GRUPO BLR

CEMENTO
Y OPERACIONES UNITARIAS

ISBN: 978-9907-852-08-0

Lenin Vicente Loayza Peñaranda
María Elena Yánez Romero
Andréi Nikolay Sánchez Rodríguez

2026

CEMENTO Y OPERACIONES UNITARIAS

Lenin Vicente Loayza Peñaranda

María Elena Yánez Romero

Andréi Nikolay Sánchez Rodríguez

AUTORES

UTMACH

Este libro ha sido debidamente examinado y valorado en la modalidad doble par ciego con fin de garantizar la calidad científica.

©Grupo Editorial BLR
Universidad Técnica de Machala
Riobamba – Ecuador
Correo: publicaciones@grupoblr.com
https://grupoblr.com/libros-investigo
REPOSITORIO



Loayza, L., Yánez., M., Sánchez, A. (2026) Cemento y operaciones unitarias. Grupo Editorial BLR.

© Lenin Vicente Loayza Peñaranda
María Elena Yánez Romero
Andréi Nikolay Sánchez Rodríguez

Cemento y operaciones unitarias.

ISBN: 978-9907-852-08-0

El copyright promueve la libertad de expresión, protege la diversidad de ideas y conocimiento, además apoya la libre expresión. Se prohíbe de manera rigurosa la producción o el almacenamiento de esta publicación, ya sea en su totalidad o en parte, está estrictamente prohibido por ley, incluyendo el diseño de la portada, así como su difusión a través de cualquiera de sus medios, ya sean electrónicos, mecánicos, ópticos, de grabación o incluso de fotocopia, sin permiso de los propietarios de los derechos de autor.

Filiación de autores

Lenin Vicente Loayza Peñaranda

Universidad Técnica de Machala

Correo Electrónico:lloayza@utmachala.edu.ec

ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2750-1748

María Elena Yánez Romero

Universidad Técnica de Machala

Correo Electrónico: myanez@utmachala.edu.ec

ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0276-4421

Andréi Nikolay Sánchez Rodríguez

Universidad Técnica de Machala

Correo Electrónico: ansanchez@utmachala.edu.ec

ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3945-5630

PREFACIO

El presente libro, desarrollado desde la perspectiva formativa y aplicada de la carrera de Ingeniería Química, constituye un material de apoyo complementario para la asignatura de Tecnología Inorgánica o Tecnología Química, así como para otras asignaturas afines que abordan el estudio de los procesos químicos industriales.

Los estudiantes de Ingeniería Química, Ingeniería Industrial y carreras afines, así como aquellos lectores interesados en comprender los fundamentos y aplicaciones de los procesos industriales, encontrarán en esta obra una guía didáctica y estructurada sobre el cemento, el proceso industrial de fabricación y sus principales generalidades.

El cemento es uno de los productos industriales de mayor producción, uso y demanda a nivel mundial, debido a su amplia aplicación en obras de infraestructura, edificaciones, carreteras y en los sectores de la ingeniería civil e industrial. A lo largo del tiempo, el desarrollo de diversas formulaciones y variedades industriales ha permitido alcanzar avances significativos en los procesos de fabricación, optimizando tanto su desempeño como su eficiencia productiva.

Este libro ofrece una base conceptual clara y estructurada para comprender el cemento y sus principales características, con especial atención al cemento Portland. A lo largo de su contenido se examinan también las materias primas utilizadas en su fabricación, analizando cada una de manera individual para identificar su composición química, sus propiedades y la función que desempeña dentro de las distintas etapas del proceso productivo.

Como complemento, el libro incorpora un capítulo dedicado al estudio de la química del cemento, en el que se explican las principales reacciones que intervienen durante su formación. Además, se abordan los fundamentos del proceso de clinkerización o sinterización, destacando los cambios químicos y térmicos que tienen lugar y su importancia en la obtención de las propiedades finales del cemento. Con el fin de fortalecer la formación integral del estudiante, se incorpora también un capítulo dedicado a las operaciones unitarias más relevantes aplicables a los procesos industriales del sector cementero.

Finalmente, el libro aborda un componente fundamental relacionado con la calidad en los procesos productivos, destacando la importancia de los mecanismos de control y aseguramiento de la calidad en las distintas etapas de producción, aspecto esencial en la formación de futuros profesionales del área.

Se espera que esta obra resulte de utilidad académica y formativa, apoyándose en los cuestionarios propuestos al final de cada capítulo, los cuales están diseñados como herramientas para la evaluación y consolidación de los conocimientos adquiridos.

ÍNDICE

PREFACIO ..... **i**

ÍNDICE ..... **iii**

ÍNDICE DE TABLAS ..... **xi**

ÍNDICE DE FIGURAS ..... **xii**

INTRODUCCIÓN ..... **xiii**

CAPÍTULO I **15**

1 BREVE HISTORIA DEL ORIGEN DEL CEMENTO **15**

1.1 Resumen 15

1.2 Preguntas de enfoque 15

1.3 Objetivos y/o resultados de aprendizaje 16

1.4 Competencias a desarrollar 17

1.5 Problemas a resolver 17

1.6 Introducción 18

1.7 El origen 18

1.8 La llegada del cemento Portland 25

1.9 Industrialización y diversificación 26

1.10 Actualidad 28

1.11 Elementos de cierre 30

CAPÍTULO II 32

2 PROCESO DE OBTENCIÓN DE MATERIAS PRIMAS... 32

2.1 Resumen 32

2.2 Esquema del capítulo 33

2.3 Preguntas de enfoque 33

2.4 Objetivos y/o resultados de aprendizaje 34

2.5 Competencias a desarrollar 35

2.6 Problemas a resolver 35

2.7 Introducción 36

2.8 Definición del cemento 36

2.9 Definición del hormigón 37

2.10 Descripción de materias primas 38

2.10.1 La piedra caliza 39

2.10.2 Arcillas y materiales arcillosos 41

2.10.3 Yeso 44

2.10.4 Puzolanas 48

2.11 Materiales cementantes suplementarios (SCM) 62

2.11.1 Clasificación general de los materiales cementarios suplementarios 63

2.11.2 Materiales funcionales o reguladores 64

2.11.3 Importancia de los SCM en la tecnología del cemento 66

2.11.4 Enfoque normativo de los SCM 66

2.11.5 Perspectiva ambiental y sostenibilidad 67

2.12 Elementos de cierre 68

CAPÍTULO III 70

3 QUÍMICA DEL CEMENTO: REACCIONES DE CLINKERIZACIÓN 70

3.1 Resumen 70

3.2 Esquema del capítulo 71

3.3 Preguntas de enfoque 72

3.4 Objetivos y/o resultados de aprendizaje 73

3.5 Competencias a desarrollar 73

3.6 Problemas a resolver 74

3.7 Introducción 74

3.7.1 El cemento Portland 75

3.8 Composición y naturaleza de los cementos blancos y cementos fraguados 77

3.8.1 Del fraguado del cemento 79

3.9 La clinkerización en la fabricación del cemento 80

3.9.1 Definición de clinkerización 81

3.10 Materias primas y preparación del crudo 82

3.11 Etapas del proceso de clinkerización 85

3.11.1 Secado y precalentamiento 85

3.11.2 Descarbonatación o calcinación 85

3.11.3 Formación de fases intermedias 86

3.12 Zona de clinkerización o sinterización 86

3.13 Reacciones de clinkerización 88

3.13.1 Formación de la belita (silicato dicálcico, C_2S) 90

3.13.2 Formación de la alita (silicato tricálcico, C_3S) 91

3.13.3 Formación del ferritoaluminato tetracálcico (C_4AF) 92

3.13.4 Formación del aluminato tricálcico (C_3A) 93

3.14 Resumen principal de las etapas 95

3.15 Elementos de cierre 98

CAPÍTULO IV 100

4 PROCESO DE PRODUCCIÓN Y FABRICACIÓN DEL CEMENTO 100

4.1 Resumen 100

4.2 Esquema general del capítulo 101

4.3 Preguntas de enfoque 102

4.4 Objetivos y/o resultados de aprendizaje 102

4.5 Competencias a desarrollar 103

4.6 Problemas a resolver 104

4.7 Introducción al proceso de fabricación del cemento 104

4.8 Preparación del crudo 108

4.8.1 Trituración 110

4.8.2 Dosificación 112

4.8.3 Molienda del crudo 112

4.8.4 Homogeneización del crudo 114

4.8.5 Control químico del crudo 115

4.9 Métodos de fabricación del cemento 116

4.9.1 Proceso por vía seca 117

4.9.2 Proceso por vía semiseca 120

4.9.3 Proceso por vía húmeda 122

4.9.4 Proceso por vía semihúmeda 124

4.10 Índices químicos del crudo (control de composición) y ejemplos de cálculo 126

4.10.1 Ejemplo 1 (directo): Cálculo de índices a partir del análisis del crudo 129

4.10.2 Ejemplo 2 (de diseño de mezcla): cálculo de composición del crudo por balance de mezcla 130

4.11 Índices químicos y realidad multióxido 132

4.12 Enfoque de la fabricación a través del clínker 134

4.12.1 Etapa de precalentamiento 135

4.12.2 Etapa de descarbonización (calcinación) 140

4.12.3 Etapa de sinterización (formación del clínker) 148

4.12.4 Etapa de enfriamiento del clínker 153

4.13 Molienda final del cemento 159

4.13.1 Adición de yeso y otros componentes 160

4.13.2 Otros componentes adicionados en la molienda final 162

4.13.3 Proceso de molienda como operación unitaria 165

4.13.4 Control de finura del cemento 169

4.13.5 Relación entre molienda, finura y consumo energético 174

4.13.6 Balance conceptual de energía en la molienda final del cemento 175

4.13.7 Enfoque energético basado en leyes de molienda 176

4.13.8 Relación entre finura y eficiencia energética 177

4.13.9 Balance energético conceptual del sistema de molienda..... 179

4.13.10 Implicaciones operativas del balance energético 180

4.14 Almacenamiento, ensacado y despacho del cemento 185

4.14.1 Almacenamiento del cemento 185

4.14.2 Ensacado del cemento 187

4.14.3 Despacho a granel 189

4.15 Control de calidad en los procesos de fabricación del cemento…. 190

4.15.1 Control de materias primas y crudo 191

4.15.2 Control del proceso de clinkerización 192

4.15.3 Control del cemento terminado 193

4.16 Consideraciones energéticas y ambientales del proceso cementero 197

4.16.1 Consumo energético del proceso cementero 197

4.17 Impacto ambiental y emisiones 199

4.17.1 Emisiones de dióxido de carbono (CO_2) 200

4.17.2 Emisiones propias del proceso químico 200

4.17.3 Emisiones por combustión 200

4.17.4 Material particulado y emisiones gaseosas 201

4.18 Estrategias de mitigación y sostenibilidad 202

4.18.1 Uso de combustibles alternativos 202

4.18.2 Reducción del factor clínker 202

4.18.3 Mejora de la eficiencia energética global 203

4.18.4 Tecnologías de control de emisiones 204

4.19 Elementos de cierre 205

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 210

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Composición química de los cementos. 55

La tabla 4 presenta un resumen de los rangos aceptables de materias primas y las normativas aplicables para su control.Tabla 2. Principales materias primas y lugares en Ecuador. 55

Tabla 3. Principales canteras / minas en Ecuador. 60

Tabla 4. Resumen de los componentes químicos típicos de las materias primas y rangos de pureza aceptables. 61

Tabla 5. Descripción de minerales presentes en el clínker. 87

Tabla 6. Rangos térmicos y formación de fases del clínker. 94

Tabla 7. Comparación simplificada entre horno largo tradicional y sistema con precalcinador. 146

Tabla 8. Balance energético comparativo entre la zona de calcinación y la zona de sinterización. 151

Tabla 9. Comparativa de equipos de molienda y rangos típicos de finura. 182

Tabla 10. Relación entre etapa del proceso, variables de control, ensayos y normas aplicables. 195

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Construcciones monumentales de la antigua grecia en la acrópolis de atenas. 20

Figura 2. Panteón de Roma. 21

Figura 3. Puente de Brooklyn. 24

Figura 4. Cristales de aragonito. 40

Figura 5. Nódulos de clínker obtenidos a partir del proceso de clinkerización. 82

Figura 6. Proceso de fabricación del cemento. 107

Figura 7. Sistema de precalentamiento en la producción de clínker. 138

Figura 8. Esquema del horno rotatorio utilizado en la fabricación de clínker, mostrando las principales zonas de reacción térmica: precalentamiento, calcinación, zona de transición, sinterización y enfriamiento del clínker. 158

Figura 9. Diagrama integral del sistema térmico de clinkerización. 159

Figura 10. Relación conceptual entre finura del cemento (Blaine) y consumo energético en molienda. 178

INTRODUCCIÓN

El presente libro desarrolla contenidos desde el estudio de los orígenes del cemento, definiciones principales hasta el impacto ambiental de las operaciones industriales en la fabricación de este material.

Cada capítulo presenta un resumen introductorio, un esquema de los contenidos, los objetivos de aprendizaje y preguntas iniciales para que la persona interesada en la revisión del presente documento se haga previo a la lectura del mismo.

El Capítulo 1 presenta una revisión histórica sobre la evolución del cemento hasta los materiales desarrollados actualmente en la industria y la construcción.

El Capítulo 2 presenta la definición detallada de cada materia prima empleada en la fabricación del cemento, al ser Ecuador un país con algunas plantas cementeras, se presenta información sobre las materias primas por región y fábricas que las emplean.

El capítulo 3, parte esencial del libro y para la ingeniería química, presenta lo relacionado con la etapa de sinterización o como se denomina en la industria cementera, la clinkerización, poniendo énfasis en las principales reacciones químicas desarrolladas durante esta etapa. Parte fundamental de la comprensión para cualquier estudiante de ingeniería química o de materiales, es conocer e identificar de qué manera ocurren las reacciones de acuerdo a las materias primas utilizadas.

El capítulo 4, presenta la estructura de las operaciones unitarias desarrolladas en la industria cementera y es importante para los estudiantes porque permite esa relación directa entre lo aprendido y la aplicación industrial. Este capítulo, que es el más amplio del libro, también nos trae ejercicios sobre balance de materia y energía, cálculos básicos sobre los índices de fabricación y además los controles de calidad aplicados en la industria en todas sus etapas, terminando con un repaso sobre el impacto y sostenibilidad que tiene esta industria a nivel mundial.

Esperamos que sea del agrado del lector y contribuya como una fuente de consulta bibliográfica y guía en los estudios de química de materiales, tecnologías químicas aplicadas, operaciones unitarias, entre otras.

Objetivo general

Proporcionar una base teórica y aplicada sobre el cemento y sus generalidades, orientada a la comprensión integral de sus fundamentos químicos, materias primas, procesos de fabricación, reacciones involucradas, operaciones unitarias y criterios de control de calidad, con el fin de apoyar la formación académica de estudiantes de Ingeniería Química, Ingeniería Industrial y carreras afines, fortaleciendo su capacidad para analizar y comprender los procesos industriales asociados a la industria cementera.

CAPÍTULO I

1 BREVE HISTORIA DEL ORIGEN DEL CEMENTO

1.1 Resumen

El estudio del cemento resulta esencial para comprender la evolución de los materiales de construcción y de numerosos procesos vinculados con la ingeniería moderna. Su desarrollo ha recorrido un largo camino, desde las primeras mezclas empleadas de forma empírica por las civilizaciones antiguas hasta convertirse en uno de los materiales más importantes de la construcción contemporánea. Esta transformación ha estado estrechamente ligada al avance del conocimiento científico, la innovación tecnológica y el perfeccionamiento de los procesos industriales.

En este capítulo se presenta una breve revisión sobre la historia del cemento, destacando los principales hitos que marcaron su evolución, así como las definiciones técnicas que permiten establecer una base conceptual sólida. Se analizan los conceptos fundamentales necesarios para comprender su naturaleza, clasificación y función dentro de los procesos industriales, documentando así las bases para el estudio más profundo en relación a su química, producción y aplicaciones en capítulos posteriores.

1.2 Preguntas de enfoque

Lee, revisa, investiga y responde las siguientes preguntas:

- ¿Cómo se originó el uso del cemento y cuáles fueron sus primeras aplicaciones a lo largo de la historia?
- ¿Qué diferencias principales pueden identificarse entre los cementos utilizados en la antigüedad y los cementos empleados actualmente?
- ¿Cómo puede definirse el cemento desde una perspectiva técnica y dentro del contexto industrial?
- ¿Cuáles son los principales tipos de cemento y qué criterios se utilizan para establecer su clasificación?
- ¿Qué factores hacen del cemento un material esencial y estratégico para el desarrollo de la ingeniería civil y de los procesos industriales?

1.3 Objetivos y/o resultados de aprendizaje

Al finalizar el estudio de este capítulo, el estudiante será capaz de:

- Comprender la evolución histórica del cemento y analizar su influencia en el desarrollo de la ingeniería.
- Reconocer y utilizar adecuadamente los principales conceptos y definiciones técnicas relacionados con el cemento y sus diferentes tipos.
- Valorar la importancia del cemento como material fundamental dentro de los procesos industriales y productivos.
- Construir una base conceptual sólida que permita abordar con mayor claridad y comprensión los contenidos desarrollados en los capítulos posteriores del libro.

1.4 Competencias a desarrollar

- Desarrolla la capacidad de analizar información histórica y técnica vinculada con los materiales de uso industrial.
- Comprende los principios fundamentales del cemento y emplear de manera adecuada su terminología técnica.
- Relaciona la evolución histórica del cemento con sus aplicaciones actuales en el ámbito industrial.
- Fortalece el pensamiento crítico para interpretar y analizar materiales, procesos y transformaciones propias de la ingeniería química.

1.5 Problemas a resolver

- Analizar la evolución histórica del cemento e identificar los factores tecnológicos que impulsaron su desarrollo.
- Comparar las definiciones técnicas del cemento desde distintas fuentes académicas y normativas.
- Evaluar la importancia del cemento en el contexto de los procesos industriales modernos.

1.6 Introducción

Este capítulo contextualiza el origen y la evolución del cemento como antecedente para comprender su desarrollo técnico e industrial. El recorrido parte de los primeros materiales cementantes, continúa con la aparición del cemento Portland y culmina con su industrialización y diversificación. Su propósito es relacionar los principales hitos históricos con los cambios que hicieron posible la fabricación moderna, de modo que el lector reconozca el alcance del capítulo y su articulación con los contenidos posteriores del libro.

En esta sección revisaremos información sobre el origen del cemento y su evolución a través del tiempo.

1.7 El origen

La antigua Grecia: Los datos históricos dan cuenta que el primer cemento data de esta región, se han encontrado varios vestigios de este material realizado a partir de residuos volcánicos en la isla de Santorini. Fue concebido desde sus inicios como material de uso previsto para la construcción.

El desarrollo de materiales conglomerantes representó un avance significativo dentro de la evolución histórica de la tecnología constructiva, aunque no alcanzó el grado de sofisticación hidráulica que posteriormente caracterizaría al cemento romano. Los constructores griegos emplearon principalmente cal obtenida por calcinación de piedra caliza ($CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2$) en hornos rudimentarios, seguida de su apagado

con agua para producir hidróxido de calcio ($Ca(OH)_2$), el cual actuaba como aglomerante al mezclarse con arenas y áridos locales.

Este material, conocido como mortero de cal aérea, adquiría resistencia mediante un proceso de carbonatación, en el cual la cal reaccionaba con el dióxido de carbono presente en el ambiente hasta formar nuevamente carbonato de calcio. Esta transformación permitía el endurecimiento progresivo del mortero y contribuía a la estabilidad de las estructuras construidas.

Aunque la arquitectura griega se distingue principalmente por el notable uso de la piedra labrada en templos y edificaciones monumentales, los morteros de cal también tuvieron una función importante. Se emplearon para unir elementos de mampostería, elaborar revestimientos y mejorar la estabilidad de muros y otras construcciones.

En determinadas obras, especialmente aquellas expuestas al agua, como instalaciones portuarias e infraestructuras hidráulicas, los griegos recurrieron además a materiales naturales con propiedades puzolánicas. Entre ellos se encontraban algunas cenizas volcánicas procedentes de islas del mar Egeo, cuya incorporación favorecía la resistencia del mortero y mejoraba su comportamiento frente a ambientes húmedos.

Estas prácticas reflejan un conocimiento empírico considerable sobre el comportamiento de los materiales de construcción. Aunque todavía no existía una explicación científica de las reacciones involucradas, la experiencia permitió identificar combinaciones capaces de mejorar las propiedades de los morteros. Este conocimiento sería posteriormente

desarrollado por los romanos, quienes incorporaron de manera más sistemática materiales puzolánicos para producir morteros con propiedades hidráulicas.

Desde el punto de vista tecnológico, uno de los principales aportes de la civilización griega fue consolidar el uso de la cal como material aglomerante y transmitir técnicas constructivas que posteriormente contribuirían al desarrollo de los cementantes hidráulicos (figura 1). Así, aunque el concepto de "cemento" en sentido moderno aún no existía, los aportes griegos representan un eslabón esencial en la transición desde los conglomerantes naturales hacia sistemas más complejos de ingeniería de materiales, demostrando cómo la observación empírica, la disponibilidad geológica regional y la necesidad estructural confluyeron en la evolución de los materiales de construcción en la cuenca mediterránea (Dodds, 1990; Jackson, 2014; Lea, 1970).



Figura 1. Construcciones monumentales de la antigua grecia en la acrópolis de atenas.

Fuente: UNESCO World Heritage Centre (s.f.).

La antigua Roma: En esta zona histórica, los romanos mejoraron la mezcla de cemento utilizando ciertas cenizas de origen volcánico en una

región cercana al volcán Vesubio. La durabilidad fue la característica fundamental atribuida a esta creación, considerada como una de las mejores mezclas de cemento, un claro ejemplo en su aplicación es la bóveda del Panteón (figura 2), que ha resistido el paso del tiempo y se mantiene hasta hoy.



Figura 2. Panteón de Roma.

Fuente: UNESCO World Heritage Centre. (n.d.). Pantheon, Rome (Italy) [Photograph]. UNESCO. https://whc.unesco.org

En la Antigua Roma, el desarrollo de materiales conglomerantes alcanzó un nivel técnico sin precedentes en el mundo antiguo, constituyendo el antecedente más directo del cemento hidráulico moderno. A diferencia de los griegos, los romanos perfeccionaron el uso de la cal combinándola sistemáticamente con materiales de naturaleza volcánica, especialmente la puzzolana, ceniza procedente de la región de Pozzuoli, cerca de Nápoles. Esta mezcla generaba un mortero capaz de fraguar y endurecer incluso en presencia de agua, debido a reacciones puzolánicas entre el hidróxido de calcio y los silicatos y aluminatos reactivos de origen

volcánico, formando compuestos cementantes de tipo silicato cálcico hidratado (C-S-H).

El tratado De Architectura de Vitruvio constituye una de las fuentes más importantes para comprender la tecnología constructiva romana. En él se describe detalladamente la preparación de la cal, la selección de arenas y la incorporación de cenizas volcánicas para obtener morteros resistentes al agua. Los romanos distinguían entre morteros aéreos y morteros hidráulicos, aplicando estos últimos en obras sometidas a humedad constante, como muelles y cimentaciones submarinas. Estudios contemporáneos han demostrado que la durabilidad excepcional del concreto romano se debe, en parte, a la formación de minerales como la tobermorita aluminosa, resultado de reacciones a largo plazo entre la cal y la puzolana en ambientes marinos (Jackson et al., 2014).

Desde una perspectiva tecnológica, el concreto romano, denominado *opus caementicium*, se elaboraba mediante la combinación de un mortero con propiedades hidráulicas y agregados de origen pétreo, entre ellos fragmentos de piedra y ladrillo triturado. Esta formulación permitió obtener un material de elevada versatilidad constructiva, adecuado para la ejecución de elementos monolíticos y estructuras de gran escala. Su empleo favoreció el desarrollo de soluciones arquitectónicas innovadoras, como bóvedas, cúpulas y muros masivos moldeados in situ. El conocimiento asociado a su fabricación, fundamentado en la observación de los materiales disponibles y en la experimentación constructiva, constituyó un avance significativo en la evolución de los materiales cementantes y de las tecnologías de construcción. Aunque la formulación

química del cemento Portland no surgiría hasta el siglo XIX, los principios fundamentales del comportamiento hidráulico y la reacción puzolánica encuentran su origen en la ingeniería romana, cuyo legado técnico continúa inspirando investigaciones actuales sobre cementos de baja huella de carbono y materiales más durables (Lea, 1970; Jackson et al., 2014).

La palabra cemento tiene su origen en el latín "*caementum"* cuyo significado se traduce a "piedra quebrada". Los romanos emplearon el término para describirla como cementación, a la mezcla creada de piedras, cal y ceniza volcánica.

Edad media: Una vez que el imperio romano perdió a uno de sus últimos ingenieros, y luego de la caída del último emperador, se perdió toda información histórica sobre el cemento. Durante ese tiempo las regiones utilizaban morteros con base de cal y otras arcillas y materiales de menor resistencia (Lea, 1970).

Siglo XVIII, los primeros avances modernos: En el año de 1758, John Smeat descubrió que mezclando una puzolana y cierto tipo de caliza con alto contenido de arcilla se conseguía un tipo de aglomerante con resistencia al agua salina y a elevadas presiones mecánicas. Este avance marcó otro hito histórico para el uso en obras importantes debido a su elevada resistencia.

Años después, James Parker, creó un nuevo tipo de cemento calcinando calizas arcillosas, denominado cemento romano, considerándolo similar al fabricado en la antigüedad, su uso se expandió entre Estados Unidos

y Europa para la fabricación de obras que se mantienen hasta la actualidad como la Galería Vittorio Emmanuelle en Milán y el Puente de Brooklyn en Nueva York como se muestra en la figura 3. (Blezard, 1998).



Figura 3. Puente de Brooklyn.

Fuente: Elaboración propia.

El legado de Vicat: En 1812, el ingeniero de caminos Louis Vicat recibe como encargo de Napoleón, la construcción de un puente sobre un río violento de aguas caudalosas, de fondo arenoso en el que resultaba difícil asentar una obra.

Una vez asumió el desafío, inició una serie de investigaciones y revisión de datos que le permitieron en lo posterior dar con un aglomerante hidráulico resistente, con fraguado controlable. Utilizando la mezcla de calizas con arcillas, calcinándolos y moliéndolos, usó este material sumergiéndolo en agua, observando que, en un plazo breve, la mezcla logró el endurecimiento al entrar en contacto con el agua. Dicho descubrimiento fue fundamental para la humanidad, un aglomerante hidráulico

que permitía controlar los tiempos de fraguado y de fácil y viable fabricación. Su trabajo fue reconocido por la Academia de París, bajo la supervisión de algunos eruditos como Gay-Lussac. El puente se fabricó sobre el río apoyado sobre zapatas de hormigón fabricado con el cemento desarrollado. (Blezard, 1998).

1.8 La llegada del cemento Portland

En el siglo XIX se da paso a la creación del cemento moderno. Los ingleses Joseph Aspdin y James Parker presentan la patente de este cemento cuyo origen se remonta a la materia prima similar a la piedra Portland, también obtenido a partir de la calcinación entre la mezcla de arcilla y caliza. (Blezard, 1998).

Aspdin patentó en 1824 el denominado "cemento Portland", nombre inspirado en la semejanza del producto endurecido con la piedra de la isla de Portland.

En 1845, Isaac Johnson revolucionó el proceso de producción del cemento al perfeccionar su fabricación mediante la calcinación de una mezcla de caliza y arcilla, llevándola a altas temperaturas hasta obtener el denominado clínker, un material que, al ser pulverizado, adquiría propiedades altamente cementantes. Johnson descubrió que para alcanzar este resultado era necesario llevar la temperatura de calcinación al límite permitido por la tecnología disponible en aquel entonces. Su innovación marcó un hito en la historia del cemento, promoviendo la expansión de su fabricación no solo en Inglaterra, sino también en el resto de Europa (Lea, 1970; Taylor, 1997).

Hacia finales del siglo XIX, se produjeron importantes avances que transformaron la producción del cemento Portland. Estos avances impulsaron la expansión del uso del cemento y favorecieron el establecimiento de métodos estandarizados para evaluar su calidad. A comienzos del siglo XX, el perfeccionamiento de los hornos rotatorios, junto con la incorporación del molino tubular, permitió aumentar la capacidad de producción y consolidar su fabricación a escala industrial. Paralelamente, los aportes de Vicat, Le Chatelier y Michaelis contribuyeron a comprender mejor sus propiedades y a obtener cementos más homogéneos, fundamentales para el crecimiento de la industria de la construcción. Así, el siglo XX comenzó a consolidarse como la era del auge del cemento Portland (Taylor, 1997).

1.9 Industrialización y diversificación

La industrialización del cemento constituye uno de los hitos más relevantes en la historia de los materiales de construcción, al transformar un producto artesanal y de producción limitada en un insumo industrial estratégico para el desarrollo económico, urbano e infraestructural a escala global. A partir de finales del siglo XIX y, de manera más marcada, durante el siglo XX, la fabricación del cemento Portland evolucionó desde procesos discontinuos y de baja eficiencia hacia sistemas industriales altamente controlados, caracterizados por la producción continua, la mecanización y la estandarización de la calidad (Lea, 1970; Taylor, 1997).

La incorporación y posterior perfeccionamiento del horno rotatorio, junto con el desarrollo de sistemas de molienda más eficientes y el em-

pleo de combustibles fósiles con mayor poder calorífico, permitió alcanzar temperaturas de clinkerización más elevadas y obtener un clínker con una composición mineralógica más uniforme. Estos avances tecnológicos facilitaron la producción de cemento a gran escala, contribuyeron a reducir los costos de fabricación y aumentaron su disponibilidad, consolidando al cemento Portland como el principal aglomerante hidráulico utilizado durante el siglo XX (Blezard, 1998). De manera paralela, la implementación de normas técnicas y métodos de ensayo estandarizados fortaleció los procesos de control de calidad y aumentó la confiabilidad del material para aplicaciones estructurales. Este desarrollo favoreció su utilización masiva en edificaciones, carreteras, presas y grandes obras de infraestructura.

Con el avance de la industrialización, el cemento comenzó a diversificarse para responder a nuevas exigencias técnicas, económicas y ambientales, dando lugar al desarrollo de formulaciones con propiedades específicas adaptadas a distintas condiciones de uso y necesidades constructivas. La investigación científica permitió comprender con mayor profundidad la química del clinker y el papel de sus principales fases minerales, lo que facilitó el diseño de cementos con propiedades ajustadas a diferentes condiciones de uso, tales como resistencias iniciales elevadas, bajo calor de hidratación o mayor durabilidad frente a ambientes agresivos (Taylor, 1997). En este contexto surgieron cementos especiales y cementos adicionados, en los cuales una fracción del clinker es sustituida por materiales suplementarios como escorias granuladas de alto horno, puzolanas naturales, cenizas volantes o fillers calizos.

Esta diversificación no solo respondió a criterios técnicos, sino también a la necesidad de optimizar el consumo energético y reducir el impacto ambiental asociado a la producción de clinker, proceso altamente intensivo en energía y emisiones de dióxido de carbono. Así, durante la segunda mitad del siglo XX y comienzos del XXI, la industria cementera incorporó progresivamente el concepto de sostenibilidad, promoviendo el uso de adiciones minerales, combustibles alternativos y tecnologías más eficientes desde el punto de vista térmico y ambiental (Hewlett & Liska, 2019). Estos cambios reflejan la evolución de una industria inicialmente enfocada en la producción a gran escala hacia un sector con mayor divesificación, en el que la innovación tecnológica y la respuesta a los actuales desafíos ambientales han adquirido una importancia creciente.

