,72	3,80	118,45
1,00	31,22	2,50	77,95	4,00	124,68
1,20	37,45	2,70	84,18	4,20	130,91
1,40	43,68	2,90	90,41	4,40	137,14

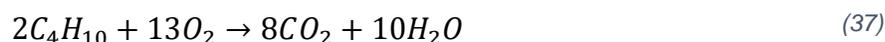
9.3 Relación aire-combustible

Como se detalló en el cuerpo, la composición del combustible es 10% propano y 90% butano, las cuales poseen las siguientes de combustión

Propano



Butano



Dicho esto, se calculará el volumen de gas, y el volumen de aire, en función de un mol de combustible

- Volumen de gas por mol de combustible

Antes que todo, es importante conocer el peso molar y la densidad de los distintos compuestos, descritos en la siguiente tabla

Tabla 23: Pesos molares de compuestos que participan en la combustión de gas licuado[47][48]

Compuesto	Peso molar [gr/ mol]	Densidad [kg/ m ³]
C_3H_8	44	1,83
O_2	32	1,33
CO_2	44	1,84
H_2O	18	1
C_4H_{10}	58	2,52
aire	28,9	1,225

Así, a continuación, se procede a calcular el volumen necesario de combustible

$$44 \left[\frac{gr}{mol} \right] \cdot \frac{1}{1000} \left[\frac{kg}{gr} \right] \cdot \frac{1}{1,83} \left[\frac{m^3}{kg} \right] = 0,024 [m^3 comb(propano)] \quad (38)$$

Si el cálculo anterior se repitiese para el butano, el volumen que se obtiene sería de $0,023 [m^3 comb(propano)]$.

- Volumen de aire por mol de combustible

Utilizando la ecuación anteriormente descrita sobre el propano, es necesario calcular la cantidad total de aire a utilizar. Así, considerando que tiene un 21% de oxígeno, los moles necesarios de aire serán

$$\frac{5 [molOX]}{1 [molcomb]} \cdot \frac{1 [molAire]}{0,21 [molOX]} = 23,8 \left[\frac{molAire}{molcomb} \right] \quad (39)$$

Así, y repitiendo el cálculo anterior, el volumen necesario para la combustión de un mol de propano será $0,56 [m^3 aire(propano)]$. Repitiendo este cálculo para el butano, se obtiene un volumen de $0,73 [m^3 aire(propano)]$.

Finalmente, la relación entre el volumen de aire y combustible será

$$\frac{0,56 [m^3 aire(propano)] \cdot 0,1 + 0,76 [m^3 aire(butano)] \cdot 0,9}{0,024 [m^3 comb(propano)] \cdot 0,1 + 0,023 [m^3 comb(butano)] \cdot 0,9} \quad (40)$$

$$= \frac{0,713 [m^3 aire]}{0,023 [m^3 comb]} = 30,86 \left[\frac{m^3 aire}{m^3 comb} \right] \quad (41)$$

Dicho esto, y considerando el exceso aire de un 10-25% recomendado por bibliografía, dando un rango total de $34 [m^3/h]$ y $39 [m^3/h]$.

9.4 Relación válvula-flujo de gas

La relación entre la apertura de válvula y el flujo de gas del horno rotatorio puede ser vista en la siguiente figura y tabla