En conjunto, la industrialización y la diversificación del cemento evidencian la una estrecha relación entre el avance científico, el desarrollo de la ingeniería y las necesidades de la sociedad. Esta evolución ha consolidado al cemento como un material fundamental para la infraestructura moderna y, al mismo tiempo, como un área de interés permanente para la investigación, la innovación y el perfeccionamiento de sus procesos de producción.

1.10 Actualidad

En síntesis, la evolución histórica del cemento no solo refleja el desarrollo de un material de construcción, sino también el avance del conocimiento científico aplicado a la ingeniería. Desde las primeras mezclas de cal empleadas en la Antigüedad hasta la consolidación del cemento

Portland como producto industrial estandarizado, se evidencia un proceso continuo de innovación, adaptación tecnológica y respuesta a las necesidades estructurales de cada época. La industrialización permitió transformar un material artesanal en un insumo estratégico para el desarrollo urbano, la infraestructura vial, hidráulica y energética, así como para la expansión de las ciudades contemporáneas. Asimismo, la diversificación del cemento, orientada hacia la mejora del desempeño y la sostenibilidad, demuestra que su evolución permanece activa y en constante perfeccionamiento.

Este recorrido histórico permite comprender que el cemento no es simplemente un producto final, sino el resultado de una cadena compleja de decisiones técnicas, científicas y económicas que comienzan mucho antes de la etapa de fabricación del clinker. La calidad, desempeño y durabilidad del cemento dependen, en gran medida, de la selección adecuada de sus materias primas y del control riguroso de sus características químicas y mineralógicas. Por ello, para entender de manera integral la fabricación del cemento moderno, resulta imprescindible analizar el origen y tratamiento de los materiales que constituyen su base fundamental.

En este contexto, el siguiente capítulo abordará el proceso de obtención de materias primas, examinando los criterios geológicos, químicos y tecnológicos que intervienen en la selección de calizas, arcillas y correctores, así como las etapas de extracción, trituración, homogeneización y preparación del crudo. Este análisis permitirá establecer el vínculo entre la historia del material y su realidad industrial actual, sentando las bases para comprender, con mayor profundidad, el proceso de clinkerización

y la formación de las fases minerales responsables de las propiedades hidráulicas del cemento.

1.11 Elementos de cierre

A continuación, se presenta el siguiente cuestionario para que evalúes, investigues y desarrolles un criterio sobre el capítulo estudiado:

1. ¿Qué civilizaciones comenzaron a utilizar materiales cementantes y cuáles fueron sus principales aplicaciones en la construcción?

2. ¿Qué importancia tuvo la cal en los primeros sistemas constructivos y cómo contribuyó posteriormente al desarrollo del cemento?

3. ¿Cuáles fueron los principales aportes de los romanos al desarrollo de los materiales cementantes y por qué se consideran relevantes en la historia del cemento?

4. ¿Cómo se entendía el concepto de cemento en sus primeras etapas y en qué se diferencia de la definición técnica utilizada actualmente?

5. ¿Qué avances científicos y tecnológicos hicieron posible la evolución de los antiguos materiales cementantes hacia los cementos industriales modernos?

6. ¿De qué manera la Revolución Industrial transformó la fabricación del cemento y favoreció la estandarización de sus procesos de producción?

7. ¿Qué características hicieron del cemento Portland un referente en la evolución de la industria cementera?

8. ¿Cómo ha contribuido la evolución del cemento al desarrollo de la ingeniería civil y de las actividades industriales modernas?

9. Investigue cómo la disponibilidad de materias primas influyó en la evolución histórica del cemento en distintas regiones del mundo.

10. Reflexione sobre la importancia del conocimiento histórico del cemento para la formación de un ingeniero químico en el contexto industrial actual.

CAPÍTULO II

2 PROCESO DE OBTENCIÓN DE MATERIAS PRIMAS

2.1 Resumen

El proceso de fabricación del cemento se sustenta en la adecuada selección, obtención y preparación de las materias primas, las cuales determinan de manera directa las propiedades finales del producto. Desde la perspectiva de la Ingeniería Química, el conocimiento de estas materias primas y de los procesos asociados a su extracción y acondicionamiento resulta esencial para comprender la eficiencia, calidad y sostenibilidad del proceso cementero.

En este capítulo se aborda de manera integral el origen, las características y la obtención de las principales materias primas empleadas en la fabricación del cemento. También se establece una diferenciación clara entre los conceptos de cemento, cemento Portland y hormigón, con el fin de facilitar su correcta interpretación y evitar confusiones habituales y comunes. A lo largo del capítulo se analizan individualmente las materias primas más relevantes, considerando sus propiedades físicas y químicas, la función que cumplen durante el proceso de fabricación y su influencia sobre la calidad y el desempeño del producto final. Asimismo, se estudian los materiales cementantes suplementarios y su aporte al mejoramiento de las propiedades mecánicas y de durabilidad. Su incorporación adquiere especial importancia por su potencial para disminuir el impacto ambiental asociado a la producción de cemento y contribuir al desarrollo de procesos más eficientes y sostenibles dentro de la industria cementera.

2.2 Esquema del capítulo

- Proceso de obtención y preparación de las materias primas empleadas en la fabricación del cemento.
- Diferencias conceptuales entre cemento, cemento Portland y hormigón.
- Principales materias primas utilizadas en la producción de cemento.
- Características y composición de la caliza.
- Características y composición de la arcilla.
- Uso de correctores y aditivos minerales en la formulación de la mezcla cruda.
- Propiedades físicas y químicas de las materias primas.
- Función de cada materia prima dentro del proceso de fabricación del cemento.
- Materiales cementantes suplementarios (SCM) y sus principales características.
- Importancia de los SCM en el desempeño, la sostenibilidad y la evolución de la industria cementera moderna.

2.3 Preguntas de enfoque

- ¿Por qué es un factor crítico en la fabricación del cemento la selección de las materias primas?
- ¿Cuáles son las diferencias fundamentales entre cemento, cemento Portland y hormigón?

- ¿Qué propiedades químicas de la caliza y la arcilla influyen en el proceso de fabricación del cemento?
- ¿Qué función cumplen los materiales correctores dentro de la formulación del crudo?
- ¿Por qué los materiales cementeros suplementarios son relevantes en la industria cementera actual?

2.4 Objetivos y/o resultados de aprendizaje

Al finalizar este capítulo, el estudiante será capaz de:

- Describir el proceso de obtención de las materias primas empleadas en la fabricación del cemento.
- Diferenciar, desde una perspectiva técnica, los conceptos de cemento, cemento Portland y hormigón.
- Identificar las principales materias primas empleadas en la fabricación del cemento y reconocer sus propiedades más relevantes.
- Analizar la función que cumple cada materia prima dentro de las distintas etapas del proceso de producción del cemento.
- Valorar la importancia de los materiales cementantes suplementarios por su aporte al desempeño técnico del cemento y a la reducción del impacto ambiental asociado a su producción.

2.5 Competencias a desarrollar

- Desarrolla la capacidad de analizar las materias primas considerando sus características físico-químicas y su aplicación en el ámbito industrial.
- Comprende los procesos que se relacionan con la obtención, selección y preparación de materiales utilizados en la producción industrial.
- Relaciona las propiedades de las materias primas con su influencia en la calidad y el desempeño del cemento.
- Fortalece el pensamiento crítico para evaluar alternativas orientadas a mejorar la eficiencia, optimización y sostenibilidad de los procesos industriales.

2.6 Problemas a resolver

- Analizar el proceso de obtención de una materia prima específica y relacionar sus características con la calidad final del cemento.
- Comparar, desde una perspectiva técnica, las principales diferencias entre cemento, cemento Portland y hormigón.
- Identificar las propiedades clave de una materia prima y explicar su función en el proceso cementero.
- Evaluar el uso de materiales cementeros suplementarios como alternativa para mejorar la sostenibilidad del proceso productivo.

2.7 Introducción

La fabricación y producción del cemento es un proceso técnico que comienza con la obtención de materias primas tales, como piedra caliza, arcilla, yeso y mineral de hierro. Estos materiales son extraídos de canteras o minas mediante métodos controlados que garantizan su disponibilidad y calidad.

La riqueza de minerales como silicio, feldespato, hierro, contribuyen a que las propiedades del cemento sean las adecuadas para un mejor fraguado y resistencia durante su uso.

En el ámbito de la industrialización del cemento estas materias primas deben cumplir con algunos parámetros de calidad y características fundamentales para su utilización.

En este capítulo se presenta una descripción de las principales materias primas utilizadas, los yacimientos ubicados en Ecuador y en Latinoamérica, así como un análisis sobre la sostenibilidad en cuanto al consumo de las materias primas.

2.8 Definición del cemento

El cemento es un material hidráulico, de origen inorgánico y finamente molido que, al mezclarse con agua, forma una pasta que fragua y desarrolla resistencia como consecuencia de las reacciones de hidratación. Una vez endurecido, conserva su estabilidad y capacidad resistente incluso en presencia de agua. Esta propiedad se atribuye a la formación de hidratos de silicatos de calcio (C-S-H), productos resultantes de la reacción química entre el agua y los principales compuestos del clinker

(Taylor, 1997; Hewlett & Liska, 2019). Debido a esta característica, el cemento se clasifica como un conglomerante hidráulico, es decir, un material capaz de endurecer y mantener su resistencia en ambientes húmedos o sumergidos (Lea, 1970).

2.9 Definición del hormigón

Según Neville (2011), el hormigón es uno de los materiales de mayor uso en la construcción, sean en las grandes obras de infraestructura, tales como represas, puentes, carreteras, plantas de tratamiento de agua y pozos petrolíferos, así como en la arquitectura de edificaciones. Junto con el acero, constituye uno de los materiales fundamentales de la Ingeniería Civil, debido a su versatilidad, disponibilidad y adecuado desempeño estructural.

Desde el punto de vista conceptual, el hormigón puede definirse como una "piedra artificial", obtenida a partir de la mezcla de cemento, agregados pétreos (arena y grava) y agua. La combinación de estos componentes da lugar a un material compuesto cuyas propiedades finales dependen de la proporción, calidad y correcta interacción entre sus constituyentes (Mindess, Young, & Darwin, 2003).

De manera general, el hormigón está constituido por dos componentes principales. Por un lado, se encuentran los agregados pétreos o áridos, como la grava, el canto rodado o el pedregullo, que conforman la estructura sólida del material y contribuyen a su resistencia mecánica y estabilidad dimensional. Por otra parte, la pasta de cemento, formada por cemento y agua, actúa como el componente aglomerante que recubre y

une los agregados. Durante el proceso de hidratación, esta pasta desarrolla progresivamente la resistencia necesaria para consolidar el conjunto y conferir al hormigón sus propiedades mecánicas características (Neville, 2011).

Estos materiales se mezclan de manera homogénea en proporciones adecuadas, dando origen a una masa plástica y trabajable, capaz de ser moldeada en estado fresco para adoptar prácticamente cualquier forma. Posteriormente, mediante el endurecimiento y el fraguado, el hormigón adquiere las propiedades mecánicas necesarias para su función estructural Mindess et al., 2003).

2.10 Descripción de materias primas

Entre las principales materias primas empleadas para la fabricación del cemento se encuentran la caliza, la arcilla o materiales arcillosos, el yeso y las puzolanas. La caliza constituye el componente predominante del crudo, debido a su alto contenido de carbonato de calcio ($CaCO_3$), esencial para la formación de los silicatos y aluminatos cálcicos durante la clinkerización (Taylor, 1997; Hewlett & Liska, 2019). Generalmente, la caliza se extrae de canteras mediante explosiones controladas, luego es triturada y transportada hacia la planta para su pre homogeneización y posterior dosificación en la mezcla cruda (Alsop, Chen, & Tseng, 2007).

Los otros componentes, tales como arcillas, bauxitas y minerales de hierro, cumplen la función de aportar sílice (SiO_2), alúmina (Al_2O_3) y óxidos de hierro (Fe_2O_3), necesarios para ajustar la composición química del crudo conforme a los módulos de control del proceso y a las especi-

ficaciones del producto final. Su proporción es significativamente menor en comparación con la caliza, pero resulta fundamental para garantizar la adecuada formación de las fases minerales del clinker (Taylor, 1997).

2.10.1 La piedra caliza

Definición

La caliza es una roca sedimentaria compuesta principalmente por carbonato de calcio ($CaCO_3$), formada por la acumulación y compactación de restos de organismos marinos (conchas, corales y algas) y precipitación química de carbonatos. Se encuentra en estratos y depósitos extensos, siendo la principal fuente de calcio para la industria cementera (Boggs, 2014).

Formulación química

- **Fórmula general:** $CaCO_3$ (carbonato de calcio).
- En cuanto a su composición, puede contener impurezas como óxidos de magnesio (MgO), sílice (SiO_2), alúmina (Al_2O_3) y óxidos de hierro (Fe_2O_3) en pequeñas proporciones.

Estructura química

El $CaCO_3$ puede presentarse en diferentes formas cristalinas:

- **Calcita:** la forma más común, con estructura trigonal.
- **Aragonita:** menos estable a temperatura ambiente, con estructura ortorrómbica.

  En el proceso cementero, la caliza se descompone térmicamente

en óxido de calcio (CaO) y dióxido de carbono (CO_2) durante la calcinación en el horno.



Figura 4. Cristales de aragonito.

Fuente: Mindat.org.

Importancia en la fabricación de cemento

- Es la fuente principal de calcio (CaO), componente esencial para formar el proceso de clinkerización
- Durante la calcinación, el óxido de calcio (CaO) reacciona con ciertos compuestos como sílice, alúmina y óxidos de hierro para formar los minerales que dan resistencia al cemento (silicatos y aluminatos de calcio).
- Determina en gran medida la calidad del clínker, ya que un contenido adecuado de óxido de calcio (CaO) favorece la resistencia mecánica y la durabilidad del cemento.

- Debido a su disponibilidad abundante, fácil accesibilidad y bajo costo, la convierten en un recurso estratégico para la industria cementera.

Propiedades

- **Color:** puede variar entre blanco, gris y beige, dependiendo principalmente del tipo y la cantidad de impurezas presentes en la caliza.
- **Dureza:** presenta una dureza aproximada de 3 en la escala de Mohs, por lo que se considera un material relativamente blando.
- **Densidad:** generalmente se encuentra en un intervalo de 2,6 a 2,8 g/cm^3.
- **Solubilidad:** posee una solubilidad muy baja en agua, aunque reacciona y en presencia de soluciones ácidos puede disolverse
- **Comportamiento térmico:** al someterse a temperaturas elevadas, generalmente superiores a 900 °C, el carbonato de calcio se descompone y libera dióxido de carbono (CO_2). Esta transformación, conocida como calcinación, constituye una etapa fundamental en la fabricación del cemento.

2.10.2 Arcillas y materiales arcillosos

Definición

La arcilla es un material natural de origen sedimentario o residual, compuesto principalmente por minerales finamente divididos del grupo de los silicatos de aluminio hidratados. Presenta plasticidad cuando se humedece y endurece al secarse o cocerse (Grim, 1968; Murray, 2007). En

la industria cementera, la arcilla es la principal fuente de sílice (SiO_2), alúmina (Al_2O_3) y en menor medida óxidos de hierro (Fe_2O_3), indispensables para la formación de los compuestos minerales del clínker (Taylor, 1997; Hewlett & Liska, 2019)..

Formulación química general

- Descripción de la fórmula general aproximada de los minerales arcillosos más comunes: $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$
- Además de sílice y alúmina, la arcilla puede contener óxidos de hierro, potasio, sodio, magnesio y calcio, cuyas proporciones varían de acuerdo con su composición mineralógica y su origen geológico.

Principales arcillas empleadas en la fabricación de cemento

- Caolinita ($Al_2Si_2O_5(OH)_4$): se caracteriza por su contenido relativamente alto de alúmina y por presentar una plasticidad moderada a baja.
- Illita $[(K,H_3O)(Al,Mg,Fe)_2(Si,Al)_4O_{10}[(OH)_2,(H_2O)]]$: constituye una fuente de sílice y alúmina, además de aportar potasio y otros elementos en menor proporción.
- Montmorillonita o esmectita $[(Na,Ca)_{0.3}(Al,Mg)_2Si_4O_{10}(OH)_2 \cdot nH_2O]$: posee una elevada capacidad de retención de agua y una marcada plasticidad, características asociadas a su estructura laminar expansiva.
- Arcillas lateríticas: presentan contenidos importantes de hierro y aluminio y se forman principalmente en regiones de clima tropical sometidas a procesos intensos de meteorización.

Estructura química

Las arcillas presentan una estructura laminar formada por unidades de tetraedros de sílice (SiO_4) y octaedros que contienen principalmente aluminio o magnesio. Estas unidades se organizan en capas sucesivas cuya unión puede producirse mediante enlaces de hidrógeno o, dependiendo del tipo de arcilla, a través de cationes intercambiables y moléculas de agua ubicadas entre las láminas. La forma en que estas capas se combinan y disponen determina la clasificación de los minerales arcillosos y condiciona propiedades como la plasticidad, la capacidad de intercambio catiónico, la retención de agua y el comportamiento frente a la expansión (Grim, 1968; Murray, 2007).

Importancia en la fabricación de cemento

- Aporta principalmente SiO_2 y Al_2O_3, compuestos esenciales para la formación de los silicatos y aluminatos cálcicos que se generan durante la clinkerización.
- El Fe_2O_3 que se encuentra presente en algunas arcillas participa en la formación de fases ferríticas, favoreciendo la aparición de una fase líquida durante la cocción, lo que facilita las reacciones que tienen lugar en el horno.
- La composición mineralógica de la arcilla influye directamente en la reactividad de la mezcla cruda y en las condiciones de sinterización necesarias para obtener un clínker adecuado.
- Su incorporación también permite ajustar la composición química del crudo y alcanzar valores apropiados del factor de saturación

de cal, el módulo de sílice y el módulo de alúmina, parámetros fundamentales para controlar la calidad del clínker.

Propiedades

- **Color:** puede variar entre blanco, gris, amarillo, rojo y pardo, dependiendo de la naturaleza y concentración de las impurezas presentes.
- **Textura:** está formada por partículas extremadamente finas, generalmente con tamaños inferiores a 2 μm.
- **Plasticidad:** cuando contiene suficiente humedad, adquiere una elevada capacidad de deformación y moldeo sin perder cohesión.
- **Higroscopicidad:** presenta una notable capacidad para absorber y retener agua, propiedad que influye directamente en su comportamiento físico y en su manejo durante el proceso industrial.

Composición química promedio para uso en cemento:

- SiO_2: 45–60 %
- Al_2O_3: 10–25 %
- Fe_2O_3: 4–10 %
- Pérdida por calcinación (H_2O y CO_2): 10–15 %.

Comportamiento térmico: deshidroxilación entre 400–700 °C y fusión parcial por encima de 1 200 °C, facilitando la formación del clínker.

2.10.3 Yeso

Definición del yeso

El yeso es un mineral de origen natural ampliamente distribuido en la corteza terrestre, perteneciente al grupo de los sulfatos, cuya composición química corresponde al sulfato de calcio di hidratado. Se presenta de forma natural en depósitos sedimentarios y evaporíticos, asociado frecuentemente a procesos de evaporación de cuerpos de agua salina. En el contexto industrial, el yeso constituye una materia prima de alto interés, no solo en la construcción tradicional, sino también como componente estratégico en la industria cementera (Boggs, 2014).

Desde el punto de vista químico, el yeso se expresa mediante la fórmula:

$CaSO_4 \cdot 2H_2O$

donde el calcio se encuentra combinado con el ion sulfato y dos moléculas de agua de cristalización, las cuales forman parte integral de su estructura cristalina.

Fórmula y reacciones del yeso en la fabricación del cemento

En la industria del cemento, el yeso no se incorpora como material estructural, sino como un regulador del fraguado del cemento Portland. Durante el proceso de fabricación, el clínker obtenido del horno (rico en silicatos y aluminatos cálcicos) se muele conjuntamente con pequeñas proporciones de yeso, típicamente entre 3 y 5 % en masa.

La función química principal del yeso está asociada a la regulación de la hidratación del aluminato tricálcico (C_3A), uno de los compuestos más reactivos del clínker. Sin la presencia del yeso, el C_3A reacciona de forma extremadamente rápida con el agua, provocando un fraguado instantáneo (flash set), lo cual imposibilita el uso práctico del cemento (Hewlett & Liska, 2019).

Las reacciones simplificadas pueden representarse como:

$C_3A+3CaSO_4 \cdot 2H_2O + 26H_2O \rightarrow$ Ettringita ($C_6AS_3H_{32}$)

Esta reacción da lugar a la formación de ettringita**,** un compuesto estable que recubre las partículas de C_3A y retarda su hidratación**,** permitiendo un fraguado controlado y técnicamente adecuado del cemento.

Estructura química del yeso

Desde el punto de vista estructural, el yeso presenta una red cristalina monoclínica en la cual los iones Ca^{2+} se coordinan con los tetraedros SO_4^{2-}, mientras que las moléculas de agua se integran en la red mediante enlaces de hidrógeno. Esta disposición confiere al material una estructura relativamente estable, pero con facilidad para perder agua cuando es sometido a calentamiento.

Por deshidratación térmica controlada, el yeso puede transformarse en:

- **Hemihidrato** (yeso cocido o yeso de París):

$CaSO_4 \cdot 1/2H_2O$

- **Anhidrita** (yeso anhidro):

$CaSO_4$

Estas transformaciones son relevantes en múltiples aplicaciones industriales, aunque en la fabricación de cemento se utiliza principalmente el yeso natural di hidratado o anhidrita natural como regulador de fraguado (Deer, Howie, & Zussman, 2013).

Importancia del yeso en la fabricación del cemento

La adición del yeso permite que durante la producción del cemento Portland funciones de forma tecnológica, permitiendo:

- Control del tiempo inicial de fraguado del cemento.
- Se garantiza un trabajo adecuado de la pasta cementicia.
- Prevenir el fraguado instantáneo asociado a la rápida hidratación del C_3A.
- Mejora la estabilidad del proceso de hidratación.

Sin la incorporación de yeso, el cemento fraguaría demasiado rápido, lo que dificultaría su preparación, transporte y correcta aplicación en obra.. La mezcla no podría transportarse, colocarse ni moldearse con el tiempo suficiente para garantizar una correcta compactación y acabado superficial. En consecuencia, aunque el yeso se incorpora en proporciones relativamente pequeñas dentro del proceso de molienda del clínker, su función es decisiva para el desempeño práctico del cemento. Actúa como un regulador químico que permite controlar la hidratación inicial del aluminato tricálcico, asegurando condiciones de trabajabilidad adecuadas antes del endurecimiento (Hewlett & Liska, 2019). De este modo, el yeso se consolida como un componente funcional indispensable en la tecnología moderna del cemento.

Propiedades del yeso relevantes para la industria cementera

Entre las principales propiedades del yeso que justifican su uso en la fabricación del cemento se destacan:

- Alta solubilidad controlada en agua, lo que permite su rápida interacción con los aluminatos del clínker.
- Capacidad reguladora del fraguado, mediante reacciones químicas estables.

- Permite mantener su estabilidad química cuando se almacena en condiciones adecuadas.
- Presencia de una buena interacción con las distintas fases minerales que conforman en clínker.
- Se encuentra disponible de forma amplia en la naturaleza, lo que es favorable para su aprovechamiento a nivel industrial.
- Los costos de extracción y procesamiento son relativamente bajos frente a los de otros aditivos de índole mineral.

Por estas características, el yeso constituye un componente fundamental en la fabricación del cemento Portland, ya que contribuye en funciones de regulación del comportamiento y asegura un desempeño adecuado durante su preparación y uso.

2.10.4 Puzolanas

Definición de las puzolanas

Las puzolanas son materiales de naturaleza silícea o de tipo sílico aluminosa que, por sí solos, poseen escasa o nula capacidad cementante, pero que, finamente molidos y en presencia de agua, reaccionan químicamente con la base, hidróxido de calcio liberado durante la hidratación del cemento Portland, formando de esta manera compuestos con propiedades cementantes.

El término “puzolana” tiene su origen histórico en las cenizas volcánicas de Pozzuoli (Italia), utilizadas por los romanos en la elaboración de morteros hidráulicos durables (Jackson, 2014). Actualmente, el concepto es

más amplio porque se incluyen tanto puzolanas naturales (origen volcánico o sedimentario), así como puzolanas artificiales o industriales, del tipo cenizas volantes, humo de sílice y escorias activadas (Mehta & Monteiro, 2014).

Desde el punto de vista normativo, una puzolana se define como un material que cumple criterios específicos de reactividad química, finura y composición mineralógica, establecidos en normas técnicas internacionales (ASTM International, 2020).

Fórmula y reacciones de las puzolanas en la fabricación del cemento

Las puzolanas no poseen una fórmula química única, ya que se trata de materiales heterogéneos. Sin embargo, su comportamiento químico se basa fundamentalmente en la presencia de sílice reactiva (SiO_2) y, en muchos casos, alúmina reactiva (Al_2O_3).

Durante la hidratación del cemento Portland, los silicatos cálcicos del clínker (C_3S y C_2S) generan hidróxido de calcio ($Ca(OH)_2$) como subproducto. Este compuesto, aunque contribuye al pH alcalino del sistema, no aporta significativamente a la resistencia mecánica.

Las puzolanas reaccionan con el $Ca(OH)_2$ según reacciones del tipo:

$$SiO_2 + Ca(OH)_2 + H_2O \rightarrow C\text{-}S\text{-}H$$

$$Al_2O_3 + Ca(OH)_2 + H_2O \rightarrow C\text{-}A\text{-}H$$

Estas reacciones conducen a la formación de silicatos cálcicos hidratados (C-S-H) y aluminatos cálcicos hidratados (C-A-H), compuestos responsables del desarrollo de la resistencia mecánica y de la mejora de la microestructura del material cementicio.

Estructura química de las puzolanas

Desde la perspectiva estructural, las puzolanas se distinguen por poseer una estructura amorfa o con un bajo grado de cristalinidad, característica que influye directamente en su capacidad de reacción. A diferencia de los minerales cristalinos estables, la sílice y la alúmina presentes en estado amorfo muestran mayor energía superficial. Esta condición facilita su reacción con el hidróxido de calcio durante la hidratación del cemento (Mehta & Monteiro, 2014).

En las puzolanas naturales, la fase amorfa se encuentra principalmente relacionada con la presencia de vidrios de origen volcánico. En cambio, en las puzolanas artificiales se forma como resultado de procesos industriales sometidos a altas temperaturas. Entre los ejemplos más representativos se encuentran las cenizas volantes, generadas durante la combustión del carbón, y el humo de sílice, obtenido como subproducto de la producción de silicio metálico.

La reactividad puzolánica no es igual en todos los materiales, pues depende de varios factores:

- La cantidad de fase amorfa presente.
- El tamaño y la finura de las partículas.
- La relación entre el contenido de sílice (SiO_2) y alúmina (Al_2O_3).
- Las condiciones de curado y la disponibilidad de hidróxido de calcio [$Ca(OH)_2$].

Importancia de las puzolanas en la fabricación del cemento

La utilización y aplicación de puzolanas en la fabricación del cemento y del hormigón representa un avance tecnológico y ambiental significativo. Su uso permite:

- Reducir el contenido formular de clínker en el cemento.
- Disminuir el calor de hidratación del sistema.
- Mejorar la durabilidad frente a ataques químicos.
- Incrementar la resistencia a edades medias y largas.
- Optimizar la microestructura de la pasta cementicia.

Desde una perspectiva ambiental, el uso de puzolanas contribuye a la reducción de emisiones de CO_2, al disminuir la demanda de clínker, cuyo proceso de producción es altamente intensivo en energía. Por esta razón, las puzolanas son consideradas un pilar fundamental en el desarrollo de cementos sostenibles y de baja huella de carbono (Scrivener, John, & Gartner, 2018).

Propiedades de las puzolanas para la industria cementera

Las principales características que hacen de las puzolanas materiales de gran importancia industrial y tecnológica son:

- Capacidad de reaccionar con el $Ca(OH)_2$ en presencia de agua.
- Elevada finura, que contribuye a acelerar las reacciones químicas.
- Presencia predominante de una estructura amorfa, esencial para mantener su actividad.
- Mayor resistencia del hormigón frente al ataque de sulfatos y cloruros.
- Disminución de la permeabilidad en el material una vez endurecido.
- Contribución al desarrollo sostenible, mediante la valorización de subproductos industriales o recursos naturales abundantes.

Estas propiedades permiten que las puzolanas actúen no solo como materiales complementarios, sino como componentes activos en la ingeniería moderna del cemento y del hormigón.

Clasificación de las puzolanas

Las puzolanas pueden clasificarse según su origen, su proceso de formación y su composición química, criterios que permiten comprender con mayor claridad su comportamiento reactivo y su aplicación tanto en la fabricación del cemento como en el hormigón. Esta clasificación no se limita únicamente a su origen geológico o industrial, sino que se vincula de manera directa con la estructura interna del material y su capacidad para reaccionar con el hidróxido de calcio. De forma general, se distinguen dos grupos principales: las puzolanas naturales, procedentes de materiales volcánicos o sedimentarios con fases amorfas activas, y las puzolanas artificiales o industriales, obtenidas como subproductos de procesos térmicos, como la combustión del carbón o la fabricación de silicio metálico (Hewlett & Liska, 2019).

Puzolanas naturales

Las puzolanas naturales son materiales de origen geológico que presentan actividad puzolánica sin necesidad de procesos industriales complejos. Se forman principalmente a partir de materiales volcánicos o sedimentos silíceos con alto contenido de sílice y alúmina en estado amorfo (Taylor, 1997).

Entre las principales puzolanas naturales se encuentran:

- Cenizas volcánicas.
- Tobas volcánicas.

- Pómez y escorias volcánicas.
- Diatomitas y tierras silíceas.

Estas puzolanas han sido utilizadas desde la antigüedad en morteros hidráulicos, destacándose por su buena durabilidad y resistencia a ambientes agresivos. Su reactividad depende del contenido de fase amorfa, la finura y el grado de alteración mineralógica.

Puzolanas artificiales o industriales

Las puzolanas artificiales, también denominadas puzolanas industriales, son subproductos o materiales obtenidos mediante procesos térmicos controlados, que generan fases amorfas altamente reactivas. Su uso se convierte de forma representativa en una estrategia clave en la valorización de residuos industriales y en la producción de cementos ecológicamente sostenibles (Mehta & Monteiro, 2014).

Entre las más relevantes se destacan:

- **Cenizas volantes:** generadas como subproducto durante la combustión del carbón en centrales termoeléctricas y se caracterizan por su contenido de sílice y alúmina con presencia en estado amorfo.
- **Humo de sílice:** se obtiene como subproducto de la fabricación de silicio metálico y ferrosilicio. Se distingue por el tamaño extremadamente fino de sus partículas y su elevada capacidad de reacción.
- **Metacaolín:** se produce mediante la calcinación controlada del caolín y presenta una alta actividad puzolánica.

- **Escorias granuladas de alto horno activadas:** en determinados sistemas, estos materiales manifiestan un comportamiento hidráulico latente y pueden utilizarse como complemento de las puzolanas.

En comparación con las puzolanas naturales, estos materiales suelen presentar una reactividad más uniforme y controlada. Esta característica facilita la determinación de las cantidades que deben incorporarse y permite integrarlos con mayor precisión en cementos compuestos y fórmulas de hormigones de alto desempeño.

Clasificación de las puzolanas según la normativa

Desde el enfoque normativo, las puzolanas también se organizan en diferentes categorías de acuerdo con los criterios establecidos en las normas técnicas internacionales. Para esta clasificación se consideran aspectos como su composición química, el índice de actividad puzolánica y el comportamiento mecánico del material.

Por ejemplo:

- Según la norma ASTM C618 clasifica las cenizas volantes y puzolanas naturales en Clase F y Clase C, según su contenido de calcio.
- Las normas europeas EN 197-1 y EN 450 regulan el uso de puzolanas en cementos comunes y hormigones estructurales.

Esta clasificación normativa garantiza la calidad, seguridad y desempeño de los materiales cementicos adicionados, asegurando su compatibilidad con los requisitos estructurales y de durabilidad.

En la tabla 1 se presenta un resumen sobre la composición química de los cementos.

Tabla 1. Composición química de los cementos.

Composición química de los cementos (% en masa)	
Parámetro	**Rango aproximado**
Residuo insoluble	0,1 – 1,4
Óxido de calcio	58,2 – 65,6
Sílice (SiO2)	19,8 – 26,45
Alúmina (Al2O3)	4,1 – 9,5
Óxido de hierro (Fe2O3)	2,1 – 4,5
Magnesia (MgO)	Trazas – 2,9
Álcalis (K2O, Na2O)	0,1 – 2,8
Sulfatos (SO3)	0,1 – 2,2
Pérdida por calcinación	0,2 – 2,8

Fuente: Adaptado de Taylor (1997) y Hewlett y Liska (2019).

En la tabla 2 se presenta un resumen las principales materias primas, regiones y lugares donde se obtienen en Ecuador.

La tabla 3 muestra las principales canteras que existen en Ecuador.

La tabla 4 presenta un resumen de los rangos aceptables de materias primas y las normativas aplicables para su control.***Tabla 2. Principales materias primas y lugares en Ecuador.***

Materia prima	**Regiones / lugares donde se**	**Minas / canteras /**	**Empresas**

		extrae en Ecuador (ejemplos)	**observaciones**	**/ usuarios principales**
	Caliza (piedra caliza) — fuente principal de $CaO/CaCO_3$	Vía a la Costa (Guayaquil / Durán / Yaguachi), zonas del Austro (Cuenca), áreas con canteras en la Sierra y litoral.	Cantera Cenaca (vía a la Costa, Guayaquil) — cantera de gran escala utilizada por Holcim; otras canteras locales en zonas cercanas a las plantas.	**Holcim Ecuador** (planta integrada Guayaquil y canteras propias). También cementeras locales (Cemento Atenas, etc.).
	Arcilla / materiales arcillosos (arcillaceos) — fuente de SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3	Depósitos repartidos en la Sierra (p. ej. zonas de Cosanga /	Existen numerosos afloramientos y minas	Suministradas a plantas por concesiones

	Tena / Archidona según estudios de depósitos de arcillas); también afloramientos locales cercanos a canteras.	de arcilla no metálica; se usan tanto arcillas naturales como lutitas y pizarra alterada.	locales; Holcim y otras empresas integran argiláceos del entorno en la mezcla.
Yeso (gypsum) — agregado para controlar fraguado (SO_3)	Existen depósitos de yeso en Ecuador (y se usan yesos locales o yesos/residuos industriales); sin embargo, la información pública	Por ejemplo, Holcim declaran en su composición el uso de yeso natural y también de yesos residuales como	Holcim Ecuador (menciona sustitución de yeso natural por residuos en iniciativas).

	sobre minas comerciales grandes de yeso en Ecuador es menos detallada — algunas empresas complementan con yeso importado o yeso residual.	estrategia de circularidad.	
Materiales ricos en hierro / lateritas / escorias (corrector de Fe_2O_3)	En las mezclas crudas, el contenido de hierro puede ajustarse mediante el uso de materiales disponibles en	Frecuentemente se usan adiciones locales (escoria, polvos industriales) o se recurre	Integrado por el departamento de mezcla (Holcim y otras cementeras).

	la zona, como lateritas y escorias, que se encuentran en distintos sectores de las regiones andina y subandina.	a importación si es necesario ajustar composición.	
Puzolanas (volcánicas) y sustitutos (cenizas, escorias)	Regiones con rocas volcánicas (varias zonas andinas) y también puzolanas naturales o importadas.	Pueden provenir de depósitos volcánicos locales o usarse materiales alternativos (cenizas de carbón, escoria de altos hornos)	Se usan por fabricantes que buscan cementos puzolánicos o la reducción de clinker

		como adicio-nes.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3. Principales canteras / minas en Ecuador.

Nombre / referencia	Material	Ubicación / comentario
Cantera Cenaca	Caliza (gran volumen)	Vía a la Costa (Guayaquil). Información de índole periodística citan como cantera de gran capacidad utilizada por Holcim; la empresa también gestiona rehabilitación de frentes.
Canteras locales alrededor de Cuenca / Pucará	Caliza / rocas calizas	Cemento Atenas (empresa con planta en Cuenca) y canteras en el Austro suministran materia prima local en la zona.
Depósitos arcillosos (varios)	Arcilla / lutitas	Informe de estudios académicos y repositorios identifican depósitos de arcilla en cantones como Tena, Archidona, Cosanga; útiles para la fracción argilosa del crudo.

Fuente: Elaboración propia

Estos rangos son orientativos y se usan como referencia al formular la mezcla cruda; los valores exactos dependen del diseño de la planta y de la norma (NTE/ASTM) aplicada.

Tabla 4. Resumen de los componentes químicos típicos de las materias primas y rangos de pureza aceptables.

Materia prima	Componentes químicos principales	Rango típico / especificaciones útiles para cemento
Caliza ($CaCO_3$)	$CaCO_3$ → CaO cuando se calcina; impurezas: SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3, MgO, SO_3	**$CaCO_3$**: ideal > **85–95 %** (según depósito); **MgO** (como óxido magnésico) normalmente **< 6 %** (para evitar problemas de expansión); insolubles (residuo insoluble) preferible **< 2–5 %**.
Arcilla / lutita / pizarra	SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3 (mayor proporción de SiO_2 y Al_2O_3)	Se busca que la suma **SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3** aporte la fracción silicato/aluminato necesario; valores varían mucho: sumar >**70–80 %** en muchas arcillas usadas para cemento. Los ajustes se hacen con caliza para lograr la relación cal-sílice-alúmina.

Yeso ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$)	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$ → aporta SO_3 para controlar fraguado	Para uso en cemento, el yeso con **pureza > 80–88 % $CaSO_4 \cdot 2H_2O$** es considerado adecuado; la presencia de purezas más altas (p. ej. >90 %) son mejores, pero muchas plantas también usan yeso residual o anhidrita regulando la dosificación según SO_3 objetivo.
Materiales férricos / lateritas / escorias	Fe_2O_3 (hierro), además de Al_2O_3 y otros	Usados para conseguir el porcentaje de Fe_2O_3 en la fórmula; los contenidos y tolerancias dependen del diseño de clinker.
Puzolanas (naturales o cenizas)	SiO_2 amorfo, Al_2O_3, etc.	Se usan como adición (sustitución parcial de clinker) — sus propiedades reactivas (sílice amorfa) determinan su porcentaje de uso.

Fuente: Elaboración propia con base en Taylor (1997), Hewlett y Liska (2019) y Alsop et al. (2007)

2.11 Materiales cementantes suplementarios (SCM)

Introducción a los materiales cementarios suplementarios (SCM)

Los materiales cementantes suplementarios (Supplementary Cementitious Materials, SCM) constituyen un conjunto de materiales minerales que, incorporados parcial o totalmente al cemento Portland o al hormigón, contribuyen al desarrollo de propiedades mecánicas, físicas y de durabilidad del material endurecido. Su uso ha adquirido una importancia creciente tanto desde el punto de vista tecnológico como ambiental, en respuesta a la necesidad de producir cementos más eficientes y sostenibles (Hewlett & Liska, 2019).

Los SCM pueden actuar como materiales puzolánicos, hidráulicos latentes o materiales funcionales, dependiendo de su composición química, estructura y mecanismo de reacción. En la práctica moderna de la ingeniería civil, estos materiales forman parte esencial de los cementos compuestos, regulados por normativas internacionales (ASTM International, 2021).

2.11.1 Clasificación general de los materiales cementarios suplementarios

Desde un enfoque académico y normativo, los SCM pueden clasificarse en tres grandes grupos:

Materiales puzolánicos

Son materiales ricos en sílice y/o alúmina reactiva, en reacción con el hidróxido de calcio liberado durante la hidratación del cemento Portland, forma cierto tipo de compuestos cementantes secundarios como el C-S-H y C-A-H.

Dentro de este grupo se incluyen:

- Puzolanas naturales (cenizas volcánicas, tobas, diatomitas),
- Puzolanas artificiales (cenizas volantes, humo de sílice, metacaolín).

Materiales hidráulicos latentes

Son materiales que presentan un potencial hidráulico, aunque necesitan una activación química para desarrollar sus propiedades cementantes. Dentro de este grupo, la escoria granulada de alto horno constituye uno de los materiales más representativos.

Esta escoria se obtiene como subproducto de la industria siderúrgica y adquiere comportamiento hidráulico al entrar en contacto con medios alcalinos, como el generado durante la hidratación del cemento Portland. Su incorporación contribuye a mejorar la durabilidad del hormigón y a disminuir de manera considerable el calor liberado durante la hidratación (Scrivener et al., 2018).

2.11.2 Materiales funcionales o reguladores

Incluyen materiales que, aun cuando no contribuyen directamente a la resistencia mecánica, cumplen funciones específicas en el sistema cementicio. El ejemplo más representativo es el:

- **Yeso**, utilizado como regulador del fraguado del cemento Portland.

Aunque su dosificación es relativamente baja en comparación con otros componentes, su papel resulta esencial para garantizar condiciones adecuadas de trabajabilidad y evitar un fraguado prematuro causado por la rápida hidratación del aluminato tricálcico (C_3A). De esta manera, el

yeso actúa como regulador químico del proceso de hidratación, asegurando un desarrollo controlado de las reacciones iniciales (Hewlett & Liska, 2019).

Mecanismos de reacción de los SCM

El comportamiento de los materiales cementantes suplementario (SCM) dentro de los sistemas cementicos puede comprenderse mediante tres mecanismos principales:

a. **Reacción puzolánica**:

   Ocurre principalmente cuando la sílice y la alúmina reactivas interactúan con el hidróxido de calcio, formando productos cementantes secundarios.

b. **Hidratación hidráulica**:

   Corresponde a la capacidad del material para formar sus propios compuestos cementantes, tal como sucede con las escorias cuando son activadas.

c. **Efecto físico o filler**:

   Para esto caso, las partículas finas ocupan los espacios vacíos dentro de la matriz cementicia, mejorando su compactación, disminuyendo la porosidad y favoreciendo una microestructura más densa y uniforme.

En la práctica, estos mecanismos suelen actuar de forma simultánea, potenciando el desempeño global del material.

2.11.3 Importancia de los SCM en la tecnología del cemento

La incorporación de SCM en la fabricación del cemento y del hormigón aporta algunos beneficios:

- Reducción del contenido de clínker y, por ende, de las emisiones de CO_2.
- Mejora de la durabilidad frente a sulfatos, cloruros y reacciones álcali-agregado.
- Disminución del calor de hidratación en estructuras masivas.
- Optimización de la microestructura de la pasta cementicia.
- Valorización de subproductos industriales y recursos naturales.

Estos beneficios han impulsado el desarrollo de cementos compuestos y cementos de bajo carbono, alineados con los principios de la ingeniería sostenible.

2.11.4 Enfoque normativo de los SCM

El uso de SCM está regulado por normas técnicas que establecen requisitos de composición, reactividad, resistencia mecánica y durabilidad. Entre las más importantes, podemos enunciar:

- ASTM C618: Describe las especificaciones para puzolanas naturales y cenizas volantes.
- ASTM C989: Describe la clasificación de escorias granuladas de alto horno.
- EN 197-1: Describe la composición y tipos de cementos comunes (cementos CEM II, CEM III, CEM IV).

- EN 450-1: Establece los requisitos para cenizas volantes en hormigón.

La aplicación de estas normas, garantiza la calidad y el desempeño en temas industriales de los materiales cementicios suplementarios.

2.11.5 Perspectiva ambiental y sostenibilidad

Desde una perspectiva contemporánea, los materiales cementantes suplementarios (SCM) ocupan un lugar estratégico en el proceso de transformación hacia una industria cementera más sostenible. La producción de clínker —etapa central en la fabricación del cemento Portland— es intensiva en consumo energético y genera emisiones significativas de dióxido de carbono, tanto por la des carbonatación de la caliza como por el uso de combustibles en los hornos. En este aspecto, la estrategia de sustitución parcial del clínker mediante SCM es una de las más efectivas para reducir la huella de carbono del cemento sin comprometer su desempeño técnico (Scrivener, John, & Gartner, 2018).

Además de reducir la proporción de clínker, la incorporación de SCM permite aprovechar subproductos industriales, como las cenizas volantes y las escorias de alto horno, favoreciendo la economía circular y el uso eficiente de los recursos. Al mismo tiempo, estos materiales mejoran la durabilidad del hormigón, debido a que disminuyen su permeabilidad, controlan las reacciones expansivas y contribuyen a formar una microestructura más compacta en el material endurecido (Mehta & Monteiro, 2014). Por lo tanto, su utilización no solo disminuye el impacto ambiental relacionado con la producción, sino que también extiende la vida útil

de las estructuras y reduce la necesidad de realizar futuras reparaciones o sustituciones.

Con esta explicación, los SCM son componentes estratégicos en el diseño de cementos y hormigones avanzados. Su correcta selección, dosificación y control técnico permiten desarrollar materiales con mejores prestaciones mecánicas, mayor eficiencia económica y un desempeño ambiental superior. En consecuencia, los materiales cementantes suplementarios representan una evolución significativa en la tecnología del cemento y del hormigón, consolidando su papel fundamental en la ingeniería civil moderna y en los desafíos globales de sostenibilidad (Scrivener et al., 2018).

2.12 Elementos de cierre

A continuación, se presenta un cuestionario para evaluar conocimientos del capítulo

1. Explique la importancia del proceso de obtención y preparación de las materias primas en la calidad final del cemento.
2. Defina y diferencie los conceptos de **cemento**, **cemento Portland** y **hormigón**, indicando su función dentro del sector de la construcción.
3. ¿Cuáles son las principales materias primas empleadas en la fabricación del cemento y qué función cumple cada una dentro del proceso productivo?
4. Explique cómo las propiedades químicas de la caliza y la arcilla influyen en la preparación de la mezcla cruda utilizada para fabricar cemento.

5. ¿Qué se entiende por materiales correctores y cuál es su importancia dentro del proceso de producción del cemento?
6. Describa las principales etapas que atraviesan las materias primas, desde su extracción hasta su preparación para ingresar al proceso de fabricación del cemento.
7. ¿De qué manera la granulometría, el contenido de humedad y la pureza de las materias primas afectan la eficiencia del proceso cementero?
8. Explique qué son los materiales cementantes suplementarios (SCM) y mencione algunos ejemplos utilizados con frecuencia en la industria cementera.
9. ¿Cuáles son los principales beneficios técnicos y ambientales que se obtienen al incorporar materiales cementantes suplementarios en la fabricación del cemento?
10. Desde su punto de vista, ¿por qué una adecuada selección de las materias primas es fundamental para lograr una industria cementera más eficiente y sostenible?

CAPÍTULO III

3 QUÍMICA DEL CEMENTO: REACCIONES DE CLINKERIZACIÓN

3.1 Resumen

El comportamiento y las propiedades del cemento están directamente determinados por las reacciones químicas que ocurren durante su fabricación y posterior hidratación. Desde la transformación térmica de las materias primas en el horno rotatorio hasta las complejas reacciones de hidratación que tienen lugar al contacto con el agua, el cemento es el resultado de una secuencia controlada de procesos fisicoquímicos.

Este capítulo aborda las principales reacciones químicas que ocurren durante la fabricación del cemento, con especial atención a la etapa de clinkerización. A lo largo de su desarrollo, se explica cómo las materias primas, principalmente la caliza y las arcillas, experimentan una serie de transformaciones al ser sometidas a las elevadas temperaturas del horno rotatorio. Como resultado de este proceso se forman las fases minerales que componen el clínker, entre ellas los silicatos y aluminatos de calcio.

También se analiza la relación existente entre la composición química de la mezcla cruda, los módulos de control y la formación adecuada de cada una de las fases minerales. El equilibrio entre estos componentes es esencial, ya que influye directamente en las propiedades y el desempeño posterior del cemento.

Además, se describen las etapas de preparación, dosificación y homogeneización de las materias primas antes de su ingreso al horno. La correcta ejecución de estas operaciones permite mantener la estabilidad del proceso térmico y obtener un producto final con características uniformes y acordes con los requisitos de calidad.

El estudio de estas reacciones facilita la comprensión del comportamiento del cemento, tanto durante su preparación y colocación como después de su endurecimiento. Asimismo, proporciona los conocimientos necesarios para mejorar el proceso de fabricación desde el punto de vista técnico, reducir el consumo de energía y disminuir su impacto ambiental.

3.2 Esquema del capítulo

1. Introducción a las reacciones químicas del cemento
2. Preparación de materias primas y del crudo

- Selección y caracterización de materias primas
- Homogeneización y molienda del crudo

3. clínkerización

- Definición del proceso de clinkerización
- Zonas térmicas del horno

4. Reacciones de clinkerización

- Descarbonatación

- Formación de silicatos y aluminatos

5. Composición del cemento

- Fases principales del clínker
- Influencia de la composición química en las propiedades del cemento

3.3 Preguntas de enfoque

1. ¿De qué manera las reacciones químicas que ocurren durante la fabricación influyen en el comportamiento y la calidad final del cemento?
2. ¿Qué función desempeña cada materia prima en la formación de las fases minerales que componen el clínker?
3. ¿En qué consiste la clinkerización y por qué se considera una etapa fundamental dentro del proceso de fabricación del cemento?
4. ¿Qué transformaciones y reacciones químicas se producen en las diferentes zonas del horno cementero?
5. ¿Cómo influye la composición mineralógica del clínker en las propiedades y el desempeño del cemento Portland?
6. ¿Qué relación existe entre las temperaturas alcanzadas en el horno y la formación de las principales fases minerales del clínker?
7. ¿Por qué es importante el control químico del crudo antes de la clinkerización?

3.4 Objetivos y/o resultados de aprendizaje

Al finalizar este capítulo, el estudiante será capaz de:

- Explicar las reacciones químicas fundamentales involucradas en la fabricación del cemento.
- Describir el proceso de preparación de materias primas y su impacto en la clinkerización.
- Identificar las principales fases químicas del clínker y su origen.
- Relacionar la composición química del cemento con sus propiedades físicas y mecánicas.
- Estudiar con enfoque químico y térmico el proceso de clinkerización.

3.5 Competencias a desarrollar

- **Competencia cognitiva:** Comprende y explica los procesos químicos que ocurren durante la fabricación del cemento.
- **Competencia analítica:** Analiza la influencia y el impacto de la composición química y las condiciones de proceso en la calidad del cemento.
- **Competencia técnica:** Interpreta de forma técnica las reacciones químicas y diagramas asociados a la clinkerización.
- **Competencia aplicada:** Relaciona fundamentos químicos y de operaciones unitarias con aplicaciones industriales del cemento.

3.6 Problemas a resolver

1. Analizar de qué manera los cambios en la composición de la mezcla cruda influyen en las reacciones que ocurren durante la formación del clínker.
2. Reconocer los efectos que puede ocasionar una temperatura demasiado baja o elevada en el horno sobre la calidad y la formación del clínker.
3. Explicar cómo las distintas fases minerales del clínker intervienen en el comportamiento del cemento durante el proceso de hidratación
4. Proponer ajustes en la preparación de materias primas para mejorar la eficiencia del proceso de clinkerización.
5. Evaluar el impacto de la composición química del cemento en una aplicación estructural específica.

3.7 Introducción

En el siguiente capítulo se profundizará en el estudio de la química del cemento desde una perspectiva científica, tomando como base el comportamiento químico de sus componentes y las interacciones que ocurren durante su hidratación.

A partir de los conceptos fundamentales y las definiciones principales, se estudiarán la estructura y la composición del material, con la finalidad de comprender con claridad los mecanismos que influyen en su comportamiento y determinan su desempeño.

También se analizará el panorama actual de la industria cementera, marcado por la búsqueda de nuevos materiales, mezclas innovadoras y alternativas de mayor eficiencia. Esta perspectiva permitirá comprender que la evolución en la formulación del cemento no responde únicamente a requerimientos técnicos, sino también a los desafíos ambientales y sociales actuales. En este sentido, estas innovaciones pueden contribuir a una producción más sostenible, mejorar la durabilidad de las estructuras y favorecer el desarrollo de infraestructuras adecuadas para las necesidades de la sociedad.

3.7.1 El cemento Portland

Para comprender la química del cemento es indispensable comenzar con la definición de cemento Portland, considerado un cemento hidráulico artificial, capaz de fraguar y endurecer incluso en condiciones de humedad, esto resulta gracias a reacciones químicas entre sus fases minerales y el agua.

Este cemento resulta de la mezcla de caliza y arcillas, en proporciones variables, que gracias a su estructura y luego de la fundición da origen al "clínker". La red cristalina formada es del tipo O – Al – O – Si. En esta estructura quedan atrapados los iones K^{+} y Ca^{2+}, muy similar a la forma de las zeolitas de naturaleza mineral.

Desde el punto de vista químico–mineralógico, el cemento hidráulico puede definirse como un sistema multicomponente constituido principalmente por silicatos y aluminatos de calcio formados durante la clinkerización, proceso que implica la calcinación controlada de una mezcla finamente dosificada de materias primas calcáreas y arcillosas, seguida

de una molienda posterior hasta obtener un polvo de elevada finura específica (Taylor, 1997; Hewlett & Liska, 2019). La composición química y mineralógica resultante no es constante, ya que depende de la naturaleza de las materias primas, del diseño del crudo, de las condiciones térmicas del horno y de los requerimientos de desempeño del producto final (Neville, 2011). En función de estas variables, se desarrollan distintos tipos de cementos hidráulicos, siendo el cemento Portland el referente industrial predominante debido a su equilibrio entre resistencia mecánica, durabilidad y comportamiento reológico (Hewlett & Liska, 2019).

El cemento Portland debe su denominación a la piedra de la península de Portland, en Inglaterra, cuya apariencia es similar a la del material endurecido tras el proceso de hidratación (Bogue, 1955). Desde el punto de vista composicional, este cemento está constituido esencialmente por fases cristalinas como el silicato tricálcico (C_3S), silicato dicálcico (C_2S), aluminato tricálcico (C_3A) y ferritoaluminato tetracálcico (C_4AF), cuyas proporciones relativas determinan la cinética de hidratación y el desarrollo de resistencias mecánicas (Taylor, 1997). Su amplia utilización en hormigones y morteros se fundamenta en su capacidad de generar productos de hidratación estables, principalmente gel C-S-H y portlandita, responsables de la cohesión y resistencia del material endurecido (Neville, 2011).

En contraste, el cemento blanco se caracteriza por presentar una composición química con contenidos significativamente reducidos de óxidos cromóforos, especialmente Fe_2O_3 y compuestos de manganeso, los cua-

les son responsables de la tonalidad gris del cemento convencional (Hewlett & Liska, 2019). La minimización de estos óxidos implica el empleo de materias primas de alta pureza y un control más estricto del proceso de clinkerización. Debido a la baja presencia de óxidos fundentes, la formación de las fases minerales requiere temperaturas de cocción ligeramente superiores y condiciones oxidantes controladas, lo que incrementa el consumo energético del proceso en comparación con el clínker gris tradicional (Taylor, 1997).

Con el fin de compensar la carencia de óxidos de hierro y favorecer las reacciones de formación del clínker, en la fabricación del cemento blanco se recurre habitualmente a la adición de óxido de calcio (CaO) y a agentes mineralizantes como la fluorita (CaF_2) o la criolit a (Na_3AlF_6), los cuales facilitan la sinterización del material y contribuyen a obtener un producto final con las propiedades físicas y químicas requeridas.

3.8 Composición y naturaleza de los cementos blancos y cementos fraguados

La composición química de los cementos blancos puede variar en función del tipo de cemento, de los requerimientos de resistencia y del fabricante; sin embargo, una característica común es el bajo contenido de óxido férrico (Fe_2O_3), el cual generalmente no supera el 1 % en masa. Este contenido disminuye progresivamente a medida que se incrementa el grado de blancura del cemento. Como referencia, un cemento blanco con un grado de blancura del 92 % puede contener aproximadamente un 0,2 % de Fe_2O_3, cantidad considerablemente menor que la presente en

los cementos grises convencionales. Pese a esta diferencia en su composición, el cemento blanco puede alcanzar propiedades mecánicas similares a las del cemento Portland gris. Por esta razón, puede utilizarse tanto en obras estructurales como en aplicaciones arquitectónicas, sobre todo cuando el acabado y la apariencia estética constituyen aspectos importantes del proyecto.

Una vez producido el fraguado y el endurecimiento, los cementos dan lugar a materiales que pueden clasificarse como materiales cerámicos inorgánicos. Desde el punto de vista de la ciencia de los materiales, estos productos se consideran minerales no metálicos, formados por una compleja red de fases cristalinas y parcialmente amorfas, originadas a partir de las reacciones de hidratación del clínker. Su estructura se caracteriza por la presencia de cristales mixtos, en los cuales coexisten enlaces iónicos y covalentes de alta estabilidad, lo que explica sus elevados puntos de fusión y su notable resistencia mecánica (Bensted & Barnes, 2008; Mehta & Monteiro, 2014).

Sin embargo, al igual que muchos materiales cerámicos, el cemento una vez fraguado presenta un comportamiento frágil y posee poca capacidad para deformarse antes de romperse. También se caracteriza por su baja conductividad térmica y eléctrica, lo que favorece su utilización en aplicaciones estructurales y de protección. Aun así, estas propiedades limitan su respuesta frente a cargas dinámicas y esfuerzos provocados por impactos. Por este motivo, suele combinarse con otros materiales, como el acero en el hormigón armado, para mejorar su resistencia y desempeño estructural.

3.8.1 Del fraguado del cemento

El fraguado es el proceso mediante el cual el hormigón o el mortero de cemento experimenta una pérdida progresiva de plasticidad y un endurecimiento inicial, como consecuencia de una serie de reacciones químicas entre el agua de amasado y los compuestos minerales presentes en el clínker del cemento. Este fenómeno se produce fundamentalmente por la hidratación de los óxidos metálicos, que da lugar a la formación de hidróxidos y productos de hidratación capaces de reorganizarse estructuralmente mediante procesos de recristalización, generando una matriz sólida continua (Taylor, 1997; Lea, 1998).

En el caso del cemento Portland, el más ampliamente utilizado en la fabricación de hormigones, los distintos compuestos del clínker reaccionan con el agua a velocidades diferentes. El aluminato tricálcico (C_3A) es el primer componente en reaccionar, dando lugar a un fraguado rápido de corta duración, generalmente comprendido entre las primeras horas y los primeros días. Posteriormente, el silicato tricálcico (C_3S) realiza una contribución inicial significativa al desarrollo de la resistencia mecánica y continúa reaccionando durante un período prolongado. Finalmente, el silicato bicálcico (C_2S) presenta una reactividad más lenta, con una aportación inicial reducida, pero adquiere un papel predominante en el aumento de la resistencia a edades más avanzadas, particularmente después de los 28 días de curado (Neville, 2011; Mehta & Monteiro, 2014).

Desde el punto de vista físico-químico, el endurecimiento del cemento no puede dividirse en fases claramente delimitadas, ya que se trata de un

proceso continuo de hidratación cuya cinética depende de múltiples factores. Entre los más relevantes se encuentran la composición del cemento, la relación existente entre agua/cemento, la temperatura, así como la presencia de sales disueltas en el agua de amasado y el valor del pH, los cuales pueden acelerar, retardar o modificar el desarrollo normal del fraguado y del endurecimiento. Estas variables deben ser cuidadosamente controladas para garantizar un desempeño adecuado del material en servicio (Bensted & Barnes, 2008; Mindess et al., 2003).

3.9 La clinkerización en la fabricación del cemento

La fabricación del cemento Portland constituye uno de los procesos industriales más relevantes a nivel mundial, tanto por su impacto económico como por su influencia directa en el desarrollo de la infraestructura moderna (Hewlett & Liska, 2019). En este contexto, la clinkerización representa la etapa central del proceso productivo, ya que en ella se generan, mediante reacciones termoquímicas a alta temperatura, las fases minerales responsables del comportamiento hidráulico del cemento, principalmente el silicato tricálcico (C_3S), silicato di cálcico (C_2S), aluminato tricálcico (C_3A) y ferrito aluminato tetra cálcico (C_4AF) (Taylor, 1997). La formación y proporción relativa de estas fases determinan las propiedades mecánicas y la evolución de resistencias del material endurecido (Neville, 2011).

Desde el punto de vista de la ingeniería química y de materiales, la clinkerización implica una secuencia de transformaciones físicas y químicas complejas que incluyen la descarbonatación del carbonato de calcio, la formación de fases intermedias y la posterior combinación en fase sólida

y líquida a temperaturas que pueden superar los 1450 °C (Taylor, 1997; Hewlett & Liska, 2019). Estas transformaciones están controladas por la temperatura, la composición del crudo, la finura de la mezcla y las condiciones operativas del horno rotatorio. La comprensión detallada de este proceso resulta fundamental para el diseño y optimización energética del sistema, así como para la reducción de emisiones asociadas a la industria cementera, particularmente de dióxido de carbono derivado tanto de la des carbonatación como del consumo de combustibles fósiles (Hewlett & Liska, 2019).

3.9.1 Definición de clinkerización

La clinkerización es el proceso termoquímico mediante el cual una mezcla uniforme de materias primas se transforma en clínker. Esta mezcla está constituida principalmente por carbonato de calcio ($CaCO_3$), procedente de la caliza, además de silicatos y aluminatos proporcionados por los materiales arcillosos. Para lograr esta transformación, el material se somete a un calentamiento gradual dentro del horno rotatorio, donde alcanza temperaturas cercanas a los 1450 °C (Taylor, 1997; Hewlett & Liska, 2019). Durante este proceso se producen reacciones sucesivas de deshidratación, descarbonatación y combinación en fase sólida y parcialmente líquida, que conducen a la formación de un producto intermedio denominado clínker. La adecuada homogeneización del crudo y el control de la curva térmica resultan determinantes para asegurar la correcta formación de las fases minerales objetivo.

El clínker se presenta en forma de nódulos sinterizados, generalmente de 3 a 25 mm de diámetro, constituidos por fases minerales sintéticas

tales como silicato tricálcico (C_3S), silicato di cálcico (C_2S), aluminato tricálcico (C_3A) y ferritoaluminato tetracálcico (C_4AF), cuya distribución y proporciones relativas dependen del módulo de saturación de cal y de las condiciones de enfriamiento (Taylor, 1997). Estas fases presentan comportamiento hidráulico, es decir, reaccionan químicamente con el agua mediante procesos de hidratación exotérmica que generan productos como el gel C-S-H y la portlandita, responsables del desarrollo de resistencia mecánica y estabilidad estructural del cemento Portland endurecido (Neville, 2011).



Figura 5. Nódulos de clínker obtenidos a partir del proceso de clinkerización.