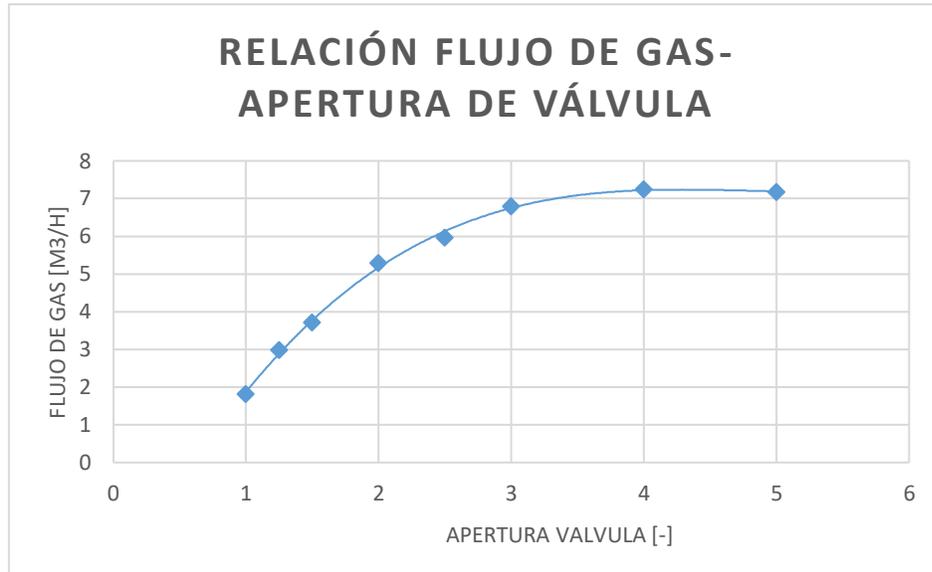


Figura 47: Relación Flujo de gas-Apertura de válvula

Tabla 24: Relación entre la apertura de válvula y el flujo de gas

Relación apertura de válvula y flujo de gas								
Apertura de la válvula	1	1,25	1,5	2	2,5	3	4	5
Flujo [m^3/h]	1,82	2,98	3,72	5,29	5,97	6,79	7,25	7,18

Esta se calculó dando distintas posiciones a la válvula de gas, visto en la Figura 44, junto a un pequeño contador de gas, visto en la Figura 48, fue posible conocer la relación de flujo de gas en función de la posición de la válvula.



Figura 48: Medidor de gas instalado en las cañerías de gas

9.5 Relación frecuencia-flujo de aire

Cabe destacar que este se calculó gracias a la ayuda de una empresa externa, usando un velocímetro. Así, como el diámetro del inyector es conocido, se puede conocer el flujo de aire, describiendo la relación en la siguiente figura y posterior tabla

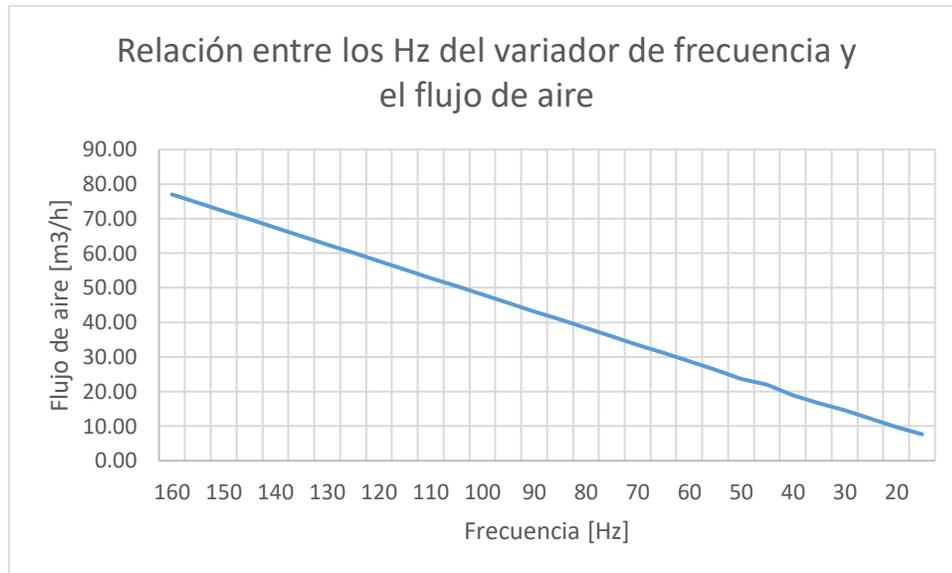


Figura 49: Relación entre la frecuencia del inyector de aire y el flujo de este

Tabla 25: Relación entre la frecuencia del motor y el flujo de aire

Frecuencia [Hz]	Flujo de aire [m³/h]	Frecuencia [Hz]	Flujo de aire [m³/h]
160	76,99	90	43,22
150	72,17	80	38,39
140	67,34	70	33,56
130	62,52	60	28,74
120	57,69	50	23,62
110	52,87	40	18,98
100	48,04	30	14,58

9.6 Metodología

9.6.1 Clínter

9.6.1.1 Microscopia óptica

El procedimiento por describir establece un método para un análisis cualitativo, y cuantitativo, de las principales fases del clínter. Para esto serán necesarios los siguientes instrumentos y equipos: Balanza analítica, microscopio óptico, pulidora, baño de ultrasonido y secador de pelo. Dicho esto, los pasos para el procedimiento serán:

1. Preparación de la muestra

- a. Tamizar la muestra en 3 mallas distintas, formando al menos 3 grupos distintos de muestras. Adicionalmente, recubrir los moldes de goma con vaselina.
- b. Seleccionar granos de las mallas, rellorando la base del molde hasta un tercio de la altura de este.
- c. Preparar la resina epóxica en un vaso desechable, masando 10 [g] del compuesto A y 5 [g] del compuesto B, para cada probeta. Mezclar de manera homogénea.
- d. Verter la mezcla sobre los moldes, procurando mantener los granos de clínter en su posición.
- e. Retirar las muestras del molde y secarlas por 24 horas, limpiando con alcohol isopropílico.
- f. Pulir las muestras en el disco rápido durante 5 minutos, usando alcohol isopropílico cada 20 para evitar calentamiento de la superficie.
- g. Luego enfocar la zona de la resina en el microscopio óptico, si existen ralladuras, pulir la muestra por 5 minutos más, humectando con alcohol cada 20 segundos, si no, continuar a la siguiente sección 9.6.1.1.1.

2. Procedimiento de ensayo

- a. Se sumerge la superficie pulida en una solución de Nital 1% [v/v] durante 6 segundos, sin dejar que toque el fondo del recipiente. Rápidamente se limpia con alcohol isopropílico y se seca con el secador de pelo.
- b. Se lleva la muestra al microscopio, asegurando que se observan las distintas fases del clínter, detalladas en la sección 9.6.1.1.1. De caso contrario se debe volver a sumergir la muestra en la solución Nital 1% [v/v] durante 1 segundo.
- c. Abrir "Image-Pro Plus", presionar el botón "Preview" y enfocar la imagen en 500X. Repetir esta acción para 100X y 1000X.
- d. Se procede a la identificación de fases, enumerando las fases y anotándolas en una hoja Excel.
- e. Guardar las imágenes en distintas carpetas, detallando la amplificación a la cual fueron tomadas.
- f. Al guardar las imágenes recordar detallar las distancias entre los poros y la longitud de las zonas de alitas.

3. Análisis cuantitativo

a. Para medir la porosidad es necesario utilizar la siguiente ecuación

$$P = \frac{\text{Número de poros}}{\text{Número total de poros}} \cdot 100\% \quad (42)$$

Donde

P : Porcentaje de porosidad [–].

Número de poros: La cantidad de imágenes en que un poro se encuentra en su punto medio [–].

Número total: La cantidad de imágenes registradas para el análisis cuantitativo, con un mínimo de 2000 [–].

b. El porcentaje de fases mayoritarias en el clínker que se estudian son: Alita (C_3S), Belita (C_2S), C_3A , C_4AF , cal libre y periclasa. Para cada fase se debe utilizar la siguiente expresión:

$$\text{Fase A} = \frac{\text{Número de puntos Fase A} \cdot \text{Densidad Fase A}}{\sum_i^n \text{Número de puntos Fase } i \cdot \text{Densidad Fase } i} \cdot 100\% \quad (43)$$

Donde

Fase A: Fase mayoritaria que se desea calcular [–].

Número de puntos Fase A: Cantidad de imágenes en que la fase A se encuentra en el punto medio [–].

Densidad Fase A: Densidad de la fase A, ver Tabla 26, en el Anexo 9.6.1.1.2 [g/ml].

Número de puntos Fase i: Cantidad de imágenes en la Fase i, donde i representa cada una de las 6 fases mayoritarias [–].

Densidad Fase i: Densidad Fase i [g/ml].

c. El error de cada porcentaje de las fases se determina con la siguiente expresión

$$\epsilon = 2,0235^2 \cdot \sqrt{\frac{P \cdot (100 - P)}{N}} \quad (44)$$

Donde

ϵ : Error absoluto [–].

P : Porcentaje de la fase mayoritaria a estudiar [–].

N : Número de imágenes en la que la fase mayoritaria a estudiar se encuentra en el punto medio [–].

9.6.1.1.1 Identificación de fases

La reactividad de los silicatos varía en cada uno, por lo que las fases poseen un rango de colores luego del ataque químico.

Alita (C_3S): Toma colores azules y verdes, en algunos casos marrones. Su forma tiene a ser hexagonal con líneas definidas. Puede poseer incrustaciones de belita (C_2S), cal libre o periclasa.

Belita (C_2S): Toma colores de marrones a azules. Su forma usualmente es pseudo circular, o en algunos casos pseudo hexagonal. Puede poseer incrustaciones de periclasa.

C_3A : Toma color gris oscuro a marrón oscuro. Usualmente se observa como cristal líquido en la matriz, pero en algunos casos se observa cristalizada con sus bordes rectos, similar a una alita.