Fuente: Elaboración propia

3.10 Materias primas y preparación del crudo

Las materias primas empleadas en la clinkerización deben aportar los óxidos fundamentales para la formación de las fases minerales del clínker, principalmente CaO, SiO_2, Al_2O_3 y Fe_2O_3, los cuales se obtienen a partir de fuentes calcáreas y arcillosas cuidadosamente seleccionadas (Taylor, 1997; Hewlett & Liska, 2019). La formulación de la mezcla

cruda o harina requiere una dosificación precisa en función de los módulos químicos —como el módulo de saturación de cal (LSF), el módulo de sílice (SM) y el módulo de alúmina (AM)— con el fin de garantizar la adecuada combinación estequiométrica durante la clinkerización. Esta etapa comprende operaciones unitarias previas tales como trituración, secado y molienda, asegurando de esta forma la homogeneidad y reactividad del sistema (Hewlett & Liska, 2019).

El secado busca disminuir la humedad de la mezcla hasta alcanzar valores cercanos al 1 %, aunque este nivel puede variar según el sistema de producción empleado, ya sea por vía seca o semiseca. Esta operación permite aprovechar mejor la energía térmica del horno y evitar el consumo adicional de energía que requiere la evaporación del agua libre presente en el material (Hewlett & Liska, 2019). Mantener la humedad dentro de los límites adecuados también favorece el funcionamiento estable del precalentador y facilita una transferencia de calor más efectiva durante las primeras etapas del proceso.

Posteriormente, la harina cruda se somete a un proceso de molienda fina con el fin de incrementar su superficie específica y además activar su reactividad química. La reducción del tamaño de partícula favorece el contacto íntimo entre los componentes minerales, acelerando las reacciones en fase sólida y líquida que ocurren durante la clinkerización (Taylor, 1997). Una finura adecuada contribuye a la formación homogénea de las fases minerales objetivo y a la optimización del consumo energético global del sistema (Neville, 2011).

Como componentes fundamentales de la mezcla cruda se encuentran:

- Óxido de calcio: CaO, cal, representado en la nomenclatura con "C".
- Óxido de silicio: SiO_2, sílica, sílice, representado con "S".
- Óxido de aluminio: Al2O3, alúmina, se representa con "A".
- Óxido de hierro: Fe2O3, se representa con "F".

Existen cuatro fases principales durante este proceso.

Etapa de silicato tricálcico (C_3S)

Etapa B-silicato dicálcico (B-C_2S)

Etapa aluminato tricálcico (C_3A)

Etapa solución sòlida de ferrito (C_4AF)

La etapa del C_3S es fundamental para obtener de forma rápida elevadas resistencias, pero también requiere del fraguado lento. Como propiedades y ventajas, el calor de fraguado es intermedio, su contracción de tipo moderada, y el comportamiento plástico no es bueno.

El C_3A reacciona vivamente con el agua y desarrolla un gran calor de fraguado. Este fraguado puede ser retardado por adición de yeso ($CaSO_4$). La resistencia no es elevada y se ha conseguido su grado máximo a las 24 horas. Ocasiona fuerte contracciones. Influye desfavorablemente sobre la estabilidad del sulfato y la del almacenaje del cemento.

El C_4AF reacciona también rápidamente con el agua, pero no tanto como el C_3A; también es sensiblemente menor su calor de fraguado. Influye de una manera favorable sobre la contracción, la facilidad de trabajarlo y la estabilidad frente a los sulfatos.

3.11 Etapas del proceso de clinkerización

El proceso de clinkerización se desarrolla de forma progresiva a lo largo del horno rotatorio y puede dividirse en varias etapas claramente diferenciadas.

3.11.1 Secado y precalentamiento

En la primera etapa del proceso, la mezcla cruda pasa por el sistema de precalentamiento y los ciclones, donde se calienta gradualmente hasta alcanzar temperaturas inferiores a 800 °C. Durante esta fase se elimina la humedad libre y se produce el calentamiento gradual del material mediante el aprovechamiento de los gases calientes, cuya procedencia es el horno rotatorio, lo que permite recuperar energía y mejorar la eficiencia térmica global del sistema (Hewlett & Liska, 2019). Este intercambio térmico contracorriente constituye uno de los elementos clave en el diseño moderno de plantas cementeras, al reducir significativamente el consumo específico de combustible.

3.11.2 Descarbonatación o calcinación

Entre aproximadamente 800 y 1000 °C tiene lugar la descomposición térmica del carbonato de calcio, según la reacción:

$CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2$

Esta reacción es fundamental en la química del cemento, ya que genera óxido de calcio (CaO) altamente reactivo, indispensable para la posterior formación de silicatos cálcicos (Taylor, 1997). Desde el punto de vista ambiental, la descarbonatación constituye una de las principales

fuentes de emisiones de dióxido de carbono en la industria cementera, debido a la liberación directa de CO_2 como producto de la reacción química, independientemente del combustible utilizado (Hewlett & Liska, 2019).

3.11.3 Formación de fases intermedias

En el intervalo aproximado de 1000 a 1250 °C, el CaO formado comienza a reaccionar progresivamente con los óxidos de silicio (SiO_2), aluminio (Al_2O_3) y hierro (Fe_2O_3), dando lugar a la formación de compuestos intermedios en fase sólida, entre ellos el silicato dicálcico (C_2S) y diversas fases alumináticas y ferríticas (Taylor, 1997). Estas reacciones preparan el sistema para la posterior formación del silicato tricálcico (C_3S) en la zona de máxima temperatura, donde se desarrolla una fase líquida transitoria que facilita la combinación química y la sinterización del clínker.

3.12 Zona de clinkerización o sinterización

Antes de abordar específicamente la clinkerización, es pertinente describir el fenómeno de sinterización desde la perspectiva de la ingeniería de materiales. La sinterización es un proceso termoactivado mediante el cual partículas sólidas, sometidas a temperaturas elevadas pero inferiores a su punto de fusión total, experimentan difusión atómica y formación de enlaces interparticulares, dando lugar a una estructura más densa y cohesionada (Taylor, 1997). En el caso del clínker, este fenómeno ocurre en presencia de una fase líquida transitoria que facilita la reacción

entre los constituyentes sólidos y promueve la formación de las fases minerales finales.

En el intervalo aproximado de 1000 a 1250 °C, el CaO generado durante la calcinación reacciona progresivamente en fase sólida con los óxidos de silicio (SiO_2), aluminio (Al_2O_3) y hierro (Fe_2O_3), dando lugar a la formación de compuestos intermedios, entre ellos el silicato dicálcico (C_2S) y diversas fases alumináticas y ferríticas (Taylor, 1997). Estas reacciones constituyen una etapa preparatoria para la zona de máxima temperatura, donde, al alcanzarse valores cercanos a 1450 °C, se desarrolla una fracción líquida significativa que favorece la combinación del CaO remanente con el C_2S para formar silicato tricálcico (C_3S), fase responsable del desarrollo temprano de resistencia en el cemento Portland (Hewlett & Liska, 2019; Neville, 2011). En la tabla 5 se presenta un resumen con la descripción de minerales presentes en el Clinker.

Tabla 5. Descripción de minerales presentes en el clínker.

Óxidos presentes en un clínker de Portland			
Nombre	**Composición**	**Peso Molecular**	**Fórmula abreviada**
Cal	CaO	56	C
Sílice	SiO2	60	S
Aluminio	Al2O3	102	A
Hierro	Fe2O3	160	F
Agua	H2O	18	H
Anhídrido sulfúrico	SO3	80	S
Magnesia	MgO	40	M
Sodio	Na2O	62	N
Potasio	K2O	94	K

Fuente: Elaboración propia

3.13 Reacciones de clinkerización

El proceso de formación del clínker comprende una secuencia de transformaciones fisicoquímicas progresivas en las que la mezcla cruda experimenta cambios estructurales y reacciones en fase sólida y parcialmente líquida, conduciendo a la obtención de un material con propiedades hidráulicas específicas para la fabricación del cemento Portland (Taylor, 1997; Hewlett & Liska, 2019). A medida que la temperatura se incrementa dentro del horno rotatorio, los constituyentes del crudo, principalmente $CaCO_3$, SiO_2, Al_2O_3 y Fe_2O_3, reaccionan de forma secuencial, primero mediante descarbonatación y posteriormente a través de combinaciones químicas controladas por fenómenos de difusión iónica y transferencia térmica.

Uno de los fenómenos fundamentales ocurre cuando el óxido de calcio (CaO), generado tras la calcinación, reacciona con la sílice (SiO_2) para formar silicatos cálcicos de naturaleza hidráulica. La proporción y tipo de estos compuestos dependen directamente de la composición química del crudo, expresada a través de los módulos químicos, así como de las condiciones térmicas y del tiempo de residencia en el horno (Taylor, 1997). Entre las fases formadas destacan el silicato tricálcico (C_3S) y el silicato dicálcico (C_2S), siendo el primero responsable del desarrollo temprano de resistencia y el segundo del incremento progresivo de resistencia a edades posteriores (Neville, 2011).

Para que estas reacciones se desarrollen eficientemente, es indispensable la formación de una fase líquida transitoria que facilite la movilidad iónica y la combinación química entre los óxidos. Desde el punto de vista termodinámico, la temperatura de fusión completa del sistema CaO–SiO_2 sería considerablemente elevada; sin embargo, en condiciones industriales, la presencia de óxidos fundentes como Al_2O_3 y Fe_2O_3 reduce la temperatura efectiva de formación de la fase líquida a valores cercanos a 1250–1450 °C, permitiendo la sinterización sin necesidad de alcanzar temperaturas extremas (Hewlett & Liska, 2019). Este fenómeno disminuye el requerimiento energético global del proceso y favorece la formación del C_3S.

Cuando la temperatura supera aproximadamente los 1250 °C, se inicia la formación significativa de fase líquida, lo que permite una mayor difusión iónica y la reacción del CaO con la sílice, la alúmina y el óxido férrico. Como resultado, se consolidan las principales fases minerales del clínker —C_3S, C_2S, C_3A y C_4AF— cuya proporción relativa determina las propiedades hidráulicas y el comportamiento del cemento durante su hidratación (Taylor, 1997; Neville, 2011).

El conjunto de estas reacciones que, se desarrollan en un estado semisólido con presencia de fase líquida parcial y bajo condiciones de alta temperatura, se conoce como reacciones de sinterización o clinkerización, constituyendo la etapa más crítica en la obtención del clínker y, por ende, en la producción del cemento Portland (Hewlett & Liska, 2019). Estas reacciones se llevan a cabo principalmente en el horno rotatorio, en un rango térmico aproximado de 900 a 1450 °C, donde la cinética de

reacción, el gradiente térmico y el tiempo de permanencia influyen directamente en la calidad mineralógica del producto final.

3.13.1 Formación de la belita (silicato dicálcico, C_2S)

La formación de la belita, conocida químicamente como silicato dicálcico (C_2S), constituye una de las primeras etapas en la generación de silicatos cálcicos durante la clinkerización. Desde el punto de vista estequiométrico, la reacción simplificada puede representarse como:

$$2CaO+SiO_2 \rightarrow 2CaO \cdot SiO_2 (C_2S)$$

En notación abreviada de Bogue:

$$2C+S \rightarrow C_2S_2$$

Esta reacción ocurre predominantemente en el intervalo de temperaturas comprendido entre aproximadamente 900 y 1200 °C, una vez que el carbonato de calcio se ha descompuesto completamente y el óxido de calcio (CaO) libre se encuentra disponible para reaccionar con la sílice (SiO_2) presente en la mezcla cruda (Taylor, 1997). El proceso se desarrolla principalmente en fase sólida, siendo controlado por mecanismos de difusión iónica en el estado sólido.

La belita se caracteriza por presentar una reactividad hidráulica moderada en comparación con el silicato tricálcico (C_3S). Durante la hidratación del cemento, el C_2S contribuye principalmente al desarrollo de resistencia mecánica a edades medias y tardías, debido a su cinética de reacción más lenta y a su menor liberación de calor de hidratación (Neville, 2011). Desde el punto de vista energético, su formación resulta

termodinámicamente más favorable que la del C_3S, ya que requiere temperaturas inferiores y menor contenido de CaO adicional, lo que implica un menor consumo energético relativo en el proceso de clinkerización (Hewlett & Liska, 2019).

3.13.2 Formación de la alita (silicato tricálcico, C_3S)

La alita, químicamente denominada silicato tricálcico (C_3S) se forma principalmente por reacción del silicato dicálcico (C_2S) con óxido de calcio (CaO) libre a altas temperaturas, en presencia de una fase líquida transitoria que facilita la difusión iónica. La reacción simplificada puede expresarse como:

$$C_2S+CaO \rightarrow C_3S$$

En notación abreviada de Bogue, la expresión se describe:

$$C_2S+C \rightarrow C_3S$$

Esta transformación se produce principalmente en la zona más caliente del horno rotatorio, donde se alcanzan temperaturas de entre 1250 y 1450 °C. En estas condiciones se forma una cantidad suficiente de fase líquida, la cual favorece la interacción y combinación de los componentes de la mezcla (Taylor, 1997; Hewlett & Liska, 2019). Esta fase cumple una función esencial, pues mejora la movilidad de los iones de calcio (Ca^{2+}) y facilita la transformación del silicato di cálcico (C_2S) en silicato tricálcico (C_3S).

Desde el punto de vista tecnológico, la formación de C_3S es determinante en la calidad del clínker, dado que esta fase es la principal responsable del rápido desarrollo de resistencia mecánica del cemento Portland

durante los primeros días de hidratación (Neville, 2011). No obstante, su estabilidad depende del régimen térmico y del enfriamiento posterior. Un enfriamiento lento o inadecuado puede favorecer la descomposición parcial del C_3S y su reconversión hacia C_2S y CaO libre, afectando negativamente las propiedades hidráulicas del producto final (Taylor, 1997). Por ello, el control de la temperatura máxima, el tiempo de residencia y la velocidad de enfriamiento constituyen parámetros críticos en la operación industrial del horno.

3.13.3 Formación del ferritoaluminato tetracálcico (C_4AF)

El ferritoaluminato tetracálcico (C_4AF) se forma por la reacción del óxido de calcio (CaO) con la alúmina (Al_2O_3) y el óxido férrico (Fe_2O_3) presentes en la mezcla cruda. En notación abreviada de Bogue, la reacción global simplificada puede expresarse como:

$$4C+F+A \rightarrow C_4AF$$

En términos químicos:

$$4CaO+Al_2O_3+Fe_2O_3 \rightarrow 4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$$

Esta fase comienza a desarrollarse en el intervalo aproximado de 1200 a 1350 °C, en condiciones donde la formación de fase líquida ya es significativa (Taylor, 1997). El C_4AF se integra principalmente en la matriz intersticial del clínker y cumple un papel importante como agente fundente, ya que contribuye a disminuir la temperatura efectiva de fusión del sistema $CaO–SiO_2–Al_2O_3–Fe_2O_3$, favoreciendo la sinterización y la formación del C_3S (Hewlett & Liska, 2019).

Desde el punto de vista hidráulico, el C_4AF posee una reactividad relativamente baja en comparación con el C_3S y el C_2S, por lo que su contribución directa a la resistencia mecánica del cemento es limitada (Neville, 2011). Sin embargo, su presencia es fundamental proporcionando estabilidad mineralógica y aumentando la eficiencia del proceso de clinkerización. Además, influye en la coloración característica del cemento Portland convencional, debido al contenido de hierro, y puede afectar el comportamiento del material frente a ciertos agentes químicos agresivos, especialmente en medios sulfatados (Taylor, 1997).

3.13.4 Formación del aluminato tricálcico (C_3A)

El aluminato tricálcico (C_3A) se forma por la reacción del óxido de calcio (CaO) con la alúmina (Al_2O_3) presente en la mezcla cruda. La reacción simplificada puede expresarse como:

$$3C+A \rightarrow C_3A$$

En términos químicos, la reacción química se describe como:

$$3CaO+Al_2O_3 \rightarrow 3CaO \cdot Al_2O_3$$

El C_3A se forma principalmente cuando la temperatura supera los 1200 °C en el horno. En estas condiciones, la fase líquida favorece el desplazamiento de los iones y facilita la reacción entre los óxidos presentes en la mezcla (Taylor, 1997). Este compuesto se encuentra, en su mayor parte, en los espacios existentes entre los principales minerales del clínker, acompañado del C_4AF. La cantidad de C_3A formada depende directamente de la alúmina disponible y del módulo de alúmina (AM) de la materia prima.

Desde el punto de vista de su comportamiento frente al agua, el C_3A es el componente más reactivo del clínker. Al entrar en contacto con el agua durante la hidratación del cemento, reacciona casi de inmediato, libera una cantidad considerable de calor e interviene en el fraguado inicial (Neville, 2011). No obstante, cuando se encuentra en proporciones elevadas, puede aumentar excesivamente el calor generado y disminuir la resistencia del cemento frente a los sulfatos, debido a que el C_3A puede producir reacciones expansivas al interactuar con los iones sulfato (Hewlett & Liska, 2019). Por esta razón, su contenido debe ser cuidadosamente controlado en cementos destinados a aplicaciones masivas o a ambientes químicamente agresivos.

En conjunto, la formación del C_3S, C_2S, C_3A y C_4AF constituye el fenómeno global de sinterización o clinkerización, mediante el cual la mezcla cruda se transforma en clínker, un material granular compuesto por fases minerales bien definidas cuya proporción, morfología y distribución determinan el comportamiento hidráulico, térmico y mecánico del cemento Portland (Taylor, 1997; Hewlett & Liska, 2019).

A continuación, se presenta la tabla 6 con los rangos térmicos y formación de fases del clínker:

Tabla 6. Rangos térmicos y formación de fases del clínker.

Rango de temperatura (°C)	**Fenómeno principal**	**Reacción dominante**	**Fase formada**	**Importancia técnica**
600 – 900	Descarbonatación inicial	$CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2$	CaO libre	Genera óxido de calcio reactivo

900 – 1200	Reacciones en estado sólido	$2C + S \rightarrow C_2S$	Belita (C_2S)	Aporta resistencia mecánica tardía
1200 – 1250	Inicio de fusión parcial	Formación de fase líquida	—	Facilita difusión iónica
1250 – 1350	Reacciones en fase semisólida	$4C + A + F \rightarrow C_4AF$	Ferrito aluminato tetracálcico	Actúa como fundente
1250 – 1400	Formación de aluminatos	$3C + A \rightarrow C_3A$	Aluminato tricálcico	Controla fraguado y calor
1350 – 1450	Clinkerización principal	$C_2S + C \rightarrow C_3S$	Alita (C_3S)	Responsable de resistencia temprana
>1450	Sobrecalentamiento	Descomposición parcial	CaO libre	Indeseable (afecta calidad)

Fuente: Elaboración propia

Nota. El rango óptimo de clinkerización industrial se sitúa entre 1400 y 1450 °C, donde se maximiza la formación de alita sin degradar la estructura del clinker.

3.14 Resumen principal de las etapas

Zona de precalentamiento

Rango térmico aproximado: 300 – 900 °C
Ubicación: Torre de ciclones y entrada al horno

En esta zona, el crudo intercambia calor con los gases calientes provenientes del horno, donde se producen principalmente:

- Eliminación del agua que aún permanece en el material.
- Pérdida del agua que forma parte de la estructura de los minerales arcillosos.
- Inicio de reacciones sólido–sólido.

Aunque esta zona suele encontrarse mayoritariamente fuera del cuerpo del horno (en la torre de ciclones), se considera parte integral del sistema de clinkerización debido a su impacto directo en la eficiencia energética global.

Zona de descarbonización (calcinación)

Rango térmico aproximado: 850 – 1000 °C
Ubicación: Pre calcinador y tramo inicial del horno

En esta etapa, los carbonatos, principalmente el carbonato de calcio, se descomponen debido al aumento de la temperatura. Este proceso requiere una gran cantidad de energía, por lo que constituye una de las fases de mayor consumo térmico. En los hornos modernos equipados con pre calcinador, la mayor parte de esta descomposición ocurre antes de que el material llegue a la zona de temperaturas más elevadas del horno.

Zona de transición

Rango térmico aproximado: 1000 – 1250 °C
Ubicación: Zona media del horno

En esta etapa comienzan a desarrollarse reacciones químicas más complejas, como la formación de los primeros silicatos de calcio, la aparición gradual de una fase líquida y el reordenamiento de los óxidos presentes. En términos sencillos, esta zona marca el cambio de una mezcla

que está formada principalmente por sólidos a otra en la que parte del material comienza a fundirse.

Zona de sinterización o clinkerización

Rango térmico aproximado: 1250 – 1450 °C
Ubicación: Zona de llama del horno

Es la región de máxima temperatura y el núcleo del proceso de clinkerización.

En esta etapa se produce la mayor cantidad de alita (C_3S), se consolidan las fases finales del clínker y una parte del material alcanza un estado de fusión controlada.

El control de la temperatura en esta zona es fundamental. Si es demasiado baja, se obtiene un clínker con poca capacidad de reacción; en cambio, si es excesiva, pueden presentarse problemas en el horno, como la formación de anillos y el desgaste del revestimiento refractario.

Zona de enfriamiento del clinker

Rango térmico aproximado: 1400 → 100–200 °C
Ubicación: Enfriador de clinker

Aunque esta zona se encuentra fuera del horno, cumple una función fundamental en el proceso, ya que permite:

- Conservar la composición mineralógica del clínker.
- Recuperar parte del calor generado durante la cocción.
- Favorecer la capacidad del cemento para reaccionar con el agua.

Además, un enfriamiento rápido ayuda a mantener la alita en una forma más reactiva y evita cambios no deseados en los minerales mientras el clínker se solidifica.

3.15 Elementos de cierre

1. ¿Cómo contribuyen las reacciones que ocurren en estado sólido y líquido a la formación de los principales componentes del clínker, como la alita, la belita, el aluminato y el ferrito?
2. ¿Cómo influyen la temperatura máxima alcanzada en el horno y el tiempo de permanencia del material en la velocidad de formación de la alita (C_3S)?
3. ¿Qué función cumple la fase líquida en el movimiento de los iones y en la estabilidad de los minerales que conforman el clínker?
4. ¿Cómo influye la cantidad de CaO, SiO_2, Al_2O_3 y Fe_2O_3 presente en la mezcla cruda en la formación y calidad del clínker?
5. ¿Qué cambios químicos experimenta el carbonato de calcio ($CaCO_3$) durante su descomposición por efecto del calor y cómo influyen en las siguientes etapas de formación del clínker?
6. ¿Cómo afectan componentes como el MgO, los álcalis y el SO_3 a la formación y estabilidad de los minerales del clínker?
7. ¿Qué cambios se producen en la formación del clínker cuando se utilizan materias primas naturales en comparación con materiales alternativos o residuos industriales?
8. ¿Cómo afecta la rapidez con la que se enfría el clínker a la estabilidad de los minerales formados durante su producción?

9. ¿Cómo influyen las reacciones ocurridas durante la formación del clínker en la consistencia, el fraguado y la resistencia del cemento Portland al mezclarse con agua?
10. ¿Cómo se pueden mejorar las reacciones de formación del clínker para disminuir el consumo de energía y las emisiones de CO_2 en la industria del cemento?

CAPÍTULO IV

4 PROCESO DE PRODUCCIÓN Y FABRICACIÓN DEL CEMENTO

4.1 Resumen

El proceso de producción y fabricación del cemento constituye el núcleo tecnológico de la industria cementera y uno de los pilares fundamentales de la ingeniería de materiales y de la ingeniería química aplicada a los materiales de construcción. En este capítulo se analizan de manera sistemática las etapas que intervienen en la obtención del cemento, desde la preparación y homogenización de las materias primas hasta la molienda final y el almacenamiento del producto terminado.

Se aborda con especial énfasis el proceso de clinkerización, considerado la fase más crítica del sistema productivo, debido a las complejas transformaciones fisicoquímicas que ocurren a altas temperaturas y que determinan la formación de las principales fases minerales responsables del comportamiento hidráulico del cemento. Asimismo, se estudian los distintos métodos de fabricación (vía seca, vía semi-seca y vía húmeda), sus diferencias operativas, ventajas, limitaciones y su evolución hacia procesos más eficientes energéticamente.

El capítulo también incorpora una visión industrial y ambiental del proceso, considerando aspectos como el consumo energético, las emisiones asociadas a la producción de clinker, el control de calidad del proceso y del producto, y la incorporación de adiciones minerales como estrategia para mejorar la sostenibilidad del cemento. De este modo, se ofrece una

visión integral que articula fundamentos científicos, criterios técnicos e implicaciones ambientales del proceso de fabricación del cemento.

4.2 Esquema general del capítulo

1. Introducción al proceso de fabricación del cemento
2. Materias primas y preparación del crudo

- Tipos de materias primas
- Trituración, dosificación y molienda
- Homogenización del crudo

3. Métodos de fabricación del cemento

- Proceso por vía seca
- Proceso por vía semi-seca
- Proceso por vía húmeda

4. Proceso de clinkerización

- Precalentamiento y descarbonatación
- Zona de clinkerización
- Enfriamiento del clinker

5. Transformaciones químicas y formación de fases en la industrialización del cemento.
6. Molienda final del cemento.

- Adición de yeso y otros componentes
- Control de finura

7. Almacenamiento, ensacado y despacho del cemento.
8. Control de calidad en el proceso de fabricación del cemento.
9. Consideraciones energéticas y ambientales del proceso cementero

4.3 Preguntas de enfoque

¿Describa las etapas fundamentales del proceso de fabricación del cemento y cómo se relacionan entre sí?

¿Por qué la clinkerización es considerada la fase más crítica del proceso productivo?

¿Qué diferencias existen entre los métodos de fabricación del cemento y cómo influyen en la eficiencia del proceso?

¿Cómo afectan las condiciones operativas del horno a la formación de las fases del clinker?

¿Qué impacto ambiental tiene la producción de cemento y qué estrategias se aplican para mitigarlo?

4.4 Objetivos y/o resultados de aprendizaje

Al finalizar el estudio de este capítulo, el lector/estudiante será capaz de:

- Describir de manera ordenada y técnica las etapas del proceso de producción y fabricación del cemento.
- Explicar los principios fisicoquímicos que intervienen durante la clinkerización y cómo estos favorecen la formación de los principales minerales del clínker.

- Comparar los distintos métodos utilizados para fabricar cemento, considerando sus ventajas, limitaciones técnicas y consumo de energía.
- Comprender cómo las condiciones de operación, como la temperatura y el tiempo de permanencia, influyen en la calidad final del cemento.
- Reconocer los principales impactos ambientales generados durante la fabricación del cemento y las medidas que aplica la industria para reducirlos.

4.5 Competencias a desarrollar

- **Competencia técnica:** Comprensión del proceso industrial de fabricación del cemento.
- **Competencia analítica:** Interpretación de las transformaciones químicas y térmicas en el proceso de clinkerización.
- **Competencia aplicada:** Capacidad para relacionar parámetros operativos de la calidad del producto final.
- **Competencia ambiental:** Evaluación del impacto ambiental del proceso cementero y de sus alternativas de mejora.
- **Competencia profesional:** manejo de criterios técnicos utilizados en la industria cementera y en el control de calidad.

4.6 Problemas a resolver

- Determinar cómo la variación en la composición del crudo afecta la formación de las fases del clinker.
- Analizar la influencia de la temperatura y el tiempo de residencia en el horno sobre la calidad del clinker.
- Comparar el consumo energético entre los distintos métodos de fabricación del cemento.
- Evaluar las causas más comunes de defectos en el clinker y su impacto en las propiedades del cemento.
- Proponer alternativas técnicas para reducir las emisiones de CO_2 asociadas a la producción de cemento.

4.7 Introducción al proceso de fabricación del cemento

La fabricación del cemento (en particular, el cemento Portland) puede entenderse como una secuencia industrial integrada cuyo propósito es transformar una mezcla cuidadosamente dosificada de materias primas —principalmente calizas y materiales arcillosos— en un producto pulverulento con capacidad hidráulica, es decir, capaz de desarrollar resistencia mecánica al reaccionar con el agua. Durante el proceso de fabricación del cemento se realizan varias operaciones básicas, como la trituración, la molienda, la clasificación, la mezcla y el transporte de los materiales sólidos. Estas actividades se complementan con una etapa termoquímica más compleja, conocida como línea de piro procesa-

miento, en la cual se forma el clínker dentro del horno rotatorio. Finalmente, el clínker se muele junto con yeso y, según el tipo de cemento que se desea producir, se incorporan otras adiciones minerales para regular su reactividad y mejorar sus propiedades.

Desde una perspectiva didáctica, el proceso se resume en cuatro etapas principales:

- Explotación y preparación de materias primas,
- Preparación del crudo (raw meal),
- clínkerización (precalentamiento–calcinación–sinterización y enfriamiento) y
- Molienda final del cemento.

Esta estructura se utiliza con frecuencia porque relaciona directamente la tecnología empleada en la planta con el control de calidad del producto. De este modo, permite identificar en qué parte del proceso se producen alteraciones que afectan características importantes, como la finura, el tiempo de fraguado, la resistencia mecánica y la estabilidad del volumen.

En la industria actual, se utiliza principalmente el proceso por vía seca con torres de ciclones o precalentadores y, en muchos casos, con pre calcinadores, debido a que consume menos energía que los antiguos procesos por vía húmeda. La razón es sencilla: mientras menor sea la energía necesaria para eliminar el agua y calentar el material crudo hasta alcanzar la temperatura de reacción, mayor será la eficiencia térmica del

sistema. Esta actualización tecnológica no responde únicamente a la reducción de costos, sino también a la necesidad de disminuir los efectos ambientales causados por la producción de cemento.

El estudio de este proceso no se limita a su funcionamiento industrial, pues la fabricación del cemento depende de equilibrios fisicoquímicos y de la velocidad de las reacciones que ocurren en el sistema $CaO–SiO_2–Al_2O_3–Fe_2O_3$. La formación de los principales minerales del clínker, como la alita, la belita, el aluminato y el ferrito-aluminato, está determinada por la composición del crudo, la temperatura del horno, el tiempo de permanencia y la velocidad de enfriamiento. En términos sencillos, la forma en que se produce el cemento determina su comportamiento durante el uso. Por ello, esta sección conecta el estudio de las materias primas con las reacciones de hidratación.

Finalmente, cualquier introducción moderna al proceso debe reconocer que la producción cementera constituye también un sistema regulado por exigencias de control de emisiones y gestión de material particulado, con fuentes dispersas a lo largo de la planta. En particular, la etapa de pirolínea concentra una proporción significativa de los desafíos ambientales, tanto por las emisiones de CO_2 derivadas de la descarbonatación del $CaCO_3$ como por el consumo energético del horno rotatorio (Hewlett & Liska, 2019). Por ello, la eficiencia energética, la captura de polvo y el desempeño ambiental deben considerarse componentes inseparables del diseño y operación del proceso cementero contemporáneo.

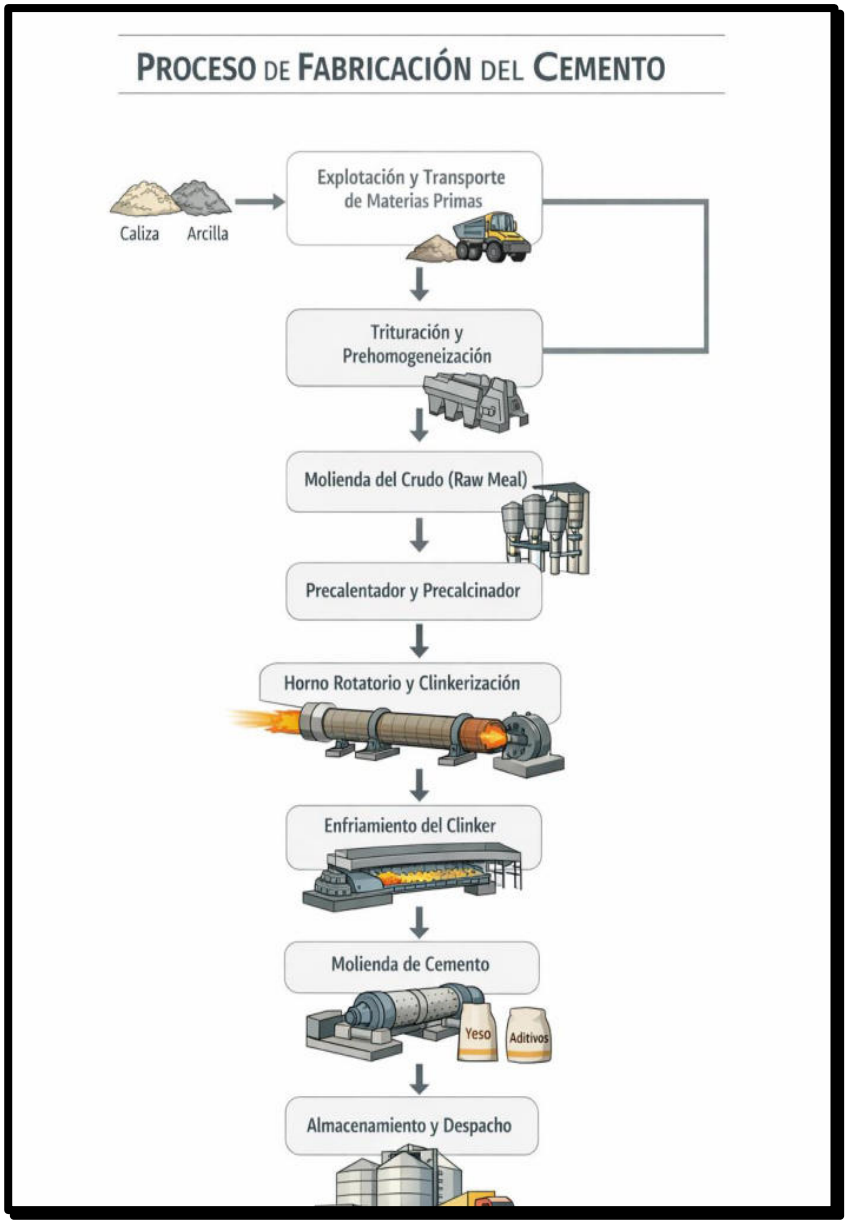


Figura 6. Proceso de fabricación del cemento.

Fuente: Elaboración propia.

4.8 Preparación del crudo

La calidad y el desempeño del cemento Portland están directamente condicionados por la selección, proporción y grado de homogeneidad de las materias primas empleadas en su fabricación. Desde una perspectiva de ingeniería de procesos, el objetivo de esta etapa consiste en producir una mezcla cruda (raw meal) con composición química estrictamente controlada, capaz de reaccionar de manera eficiente durante la clinkerización para generar las fases minerales deseadas del clínker (Hewlett & Liska, 2019; Taylor, 1997). El control de esta composición se realiza comúnmente mediante el ajuste de los módulos químicos —módulo de saturación de cal (LSF), módulo de sílice (SM) y módulo de alúmina (AM)— que gobiernan la formación de C_3S, C_2S, C_3A y C_4AF.

La piedra caliza constituye la materia prima principal, aportando el carbonato de calcio necesario para la formación de CaO. Su explotación se realiza en canteras mediante técnicas de voladura controlada, seguidas de operaciones de trituración primaria y secundaria para reducir el tamaño del material a rangos adecuados para su manejo y posterior molienda (Wills & Finch, 2016). Tras la extracción, el material es transportado a la planta cementera para su almacenamiento en pilas de prehomogeneización, donde se busca reducir la variabilidad natural del yacimiento.

Los materiales correctores —tales como arcillas, bauxitas, minerales de hierro o subproductos siderúrgicos— se incorporan con el propósito de ajustar la composición del sistema multicomponente $CaO–SiO_2–Al_2O_3–$

Fe_2O_3 a los requerimientos del proceso y a las especificaciones del producto final (Taylor, 1997). Aunque su proporción es significativamente menor en comparación con la caliza, su influencia en la formación de fase líquida y en la estabilidad mineralógica del clínker es determinante.

La preparación del crudo comprende un conjunto de operaciones unitarias orientadas a la reducción de tamaño, secado, molienda fina, mezcla y homogenización de las materias primas antes de su ingreso al sistema de precalentamiento. La molienda del crudo, usualmente realizada en molinos verticales o molinos de bolas con separación neumática, tiene como objetivo incrementar la superficie específica y garantizar una distribución granulométrica que favorezca la reactividad en el horno (McCabe et al., 2005; Hewlett & Liska, 2019). La reducción del tamaño de partícula mejora el contacto íntimo entre los constituyentes sólidos y facilita las reacciones en fase sólida durante la clinkerización.

Las materias primas son secadas y molidas conjuntamente en proporciones estrictamente dosificadas, frecuentemente bajo control automatizado mediante analizadores en línea (XRF), para producir la harina de alimentación al horno con la composición química y propiedades físicas requeridas. Posteriormente, la harina es almacenada en silos de homogeneización equipados con sistemas de aireación o mezcla mecánica, cuyo propósito es minimizar fluctuaciones composicionales y asegurar una alimentación estable al sistema de precalentamiento (Hewlett & Liska, 2019). Esta etapa resulta crítica, ya que variaciones en la composición del crudo pueden traducirse en inestabilidades operativas y desviaciones en la calidad del clínker.

4.8.1 Trituración

La trituración constituye la primera operación unitaria en la preparación del crudo para la fabricación de cemento Portland. El objetivo principal de esta etapa es disminuir el tamaño de las rocas extraídas de la cantera hasta obtener fragmentos que puedan transportarse, almacenarse, prehomogeneizarse y molerse con mayor facilidad. Para lograrlo, el material se somete a diferentes fuerzas mecánicas, como la compresión, el impacto y la abrasión, que permiten romper su estructura y reducir progresivamente su tamaño (McCabe et al., 2005; Wills & Finch, 2016).

En la industria cementera, la trituración primaria suele realizarse con trituradoras de mandíbulas o giratorias, diseñadas para procesar los grandes bloques de caliza obtenidos mediante voladuras controladas. Luego, en las etapas de trituración secundaria o terciaria, se utilizan trituradoras de impacto o de rodillos para reducir el material hasta alcanzar tamaños generalmente inferiores a 25–50 mm, apropiados para la posterior molienda del crudo (Wills & Finch, 2016). La elección del equipo más adecuado depende de factores como la dureza y abrasividad del material, así como de la cantidad que se necesita procesar.

Desde una perspectiva energética, la reducción de tamaño puede analizarse mediante modelos empíricos clásicos como las leyes de Rittinger, Kick y Bond, que relacionan el consumo específico de energía con el cambio de tamaño de partícula (McCabe et al., 2005). En particular, la ecuación de Bond es ampliamente utilizada para estimar la energía re-

querida en procesos de conminución industrial, siendo un parámetro relevante en la optimización del consumo energético global de la planta cementera.

Desde el punto de vista normativo, el tamaño de las partículas del material triturado puede controlarse mediante un análisis de tamizado. Este procedimiento permite conocer cómo se distribuyen las partículas según su tamaño y comprobar si el material cumple con las condiciones requeridas para las siguientes etapas del proceso. Para realizar este análisis pueden tomarse como referencia normas como la ASTM C136/C136M y la EN 933-1, utilizada en el ámbito europeo. Aunque ambas normas fueron desarrolladas principalmente para evaluar agregados, sus principios de clasificación por tamaños también pueden aplicarse al control de materias primas sólidas utilizadas en diferentes procesos industriales. Asimismo, la caracterización química posterior del material triturado suele realizarse mediante análisis por fluorescencia de rayos X (XRF), siguiendo lineamientos como los descritos en la norma ASTM C114 para análisis químico de cementos hidráulicos.

El adecuado control de la trituración no solo influye en la eficiencia de la molienda posterior, sino también en la estabilidad composicional del crudo. Una distribución granulométrica homogénea favorece la mezcla uniforme en pilas de prehomogeneización y reduce variaciones en la alimentación al molino, contribuyendo indirectamente a la calidad final del clínker (Hewlett & Liska, 2019). Por tal motivo, la trituración no debe entenderse únicamente como una etapa preliminar, sino como un eslabón estratégico dentro del esquema integral de control del proceso cementero.

4.8.2 Dosificación

Una vez trituradas, las materias primas se dosifican en proporciones precisas mediante sistemas de alimentación controlados (básculas dosificadoras), con base en la composición química determinada por análisis de laboratorio o sistemas en línea (XRF). La dosificación correcta es crítica para mantener constantes los parámetros químicos del crudo.

4.8.3 Molienda del crudo

La molienda del crudo constituye una operación unitaria de conminución fina cuyo objetivo es reducir el tamaño de partícula de las materias primas previamente trituradas hasta alcanzar una finura adecuada para su posterior transformación termoquímica en el horno rotatorio. En la industria cementera moderna, esta etapa se realiza principalmente en molinos verticales de rodillos de modelos VRM, Vertical Roller Mills o en molinos de bolas con sistemas de clasificación neumática integrados (Hewlett & Liska, 2019).

Desde el punto de vista mecánico, la reducción de tamaño en esta etapa se produce por combinación de compresión, cizallamiento e impacto, dependiendo del tipo de equipo utilizado. Los molinos verticales operan mediante un lecho de material comprimido entre rodillos y una mesa giratoria, lo que permite alta eficiencia energética y secado simultáneo mediante gases calientes del horno. En contraste, los molinos de bolas emplean impacto y fricción generados por cuerpos moledores en rotación, siendo sistemas robustos, aunque generalmente con mayor consumo específico de energía (Wills & Finch, 2016; McCabe et al., 2005).

El control de la finura es un parámetro crítico del proceso. Industrialmente, se establecen residuos típicos del orden del 10–15 % en el tamiz de 90 μm, aunque este valor puede variar según el diseño de planta y la reactividad deseada del crudo (Hewlett & Liska, 2019). El análisis granulométrico puede determinarse mediante métodos de tamizado en seco siguiendo principios similares a los establecidos en normas como ASTM C136/C136M y EN 933-1, mientras que la superficie específica puede evaluarse por métodos de permeabilidad al aire tipo Blaine, conforme a ASTM C204, cuando se requiere una caracterización más precisa de la finura.

Una molienda adecuada del crudo permite obtener partículas con la finura necesaria para favorecer las siguientes condiciones:

- Una calcinación más uniforme, debido a que aumenta la superficie de contacto entre el óxido de calcio (CaO) y los demás óxidos presentes en la mezcla.
- Una formación más eficiente de los principales minerales del clínker, ya que facilita las reacciones que ocurren en las fases sólida y líquida durante la sinterización (Taylor, 1997).
- Una menor presencia de partículas sin reaccionar o de núcleos de cal libre dentro del horno, lo que favorece la estabilidad del proceso y permite obtener un producto final con una composición mineralógica más uniforme.

Desde una perspectiva energética, la molienda representa una fracción significativa del consumo eléctrico total de la planta cementera, por lo

que la optimización del tamaño de partícula y del sistema de clasificación resulta fundamental para equilibrar reactividad y eficiencia energética (McCabe et al., 2005; Hewlett & Liska, 2019).

4.8.4 Homogeneización del crudo

La homogeneización del crudo constituye una etapa estratégica en la fabricación del cemento, cuyo propósito es reducir la variabilidad química inherente a las materias primas naturales y garantizar una alimentación estable y uniforme al sistema de clinkerización. Debido a la heterogeneidad geológica de la caliza y los materiales correctores, incluso pequeñas fluctuaciones composicionales pueden generar desviaciones significativas en los módulos químicos del crudo y, en consecuencia, en la formación de las fases del clínker (Hewlett & Liska, 2019; Taylor, 1997).

Desde el punto de vista de la ingeniería de procesos, la homogeneización se realiza en silos diseñados para mezclar grandes volúmenes de harina cruda mediante sistemas neumáticos de aireación, fluidización o mezcla mecánica controlada. En los sistemas neumáticos, las corrientes de aire a presión provocan el movimiento del material en patrones definidos que favorecen la redistribución y el mezclado por gradientes de densidad y flujo (McCabe et al., 2005). El objetivo es reducir la desviación estándar de la composición química, especialmente del CaO, SiO_2, Al_2O_3 y Fe_2O_3, a valores compatibles con la estabilidad operativa del horno.

Una mezcla de crudo bien homogeneizada ayuda a mantener estable la temperatura del horno rotatorio, ya que conserva una composición química uniforme y, por lo tanto, requiere condiciones de reacción más

constantes, además reduce la probabilidad de formación de clínker de baja calidad, asociado a variaciones en la saturación de cal o en la proporción de fase líquida y disminuye problemas operativos como formación de anillos, incrustaciones o acumulaciones internas en la pirolínea, fenómenos relacionados con inestabilidades químicas y térmicas (Hewlett & Liska, 2019).

Desde una perspectiva estadística, la homogeneización puede interpretarse como un proceso de reducción de variabilidad, donde la mezcla de múltiples capas o corrientes de material disminuye la amplitud de fluctuaciones composicionales iniciales. Esta estabilización es fundamental para asegurar una clinkerización eficiente y una calidad mineralógica consistente del producto final (Taylor, 1997).

4.8.5 Control químico del crudo

El control del crudo se basa en índices empíricos que relacionan los principales óxidos presentes:

- Factor de saturación de cal (LSF)
- Módulo de sílice (SM)
- Módulo de alúmina (AM)

Estos parámetros permiten anticipar el comportamiento del crudo durante la clinkerización y ajustar la dosificación para obtener un clinker con propiedades hidráulicas adecuadas (Lea, 2019).

4.9 Métodos de fabricación del cemento

Históricamente, el desarrollo de la producción de clinker fue cambiando desde sistemas húmedos a secos, con los pasos intermedios de sistemas semihúmedos y semisecos, con el objetivo de aumentar la eficiencia del proceso.

Los sistemas húmedos permitían un manejo más fácil de los materiales crudos, porque permitían homogeneizar adecuadamente aun en aquellos casos de contar con materias primas muy variables.

Con el avance tecnológico, fue posible preparar mezclas crudas homogéneas, utilizando procesos secos, sin necesidad de adicionar agua para formar la pasta ("slurry").

La principal ventaja de los procesos secos sobre los húmedos es el muy inferior consumo de combustible, y por lo tanto el muy inferior costo. En la actualidad la elección de un proceso húmedo es solo factible bajo condiciones muy particulares de los materiales crudos.

En la práctica industrial, los "métodos" de fabricación se distinguen principalmente por el estado físico del crudo que alimenta el sistema térmico (horno) y, por tanto, por el consumo energético asociado a calentar y/o evaporar agua. Aunque hoy predomina la vía seca con precalentador y precalcinador, es importante comprender los cuatro esquemas clásicos porque explican configuraciones de planta aún existentes y criterios de selección tecnológica.

4.9.1 Proceso por vía seca

El proceso de fabricación de cemento por vía seca constituye el método predominante en la industria contemporánea debido a su elevada eficiencia energética y su compatibilidad con sistemas modernos de control ambiental. En este esquema, el crudo se prepara en forma de harina seca (raw meal) finamente molida, la cual es alimentada al sistema de precalentamiento y posteriormente al horno rotatorio para su transformación en clínker (Hewlett & Liska, 2019; Taylor, 1997).

En los sistemas convencionales históricos, la harina cruda seca se alimentaba directamente a hornos rotatorios largos equipados con intercambiadores internos. Sin embargo, el diseño moderno incorpora torres de ciclones precalentadores y, en la mayoría de los casos, un precalcinador, lo que permite realizar una parte sustancial del intercambio térmico y de la descarbonatación antes de que el material ingrese al horno rotatorio principal (Schneider et al., 2011; Hewlett & Liska, 2019).

Secuencia típica del proceso por vía seca

1. Trituración y prehomogeneización: Las materias primas son trituradas y almacenadas en patios de prehomogeneización equipados con sistemas stacker–reclaimer, cuyo propósito es reducir la variabilidad composicional inicial.
2. Molienda y secado del crudo: La mezcla se seca y muele en molinos verticales de rodillos o molinos de bolas con separadores dinámicos, utilizando gases calientes provenientes del horno o del enfriador de clínker para mejorar la eficiencia térmica del sistema (Hewlett & Liska, 2019).

3. Homogeneización en silos: La harina cruda se almacena y mezcla en silos mediante sistemas neumáticos o mecánicos. Este procedimiento permite mantener una composición uniforme antes de enviar el material a la etapa de calentamiento.
4. Torre de precalentamiento o ciclones: El material crudo desciende por la torre mientras los gases calientes circulan en sentido contrario. Este intercambio permite aprovechar el calor de los gases y elevar la temperatura del crudo hasta aproximadamente 800–900 °C antes de su ingreso al horno (Taylor, 1997).
5. Precalcinador: Cuando la planta dispone de este equipo, una parte importante del carbonato de calcio ($CaCO_3$) se descompone antes de entrar al horno. Para ello, se emplea combustible adicional, lo que disminuye la cantidad de calor que debe suministrarse posteriormente en el horno rotatorio.
6. Horno rotatorio: Dentro del horno, el material alcanza temperaturas aproximadas de 1250 a 1450 °C. En estas condiciones ocurre la sinterización y se forman los principales minerales que componen el clínker.
7. Enfriador de clínker: Después de salir del horno, el clínker pasa generalmente por un enfriador de parrilla. Este equipo reduce rápidamente su temperatura, recupera parte del calor para reutilizarlo en el proceso y ayuda a conservar la composición mineralógica alcanzada durante la cocción.
8. Molienda final del cemento: Una vez enfriado, el clínker se muele junto con yeso y, según el tipo de cemento que se desea fabricar,

con otras adiciones minerales. Esta etapa permite regular el fraguado y ajustar las propiedades mecánicas e hidráulicas del producto final.

Ventajas que presenta el proceso por vía seca

- **Mayor aprovechamiento de la energía**, porque no es necesario gastar calor en evaporar grandes cantidades de agua, como ocurre en el proceso por vía húmeda.
- **Mayor capacidad de producción**, gracias al intercambio eficiente de calor que se produce entre el material crudo y los gases calientes dentro de las torres de ciclones.
- **Mejor incorporación de tecnologías modernas**, con los sistemas automáticos de control del proceso, los equipos reducen las emisiones y los mecanismos de recuperación y reutilización del calor generado (Schneider et al., 2011).

Limitaciones y retos operativos

- Mayor presencia de polvo fino: Este proceso produce una cantidad considerable de partículas suspendidas, por lo que es necesario contar con equipos eficientes que las recojan y filtren para evitar su liberación al ambiente.
- Mayor sensibilidad a los cambios en la materia prima: Las variaciones en la composición química del crudo pueden afectar el funcionamiento del proceso y la calidad del clínker. Por ello, es fundamental mezclar correctamente los materiales y controlar su composición antes de introducirlos al horno (Hewlett & Liska, 2019).

En términos contemporáneos, la vía seca con precalentador y precalcinador se considera el estándar industrial por su superior desempeño energético, menor consumo específico de combustible y mejor comportamiento ambiental en comparación con procesos históricos por vía húmeda (Hewlett & Liska, 2019; Schneider et al., 2011; Taylor, 1997).

4.9.2 Proceso por vía semiseca

El proceso de fabricación de cemento por vía semiseca puede considerarse una variante intermedia entre la vía seca y la vía húmeda. En este método, se parte de una harina cruda seca finamente molida que posteriormente es humedecida con una cantidad limitada de agua (generalmente del orden de 10–15 %) con el propósito de formar gránulos o nódulos (pellets) que mejoran la manejabilidad del material y su comportamiento durante la alimentación al sistema térmico (Hewlett & Liska, 2019).

Desde el punto de vista operativo, la harina seca es sometida a un proceso de granulación o nodulización en discos o tambores granuladores, donde la adición controlada de agua permite aglomerar las partículas finas mediante fuerzas capilares y cohesivas. Este tratamiento reduce la generación de polvo y facilita la manipulación mecánica del material, particularmente en configuraciones de hornos que no contaban con sistemas avanzados de transporte neumático (Taylor, 1997).

Históricamente, el proceso por vía semiseca se utilizó en combinación con sistemas de precalentamiento de parrilla, en los cuales los gránulos eran alimentados sobre una parrilla móvil donde se producía el intercambio térmico inicial con los gases calientes provenientes del horno

rotatorio. En esta etapa se iniciaba el secado residual y el precalentamiento del material antes de su ingreso al horno para completar la descarbonatación y la sinterización (Hewlett & Liska, 2019).

En términos energéticos, la vía semiseca representó una mejora respecto a la vía húmeda, ya que reducía significativamente la energía requerida para evaporar grandes cantidades de agua presentes en la suspensión acuosa del crudo. Sin embargo, su eficiencia térmica es inferior a la del proceso moderno por vía seca con torres de ciclones y precalcinadores, lo que ha llevado a su progresivo reemplazo en instalaciones contemporáneas (Schneider et al., 2011).

Desde una perspectiva de ingeniería de procesos, la vía semiseca presenta ventajas asociadas a una mejor manejabilidad del material y menor generación de polvo en comparación con la vía seca primitiva. No obstante, implica una complejidad adicional en el control del contenido de humedad y en la estabilidad mecánica de los pellets, ya que variaciones en la granulometría pueden afectar la transferencia de calor y la eficiencia de la descarbonatación (Taylor, 1997).

En la actualidad, el proceso por vía semiseca se considera tecnológicamente superado por los sistemas de vía seca con precalentador y precalcinador, aunque su estudio resulta relevante para comprender la evolución histórica del diseño de hornos y la transición hacia esquemas de mayor eficiencia energética y menor impacto ambiental (Schneider et al., 2011).

4.9.3 Proceso por vía húmeda

El proceso de fabricación de cemento por vía húmeda se caracteriza por la preparación del crudo en forma de suspensión acuosa o pulpa (slurry), con un contenido de agua que típicamente puede oscilar entre 30 y 45 % en masa. Esta elevada fracción líquida facilita la mezcla íntima de las materias primas y favorece una homogeneidad química superior antes de la etapa de clinkerización (Hewlett & Liska, 2019; Taylor, 1997). Sin embargo, la presencia de grandes cantidades de agua implica un costo energético considerable asociado a su evaporación durante el proceso térmico.

En este esquema, las materias primas previamente trituradas se someten a molienda en presencia de agua en molinos de bolas o molinos tubulares, generando una pasta fluida que es almacenada en tanques de agitación para su homogeneización. La mezcla acuosa permite una distribución uniforme de los componentes químicos del sistema $CaO–SiO_2–Al_2O_3–Fe_2O_3$, reduciendo la variabilidad composicional y mejorando el control de los módulos químicos (Taylor, 1997).

Históricamente, la pulpa era alimentada directamente a hornos rotatorios largos, donde el secado, la evaporación del agua, la descarbonatación y la sinterización ocurrían progresivamente a lo largo del cilindro. En configuraciones más avanzadas, se incorporaron sistemas de secado previo o intercambiadores de calor, aunque la eficiencia térmica seguía siendo significativamente menor en comparación con los procesos por vía seca modernos (Hewlett & Liska, 2019).

Secuencia típica del proceso por vía húmeda

- Trituración de materias primas.
- Molienda en presencia de agua para formar la pulpa.
- Homogeneización en tanques agitados.
- Alimentación al horno rotatorio.
- Formación de clínker.
- Enfriamiento del clínker.
- Molienda final del cemento con yeso y adiciones, en función del requerimiento.

Desde el punto de vista operativo, una de las principales ventajas del proceso por vía húmeda es que permite obtener una mezcla con una composición química muy uniforme. Esto se debe a que las materias primas se mezclan en presencia de agua, lo que facilita el control de su composición y disminuye las variaciones durante la formación de los minerales del clínker. Además, resulta útil cuando las materias primas presentan características que dificultan su secado o molienda en seco (Hewlett & Liska, 2019).

No obstante, las desventajas energéticas son significativas. La evaporación del agua contenida en la pulpa requiere un aporte térmico elevado antes de que puedan iniciarse las reacciones de descarbonatación y sinterización. Este consumo energético adicional se traduce en mayores costos operativos y en un incremento de emisiones asociadas al uso de combustibles fósiles (Schneider et al., 2011). Por esta razón, el proceso por vía húmeda ha sido progresivamente reemplazado por la vía seca con precalentador y precalcinador, que ofrece un desempeño energético y ambiental sustancialmente superior.

En la actualidad, la vía húmeda se considera tecnológicamente obsoleta en nuevas instalaciones, aunque su estudio resulta fundamental para comprender la evolución histórica del diseño de plantas cementeras y los avances en eficiencia energética logrados en las últimas décadas (Hewlett & Liska, 2019).

4.9.4 Proceso por vía semihúmeda

El proceso de fabricación de cemento por vía semihúmeda constituye una variante intermedia entre la vía húmeda y la vía seca, combinando características de ambas con el propósito de reducir el consumo energético asociado a la evaporación del agua sin renunciar completamente a las ventajas de la mezcla en fase líquida.

En este método, el crudo se prepara inicialmente como una pulpa acuosa similar a la utilizada en la vía húmeda; sin embargo, posteriormente se somete a una etapa de desaguado mecánico mediante filtros prensa o sistemas de filtración al vacío, con el fin de reducir significativamente su contenido de humedad (Hewlett & Liska, 2019).

El resultado de esta operación es una "torta" de material con menor fracción de agua (típicamente entre 15 y 20 %) que conserva una homogeneidad química adecuada, pero requiere menor energía para su secado térmico posterior. Desde el punto de vista de operaciones unitarias, esta etapa implica fenómenos de separación sólido–líquido bajo gradiente de presión, gobernados por principios de filtración descritos clásicamente en la ingeniería química (McCabe et al., 2005).

En configuraciones convencionales, la torta desaguada puede ser extruida o nodulizada para formar pellets que facilitan su transporte y alimentación al sistema térmico. Estos pellets se introducen en sistemas de precalentamiento de parrilla o directamente al horno rotatorio, donde se completan las etapas de secado residual, calcinación del carbonato y sinterización (Taylor, 1997). En configuraciones más modernas, la torta puede introducirse en secadores-trituradores que combinan secado y reducción de tamaño antes de su ingreso a un horno equipado con precalentador o precalcinador.

Desde el punto de vista energético, la vía semihúmeda presenta una mejora respecto a la vía húmeda al disminuir la cantidad de agua que debe evaporarse en el horno. No obstante, su eficiencia global sigue siendo inferior a la del proceso moderno por vía seca con torres de ciclones y precalcinadores, lo que ha limitado su adopción en plantas de nueva generación (Schneider et al., 2011; Hewlett & Liska, 2019).

Entre sus principales ventajas se encuentran:

- **Mayor homogeneidad química del crudo** en comparación con procesos secos primitivos.
- **Menor consumo de energía térmica:** En comparación con el proceso por vía húmeda, esta alternativa requiere menos calor durante la fabricación del clínker.
- **Mejor control del tamaño de las partículas:** El uso de sistemas de nodulización permite formar gránulos de dimensiones más uniformes, lo que facilita el manejo y procesamiento del material.

Sin embargo, este proceso también presenta algunas limitaciones:

- **Mayor dificultad de operación:** La incorporación de equipos para filtrar y retirar el exceso de agua hace que el proceso sea más complejo.
- **Consumo de energía todavía elevado:** Aunque utiliza menos energía que la vía húmeda, su demanda energética continúa siendo mayor que la del proceso moderno por vía seca.
- **Control cuidadoso de la humedad:** Es necesario vigilar la cantidad de agua que permanece en el material, ya que un nivel inadecuado puede provocar variaciones de temperatura y afectar la estabilidad del horno

En términos históricos, la vía semihúmeda representó un paso evolutivo importante hacia la optimización energética del proceso cementero, aunque actualmente ha sido desplazada casi por completo por sistemas de vía seca de alta eficiencia (Hewlett & Liska, 2019).

4.10 Índices químicos del crudo (control de composición) y ejemplos de cálculo

La fabricación de un clinker "estable" se apoya en el control rutinario de la composición del crudo mediante índices que relacionan los óxidos mayoritarios del sistema $CaO–SiO_2–Al_2O_3–Fe_2O_3$. Estos índices permiten anticipar qué tan fácil será la formación del clínker, estimar la cantidad de cada fase mineral, identificar el riesgo de que quede cal sin reaccionar y prever tanto la reactividad del producto como su comportamiento durante el proceso.

Nota de base: Los cálculos se efectúan a partir de la composición de óxidos del crudo, una vez descontadas la humedad y las sustancias volátiles. Esto se debe a que el agua y el CO_2 liberado por los carbonatos no intervienen directamente en la formación de los minerales del clínker (Taylor, 1997; Hewlett & Liska, 2019).

a. Factor de Saturación de Cal (LSF o KH)

El LSF mide cuánto CaO hay respecto del CaO teórico necesario para combinarse con SiO_2, Al_2O_3 y Fe_2O_3 formando los principales compuestos del clinker.

Una forma ampliamente usada: SiO_2

$$LSF = \frac{CaO}{(2.8\ SiO_2)+(1.2\ Al_2O_3)+(0.65\ Fe_2O_3)} * 100$$

- **LSF alto** → Un valor de LSF alto muestra la tendencia a **cal libre** si la quema/enfriamiento no son adecuados; más alita potencial, pero mayor exigencia de clinkerización.
- **LSF bajo** → Un valor de LSF bajo, muestra un menor riesgo de cal libre, pero mayor belita relativa y, en general, desarrollo de resistencia inicial más lento.

Rangos típicos para clinker Portland ordinario: **~92–98** cuyo resultuado depende de los estándares de planta y del tipo de cemento a fabricar (Kurdowski, 2014).

Este índice permite estimar el potencial de formación de C_3S y la probabilidad de presencia de cal libre en el clínker. Valores excesivamente

altos pueden generar CaO no combinado, mientras que valores bajos favorecen la formación predominante de C_2S (Taylor, 1997).

b. Módulo de Sílice (SM o SR)

$$M = \frac{SiO_2}{Al_2O_3 + Fe_2O_3}$$

Este parámetro refleja la relación entre sílice y los óxidos fundentes, influyendo directamente en la cantidad de fase líquida formada durante la sinterización y, por tanto, facilidad en el proceso de clinkerización (Hewlett & Liska, 2019).

Rangos típicos: **~2.0–2.8** (Taylor, 1997; Hewlett & Liska, 2019).

c. Módulo de Alúmina (AM o AR)

Este índice permite conocer la relación entre el C_3A y el C_4AF presentes en el clínker. La proporción de estos componentes influye en la capacidad del cemento para reaccionar con el agua y en su resistencia frente al ataque de los sulfatos (Neville, 2011).

$$\boldsymbol{AM} = \frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3}$$

Además, condiciona la relación entre fases aluminatos/ferritos (C_3A/C_4AF) y afecta de forma directa a:

- Reactividad inicial
- Sensibilidad a sulfatos (relación con yeso)
- Reología del fundido en clinkerización.

Rangos típicos: **~1.3–2.5** (depende del objetivo de C_3A y del tipo de cemento) (Kurdowski, 2014).

En conjunto, estos parámetros permiten anticipar cómo se comportará la mezcla cruda durante la formación del clínker y realizar ajustes inmediatos en la cantidad de materias primas utilizadas. Para ello, generalmente se emplean sistemas de fluorescencia de rayos X (XRF) que analizan continuamente la composición química del material.