C_4AF : Toma color gris brillante. Se observa en la matriz como cristal líquido.

Cal libre: Con una amplitud del 100x se puede observar como esferas oscuras, pero al usar una amplificación de 500x se puede ver que posee colores tornasol. Se recalca, que la cal libre en ningún caso se encontrara en contacto con la belita, pero si se puede observar un puente de alitas que las separe.

Periclasa: Toma color rosa pálido. Principalmente se observa con forma dendrítica en los bordes de alita o belita, pero además puede poseer una forma pentagonal, hexagonal, piramidal o irregular. Una forma de no confundirla con otra fase mayoritaria es recordar que la periclasa no posee incrustaciones.

9.6.1.1.2 Densidad de las fases mayoritarias

Tabla 26: Densidad de las fases mayoritarias

Fases	Densidad	Unidades
Alita	3,2	$[g/cm^3]$
Belita	3,28	$[g/cm^3]$
Celita	3,04	$[g/cm^3]$
Felita	3,77	$[g/cm^3]$
Cal libre	3,3	$[g/cm^3]$
Periclasa	3,58	$[g/cm^3]$

9.6.2 Cemento

9.6.2.1 Peso específico

Esta norma, NCh0154, establece el procedimiento para determinar el peso específico relativo de los cementos, mediante el matraz normal de Le Chatelier, visto en la Figura 50, los cuales serán empleados en la confección de morteros y hormigones.



Figura 50: Diagrama de un matraz de Le Chetelier [49]

Este método consiste en establecer la relación entre una masa de cemento (g) y el volumen (ml) de líquido que esta masa desplaza en el matraz de Le Chetelier. Para esto se utilizarán los siguientes materiales: Baño de temperatura constante, queroseno y bencina (de masa específica igual o superior a 0,73 [g/ml]). Dicho esto, los pasos para el procedimiento serán:

1. Llenar el matraz con cualquiera de los líquidos especificados anteriormente hasta obtener una marca de 0 ml en el matraz de Le Chetelier.
2. Sumergir el matraz en el baño de temperatura constante donde deberá permanecer hasta que su contenido haya alcanzado la temperatura del agua.
3. Pesar una porción de masa, 64 gramos para ser exactos, de cemento y agregar al líquido contenido en el matraz.
4. Tapar el matraz y hacer girar en una posición inclinada para el desprendimiento de burbujas de aire.
5. Registrar el volumen final y el desplazado.

Finalmente, se calculará el peso específico de la siguiente manera

$$P_e = \frac{m}{V_2 - V_1} \quad (45)$$

Donde

m : Masa [g].

P_e : Peso específico [g/ml].

$V_2 - V_1$: Volumen desplazado por la muestra [ml].

9.6.2.2 Determinación de la superficie específica según Blaine

Esta norma establece un método de ensayo para la determinación de la superficie específica de los cementos, específicamente sobre su finura, mediante la permeabilidad

de Blaine. Esta se basa en el hecho de que la velocidad de paso del aire a través de una capa de material con determinada porosidad es función del número y tamaño de los huecos existentes en la capa, los cuales dependen directamente del tamaño de las partículas del material, y por lo tanto, de la superficie específica de este. Para esto se utilizarán los siguientes aparatos: Aparato Blaine, visto en la Figura 51, celda de permeabilidad, disco perforado, embolo, papel filtro, manómetro, líquido para el manómetro (normalmente se utiliza aceite) y un cronometro.



Figura 51: Equipo para ensayo de permeabilidad según Blaine [50]

9.6.2.3 Ensayo de flexión y compresión

Esta norma establece procedimientos para determinar la resistencia a la flexión y compresión de morteros de cementos para distintos periodos de tiempo. Para esto, se utilizarán los distintos aparatos: balanza, tamices, matraz aforado, moldes, mezcladora, mesa de compactación, máquina para ensayo de flexión y máquina para ensayo de compresión, usando materiales como agua, cemento y arena. Debido a que se realizaran varios procedimientos, en distintos equipos, será necesario ir detallándolos uno por uno

1. Moldes

- a. Los moldes serán de material que no sea atacado por el mortero de cemento.
- b. Los moldes estarán divididos en tres compartimientos prismáticos, que permitirán confeccionar 3 probetas, donde cada compartimiento tendrá una longitud de 160 [mm], ancho de 40 [mm] y una altura de 40 [mm]. Adicionalmente tendrán un espesor igual o superior a 6 [mm] y con caras internas que formarán, entre sí, ángulos de 90°.
- c. Los moldes estarán provistos de un marco metálico superpuesto, para facilitar el llenado, el cual constara de tres compartimientos prismáticas de 20 a 40 [mm] de altura.

2. Mezcladora

- a. Estará compuesta de un recipiente de acero inoxidable, de aproximadamente 6 [lts], de la forma y dimensión señaladas en la Figura 52.

- b. Tendrá una paleta, de la forma y dimensiones indicadas en la Figura 52 con un movimiento de rotación alrededor de su propio eje, y un movimiento planetario alrededor del eje del motor.

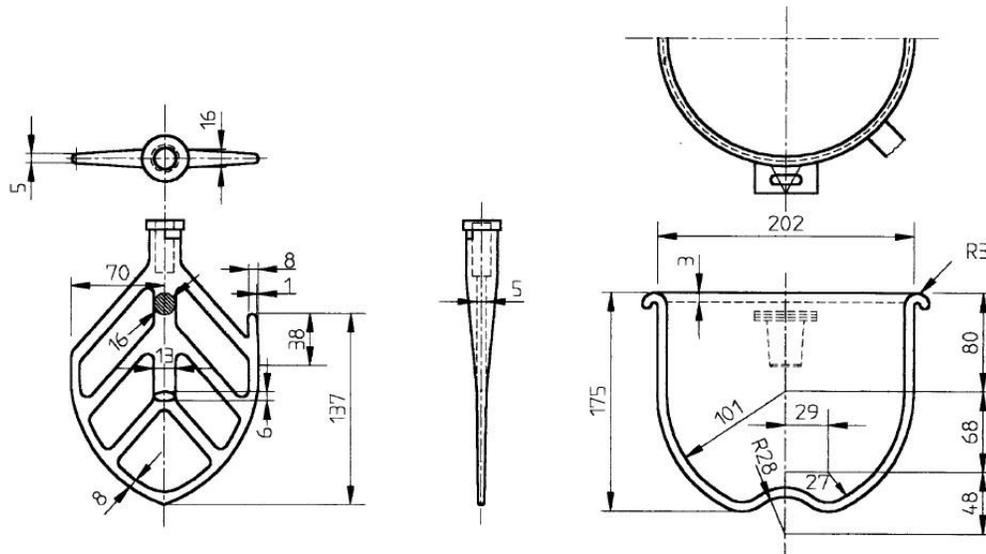


Figura 52: Dimensión de la mezcladora y sus paletas (en mm).

3. Mesa de compactación

- La mesa de compactación estará constituida por una plancha metálica horizontal, unida a un dispositivo accionador por un motor que le otorgue un movimiento de subida hasta una altura de 15 [mm], y la deje caer libremente desde esa altura, a razón de una caída por segundo.
- La mesa tendrá dispositivos de sujeción para fijar firmemente los moldes.
- El aparato se fijará en una base de hormigón de dimensiones apropiadas.

4. Máquina para ensayo de flexión

- Esta máquina deberá tener una precisión igual o superior a 1%. Adicionalmente, tendrá dos rodillos de 10 [mm] situados a una distancia de 100 [mm]. Tendrá, además, un rodillo equidistante de los de apoyo y de igual diámetro que ellos.
- Los rodillos serán móviles alrededor de su centro para permitir una repartición uniforme de las cargas.

5. Máquina para ensayo de compresión

- La máquina tendrá una precisión igual o superior a $\pm 1,5\%$ en todo el intervalo de cargas.
- El dispositivo para colocar las probetas tendrá un sistema de placas, el cual se coloca entre los platillos de la máquina de ensayo a compresión, y que constan de dos placas de presión rectangulares.
- Estas placas, estarán guiadas sin frotamiento, y una de ellas ayudara con un sistema de rotula, pudiendo inclinarse ligeramente.