Mantener un control adecuado del factor de saturación de cal (LSF), el módulo de sílice (SM) y el módulo de alúmina (AM) es fundamental para que el horno funcione de manera estable, aproveche mejor la energía y produzca un clínker con una composición mineralógica uniforme. (Hewlett & Liska, 2019).

A continuación, se presentan los siguientes ejemplos de aplicación en esta etapa de control:

4.10.1 Ejemplo 1 (directo): Cálculo de índices a partir del análisis del crudo

Supón que el laboratorio reporta (base óxidos, % masa):

- CaO = 65.0 %
- SiO_2 = 21.0 %
- Al_2O_3 = 5.0 %
- Fe_2O_3 = 3.0 %

1) LSF

Denominador:

- 2.8(21.0) = 58.8
- 1.2(5.0) = 6.0
- 0.65(3.0) = 1.95

Suma = 58.8 + 6.0 + 1.95 = 66.75

LSF= $\frac{65}{66,75} \times 100 = 97.38$

SM = $\frac{21}{5+3} = \frac{21}{8} = 2.625$

AM = $\frac{5}{3} = 1.667$

Lectura técnica (ingeniería):

- LSF ≈ 97.4 → en rango típico; exige buena quema/enfriamiento para minimizar la cal libre.
- SM ≈ 2.63 → tendencia a buen equilibrio entre silicatos y fundentes.
- AM ≈ 1.67 → relación Al/Fe moderada; C_3A esperado "medio" (según sulfatos y otros óxidos).

4.10.2 Ejemplo 2 (de diseño de mezcla): cálculo de composición del crudo por balance de mezcla

Considera cuatro materiales con composición aproximada en óxidos (% masa, base analítica):

Caliza: CaO 53.0, SiO_2 3.0, Al_2O_3 1.0, Fe_2O_3 0.5
Arcilla: CaO 2.0, SiO_2 55.0, Al_2O_3 18.0, Fe_2O_3 8.0

Arena silícea: CaO 0.2, SiO_2 95.0, Al_2O_3 2.0, Fe_2O_3 0.5
Mineral de hierro: CaO 1.0, SiO_2 5.0, Al_2O_3 2.0, Fe_2O_3 80.0

Se propone una dosificación:

- 80.0% caliza
- 18.0% arcilla
- 1.5% arena
- 0.5% mineral de hierro

1) Balance de óxidos (ejemplo CaO)

$CaO_{mezcla} = 0.80(53.0) + 0.18(2.0) + 0.015(0.2) + 0.005(1.0)$

$CaO_{mezcla} = 42.4 + 0.36 + 0.003 + 0.005 = 42.768\%$

De forma análoga:

- $SiO_2 = 13.750\%$
- $Al_2O_3 = 4.080\%$
- $Fe_2O_3 = 2.2475\%$

2) Índices del crudo propuesto LSF

Denominador:

- $2.8(13.75) = 38.50$
- $1.2(4.08) = 4.896$
- $0.65(2.2475) = 1.4609$

Suma = 38.50 + 4.896 + 1.4609 = 44.8569

$$LSF = \frac{42.768}{44.8569} \text{ X } 100 = 95.34$$

$$SM = \frac{13.75}{4.08+2.2475} = \frac{13.75}{6.3275} = 2.173$$

$$AM = \frac{4.08}{2.2475} = 1.815$$

3) Interpretación y decisiones de ajuste (muy típico en planta)

- **Si el LSF sube demasiado** (p.ej., >98–100):
  - Bajar caliza o subir corrector silíceo/arcilloso,
  - o mejorar clinkerización (temperatura/residencia) si no hay margen químico.
- **Si SM es muy alto** (mezcla "alto contenido de sílice"):
  - Se reduce fundente relativo → puede dificultar clinkerización; se corrige con arcilla o corrector de Fe/Al.
- **Si AM es alto** (mucho Al relativo):
  - Tiende a mayor C_3A (según sulfatos), con implicaciones en fraguado y demanda de sulfato; se corrige con corrector férrico.

4.11 Índices químicos y realidad multióxido

Índices químicos y complejidad multicomponente del sistema

Si bien los índices clásicos de control químico —factor de saturación de cal (LSF), módulo de sílice (SM) y módulo de alúmina (AM)— constituyen herramientas robustas y ampliamente utilizadas en la industria cementera, es fundamental reconocer que estos parámetros representan simplificaciones empíricas de un sistema químico multicomponente de elevada complejidad (Taylor, 1997).

En la práctica industrial, la respuesta real del horno rotatorio no depende exclusivamente de las relaciones $CaO–SiO_2–Al_2O_3–Fe_2O_3$, sino también

de la presencia de óxidos secundarios y trazas que influyen en la formación de fase líquida, en la estabilidad mineralógica del clínker y en el comportamiento operativo del sistema térmico.

Entre los componentes que pueden modificar significativamente la clinkerización se encuentran:

MgO, que puede influir en la expansión y estabilidad volumétrica si se encuentra en fases cristalinas libres.

SO_3, relacionado con ciclos internos de azufre y formación de incrustaciones.

Álcalis (Na_2O y K_2O), que afectan la viscosidad de la fase líquida, la formación de depósitos y el comportamiento frente a reacciones expansivas.

TiO_2, Mn_2O_3 y P_2O_5, que pueden alterar la cinética de reacción y la estabilidad de determinadas fases minerales (Taylor, 1997; Hewlett & Liska, 2019).

Además, no toda la sílice presente en las materias primas posee la misma reactividad. La estructura mineral del material —cuarzo, sílice amorfa o arcillas silicatadas— condiciona la velocidad de reacción y la formación de silicatos cálcicos. Por tanto, el comportamiento real del sistema no puede describirse únicamente mediante relaciones estequiométricas simplificadas.

En consecuencia, las plantas cementeras modernas complementan el uso de los índices LSF, SM y AM con herramientas de control avanzado, tales como:

- Análisis químico continuo o de alta frecuencia mediante fluorescencia de rayos X (XRF).
- Control estadístico del proceso (SPC), que se utiliza para supervisar el proceso y reducir las variaciones en la composición de la mezcla.
- Modelos de estimación mineralógica como los cálculos potenciales de Bogue para el clínker, cuyos resultados deben interpretarse con precaución, ya que se basan en condiciones teóricas e idealizadas (Taylor, 1997).

Este enfoque permite comprender de manera más precisa el comportamiento del sistema formado por $CaO–SiO_2–Al_2O_3–Fe_2O_3–X$. En esta representación, la letra «X» agrupa los componentes minoritarios que, a pesar de encontrarse en pequeñas cantidades, pueden influir de manera importante en el funcionamiento del horno y en la calidad final del clínker. (Hewlett & Liska, 2019).

4.12 Enfoque de la fabricación a través del clínker

En el capítulo anterior se indicaron las principales reacciones durante la clinkerización, cabe recalcar que la misma constituye la etapa central y más crítica del proceso de fabricación del cemento, ya que en ella se producen las transformaciones fisicoquímicas que dan origen al clinker, material intermedio responsable de las propiedades hidráulicas del cemento. Este proceso se desarrolla en el sistema térmico de la planta, conformado principalmente por la torre de precalentamiento, el precalcinador (cuando existe), el horno rotatorio y el enfriador de clinker, y

ocurre en un amplio rango de temperaturas que puede superar los 1450 °C.

Desde el punto de vista didáctico y operativo, el proceso de clinkerización se analiza en cuatro etapas sucesivas: precalentamiento, calcinación, sinterización y enfriamiento, cada una con funciones específicas y efectos directos sobre la mineralogía y reactividad del clinker.

4.12.1 Etapa de precalentamiento

La etapa de precalentamiento constituye la primera fase del tratamiento térmico del crudo en el proceso moderno de fabricación de clínker Portland. En plantas contemporáneas de vía seca, esta operación se lleva a cabo en torres de ciclones múltiples (generalmente de 4 a 6 etapas), donde el material pulverizado entra en contacto contracorriente con los gases calientes procedentes del horno rotatorio y del enfriador de clínker (Taylor, 1997; Hewlett & Liska, 2019).

El sistema de precalentamiento por suspensión funciona bajo el principio de intercambio térmico sólido-gas en régimen turbulento, lo que permite una elevada eficiencia de transferencia de calor. El crudo, previamente molido hasta obtener partículas generalmente menores de 100 μm, se introduce por la parte superior de la torre y desciende por efecto de la gravedad a través de varios ciclones. Al mismo tiempo, los gases calientes circulan hacia arriba en dirección contraria al material.

Cada ciclón cumple dos funciones principales:

- Separar las partículas sólidas de la corriente de gases.

- Mantener el material el tiempo necesario para favorecer un intercambio eficiente de calor.

Gracias al diseño de la torre, el crudo puede alcanzar temperaturas de entre 700 y 900 °C antes de pasar al precalcinador o ingresar directamente al horno rotatorio, según la configuración de la planta. (Alsop, Chen, & Tseng, 2007).

Fenómenos físicos dominantes

De acuerdo a procesos termodinámicos y de operaciones unitarias, durante el precalentamiento ocurren fenómenos físicos asociados a:

a) Eliminación de humedad

Entre 100 y 200 °C se elimina el agua libre presente en el material mediante evaporación. Para que este proceso ocurra, se necesita energía tanto para calentar el agua hasta alcanzar su temperatura de ebullición como para transformarla de líquido en vapor (~2257 kJ/kg a 100 °C).

La eficiencia del proceso de secado depende de:

- Distribución granulométrica del crudo
- Contenido inicial de humedad
- Temperatura y caudal de gases

Si el material no se seca adecuadamente, pueden presentarse variaciones en el funcionamiento del proceso, acumulaciones que forman anillos dentro de los equipos y dificultades en el desplazamiento del material a través del sistema.

b) Deshidroxilación de minerales arcillosos

Entre 400 y 650 °C se produce la pérdida de grupos hidróxilos de minerales arcillosos como la caolinita:

$$Al_2Si_2O_5(OH)_4 \rightarrow Al_2Si_2O_7 + 2H_2O$$

Esta reacción genera una nueva forma de meta caolín amorfo y libera vapor de agua estructural. Se trata de una transformación que absorbe calor, alterando la reactividad posterior del material (Taylor, 1997).

Este cambio modifica la estructura del sólido y aumenta el área disponible para que ocurran las reacciones químicas, lo que facilita la posterior formación de los principales minerales del clínker.

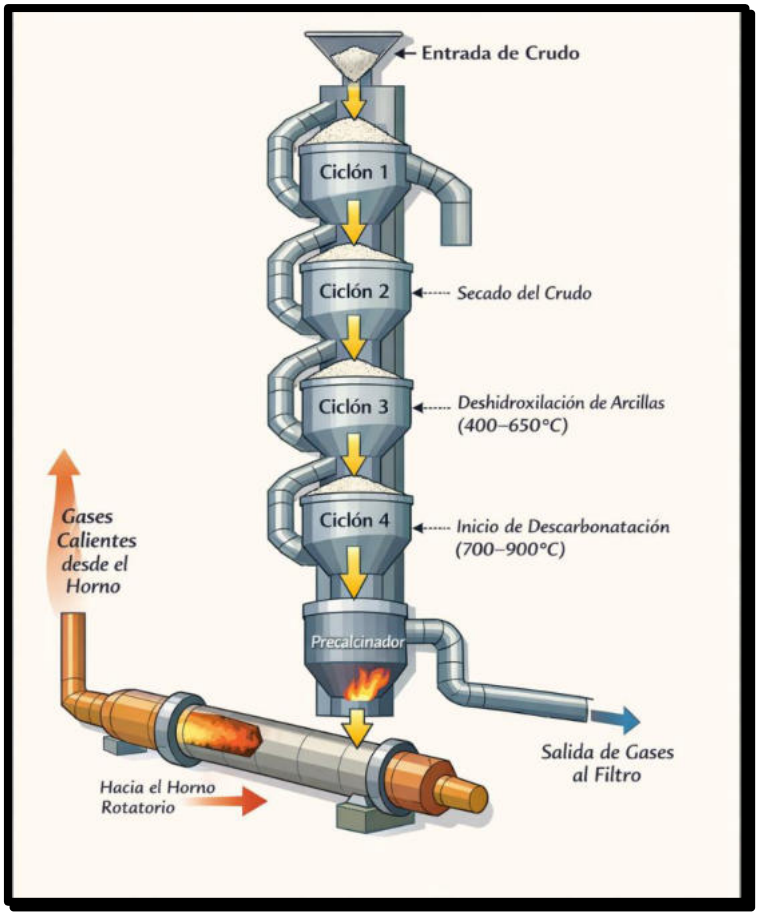


Figura 7. Sistema de precalentamiento en la producción de clínker.

Fuente: Adaptado de Alsop, P.A, Chen, Hm & Tseng, H (2007). The Cement Plant Operationes Handbook (5th ed.).

Desde la perspectiva del diseño térmico, el precalentamiento cumple un rol crítico en la optimización energética del sistema cementero. En los sistemas modernos que cuentan con precalcinador, entre el 60 y el 70 % del carbonato de calcio puede descomponerse antes de que el material ingrese al horno rotatorio. Esto permite disminuir considerablemente la

cantidad de calor que debe suministrarse dentro del horno. (Alsop et al., 2007).

Un precalentamiento eficiente permite:

- Disminuir la cantidad de combustible necesaria para producir cada kilogramo de clínker, con valores aproximados de 3000 a 3300 kJ/kg en los sistemas modernos.
- Utilizar hornos de menor longitud, debido a que una parte importante de las reacciones ocurre previamente en el precalcinador.
- Mantener una distribución de temperatura más estable a lo largo del proceso.
- Reducir la cantidad de dióxido de carbono (CO_2) emitida por cada tonelada de clínker producida.

Desde el punto de vista de la transferencia de calor, el sistema funciona mediante:

- El contacto forzado entre las partículas sólidas y los gases calientes.
- Una amplia superficie de contacto, que facilita el intercambio de calor.
- Una elevada transferencia térmica, favorecida por el movimiento turbulento de los gases.

El uso de varios ciclones permite aprovechar mejor la diferencia de temperatura entre el crudo y los gases calientes. De esta manera, el sistema se comporta de forma similar a un intercambiador de calor en contracorriente, logrando un calentamiento más eficiente del material.

Importancia operacional del precalentamiento

Un precalentamiento ineficiente puede generar:

- Incremento en consumo de combustible.
- Inestabilidad del horno.
- Formación de costras internas.
- Variabilidad en la calidad del clínker.

Por ello, el control operativo incluye monitoreo continuo de:

- Temperatura por etapa de ciclón.
- Presión diferencial.
- Composición de gases (O_2, CO, CO_2).
- Eficiencia de separación ciclónica.

4.12.2 Etapa de descarbonización (calcinación)

La descarbonización, también denominada calcinación, constituye la etapa central de transformación química en la clinkerización, en la cual los carbonatos presentes en el crudo (principalmente el carbonato de calcio ($CaCO_3$) se descomponen térmicamente para formar óxido de calcio (CaO) y dióxido de carbono (CO_2). Esta reacción se desarrolla típicamente en el intervalo de 850–1000 °C, dependiendo de la presión parcial de CO_2, la granulometría del material y las condiciones cinéticas del sistema (Taylor, 1997; Hewlett & Liska, 2019).

Fundamento químico y termodinámico

La reacción principal puede expresarse como:

$CaCO_{3(s)} \rightarrow CaO_{(s)} + CO_{2(g)}$

De acuerdo a los principios termodinámicos, a condiciones estándar (298 K, 1 bar), la entalpía de reacción que es fuertemente endotérmica, es aproximadamente:

$\Delta H° \approx +178.4$ kJ/mol

Este valor representa el mínimo termodinámico de energía requerido para descomponer $CaCO_3$ (sin considerar calentamientos sensibles, pérdidas ni ineficiencias).

El equilibrio de la reacción está gobernado por la presión parcial de CO_2. A mayor presión parcial, mayor será la temperatura necesaria para alcanzar la descomposición completa. En condiciones industriales (presiones ligeramente superiores a 1 atm y atmósfera rica en CO_2), la temperatura efectiva de descarbonatación del $CaCO_3$ suele situarse entre 880 y 950 °C (Hewlett & Liska, 2019).

La rapidez de la reacción depende principalmente de los siguientes factores:

- La cantidad de calor que llega hasta cada partícula.
- La facilidad con la que el CO_2 liberado atraviesa la capa de óxido de calcio (CaO) formada.
- La superficie disponible del material crudo para que ocurran las reacciones.
- El tamaño de las partículas y la uniformidad de su composición mineralógica.

A medida que avanza la reacción, se forma una capa de CaO alrededor de la parte de la partícula que aún no ha reaccionado. Esta capa dificulta la salida del CO_2 y puede hacer que la transformación completa del material ocurra más lentamente.

Configuración industrial: El precalcinador

En los sistemas modernos de producción por vía seca, la mayor parte de la descomposición del carbonato de calcio no se realiza dentro del horno rotatorio, sino en el precalcinador. Este equipo se encuentra ubicado entre la torre de ciclones y el horno, y funciona como un reactor donde las partículas permanecen suspendidas en la corriente de gases calientes. Además, se suministra combustible adicional, como carbón pulverizado, coque de petróleo o combustibles alternativos. Esto permite que entre el 85 y el 95 % del $CaCO_3$ se descomponga antes de ingresar al horno rotatorio (Alsop, Chen, & Tseng, 2007).

Desde el punto de vista del proceso, esta alternativa presenta varias ventajas:

- Reduce considerablemente la cantidad de calor que debe suministrarse dentro del horno.
- Permite utilizar un horno rotatorio de menor longitud.
- Ayuda a mantener una distribución de temperatura más uniforme.
- Aumenta la capacidad de producción de la planta.

El precalcinador funciona mediante un contacto intenso y turbulento entre las partículas sólidas y los gases calientes. Esta condición facilita una

rápida transferencia de calor y permite alcanzar un alto grado de descomposición en tiempos de permanencia relativamente cortos, generalmente de entre 2 y 6 segundos.

Balance energético de la calcinación

Al considerar el consumo total de calor del proceso, la descarbonización es una de las etapas que requiere mayor cantidad de energía. Considerando que el crudo típico contiene aproximadamente 75–80 % en masa de $CaCO_3$, la energía necesaria para su descomposición puede estimarse del orden de:

3.1–3.3 GJ/t clínker

para el proceso completo de clinkerización, de los cuales una fracción sustancial corresponde exclusivamente a la reacción endotérmica de calcinación (Hewlett & Liska, 2019).

En términos de aporte relativo, la energía química de la descarbonización representa aproximadamente el 55–60 % del consumo térmico mínimo teórico del proceso.

Impacto ambiental y emisiones de CO_2

La descarbonización es una etapa especialmente importante, ya que genera la mayor parte de las emisiones de CO_2 producidas por las reacciones químicas durante la fabricación del cemento. Se estima que entre el 60 y el 65 % de las emisiones totales asociadas a la producción de clínker se originan directamente por la descomposición del carbonato de calcio ($CaCO_3$). El porcentaje restante proviene principalmente de la quema de

los combustibles utilizados para aportar calor al proceso. (Hewlett & Liska, 2019).

Es importante destacar que estas emisiones químicas son inherentes a la reacción estequiométrica y no dependen del tipo de combustible empleado. Por ello, las estrategias de mitigación incluyen:

- Reducción del factor clínker en el cemento.
- Uso de materiales cementantes suplementarios (SCM).
- Captura y almacenamiento de carbono (CCS).
- Optimización del grado de calcinación.

Relevancia para la calidad del clínker

Desde la perspectiva de la calidad del producto, una descarbonización incompleta puede generar:

- Presencia de $CaCO_3$ residual.
- Una formación poco uniforme de los minerales del clínker.
- Dificultades en la posterior formación de alita (C_3S).
- Variaciones en la composición y estabilidad mineralógica del material.

Por otro lado, una calcinación excesiva o un tiempo de permanencia demasiado prolongado pueden provocar que el material comience a sinterizarse antes de lo previsto o que se formen anillos en los equipos.

Por esta razón, es necesario controlar cuidadosamente la temperatura, el tiempo de permanencia, la concentración de oxígeno y la presión parcial de CO_2. Así se consigue que el carbonato de calcio alcance un nivel adecuado de descomposición antes de iniciar la etapa de sinterización.

Balance energético comparativo: precalcinador vs. horno rotatorio

La incorporación del precalcinador en los sistemas modernos de producción por vía seca cambió de manera importante la forma en que se distribuye el calor durante la formación del clínker. Desde el punto de vista energético, su principal ventaja consiste en realizar la mayor parte de la descarbonización —una reacción que necesita absorber una gran cantidad de calor— fuera del horno rotatorio, donde el aprovechamiento de la energía térmica es menos eficiente.

a) Distribución del calor en sistemas convencionales sin precalcinador

- En los hornos largos tradicionales que funcionan por vía seca, la mayor parte de la descarbonización se produce dentro del propio horno rotatorio.
- La zona de calcinación ocupa una fracción significativa de su longitud.
- El consumo térmico específico puede situarse entre 4.0–5.0 GJ/t clínker.

En este caso, el horno debe suministrar simultáneamente:

- Calor sensible para elevar la temperatura del crudo.
- Energía endotérmica para la calcinación.
- Energía adicional para la sinterización.

Esto implica mayores pérdidas por radiación y convección debido a la mayor longitud del equipo (Alsop, Chen, & Tseng, 2007).

b) Distribución térmica en sistemas modernos con precalcinador

En plantas modernas:

- 85–95 % del $CaCO_3$ se descompone en el precalcinador.
- El horno rotatorio se dedica principalmente a la formación de fases del clínker (C_2S, C_3S, C_3A, C_4AF).
- El consumo térmico específico se reduce típicamente a 3.0–3.3 GJ/t clínker (Hewlett & Liska, 2019).

La tabla 7 muestra un resumen comparativo simplificado de algunos conceptos principales entre horno largo tradicional y sistema con precalcinador.

Tabla 7. Comparación simplificada entre horno largo tradicional y sistema con precalcinador.

Concepto	Horno largo tradicional	Sistema con precalcinador
% descarbonización fuera del horno	< 20 %	85–95 %
Longitud del horno	Alta	Reducida
Consumo térmico	4.0–5.0 GJ/t	3.0–3.3 GJ/t
Eficiencia térmica	Media	Alta

Fuente: Elaboración propia

Como se menciona, en esta etapa se generan emisiones de CO2 en la elaboración de clínker.

A continuación, se presenta un ejemplo con el cálculo de emisiones por tonelada de clínker producido.

Datos típicos de composición

Supongamos:

Para producir 1 tonelada de clínker se requiere 1.55 t de crudo

El crudo contiene 78 % de $CaCO_3$

Masa molar:

$CaCO_3$ = 100.09 kg/kmol

CO_2 = 44.01 kg/kmol

Determinamos la masa de $CaCO_3$ en el crudo:

$mCaCO_3$=1.55×0.78 = 1.209 t = 1209 kg

De acuerdo a la reacción, hacemos un análisis estequiométrico para conocer la relación CO2 producido por cada 1 Kg de $CaCO_3$.

$CaCO_3 \rightarrow CaO+CO_2$

$$1 \text{ Kg de CaCO3 X } \frac{44{,}01 \text{ Kg de CO2}}{100{,}09 \text{ Kg de CaCO3}} = 0{,}439 \text{ Kg de CO2}$$

Determinamos las emisiones químicas de CO_2

mCO_2 = 1209 Kg de CaCO3 x 0,439

mCO_2 = 530 Kg

Es decir 0,53 toneladas de CO_2

Ahora, calculamos las emisiones totales con la suma del CO_2 producido durante la combustión:

Si consideramos que el consumo térmico moderno es:

3.2 GJ/t de clínker

Y que el factor de emisión típico del combustible (carbón/coque) es aproximadamente: 94 Kg CO_2/GJ

Entonces:

$3.2 \times 94 = 301$ kg CO_2

Por lo tanto, las emisiones totales estimadas serían:

530 (reacción química) + 301 (combustión) = 831 kg CO2/Ton de clínker

Interpretación didáctica

Aproximadamente el 63 % proviene de la descarbonización.

Aproximadamente el 37 % proviene de la combustión.

Por lo tanto, podríamos concluir técnicamente que:

Cambiar el combustible reduce solo la fracción térmica.

Reducir el factor clínker impacta ambas fracciones indirectamente.

4.12.3 Etapa de sinterización (formación del clínker)

La sinterización es la etapa en la cual se produce la formación efectiva de las fases minerales del clinker, y tiene lugar en la zona de mayor temperatura del horno rotatorio, típicamente entre 1250 y 1450 °C. En este rango térmico, el material alcanza un estado de fusión parcial, generándose una fase líquida que facilita la difusión iónica y la reacción entre los óxidos.

Durante la sinterización se desarrollan progresivamente las principales fases del clinker:

- Silicato tricálcico C_3S (alite),

- Silicato dicálcico C_2S (belita),
- Aluminato tricálcico C_3A,
- Ferritoaluminato tetracálcico C_4AF.

La cantidad y composición de la fase líquida, así como el tiempo de residencia del material en la zona de sinterización, influyen directamente en la reactividad del clinker, en la presencia de cal libre y en la formación de defectos microestructurales. Un control inadecuado de esta etapa puede dar lugar a problemas operativos (anillos, recubrimientos) y a un clinker de baja calidad. En la sección Reacciones Químicas del cemento se explican cada una de estas etapas.

Intervalo térmico y características operativas

La sinterización ocurre en el tramo final del horno rotatorio, donde el material alcanza temperaturas máximas del orden de 1400 – 1450 ^{o}C

A estas temperaturas se desarrolla una fase líquida parcial (≈20–30 % en masa), la cual facilita la difusión iónica y la reacción sólida–líquida necesaria para la formación del C_3S. La presencia de esta fase parcialmente fundida es fundamental, ya que favorece el crecimiento de los cristales y permite que la estructura del clínker se forme y se consolide adecuadamente. (Hewlett & Liska, 2019).

Para que la formación del clínker se desarrolle adecuadamente, deben mantenerse las siguientes condiciones de operación:

- El material debe permanecer entre 10 y 20 minutos en la zona de mayor temperatura.

- La cantidad de oxígeno dentro del horno debe controlarse, manteniendo un exceso moderado que favorezca una combustión eficiente.
- El horno debe girar a una velocidad aproximada de 2 a 5 revoluciones por minuto.
- La inclinación del horno suele mantenerse entre el 3 y el 4 %, lo que facilita el avance gradual del material a través del equipo.

Fundamento termodinámico y energético

Desde lo energético, la sinterización requiere:

- Control de temperatura adecuada de calor sensible adicional para elevar el material desde ~1000 °C hasta ~1450 °C.
- Energía para la formación y mantenimiento de la fase líquida.
- Energía asociada a reacciones endotérmicas menores.

Aunque la energía endotérmica dominante ya fue consumida en la descarbonización, el mantenimiento de la temperatura de llama (~2000 °C) es esencial para sostener el perfil térmico del horno.

El consumo térmico total del proceso moderno (3.0–3.3 GJ/t clínker) incluye la energía necesaria para alcanzar y sostener la zona de sinterización (Alsop et al., 2007).

Como parte del análisis en la etapa de sinterización existe un desarrollo microestructural del clínker, durante el cual se producen de forma resumida las siguientes acciones:

- Crecimiento cristalino del C_3S.
- Incorporación de impurezas (MgO, álcalis).
- Distribución de la fase intersticial (C_3A + C_4AF).
- Formación de estructura nodular.

El material se transforma en nódulos de clínker de 5–25 mm de diámetro.

La morfología y tamaño cristalino influyen directamente en:

- Reactividad hidráulica.
- Desarrollo de resistencias.
- Calor de hidratación.

A continuación, en la tabla 8 se presenta un balance energético

Tabla 8. Balance energético comparativo entre la zona de calcinación y la zona de sinterización.

Etapa	Tipo de energía dominante	Magnitud relativa
Calcinación	Endotérmica (ΔH reacción $CaCO_3$)	Muy alta
Sinterización	Calor sensible + formación fase líquida	Alta
Enfriamiento	Recuperación parcial de calor	Recuperativa

Fuente: Elaboración propia

La calcinación es la reacción química que absorbe la mayor cantidad de calor durante el proceso. Sin embargo, la sinterización requiere alcanzar las temperaturas más elevadas del sistema, por lo que necesita un suministro intenso de energía en esta etapa.

Desde el diseño del proceso, separar ambas etapas (precalcinador + horno) permite optimizar el uso del combustible y minimizar pérdidas térmicas.

En el siguiente empleo, se plantea el cálculo de la energía necesaria para elevar el material hasta 1450 ºC.

Supongamos los siguientes datos:

Masa de material calcinado que entra al horno: 1.0 t

Temperatura de entrada: 1000 °C

Temperatura máxima: 1450 °C

Cp promedio sólido calcinado ≈ 1.05 kJ/kg·K

$Qsens = m * Cp * \Delta T$

$Qsens = 1000\ Kg \times 1.05\ kJ/Kg.K \times (1450-1000)\ K$

$Qsens = 472500\ kJ$

Este valor equivale aproximadamente al 15 % del consumo total de energía térmica en sistemas modernos. Esto demuestra que, aunque la principal reacción química ya se ha completado, se necesitaría una cantidad importante de energía para elevar el material hasta la temperatura ideal para la sinterización.

Importancia ambiental y operativa de la sinterización

Una sinterización inadecuada puede generar:

- Exceso de óxido de calcio libre.
- Formación deficiente de C_3S.

- Clínker mal aprovechado, sea sub quemado o sobre quemado.

Aumento de consumo energético.

Desde la sostenibilidad, mejorar la eficiencia de la zona de sinterización reduce:

- Consumo específico de combustible.
- Emisiones indirectas de CO_2.
- Desgaste refractario.

4.12.4 Etapa de enfriamiento del clínker

El enfriamiento del clínker constituye la etapa final del proceso de clinkerización y cumple una función estratégica tanto desde el punto de vista mineralógico como energético. Inmediatamente después de abandonar la zona de sinterización del horno rotatorio (≈1400–1450 °C), el clínker incandescente es sometido a un enfriamiento controlado, generalmente mediante enfriadores de parrilla, aunque también existen diseños rotatorios y planetarios (Alsop, Chen, & Tseng, 2007).

En esta etapa, el clínker se enfría desde unos 1400 °C hasta alcanzar una temperatura aproximada de entre 100 y 200 °C.

Funcionamiento y tipos de enfriadores

a) Enfriador de parrilla

Es el sistema más utilizado en las plantas cementeras modernas. En este equipo, el clínker caliente avanza sobre una parrilla móvil mientras recibe aire frío desde la parte inferior.

El enfriamiento ocurre mediante tres mecanismos:

- El contacto directo entre el clínker y el aire frío en movimiento.
- La transferencia de calor entre las partículas del material.
- La pérdida de calor por radiación durante las primeras etapas del enfriamiento.

El aire que se calienta al entrar en contacto con el clínker se recupera y se utiliza nuevamente en el proceso como:

- Aire secundario para favorecer la combustión dentro del horno.
- Aire terciario para apoyar la combustión en el precalcinador.

Gracias a este diseño, puede recuperarse más del 70 % del calor contenido en el clínker caliente, lo que mejora el aprovechamiento energético del proceso (Hewlett & Liska, 2019).

Funciones principales del enfriamiento

El enfriamiento cumple dos funciones esenciales:

a) Estabilización de los minerales del clínker. Después de la sinterización, el clínker contiene minerales formados a temperaturas elevadas, especialmente alita (C_3S), cuya estructura debe conservarse mediante una reducción adecuada de la temperatura.