Descrito todos los equipos, junto a sus características principales, se procederá a describir las etapas del ensayo

1. Acondicionamiento – Temperatura y humedad
 - a. La temperatura de la sala se mantendrá entre 18°C y 27°C, con una humedad relativa inferior al 50%.
 - b. Los materiales y aparatos usados en la preparación de mortero deberán estar a una temperatura entre 18°C y 27°C.
2. Acondicionamiento – Pesada de los materiales
 - a. Se pesarán separadamente 500 [g] de cemento, 500 [g] de arena fin, 500 [g] de arena media y 500 [g] de arena gruesa, junto a 250 [ml] de agua.
 - b. Los materiales se dejarán en envases junto a la mezcladora.
3. Acondicionamiento - Mezcla.
 - a. Estando el mezclador en posición de partida, se verterá el agua en el recipiente. A continuación, se agregará el cemento.
 - b. Se pondrá en marcha el mezclador a la velocidad lenta.
 - c. Después de 30 [s] de la puesta en marcha se ingresará el total de arena, para luego cambiar a velocidad rápida el mezclador por un 90 [s].
 - d. Se detendrá el mezclador para raspar el mortero con una espátula o plástico.
 - e. Se pondrá en marcha el mezclador con la velocidad rápida durante un minuto más.
4. Probetas – Preparación
 - a. El molde debe cubrirse interiormente con una capa delgada de aceite. Las uniones exteriores deberán sellarse. Recordar que el molde y el marco se fijaran sobre la mesa de compactación.
 - b. Se introducirá en cada uno de los compartimientos una primera capa de alrededor de 320 g de mortero, directamente desde el mezclador, nivelando con una espátula.
 - c. Se hará funcionar la mesa de golpes dando 60 caídas en 60 s.
 - d. Se colocará una segunda capa de mortero, igual a la anterior.
 - e. Se emparejará la superficie alisándola con una regla. Luego, se identificarán las probetas.
5. Probetas – Conservación
 - a. Los moldes se cubrirán con una plancha de material no absorbente, para evitar la evaporación de agua, para transportarse a una cámara húmeda.
 - b. Están serán retiradas desde la cámara de agua en un plazo de 1, 3, 7, 14 o 28 días, dependiendo de lo exigido por el cliente.
6. Procedimiento
 - a. Para la flexión, se apoyará una de las caras de la probeta sobre los rodillos de la máquina de flexión.
 - b. La carga se aplicará a través de un rodillo superior.

- c. Los trozos de las probetas rotas a flexión, se conservarán húmedos hasta el momento en que cada uno de ellos se someta al ensayo de compresión.
- d. Para la compresión, a cada trozo obtenido del proceso anterior, se le aplicara una carga proveniente de las placas de la máquina de compresión.

7. Cálculo

- a. Las resistencias mecánicas serán entregadas por los equipos en kg/cm^2 .
- b. Las resistencias se determinarán en tres probetas como mínimo para cada edad, siendo el resultado final la media aritmética de los datos entregados.

9.7 Tabla de conversión termocupla Tipo K

A continuación, se muestra una tabla de conversión de voltaje a temperatura para una termocupla tipo K

Termocupla tipo K - Equivalencias: grados celsius - milivoltios													
°C	mV	°C	mV	°C	mV	°C	mV	°C	mV	°C	mV	°C	mV
0	0,00	200	8,13	400	16,40	600	24,91	800	33,30	1000	41,31	1200	48,89
10	0,40	210	8,54	410	16,82	610	25,34	810	33,71	1010	41,70	1210	49,25
20	0,80	220	8,94	420	17,24	620	25,76	820	34,12	1020	42,09	1220	49,62
30	1,20	230	9,34	430	17,67	630	26,19	830	34,53	1030	42,48	1230	49,98
40	1,61	240	9,75	440	18,09	640	26,61	840	34,93	1040	42,87	1240	50,34
50	2,02	250	10,16	450	18,51	650	27,03	850	35,34	1050	43,25	1250	50,69
60	2,43	260	10,57	460	18,94	660	27,45	860	35,75	1060	43,64	1260	51,05
70	2,85	270	10,98	470	19,37	670	27,87	870	36,15	1070	44,02	1270	51,41
80	3,26	280	11,39	480	19,79	680	28,30	880	36,55	1080	44,40	1280	51,76
90	3,68	290	11,80	490	20,22	690	28,72	890	36,96	1090	44,78	1290	52,11
100	4,10	300	12,21	500	20,65	700	29,14	900	37,36	1100	45,16	1300	52,46
110	4,51	310	12,63	510	21,07	710	29,56	910	37,76	1110	45,54	1310	52,81
120	4,93	320	13,04	520	21,50	720	29,98	920	38,16	1120	45,92	1320	53,16
130	5,33	330	13,46	530	21,92	730	30,39	930	38,56	1130	46,29	1330	53,51
140	5,73	340	13,88	540	22,35	740	30,81	940	38,96	1140	46,67	1340	53,85
150	6,14	350	14,29	550	22,78	750	31,23	950	39,35	1150	47,04	1350	54,20
160	6,54	360	14,71	560	23,20	760	31,65	960	39,75	1160	47,41	1360	54,54
170	6,93	370	15,13	570	23,63	770	32,06	970	40,14	1170	47,78	1370	54,88
180	7,33	380	15,55	580	24,06	780	32,48	980	40,53	1180	48,15		
190	7,73	390	15,98	590	24,48	790	32,89	990	40,92	1190	48,52		

Figura 53: Tabla de conversión termocupla tipo K [51]

9.8 Memoria de calculo

9.8.1 Tiempo de residencia

El tiempo teórico será calculado usando los valores conocidos del horno, como largo, diámetro y ángulo de inclinación, y el ángulo de talud del material. Para esto se variarán las RPM del horno. Así, la memoria de cálculo de este proceso será

$$t = \frac{1,77 \cdot L \cdot \sqrt{\theta}}{P \cdot D \cdot N} \tag{46}$$

$$t = \frac{1,77 \cdot 500[cm] \cdot \sqrt{40}}{2[1/min] \cdot 29[cm] \cdot 1,94} \quad (47)$$

$$t = 28,4[min] \quad (48)$$

Aquí se utilizó un ángulo igual a 1,94, debido que la elevación del horno era igual a 3,4%. Este cálculo se repetirá para la 2,5, 3 y 3,5 RPM, dando la siguiente tabla

Tabla 27: Tiempo teórico en función de las RPM

RPM [1/min]	3,50	3,00	2,50	2,00
Tiempo teórico [min]	28,4	33,1	39,7	49,7

Adicionalmente, se calcula la función de distribución de la siguiente manera

$$E(t) = \frac{C(t)}{\int_0^{\infty} C(t) \cdot dt} \approx \frac{C(t)}{\sum C(t) \cdot \Delta t} \quad (49)$$

$$E(t) = \frac{0,1[g]}{1168,3[g \cdot s]} \quad (50)$$

$$E(t) = 8,56 \cdot 10^{-5}[1/s] \quad (51)$$

Donde se usaron los primeros datos obtenidos a 2 RPM. Esto se repitió para todas las concentraciones y para las series de 2,5, 3 y 3,5 RPM.

Así, el tiempo esperado se calculó usando la siguiente formula

$$t_m = \frac{\int_0^{\infty} t \cdot E(t) \cdot dt}{\int_0^{\infty} E(t)} = \int_0^{\infty} t \cdot E(t) \cdot dt \approx \sum t \cdot E(t) \cdot \Delta t \quad (52)$$

$$t \cdot E(t) \cdot \Delta t = 60[s] \cdot 8,56 \cdot 10^{-5} \left[\frac{1}{s} \right] \cdot 20[s] \quad (53)$$

$$t \cdot E(t) \cdot \Delta t = 2,85 \cdot 10^{-5}[s] \quad (54)$$

Repitiendo este cálculo para todas las concentraciones, y realizando una posterior sumatorio, es posible obtener el t_m para las distintas RPM. Esto se puede observar en la siguiente tabla

Tabla 28: Tiempo esperado con el 95% de la masa extraída

RPM [1/min]	3,50	3,00	2,50	2,00
Tiempo esperado 95% [min]	26,1	32,0	38,2	46,2

Adicionalmente, se obtienen los datos hipotéticos de un 100%, para 2 RPM, de la siguiente manera

$$t_{m,100\%} = \frac{t_{m,95\%}}{0,95} \quad (55)$$

$$t_{m,100\%} = \frac{26,1[\text{min}]}{0,95} \quad (56)$$

$$t_{m,100\%} = 27,4[\text{min}] \quad (57)$$

Repitiendo estos cálculos para 2,5, 3 y 3,5 RPM, se obtiene la siguiente tabla de valores

Tabla 29: Tiempo esperado hipotético con el 100% de la masa extraído

RPM [1/min]	3,50	3,00	2,50	2,00
Tiempo esperado imponiendo 100% [min]	27,4	33,7	40,2	48,7

Finalmente, se compara el tiempo esperado hipotético, y el tiempo experimental calculado, con el tiempo calculado teóricamente, obteniendo la siguiente tabla

Tabla 30: Tabla final de los tiempos de residencia

RPM	3,50	3,00	2,50	2,00
Tiempo teórico [min]	28,4	33,1	39,7	49,7
Tiempo esperado 95% [min]	26,1	32,0	38,2	46,2
Diferencia porcentual 95% [%]	8,19	3,40	3,96	6,91
Tiempo esperado imponiendo 100% [min]	27,4	33,7	40,2	48,7
Diferencia porcentual 100% [%]	3,4	1,7	1,1	2,0