Si el enfriamiento es lento, pueden producirse reacciones de reequilibrio sólido–sólido, tales como:

$C_3S \rightarrow C_2S + CaO$

Estas reversiones reducen la fracción de alita reactiva, afectando negativamente las resistencias mecánicas tempranas del cemento (Taylor, 1997).

Un enfriamiento rápido "congela" la estructura mineralógica, preservando:

- Alta proporción de C_3S,
- Microestructura fina,
- Distribución homogénea de fase intersticial.

b) Recuperación energética

Desde el punto de vista del balance térmico global, el clínker abandona el horno con una elevada carga de calor sensible, cuya recuperación es esencial para que el proceso sea eficiente.

Ejemplo de energía recuperable

Supongamos los siguientes datos:

1 t de clínker

Temperatura de salida del horno: 1400 °C

Temperatura final tras enfriamiento: 150 °C

Cp promedio del clínker ≈ 1.05 kJ/kg·K

$Q = m^* cp^* (Ti - Tf)$

$$Q = 1000\ Kg \times 1.05\ kJ/kg \cdot K \times (1400 - 150)\ K$$

$$Q = 1{,}312{,}500\ kJ \approx 1.31\ GJ$$

Esta energía es similar al calor requerido para precalentar el crudo, lo que evidencia la función esencial del enfriador en el aprovechamiento térmico del proceso. En las plantas modernas, buena parte de este calor se recupera y vuelve a utilizar, reduciendo así el consumo total de combustible. (Alsop et al., 2007).

Influencia del enfriamiento en la estructura y reactividad del clínker

La rapidez con la que se enfría el clínker influye directamente en varios aspectos, como el tamaño de los cristales de C_3S, la distribución de la fase vítrea, la cantidad de CaO libre y su capacidad para reaccionar con el agua.

Un enfriamiento rápido favorece la formación de cristales más pequeños y con ciertas irregularidades en su estructura, lo que aumenta su reactividad. Además, proporciona una mayor superficie disponible para las reacciones de hidratación y contribuye al desarrollo temprano de la resistencia mecánica del cemento. Por el contrario, un enfriamiento lento puede:

- Permitir crecimiento cristalino excesivo,
- Reducir la reactividad inicial,
- Aumentar la variabilidad del desempeño mecánico.

Integración térmica del proceso de clinkerización

Las etapas de:

- Precalentamiento,
- Descarbonización,
- Sinterización,
- Enfriamiento

constituyen un sistema térmico altamente acoplado.

Desde el punto de vista de ingeniería de procesos, el sistema opera como una red de intercambiadores de calor integrados donde:

- Los gases del horno calientan el crudo.
- El clínker caliente precalienta el aire de combustión.
- El aire caliente reduce la demanda energética externa.

La clinkerización no debe interpretarse únicamente como un fenómeno químico, sino como un proceso termoquímico-industrial integral, donde convergen:

- Termodinámica de altas temperaturas
- Cinética de reacción sólido–sólido y sólido–líquido,
- Transferencia de calor y masa,
- Diseño y optimización energética.

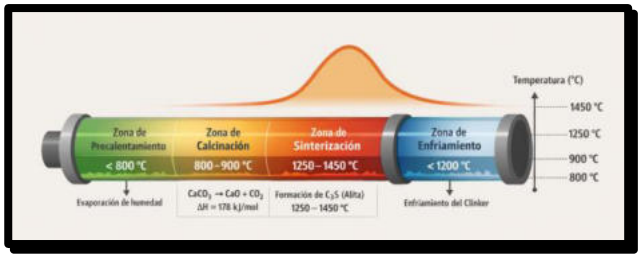


Figura 8. Esquema del horno rotatorio utilizado en la fabricación de clínker, mostrando las principales zonas de reacción térmica: precalentamiento, calcinación, zona de transición, sinterización y enfriamiento del clínker.

Fuente: Adaptado de Taylor (1997) y Hewlett & Liska (2019)

Flujo esquemático del sistema térmico de clinkerización, mostrando la integración de las etapas de precalentamiento, pre calcinación, sinterización y enfriamiento, con recuperación de calor.

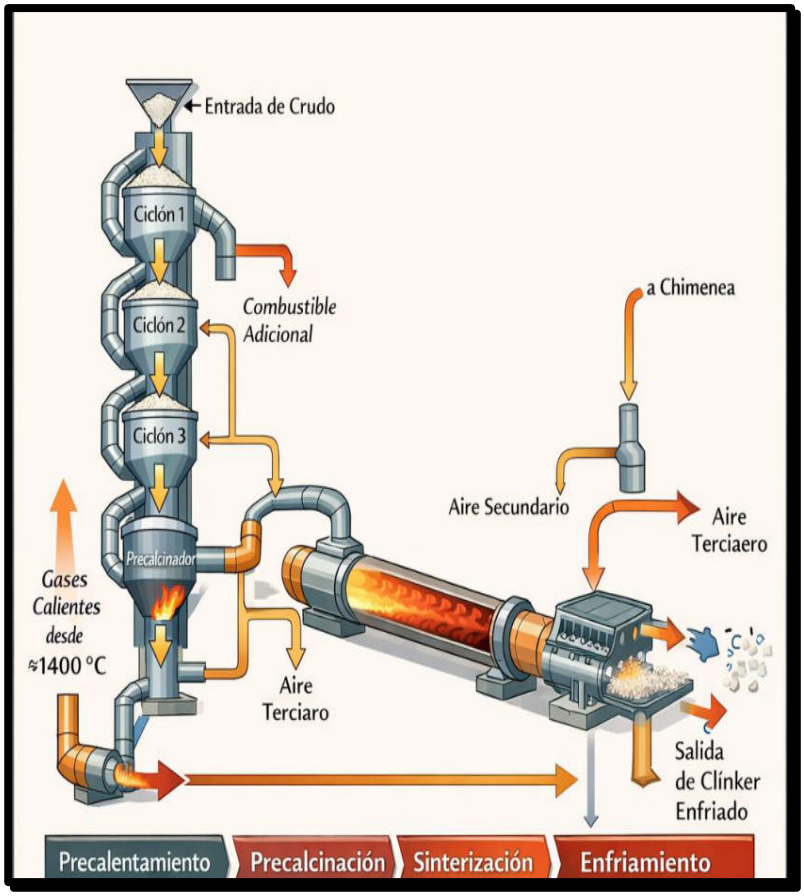


Figura 9. Diagrama integral del sistema térmico de clinkerización.

Fuente: Adaptado de Alsop, P.A., Chen, H, & Tseng, H, H (2007), The cement plant Operationes Handbook (5th ed), Tradeship Publications.

4.13 Molienda final del cemento

La molienda final del cemento constituye la última operación unitaria del proceso de fabricación y tiene como objetivo transformar el clínker enfriado, junto con el yeso y otros componentes adicionales, en un material pulverulento de finura y composición controladas, apto para su utilización en aplicaciones constructivas.

A diferencia de la clinkerización - donde predominan fenómenos termoquímicos de alta temperatura-, la molienda final es un proceso fundamentalmente mecánico, aunque sus efectos inciden directamente sobre el comportamiento químico, cinético e hidráulico del cemento (Hewlett & Liska, 2019).

Desde el punto de vista de la ingeniería de procesos, esta etapa se clasifica como una operación unitaria de reducción de tamaño con clasificación, en la cual intervienen mecanismos combinados de:

- Impacto
- Compresión
- Fricción
- Cizallamiento

Todos, acompañados de sistemas de separación que permiten controlar la distribución granulométrica del producto final (Alsop, Chen, & Tseng, 2007).

4.13.1 Adición de yeso y otros componentes

Función del yeso en el cemento

La adición de yeso ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) durante la molienda final del clínker es fundamental para controlar la reacción inicial del cemento y asegurar que presente un comportamiento adecuado al mezclarse con agua. Aunque su proporción en la mezcla es relativamente pequeña, su función es crítica desde el punto de vista químico y tecnológico.

El clínker Portland contiene, entre sus fases principales, aluminato tricálcico (C_3A), compuesto altamente reactivo frente al agua. En ausencia de un regulador de fraguado, el C_3A reaccionaría de manera prácticamente instantánea al entrar en contacto con el agua de amasado, generando una rápida formación de productos hidratados y ocasionando el fenómeno conocido como flash set o fraguado instantáneo. Esta reacción abrupta impediría la adecuada colocación y trabajabilidad del material en obra (Taylor, 1997).

La función del yeso es actuar como moderador cinético de esta reacción. Durante la hidratación inicial, el sulfato aportado por el yeso reacciona con el C_3A para formar ettringita ($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$), un compuesto de carácter expansivo y cristalización controlada que retrasa la reacción directa del aluminato con el agua:

$$C_3A + 3CaSO_4 \cdot 2H_2O + 26H_2O \rightarrow C6AS_3H_{32}$$

Este mecanismo permite que el fraguado ocurra de forma progresiva y controlada, garantizando un tiempo adecuado de trabajabilidad sin comprometer el desarrollo posterior de resistencia (Hewlett & Liska, 2019).

En la producción industrial de cemento, la cantidad de yeso incorporada suele representar entre el 3 y el 5 % de la masa del clínker. Sin embargo, la proporción más adecuada depende de varios factores, como:

- La cantidad de C_3A presente en el clínker.
- La presencia de sulfatos alcalinos, como Na_2SO_4 y K_2SO_4.
- El grado de finura del cemento.
- Los requisitos establecidos para el tipo de cemento que se desea fabricar.

Cuando se añade una cantidad insuficiente de yeso, el cemento puede endurecerse demasiado rápido, perder facilidad de manejo y liberar calor antes de lo esperado. Por el contrario, un exceso de sulfato puede conducir a fenómenos de falso fraguado (false set) o incluso a expansiones indeseadas por formación tardía de ettringita secundaria (Taylor, 1997; Hewlett & Liska, 2019).

Desde la perspectiva de la ingeniería de procesos, el control del contenido de sulfato constituye un parámetro crítico de calidad. En plantas modernas, la dosificación se ajusta considerando tanto la composición química del clínker (determinada por análisis XRF) como el desempeño reológico y mecánico del cemento producido.

En síntesis, aunque el yeso representa una fracción minoritaria del producto final, su papel es fundamental para transformar el clínker —material altamente reactivo— en un cemento técnicamente utilizable. Su correcta dosificación constituye un claro ejemplo de cómo una modificación composicional relativamente pequeña puede determinar el comportamiento macroscópico del material en servicio.

4.13.2 Otros componentes adicionados en la molienda final

Además del yeso, la molienda final constituye la etapa en la que se incorporan diversos materiales cementantes suplementarios (MCS) o adiciones minerales, dependiendo del tipo de cemento a producir y de los requisitos normativos aplicables. Estas adiciones no solo cambian la composición del cemento, sino que también influyen en su resistencia mecánica, su durabilidad y el impacto ambiental asociado a su producción.

- Entre los materiales utilizados con mayor frecuencia se encuentran:
- Las puzolanas naturales o industriales, como las puzolanas volcánicas y las cenizas volantes.
- Las escorias granuladas de alto horno.
- El fíller calizo.
- Otros materiales cementantes suplementarios (MCS).

Enfoque desde las operaciones unitarias: molienda conjunta o separada

Desde el punto de vista del proceso, estos materiales se incorporan como sólidos adicionales durante la reducción de tamaño. Sus características físicas influyen directamente en la energía necesaria para molerlos y en el tamaño final de las partículas obtenidas.

Entre los aspectos más importantes que deben considerarse se encuentran:

- La dureza, expresada mediante el índice de trabajo de Bond.
- La facilidad con la que el material se fragmenta.
- El contenido de humedad.
- El tamaño inicial de las partículas.
- La tendencia del material a formar aglomeraciones.

Debido a su estructura cristalina compacta, el clínker suele ser más difícil de moler que la mayoría de los materiales cementantes suplementa-

rios (MCS). Sin embargo, algunos materiales, como la escoria, presentan un comportamiento diferente durante la molienda. Por ello, la industria puede optar por dos alternativas: moler todos los componentes juntos o procesarlos por separado.

a) Co-molienda

Los componentes se muelen simultáneamente.

Ventajas:

- Simplicidad operativa.
- Menor inversión en equipos adicionales.

Desventajas:

- Distribuciones granulométricas no óptimas para cada fase.
- Mayor dificultad de control fino.

b) Molienda separada

Cada componente se muele por separado y posteriormente se mezcla.

Ventajas:

- Mayor control de finura individual.
- Optimización energética específica.

Desventajas:

- Mayor complejidad operativa.

(Alsop, Chen, & Tseng, 2007)

4.13.3 Proceso de molienda como operación unitaria

Desde la perspectiva de la ingeniería química, la molienda final del cemento se clasifica como una operación unitaria de reducción de tamaño (conminución), cuyo objetivo es disminuir el tamaño de partícula del clínker y de los componentes adicionados hasta alcanzar una distribución granulométrica específica que garantice el desempeño hidráulico del cemento.

La conminución es una operación fundamental en la ingeniería de procesos sólidos y se encuentra descrita bajo los principios clásicos desarrollados por Rittinger, Kick y Bond, los cuales relacionan la energía requerida con el grado de reducción de tamaño alcanzado (Wills & Napier-Munn, 2016). La ley de Bond es la más utilizada para estimar el consumo energético en molinos cementeros industriales.

A nivel físico y mecánico, la molienda reduce el tamaño del material mediante la acción conjunta de tres mecanismos principales:

- Impacto: ocurre cuando los cuerpos moledores o las partículas caen o chocan a gran velocidad, provocando la ruptura del material.
- Compresión: se produce cuando el material queda presionado entre dos superficies sólidas hasta fragmentarse.
- Abrasión o fricción: sucede cuando las partículas entran en contacto y se rozan entre sí, desgastándose y reduciendo gradualmente su tamaño.

Estos mecanismos actúan en proporciones distintas dependiendo del tipo de molino empleado (Hewlett & Liska, 2019).

Descripción de los principales tipos de molinos en la industria cementera

1. Molino de bolas (Ball mill)

El molino de bolas es el equipo tradicionalmente utilizado en la molienda de cemento. Consiste en un cilindro horizontal giratorio parcialmente lleno de cuerpos moledores de acero. A medida que el cilindro rota, las bolas ascienden por efecto de la fricción y posteriormente caen, generando principalmente mecanismos de impacto y abrasión.

Características principales:

- El molino trabaja en circuito cerrado junto con un separador dinámico, encargado de clasificar las partículas según su tamaño.
- El material obtenido presenta partículas de diferentes tamaños.
- Es un equipo resistente, confiable y capaz de mantener un funcionamiento estable.
- Su consumo de energía es relativamente alto, con valores aproximados de 30 a 35 kWh por tonelada de material procesado.

Durante la molienda, las bolas se elevan y caen continuamente dentro del equipo. Estos movimientos producen golpes y esfuerzos repetidos que rompen el material y reducen gradualmente el tamaño de sus partículas. (Wills & Napier-Munn, 2016).

2. Molino vertical de rodillos (VRM – Vertical Roller Mill)

Es una alternativa más moderna y eficiente. El clínker se deposita sobre una mesa giratoria y es comprimido por rodillos accionados mediante

presión hidráulica. Este mecanismo permite reducir el consumo de energía entre un 10 y un 20 % respecto al molino de bolas. Además, puede integrar en un mismo equipo las operaciones de secado, molienda y clasificación, facilitando un mejor control del tamaño de las partículas (Alsop et al., 2007).

En este caso, el mecanismo dominante es la compresión entre partículas, lo que favorece una fractura más eficiente desde el punto de vista energético.

Ventajas principales:

- Reducción del consumo energético (10–20 % menor que molino de bolas).
- Integración simultánea de secado, molienda y clasificación.
- Mejor control de distribución granulométrica.

3. Prensas de rodillos (High Pressure Grinding Rolls – HPGR)

En los sistemas híbridos, la prensa de rodillos se utiliza antes del molino de bolas. El material se comprime a presiones de entre 50 y 300 MPa, provocando su fractura entre las propias partículas. Este tratamiento previo reduce el trabajo del molino principal y mejora la eficiencia energética del proceso.

Circuito cerrado y sistemas de clasificación

Sin importar el tipo de molino utilizado, en la industria cementera la molienda se realiza generalmente en circuito cerrado, con separadores dinámicos eficientes que clasifican las partículas según su tamaño.

Para este caso, el separador cumple la función de:

- Clasificar el material molido.
- Permitir la salida de partículas que cumplen con el tamaño y finura especificada.
- Retornar las partículas gruesas al molino para nueva molienda.

Este sistema mejora los siguientes aspectos:

- La estabilidad operativa.
- La eficiencia energética.
- La uniformidad del producto final.

Desde el punto de vista de ingeniería de procesos, el circuito cerrado reduce la sobremolienda, optimiza el consumo energético y permite mantener una distribución granulométrica controlada, variable crítica para el comportamiento reológico y mecánico del cemento (Hewlett & Liska, 2019).

Relación entre operación unitaria y desempeño hidráulico

Aunque la molienda es esencialmente un proceso mecánico, sus efectos inciden directamente sobre:

- Velocidad de hidratación.
- Ejecución de resistencia temprana.
- Calor de hidratación.
- Requerimiento de agua.

La molienda final va más allá de disminuir mecánicamente el tamaño de las partículas, pues representa una etapa clave en la que se combinan los siguientes aspectos:

- Los mecanismos de fractura.
- El comportamiento termodinámico de las superficies.
- La transmisión de energía.
- El control del tamaño de las partículas.
- El uso eficiente de la energía.

Así, esta operación condiciona directamente el desempeño del cemento en sus aplicaciones estructurales

4.13.4 Control de finura del cemento

La finura del cemento constituye uno de los parámetros más determinantes en su comportamiento en estado fresco y endurecido. Aunque a primera vista pueda parecer simplemente una característica física relacionada con el tamaño de partícula, en realidad se trata de una variable que condiciona la cinética de hidratación, la evolución microestructural y, en consecuencia, el desempeño mecánico y térmico del material.

Desde la perspectiva fisicoquímica, cuanto más fino es el cemento, mayor es la superficie disponible para entrar en contacto con el agua de mezcla. Esta mayor área de reacción facilita que los componentes sin hidratar se disuelvan con rapidez, especialmente el silicato tricálcico (C_3S). Como resultado, la hidratación avanza rápidamente y la resistencia se desarrolla antes. (Taylor, 1997).

En consideraciones prácticas, el control de la finura influye directamente en:

Velocidad de hidratación: las partículas más finas reaccionan más rápidamente.

Desarrollo de resistencias mecánicas: mayor finura suele mejorar las resistencias tempranas.

Calor de hidratación: una hidratación más rápida genera mayor liberación térmica en edades iniciales.

Trabajabilidad: la finura modifica la demanda de agua y la reología de la mezcla.

No obstante, la molienda excesiva no siempre es deseable. Desde el punto de vista energético, una mayor finura implica un incremento significativo del consumo eléctrico en la etapa de molienda, que ya representa una fracción importante del consumo total de la planta (Hewlett & Liska, 2019). Además, una cantidad excesiva de partículas muy finas puede aumentar el agua necesaria para preparar la mezcla, disminuir su facilidad de manejo y favorecer problemas como la retracción plástica o autógena.

Por esta razón, el control de la finura debe mantener un equilibrio entre:

- La reactividad que se desea alcanzar.
- El consumo de energía durante la molienda.
- La resistencia y el comportamiento mecánico del cemento.
- La capacidad del material para conservar su volumen sin presentar deformaciones.

Métodos de control de finura

La finura del cemento se controla mediante ensayos establecidos por normas técnicas. Estas pruebas permiten comprobar que el producto

mantenga características uniformes durante su fabricación y que cumpla con los requisitos internacionales de calidad.

a. Superficie específica Blaine

El método Blaine es el procedimiento más ampliamente utilizado en la industria cementera. Se basa en la medición de la permeabilidad al aire a través de una capa compactada de cemento, lo que permite estimar indirectamente el área superficial específica del material.

El resultado se expresa en: m^2/Kg

Este ensayo está normalizado en diversas normativas internacionales, de acuerdo a:

- ASTM C204
- EN 196-6

En los tipos de cementos Portland ordinarios, los valores típicos de superficie específica Blaine se sitúan entre 300 y 400 m^2/kg, aunque pueden ser mayores en cementos de alta resistencia inicial (Hewlett & Liska, 2019).

Es importante tener en cuenta que el método Blaine determina la superficie específica total del cemento, pero no muestra con detalle cómo se distribuyen sus partículas según el tamaño. Por esta razón, se complementa con otros métodos de análisis.

b. Análisis granulométrico mediante tamizado

Este análisis determina la cantidad de partículas que quedan retenidas en tamices con aberturas de:

- 45 μm.
- 90 μm.

De esta manera, es posible identificar la proporción de partículas gruesas presentes en el cemento, las cuales pueden disminuir la velocidad de hidratación y afectar la uniformidad del producto final.

Aunque es un método sencillo, no proporciona información sobre las fracciones ultrafinas.

c. Distribución de tamaño de partícula (PSD)

Las técnicas instrumentales modernas, como la difracción láser, permiten obtener la distribución completa de tamaño de partícula (Particle Size Distribution, PSD). Este análisis proporciona parámetros como:

- D10, D50, D90
- Curva granulométrica completa
- Área superficial estimada

Desde el punto de vista de ingeniería de materiales, la PSD es más representativa del comportamiento real del cemento, ya que la hidratación no depende únicamente del valor promedio de finura, sino de la proporción relativa de partículas finas, medias y gruesas (Taylor, 1997).

Influencia de la finura en el comportamiento del cemento al entrar en contacto con el agua

La finura del cemento influye directamente en la rapidez con la que reacciona con el agua, ya que una mayor superficie de contacto facilita las reacciones de hidratación. Por esta razón:

- Los cementos más finos desarrollan resistencia con mayor rapidez durante las primeras edades.
- Los cementos menos finos liberan menos calor y alcanzan su resistencia de manera más gradual.

En construcciones de gran tamaño, como presas o estructuras que requieren grandes volúmenes de concreto, se prefieren cementos con una finura moderada. Esto ayuda a controlar el aumento de temperatura generado durante la hidratación y disminuye el riesgo de que aparezcan grietas por cambios térmicos.

Por lo tanto, la finura no debe considerarse únicamente como un indicador de calidad, sino también como una característica que puede ajustarse según el uso previsto del cemento. Dentro del proceso de fabricación, este parámetro relaciona:

- La eficiencia de la molienda.
- La composición mineralógica del clínker.
- La formulación del cemento.
- El comportamiento final del material en la estructura.

En definitiva, la molienda no consiste simplemente en convertir el clínker en polvo. Su verdadero propósito es obtener partículas con una distribución de tamaños adecuada, capaz de equilibrar la reactividad del cemento, el consumo de energía durante su producción y su desempeño en condiciones reales de uso.

4.13.5 Relación entre molienda, finura y consumo energético

Desde la perspectiva de la ingeniería de procesos, la molienda final del cemento constituye una de las etapas más intensivas en consumo energético dentro de la planta cementera. A diferencia de la clinkerización, donde la energía se suministra principalmente en forma de calor, en la molienda la energía se introduce como trabajo mecánico, cuyo propósito es reducir el tamaño de partícula y aumentar la superficie específica del material.

Existe una relación directa entre la energía suministrada al molino y el grado de reducción de tamaño alcanzado. Esta relación ha sido descrita mediante leyes empíricas clásicas de conminución, tales como las propuestas por Kick, Rittinger y Bond, ampliamente utilizadas en ingeniería de procesos de sólidos (Wills & Napier-Munn, 2016).

En términos prácticos, incrementar la finura del cemento implica necesariamente un mayor consumo energético. Por ello, el control de la finura debe responder a un criterio técnico-económico, donde se logre el desempeño requerido del cemento sin incurrir en un gasto energético desproporcionado.

La selección adecuada del equipo de molienda (molino de bolas, molino vertical de rodillos, prensa de rodillos), del sistema de clasificación y de las condiciones operativas constituye un factor determinante para alcanzar este equilibrio (Alsop, Chen, & Tseng, 2007).

En tal sentido, la molienda final no debe considerarse únicamente como una etapa mecánica de reducción de tamaño, sino como una operación unitaria estratégica, que define en gran medida:

- La reactividad hidráulica del cemento
- El desarrollo de resistencias
- El calor de hidratación,
- La eficiencia energética global de la planta.

4.13.6 Balance conceptual de energía en la molienda final del cemento

Naturaleza del consumo energético en la molienda

Desde un enfoque conceptual, el consumo energético en la molienda puede analizarse como la suma de tres contribuciones principales:

- Energía útil de conminución

Es la fracción de energía efectivamente empleada en la generación de nuevas superficies al fracturar las partículas de clínker y de los materiales adicionados. Esta es la energía que cumple el objetivo físico de la operación unitaria.

- Pérdidas mecánicas

Incluyen fricción en cojinetes, engranajes, deformaciones no elásticas de los cuerpos moledores, vibraciones y ruido. Estas pérdidas reducen la eficiencia global del sistema.

- Pérdidas térmicas

Una parte significativa de la energía eléctrica se transforma en calor debido a la fricción interna y a la disipación mecánica. Este fenómeno puede elevar la temperatura del cemento durante la molienda, afectando la deshidratación parcial del yeso o la estabilidad del producto final.

En la práctica industrial, solo una fracción relativamente pequeña de la energía eléctrica consumida se convierte en energía útil de fragmentación; el resto se disipa. Esta realidad explica por qué la molienda representa un foco prioritario de optimización energética en la industria cementera (Hewlett & Liska, 2019).

4.13.7 Enfoque energético basado en leyes de molienda

El análisis conceptual del consumo energético suele apoyarse en leyes empíricas de conminución, que relacionan la energía específica requerida con el cambio en el tamaño de partícula:

- **Ley de Kick**

Establece que la energía necesaria es proporcional a la relación de reducción de tamaño. Es aplicable cuando las reducciones son moderadas y el tamaño inicial es relativamente grande.

- **Ley de Rittinger**

Plantea que la energía requerida es proporcional a la nueva superficie generada. Resulta más adecuada cuando el proceso implica una molienda fina, donde el incremento del área superficial es significativo.

- **Ley de Bond**

Representa un compromiso intermedio entre Kick y Rittinger, y es la más utilizada en la industria cementera para estimar el consumo energético en molinos industriales. La ecuación de Bond relaciona la energía específica con los tamaños característicos del alimento y del producto (Wills & Napier-Munn, 2016).

En el caso del cemento, donde se busca alcanzar elevadas superficies específicas (300–400 m²/kg o superiores), el comportamiento del proceso se aproxima más al descrito por la ley de Rittinger, ya que el consumo energético está estrechamente ligado al incremento de la superficie específica medida por el método Blaine.

4.13.8 Relación entre finura y eficiencia energética

A medida que se incrementa la finura:

- Aumenta la superficie específica.
- Se incrementa la velocidad de hidratación.
- Se eleva el consumo eléctrico del molino.
- Disminuye la eficiencia marginal de conminución.

En otras palabras, los incrementos adicionales de finura requieren cantidades progresivamente mayores de energía por unidad de superficie generada.

Por ello, el diseño de la molienda debe buscar un punto óptimo donde:

- La resistencia mecánica cumpla especificaciones.
- El calor liberado durante la hidratación sea adecuado para el uso previsto del cemento.
- El consumo de energía se mantenga dentro de valores económicamente aceptables.
- Los equipos funcionen correctamente sin sufrir un desgaste prematuro que reduzca su vida útil.

Por lo tanto, el uso eficiente de la energía durante la molienda no solo permite reducir los costos de producción, sino también disminuir el impacto ambiental del cemento. Esto se debe a que la electricidad consumida puede generar emisiones indirectas de CO_2, cuya cantidad depende de las fuentes energéticas utilizadas en cada país.

La comprensión de estos conceptos permite concebir la molienda como una operación unitaria donde convergen:

- Mecanismos de fractura
- Comportamiento de las superficies
- Costos y eficiencias del proceso
- Diseño de materiales cementantes

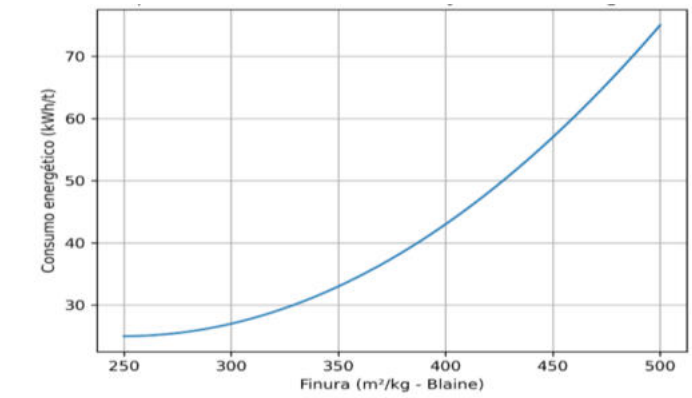


Figura 10. Relación conceptual entre finura del cemento (Blaine) y consumo energético en molienda.

Fuente: Elaboración propia

La figura 10 muestra una relación conceptual no lineal entre la finura del cemento (expresada como superficie específica Blaine, m^2/kg) y el consumo energético específico de la molienda (kWh/t). A medida que

aumenta la finura o el tamaño de la partícula, el consumo energético se incrementa de forma progresivamente más pronunciada, reflejando la menor eficiencia marginal de conminución en rangos de alta superficie específica. Este comportamiento se aproxima conceptualmente al descrito por la ley de Rittinger, donde la energía requerida es proporcional a la nueva superficie generada.

4.13.9 Balance energético conceptual del sistema de molienda

De forma simplificada, el balance energético del molino puede expresarse conceptualmente como:

E Eléctrica = E conminucion + E perdidas mecánicas + E calor

Donde:

- E eléctrica: es la energía suministrada por el motor del molino,
- E conminución: corresponde a la energía útil para la reducción de tamaño,
- E pérdidas mecánicas: incluye fricción y resistencias internas,
- E calor: se manifiesta como aumento de temperatura del cemento y del equipo.

En la práctica industrial, el consumo específico de energía en la molienda final del cemento suele situarse en el rango de 25 a 40 kWh/t, dependiendo del tipo de molino, del circuito de clasificación, de la dureza del clinker y de la finura objetivo.

4.13.10 Implicaciones operativas del balance energético

Desde una perspectiva ingenieril, el balance energético de la molienda final no constituye únicamente un indicador de consumo eléctrico, sino un parámetro estratégico que impacta directamente la eficiencia global del proceso, la calidad del producto y la estabilidad operativa del sistema cementero.

La molienda utiliza entre el 30 % y el 40 % de toda la electricidad consumida en una planta cementera, por lo que constituye una de las etapas con mayor demanda energética (Hewlett & Liska, 2019). Por esta razón, si la energía empleada no produce la reducción de tamaño esperada, pueden presentarse problemas técnicos y mayores costos de producción.

A continuación, se describen algunos impactos derivados del balance energético:

a) Impacto en la eficiencia de producción

La electricidad utilizada durante la molienda repercute directamente en:

- Los costos de operación por cada tonelada de cemento producida.
- El consumo total de energía requerido por el proceso.
- Las emisiones indirectas de carbono asociadas con las fuentes utilizadas para generar electricidad.

Como solo una pequeña parte de la energía suministrada logra romper las partículas, mejorar el circuito de molienda resulta esencial para reducir pérdidas y conseguir una producción cementera más eficiente, estable, económica y ambientalmente responsable. (Wills & Napier-Munn, 2016).

b) Impacto sobre las propiedades del cemento

Considerando los aspectos de calidad del producto, un uso excesivo de energía durante la molienda puede generar partículas demasiado finas. Una cantidad elevada de estas partículas puede ocasionar:

- Mayor cantidad de agua de la necesaria para preparar la mezcla.
- Aumento del calor liberado durante las primeras etapas de hidratación.
- Mayor contracción del material durante el endurecimiento.
- Cambios en la fluidez y facilidad de manejo de mezcla.