9.8.2 Perfil de temperatura externo

Para armar los perfiles de temperatura externos, se usaron los siguientes datos:

Tabla 31: Perfil de temperatura externo, en °C, usando un flujo de 16,8 [m³/h] de aire y un flujo de gas 0,5 [m³/h]

Distancia a la flama [cm]	20	60	85	120	175	230	290	325	405	465
Tiempo [min]	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
15	18	34	34	30	20	19	19	18	18	18
30	26	52	66	49	37	35	24	22	21	18
45	42	81	90	84	52	50	43	35	34	31
60	63	97	105	99	68	64	62	48	46	44
80	76	110	118	108	73	75	71	60	58	57
100	88	121	126	114	84	84	80	68	65	62
120	98	133	134	118	92	92	88	78	70	68
140	101	136	138	122	95	93	90	79	71	70

Tabla 32: Perfil de temperatura externo, en °C, usando un flujo de 16,8 [m³/h] de aire y un flujo de gas 1,82 [m³/h]

Distancia a la flama [cm]	20	60	85	120	175	230	290	325	405	465
Tiempo [min]	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
15	30	37	47	29	26	27	28	26	26	26
30	61	91	97	75	48	51	49	45	43	44
45	90	123	125	92	69	71	69	63	51	49
60	103	148	151	114	86	89	84	80	75	73
75	111	168	167	133	101	102	98	93	87	86
105	146	192	192	157	123	125	122	114	106	105
135	169	202	205	169	141	140	137	128	120	118
165	174	214	214	186	151	150	148	142	130	131
180	176	218	215	188	156	156	154	148	137	136

Tabla 33: Perfil de temperatura externo, en °C, usando un flujo de 16,8 [m³/h] de aire y un flujo de aire 3,72 [m³/h] de gas

Distancia de la flama [cm]	20	60	85	120	175	230	290	325	405	465
Tiempo [min]	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
20	76	98	106	80	50	45	51	41	41	42
40	141	162	172	132	92	112	99	81	76	78
60	173	201	236	181	149	155	145	119	114	110
75	205	231	265	204	172	181	160	150	121	132
90	217	242	278	216	199	206	201	167	149	144
105	228	240	283	237	215	221	215	188	165	159
120	241	267	289	248	227	233	235	187	179	172
140	247	271	295	254	240	244	248	213	192	192
160	254	272	300	256	249	247	250	215	205	200
180	257	275	303	256	252	248	252	220	210	204
210	258	277	306	260	253	250	255	222	212	208

Tabla 34: Perfil de temperatura externo, en °C, usando un flujo de 16,8 [m³/h] de aire y un flujo de aire 5,29 [m³/h] de gas

Distancia de la flama [cm]	20	60	85	120	175	230	290	325	405	465
Tiempo [min]	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
15	56	85	132	84	51	57	51	48	40	41
25	109	194	244	177	107	121	104	87	82	73
35	159	273	322	248	167	178	153	136	111	103
45	253	334	381	310	224	246	200	178	143	136
55	279	391	419	331	259	270	246	214	188	165
70	315	410	451	386	315	328	285	249	219	200
85	353	445	488	414	330	336	323	286	256	228
100	354	464	501	437	355	365	341	323	276	251
115	360	474	507	451	371	400	368	334	290	277
135	392	480	520	455	393	400	392	362	316	288
155	387	489	523	464	404	406	401	365	320	299
180	423	497	536	470	396	408	402	370	307	303
210	423	505	542	476	405	430	407	375	315	308
240	425	505	545	477	406	433	410	377	318	315

Con estos datos, normalizo el perfil de temperatura en función de la temperatura externa más alta, dando la siguiente tabla:

Tabla 35: Detalles de la normalización al perfil de temperatura en tiempo estacionario, a aire constante (16,8 [m³/h])

Flujo de gas [m³/h]	20	60	85	120	175	230	290	325	405	465
0,5	0,732	0,989	1,000	0,882	0,688	0,680	0,654	0,577	0,518	0,507
1,82	0,809	1,000	0,994	0,865	0,710	0,709	0,697	0,671	0,619	0,618
3,72	0,842	0,913	1,000	0,857	0,822	0,825	0,837	0,719	0,667	0,659
5,29	0,785	0,929	1,000	0,878	0,743	0,777	0,750	0,691	0,577	0,553