Además, una distribución poco uniforme del tamaño de las partículas puede modificar la velocidad de hidratación de los principales minerales del cemento, especialmente del C_3S, e influir negativamente en el desarrollo de la resistencia inicial (Taylor, 1997).

Con esta consideración, el balance energético no solo debe evaluarse en términos de kWh/t, sino en función de su efecto sobre la definición granulométrica del cemento.

c) Impacto en la continuidad de la operación

Durante la molienda, no toda la energía se utiliza para reducir el tamaño de las partículas. Una parte se pierde en forma de calor debido al rozamiento y al movimiento mecánico dentro del molino. Por esta razón, según ciertas condiciones de operación, la temperatura del cemento puede superar los 100 °C.

Este aumento de temperatura puede provocar:

- La pérdida parcial del agua presente en el yeso, transformándolo de dihidrato en hemihidrato.
- Alteraciones en el equilibrio entre los sulfatos y los aluminatos.
- Una mayor tendencia del cemento a presentar falso fraguado.

La modificación del sulfato puede dificultar el control de la reacción del C_3A y afectar la facilidad con la que el cemento fresco se mezcla y se trabaja. (Hewlett & Liska, 2019).

En consecuencia, el control de temperatura en el molino, mediante ventilación adecuada y optimización del flujo de aire, constituye un aspecto crítico del diseño y operación del sistema, la tabla 9 muestra datos comparativos de equipos de molienda y rangos típicos en cuanto a finura.

Tabla 9. Comparativa de equipos de molienda y rangos típicos de finura.

Equipo de molienda	**Principio de operación**	**Finura típica (Blaine, m^2/kg)**	**Consumo energético relativo**	**Observaciones técnicas**
Molino de bolas (circuito abierto)	Impacto y fricción	280 – 350	Alto	Tecnología robusta, menor eficiencia energética, control limitado de la distribución granulométrica
Molino de bolas (circuito cerrado con separador)	Impacto, fricción y clasificación	300 – 420	Medio	Mejor control de finura y menor consumo específico que circuito abierto

Molino vertical de rodillos (VRM)	Compresión y cizallamiento	320 – 450	Bajo	Alta eficiencia energética, menor huella de planta, mayor complejidad operativa
Molino de rodillos de alta presión (HPGR) + separador	Compresión interparticular	300 – 450	Bajo	Alta eficiencia, partículas uniformes, necesita complementarse con otros equipos adicionales.
Sistema híbrido (VRM + molino de bolas)	Compresión + impacto	320 – 420	Medio–bajo	Flexibilidad operativa, combinación de ventajas de ambos sistemas

El proceso de producción del cemento, comprendido desde la preparación y homogenización del crudo hasta la molienda final del producto terminado, evidencia la profunda interrelación entre fenómenos químicos, térmicos y mecánicos que caracterizan a los sistemas industriales complejos. Las etapas no operan de manera aislada, sino como parte de un sistema combinado en el que las decisiones adoptadas en una fase repercuten directa o indirectamente en las siguientes.

La clinkerización, mediante reacciones a temperaturas elevadas, determina los minerales que formarán el cemento. Luego, el enfriamiento conserva esta composición y la molienda final reduce y clasifica las partículas hasta obtener una distribución de tamaños adecuada. Esta característica influye directamente en la rapidez de hidratación y en la resistencia del material.

De acuerdo a la explicación anterior, la molienda final se consolida como una operación unitaria importante. No se limita a reducir el tamaño del clínker, sino que constituye el punto donde convergen:

- La cantidad de energía eléctrica consumida en la planta.
- La proporción de yeso y materiales cementantes suplementarios incorporados al cemento.
- El control de la finura y el tamaño de las partículas.
- El comportamiento y las propiedades del cemento, tanto en estado fresco como después de su endurecimiento.

El control conjunto del consumo de energía, la composición de las materias primas y la finura del cemento influye directamente tanto en la eficiencia general del proceso productivo como en la calidad del producto obtenido.

Desde la perspectiva de la ingeniería, es fundamental comprender cómo se relacionan los fenómenos térmicos que ocurren en el horno, los mecanismos físicos de la molienda y las reacciones químicas de hidratación. Este conocimiento permite diseñar, operar y mejorar las plantas cementeras modernas. Por ello, las decisiones tecnológicas no deben enfocarse únicamente en aumentar la producción, sino también en aprovechar mejor la energía, mantener estable el proceso, disminuir las emisiones y reducir su impacto ambiental.

4.14 Almacenamiento, ensacado y despacho del cemento

Una vez finalizada la molienda, el cemento puede considerarse un producto terminado desde el punto de vista químico y físico. No obstante, su desempeño final no depende únicamente de las etapas previas de clinkerización y molienda, sino también de las condiciones en que se almacena, envasa y transporta hasta el usuario final.

El cemento es un material higroscópico y altamente reactivo frente a la humedad; por ello, su manejo posterior constituye una etapa crítica para preservar las propiedades alcanzadas durante el proceso de fabricación. Las operaciones de almacenamiento, ensacado y despacho no deben entenderse como simples actividades logísticas, sino como fases estratégicas dentro del sistema global de aseguramiento de calidad (Hewlett & Liska, 2019).

4.14.1 Almacenamiento del cemento

El cemento se almacena generalmente en silos cerrados, construidos en acero o concreto, diseñados para proteger el material de la humedad ambiental y evitar fenómenos de segregación o contaminación cruzada entre diferentes tipos de cemento.

a) Ingeniería en el diseño de silos

Desde el enfoque de la ingeniería aplicada al manejo de sólidos a granel, el diseño de los silos debe asegurar:

- Un desplazamiento continuo y uniforme del cemento, procurando que todo el material avance al mismo tiempo y evitando el flujo en forma de embudo.
- La prevención de problemas como la compactación, la formación de bóvedas internas o la aparición de canales de flujo, conocidos como rat-holing.
- Un control apropiado de la aireación dentro del silo.
- Un manejo adecuado del tiempo que el cemento permanece almacenado

El comportamiento del cemento durante su almacenamiento puede estudiarse mediante los principios de la mecánica de materiales granulares. En este análisis se consideran propiedades como el ángulo de reposo, la cohesión entre las partículas y la presión de compactación, ya que estas influyen directamente en la forma en que el material circula y sale del silo (Wills & Napier-Munn, 2016).

Un silo diseñado de manera incorrecta puede ocasionar:

- Separación de las partículas según su tamaño.
- Formación de terrones o acumulaciones compactas.
- Problemas durante la descarga del material.
- Cambios en la uniformidad y calidad del cemento entregado.

b) Control de humedad y estabilidad

El cemento es muy sensible a la humedad, por lo que debe almacenarse en condiciones que eviten su contacto con el agua. Una exposición prolongada puede provocar:

- La reacción anticipada de algunos de sus componentes más activos, como el C_3S y el C_3A.
- La unión de las partículas y la formación de grumos o terrones.
- La reducción de la superficie disponible para reaccionar con el agua durante su uso.
- La disminución de la capacidad del cemento para desarrollar la resistencia mecánica esperada.

Incluso pequeñas cantidades de humedad pueden activar reacciones superficiales que alteran la reactividad posterior del material (Taylor, 1997). Por ello, los silos deben estar equipados con sistemas de ventilación controlada y filtros que impidan la entrada de aire húmedo.

Desde la práctica industrial, se recomienda minimizar el tiempo de almacenamiento prolongado, especialmente en climas tropicales o de alta humedad relativa.

4.14.2 Ensacado del cemento

El ensacado consiste en la dosificación del cemento en envases (comúnmente de 25 o 50 kg), mediante sistemas automáticos de llenado y sellado. Desde lo operativo, esta etapa debe garantizar:

Requisitos operativos

Desde la perspectiva técnica, se debe asegurar:

- Una cantidad exacta de cemento en cada envase, de acuerdo con lo establecido en las normas.
- Un envase resistente, capaz de soportar la manipulación, el almacenamiento y el transporte.
- Un cierre adecuado que proteja el cemento del contacto con la humedad.
- La reducción de las emisiones de polvo durante el llenado y sellado.

El peso de cada envase se controla generalmente mediante equipos electrónicos como balanzas de alta precisión. Este control es importante porque las diferencias repetidas en la cantidad de producto pueden generar pérdidas económicas para la empresa o incumplimiento de requisitos establecidos.

Control ambiental en ensacado

El ensacado es una de las etapas con mayor potencial de emisión de material particulado. Por ello, las plantas modernas incorporan:

- Sistemas de filtración de mangas.
- Recuperación y recirculación de polvo.
- Encapsulamiento de líneas de llenado.

Estas medidas no solo mejoran las condiciones ambientales internas y externas de la planta, sino que también contribuyen a la eficiencia global del proceso al recuperar material fino (Hewlett & Liska, 2019).

4.14.3 Despacho a granel

El despacho a granel representa una alternativa logística más eficiente para grandes volúmenes de cemento. Se realiza mediante:

- Camiones cisterna presurizados.
- Vagones ferroviarios.
- Sistemas neumáticos de transferencia.

Desde el punto de vista operativo, el transporte neumático permite transferir el cemento desde el silo hasta el vehículo mediante aire comprimido, asegurando descarga rápida y controlada.

Ventajas del despacho a granel

- Reducción del uso de envases.
- Disminución de costos logísticos.
- Menor generación de residuos sólidos
- Mayor eficiencia en proyectos de gran escala.

Además, el despacho a granel reduce la manipulación intermedia, lo que minimiza la exposición del cemento a condiciones ambientales adversas.

4.15 Control de calidad en los procesos de fabricación del cemento

El control de calidad en la industria cementera no constituye una etapa aislada, sino un sistema transversal que acompaña todas las fases del proceso productivo, desde la selección de materias primas hasta la certificación del producto terminado. Su propósito es asegurar que el cemento mantenga una calidad uniforme, cumpla con las normas técnicas nacionales e internacionales y conserve de manera constante sus propiedades físicas, químicas y mecánicas.

En términos de ingeniería, el control de calidad integra:

- Evaluación de la composición química y de los minerales presentes.
- Seguimiento continuo de las principales condiciones de operación.
- Realización de ensayos físicos establecidos por las normas técnicas.

La fabricación del cemento es un proceso continuo que puede verse afectado por pequeños cambios en la composición de las materias primas o en la temperatura. Por esta razón, la calidad no debe comprobarse únicamente cuando el producto está terminado, sino controlarse de forma preventiva durante cada etapa de producción (Hewlett & Liska, 2019).

4.15.1 Control de materias primas y crudo

El aseguramiento de la calidad comienza en la etapa de preparación del crudo. Dado que la clinkerización depende directamente de la composición química del material alimentado al horno, el control temprano permite anticipar desviaciones y evitar inestabilidades térmicas o defectos mineralógicos.

a) Análisis químico de materias primas

Las materias primas (caliza, arcilla, correctores de hierro y sílice) son sometidas a análisis químicos periódicos mediante técnicas como:

- Fluorescencia de rayos X (XRF)
- Análisis químico clásico
- Espectroscopía.

El objetivo es determinar concentraciones de:

- CaO (óxido de calcio),
- SiO_2 (Dióxido de silicio),
- Al_2O_3 (Trióxido de aluminio),
- Fe_2O_3 (Tríóxido de hierro),
- MgO (Óxido de magnesio),
- SO_3 (Trióxido de azufre),
- Álcalis.

b) Verificación de la composición del crudo

La homogenización del crudo busca mantener una composición constante que permita una clinkerización estable. En este contexto, se controlan los principales índices químicos, entre ellos:

- LSF (Lime Saturation Factor)
- SM (Silica Modulus)
- AM (Alumina Modulus)

Estos índices permiten prever la proporción de fases potenciales del clínker y ajustar la dosificación antes de que se presenten problemas operativos en el horno (Taylor, 1997).

Un control deficiente en esta etapa puede derivar en:

- Exceso de cal libre,
- Formación inadecuada de C_3S,
- Problemas de estabilidad térmica.

4.15.2 Control del proceso de clinkerización

Durante la clinkerización, el control de calidad se apoya en:

- Monitoreo de temperaturas y perfiles térmicos del horno: Incluye temperatura de llama, temperatura de gases, presión y flujo de aire.

- Inspección del clinker (cal libre, color, formación): Incluye determinación de cal libre, inspección visual de color y tamaño de nódulo, ensayos de reactividad, análisis mineralógico.
- Ensayos de enfriamiento y mineralogía.

Un control inadecuado en esta etapa puede generar clinker con baja reactividad o con defectos que afecten la molienda y el desempeño del cemento.

4.15.3 Control del cemento terminado

Una vez finalizada la molienda y formulación, el cemento es sometido a ensayos normalizados que certifican su cumplimiento normativo.

Ensayos físicos y mecánicos más relevantes

Finura

- Método Blaine (ASTM C204, EN 196-6).

Tiempo de fraguado

- Aparato de Vicat, normas de referencia ASTM C191, EN 196-3.

Resistencia mecánica a compresión

- Ensayos en morteros normalizados, según la referencia de ASTM C109, EN 196-1.

Estabilidad volumétrica (expansión)

- Método Le Chatelier o autoclave, de acuerdo a ASTM C151.

Según ASTM International (2022), estos ensayos permiten verificar y garantizan que el cemento cumple con las especificaciones de normas tales como:

- ASTM C150 (cemento Portland),
- EN 197-1 (cementos comunes),
- Normativas nacionales aplicables.

El control de calidad en la industria cementera combina acciones preventivas y correctivas. Su aplicación no se limita a revisar el cemento una vez terminado, sino que incluye:

- El uso del control estadístico para identificar variaciones en el proceso.
- La supervisión continua de las condiciones de producción mediante sistemas en línea.
- El seguimiento de cada lote desde las materias primas hasta el producto final.
- La realización de auditorías internas y evaluaciones externas para comprobar el cumplimiento de las normas

Desde la formación en ingeniería, comprender este sistema permite analizar la fabricación del cemento más allá de una simple sucesión de cambios físicos y químicos. También ayuda a reconocerla como un proceso industrial organizado, que debe cumplir requisitos técnicos y normativos, además de mantener un funcionamiento estable, seguro y confiable.

El control de calidad es, en última instancia, el mecanismo que asegura que la compleja interacción entre química, termodinámica y mecánica se traduzca en un producto técnicamente confiable y apto para aplicaciones estructurales exigentes. La tabla 10 muestra la relación entre cada etapa del proceso, las principales variables y normativas referenciales de control.

Tabla 10. Relación entre etapa del proceso, variables de control, ensayos y normas aplicables.

Etapa del proceso	**Variable crítica de control**	**Ensayo / Método**	**Normativa de referencia**
Materias primas	Composición química (CaO, SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3, MgO, SO_3)	Fluorescencia de rayos X (XRF)	ASTM C114 / EN 196-2
	Humedad	Secado en estufa	ASTM C566
	Granulometría	Tamizado	ASTM C136
Crudo homogenizado	LSF, SM, AM	Cálculo estequiométrico a partir de análisis químico	Hewlett & Liska (2019)
	Homogeneidad	Muestreo estadístico y análisis químico	Control interno de planta
Clinkerización	Temperatura del horno	Termopares y monitoreo continuo	Control interno de proceso
	Cal libre (CaO libre)	Titulación química / XRD	ASTM C114
	Mineralogía (C_3S, C_2S, C_3A, C_4AF)	Difracción de rayos X (XRD)	EN 196-2

	Nodulización	Inspección visual / tamizado	Control interno
Molienda final	Finura (superficie específica)	Método Blaine	ASTM C204 / EN 196-6
	Residuo en tamiz (45 µm / 90 µm)	Tamizado	ASTM C430
	Temperatura del cemento	Medición directa	Control interno
Cemento terminado	Tiempo de fraguado	Aparato de Vicat	ASTM C191 / EN 196-3
	Resistencia mecánica	Ensayo a compresión en mortero	ASTM C109 / EN 196-1
	Estabilidad volumétrica	Método Le Chatelier / Autoclave	ASTM C151 / EN 196-3
	Expansión por sulfatos	Ensayo acelerado	ASTM C1012
	Cumplimiento de especificación	Verificación integral	ASTM C150 / EN 197-1

La tabla 10 muestra que el control de calidad en la industria cementera no se concentra exclusivamente en el producto terminado, sino que se distribuye a lo largo de todo el proceso productivo. Cada etapa del proceso productivo posee variables críticas, cuya desviación puede afectar de forma directa o indirecta etapas posteriores.

También se puede señalar que:

- Las etapas iniciales controlan principalmente la composición química del material.
- La clinkerización controla la temperatura y la formación mineralógica.

- La molienda controla las propiedades físicas y el consumo energético.
- El producto final se verifica mediante ensayos físicos y mecánicos normalizados.

Este control asegura que el cemento cumpla los requisitos técnicos para estructuras.

4.16 Consideraciones energéticas y ambientales del proceso cementero

La fabricación del cemento es uno de los procesos industriales más intensivos en energía dentro del sector de materiales de construcción. Su complejidad termoquímica, particularmente en la etapa de clinkerización, implica elevados requerimientos energéticos y una significativa generación de emisiones atmosféricas. En consecuencia, la eficiencia energética y la sostenibilidad ambiental han dejado de ser objetivos complementarios para convertirse en criterios centrales en el diseño, operación y modernización de plantas cementeras (Hewlett & Liska, 2019).

El análisis energético debe integrar el consumo térmico y eléctrico, considerando su efecto en las emisiones de carbono y en la competitividad de la industria.

4.16.1 Consumo energético del proceso cementero

El consumo energético total del proceso se encuentra distribuido en dos grandes categorías:

a) Demanda térmica del proceso de clinkerización

La clinkerización representa la etapa de mayor consumo energético, debido a:

- La generación de reacción endotérmicas de descarbonización del $CaCO_3$.
- El calentamiento del material hasta temperaturas cercanas a 1450 °C.
- Las pérdidas térmicas inherentes al sistema.

En plantas modernas de vía seca con precalcinador, el consumo térmico específico se sitúa típicamente en el rango de:

3.0 - 3,3 GJ/t de clínker

Mientras que en sistemas más antiguos puede superar los 4.0 GJ/t clínker (Alsop, Chen, & Tseng, 2007).

La eficiencia térmica depende en gran medida de:

- El diseño del sistema de precalentamiento.
- La cantidad de carbonato de calcio que se descompone antes de ingresar al horno.
- El aprovechamiento de calor recuperado durante el enfriamiento del clínker.
- La capacidad de revestimiento del horno rotatorio para conservar el calor y reducir las pérdidas de energía.

b) Consumo de energía eléctrica en la molienda y el transporte

Dentro de una planta cementera, la energía eléctrica se utiliza principalmente en las siguientes operaciones:

- La molienda de las materias primas.
- La molienda final del clínker para obtener el cemento.
- El traslado neumático y mecánico de los materiales entre las diferentes etapas.
- El funcionamiento de ventiladores y otros equipos auxiliares.

La molienda final consume aproximadamente entre 25 y 35 kWh por cada tonelada de cemento producida, por lo que representa una de las operaciones con mayor demanda eléctrica dentro de la planta (Hewlett & Liska, 2019).

Aunque el consumo de electricidad es menor que la demanda de energía térmica, su efecto sobre los costos y el ambiente depende de las fuentes utilizadas para generar electricidad en cada país.

4.17 Impacto ambiental y emisiones

La fabricación del cemento genera impactos ambientales importantes debido a las reacciones químicas que ocurren durante la formación del clínker y a la gran cantidad de energía que se necesita para el proceso. Entre las principales emisiones producidas se encuentran:

- Dióxido de carbono (CO_2)
- Material particulado (PM)
- Óxidos de nitrógeno (NO_x)

- Óxidos de azufre (SO_x)

Estas emisiones tienen dos orígenes principales:

Algunas se producen directamente por las reacciones químicas de las materias primas, mientras que otras provienen de la combustión necesaria para alcanzar las elevadas temperaturas del horno rotatorio.

4.17.1 Emisiones de dióxido de carbono (CO_2)

El dióxido de carbono (CO_2) es la emisión de mayor importancia por su contribución al cambio climático. En la industria cementera, se genera principalmente en dos vías:

4.17.2 Emisiones propias del proceso químico

Se originan durante la descomposición térmica del carbonato de calcio, reacción en la que se libera dióxido de carbono

$CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2$

Estas emisiones representan aproximadamente 60–65 % del total generadas, asociadas principalmente al proceso químico de producción de clínker (Hewlett & Liska, 2019).

4.17.3 Emisiones por combustión

Este tipo emisiones se asocian al uso de combustibles fósiles en la generación de energía térmica en el horno.

Esta doble fuente convierte la reducción de emisiones de CO_2 en un desafío técnico particularmente complejo, ya que una parte sustancial

no depende únicamente de la matriz energética, sino de la reacción química fundamental del proceso.

Se estima que la industria cementera contribuye aproximadamente con 7–8 % de las emisiones antropogénicas globales de CO_2, lo que ha impulsado un esfuerzo sostenido de innovación tecnológica y regulatoria en el sector (Hewlett & Liska, 2019).

4.17.4 Material particulado y emisiones gaseosas

Además del CO_2, el proceso cementero genera material particulado en distintas etapas, principalmente en:

- Molienda,
- Transporte neumático,
- Enfriamiento del clínker,
- Ensacado

El control del polvo se realiza mediante:

- Filtros de mangas de polvo
- Precipitadores del tipo electrostáticos
- Sistemas de captación localizada.

En cuanto a los NO_x, estos se forman principalmente por mecanismos térmicos a altas temperaturas en la llama del horno. Los SO_x, por su parte, están asociados al contenido de azufre en las materias primas y combustibles.

La reducción de estas emisiones implica estrategias combinadas de optimización térmica y tecnologías de control de gases (Alsop, Chen, & Tseng, 2007).

4.18 Estrategias de mitigación y sostenibilidad

Frente a los desafíos energéticos y ambientales, la industria cementera ha desarrollado múltiples estrategias orientadas a reducir su impacto sin comprometer el desempeño técnico del cemento.

4.18.1 Uso de combustibles alternativos

La sustitución parcial de combustibles fósiles por:

- Biomasa,
- Residuos industriales,
- Combustibles derivados de residuos (CDR),

Permite disminuir la intensidad de carbono del proceso térmico. Esta estrategia contribuye tanto a la reducción de emisiones netas como a la valorización energética de residuos.

4.18.2 Reducción del factor clínker

La incorporación de materiales complementarios al cemento, como escorias, puzolanas y filler calizo, reducen la proporción de clínker en el cemento final. Dado que el clínker es el principal responsable de las emisiones de CO_2, esta estrategia tiene un impacto directo en la reducción de la huella de carbono por tonelada de cemento producido (Hewlett & Liska, 2019).

4.18.3 Mejora de la eficiencia energética global

Desde la ingeniería de procesos, la optimización energética busca reducir el consumo específico sin comprometer la calidad del producto. Entre las estrategias más relevantes se encuentran:

a) Sistemas de precalentamiento y precalcinación

Principalmente el uso de torres de ciclones y precalcinadores, cuya operación permite:

- Transferencia eficiente de calor sólido–gas.
- Reducción de la longitud del horno.
- Disminución del consumo térmico específico.

Estos sistemas representan una de las innovaciones más significativas en la evolución tecnológica de la industria cementera (Alsop et al., 2007).

b) Mejora en la eficiencia de equipos de molienda

La incorporación de:

- Molinos verticales de rodillos (VRM),
- Prensas de rodillos de alta presión,
- Separadores dinámicos de alta eficiencia,

permite reducir el consumo eléctrico por tonelada de cemento producido.

c) Recuperación y reutilización de calor residual

El calor sensible de los gases del horno y del enfriador puede recuperarse mediante:

Sistemas de recuperación de calor residual (WHR – Waste Heat Recovery),

Generación de energía eléctrica a partir de gases calientes,

Optimización del aire secundario y terciario.

La recuperación energética contribuye a mejorar la eficiencia global del proceso y a reducir la dependencia de fuentes externas de energía.

4.18.4 Tecnologías de control de emisiones

Las plantas modernas incorporan sistemas de:

- Filtración de partículas,
- Reducción catalítica selectiva (SCR) o no catalítica (SNCR) para NO_x,
- Control de SO_x,
- Captura y almacenamiento de carbono (CCS) en proyectos piloto.

La implementación de estas tecnologías refleja una transición progresiva hacia modelos productivos más sostenibles.

El proceso de producción y fabricación del cemento debe entenderse como un sistema industrial altamente integrado, donde cada etapa —desde la preparación del crudo hasta el despacho del producto terminado— influye directamente en:

- La calidad técnica del cemento,

- El consumo energético global,
- La huella ambiental del proceso.

Las decisiones relacionadas con la composición del crudo, el funcionamiento térmico del horno, la eficiencia de la molienda y la distribución del producto están estrechamente vinculadas. Cualquier cambio realizado en una de estas etapas puede influir en el desempeño de las demás y en la calidad final del cemento

Desde la formación en ingeniería, comprender el proceso como un sistema integrado es fundamental. Por ello, el profesional de la industria cementera debe relacionar conocimientos de:

- Química y comportamiento del cemento.
- Operaciones unitarias aplicadas al proceso.
- Transferencia de calor y de materia.
- Uso eficiente de la energía.
- Prevención y gestión de los impactos ambientales.

Esta visión integral permite contribuir de manera responsable a la modernización de la industria, buscando un equilibrio entre la productividad, la calidad del cemento y la reducción de su impacto ambiental.

4.19 Elementos de cierre

Preguntas de evaluación:

A. Preguntas abiertas

1. Describa cómo se fabrica el cemento, señalando sus principales etapas y la función que cumple cada una dentro del proceso.

2. Explique por qué la preparación y la mezcla uniforme del crudo son importantes para obtener un clínker y un cemento de buena calidad.

3. Compare los procesos de fabricación por vía seca y vía húmeda, tomando en cuenta las diferencias en el consumo de energía y en la forma de operar la planta.

4. Explique qué representa el factor de saturación de cal (LSF) y cómo influye en la formación de los minerales del clínker y en la cantidad de cal que puede quedar sin reaccionar.

5. Describa las etapas de la clinkerización e indique los principales cambios físicos y químicos que experimenta el material en cada una.

6. Explique cómo la velocidad de enfriamiento del clínker influye en la conservación de sus minerales y en la capacidad del cemento para reaccionar con el agua.

7. ¿Qué función cumple el yeso durante la molienda final y qué problemas pueden presentarse cuando se añade una cantidad inadecuada?

8. Desde el punto de vista de las operaciones unitarias, explique cómo se realiza la molienda final del cemento y cómo esta etapa influye en el consumo de energía.

9. Describa cómo se controla la calidad durante la fabricación del cemento, desde la selección de las materias primas hasta la evaluación del producto terminado.

10. Identifique las etapas que consumen más energía y las principales fuentes de impacto ambiental de la industria cementera. Además, proponga medidas técnicas que permitan reducirlas.

B. Preguntas de opción múltiple

Instrucciones: Seleccione la única opción correcta de acuerdo a las alternativas propuestas en cada pregunta.

1. ¿Qué función cumple el precalentamiento del crudo dentro del proceso de fabricación del cemento?

a) Formar las fases del clinker
b) Incrementar la finura del material
c) Aprovechar el calor de los gases para elevar la temperatura del crudo
d) Regular el tiempo de fraguado

2. La descarbonización del carbonato de calcio ocurre principalmente en el rango de temperatura:

a) 300 ºC –600 °C
b) 600ºC –800 °C
c) 850 ºC –1000 °C
d) 1200 ºC –1400 °C

3. ¿Cuál de las siguientes fases se forma predominantemente en la zona de sinterización del horno?

a) Ettringita
b) Silicato tricálcico (C_3S)
c) Hidróxido de calcio

d) Yeso

4. El método de fabricación del cemento con mayor eficiencia energética es:

a) Vía húmeda
b) Vía semi-húmeda
c) Vía seca con precalentador y precalcinador
d) Vía semi-seca tradicional

5. El módulo de sílice (SM) se define cómo la relación entre:

a) CaO y SiO_2
b) Al_2O_3 y Fe_2O_3
c) SiO_2 y (Al_2O_3 + Fe_2O_3)
d) CaO y (Al_2O_3 + Fe_2O_3)

6. Una finura elevada del cemento se asocia principalmente con:

a) Menor velocidad de hidratación
b) Mayor superficie específica
c) Menor consumo energético
d) Mayor estabilidad volumétrica inmediata

7. ¿Cuál es la función principal del separador dinámico en un circuito de molienda?

a) Incrementar la dureza del clinker
b) Controlar la dosificación del yeso
c) Clasificar el material según su tamaño de partícula
d) Reducir la temperatura del cemento

8. El consumo energético típico de la molienda final del cemento se sitúa aproximadamente en el rango de:

a) 5–10 kWh/t
b) 10–20 kWh/t
c) 25–40 kWh/t
d) 60–80 kWh/t

9. ¿Cuál de las siguientes es una fuente de emisión de CO_2 de origen químico en la fabricación del cemento?

a) Combustión del combustible en el horno
b) Molienda del clinker
c) Descarbonización del $CaCO_3$
d) Transporte del cemento

10. El almacenamiento del cemento debe realizarse en silos cerrados principalmente para:

a) Incrementar la finura
b) Facilitar el ensacado
c) Evitar la hidratación prematura y la segregación
d) Mejorar la resistencia mecánica

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alsop, P. A., Chen, H., & Tseng, H. H. (2007). The cement plant operations handbook (5th ed.). Tradeship Publications.

ASTM International. (2020). ASTM C136/C136M-19: Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates. ASTM International.

ASTM International. (2020). ASTM C618-19: Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete. ASTM International.

ASTM International. (2021). ASTM C989/C989M-20: Standard specification for slag cement for use in concrete and mortars. ASTM International.

ASTM International. (2022). ASTM C114-22: Standard test methods for chemical analysis of hydraulic cement. ASTM International.

ASTM International. (2022). ASTM C204-22: Standard test methods for fineness of hydraulic cement by air-permeability apparatus. ASTM International.

ASTM International. (2023). ASTM C150/C150M: Standard specification for Portland cement. ASTM International.

Bensted, J., & Barnes, P. (Eds.). (2002). Structure and performance of cements (2nd ed.). Spon Press.

Blezard, R. G. (1998). The history of calcareous cements. In P. Hewlett (Ed.), Lea's chemistry of cement and concrete (4th ed., pp. 1–24). Arnold.

Boggs, S. (2014). Principles of sedimentology and stratigraphy (5th ed.). Pearson.

Bogue, R. H. (1955). The chemistry of Portland cement (2nd ed.). Reinhold Publishing Corporation.

Deer, W. A., Howie, R. A., & Zussman, J. (2013). An introduction to the rock-forming minerals (3rd ed.). Mineralogical Society.

Dodds, G. (1990). Architecture and society in ancient Greece. Cambridge University Press.

EN 197-1. (2011). Cement – Part 1: Composition, specifications and conformity criteria for common cements. European Committee for Standardization (CEN).

EN 450-1. (2012). Fly ash for concrete – Part 1: Definition, specifications and conformity criteria. European Committee for Standardization (CEN).

Grim, R. E. (1968). Clay mineralogy (2nd ed.). McGraw-Hill.

Hewlett, P. C., & Liska, M. (Eds.). (2019). Lea's chemistry of cement and concrete (5th ed.). Butterworth-Heinemann.

Jackson, M. D. (2014). Roman architecture and volcanic materials: The pozzolanic foundations of durable concrete. Elements, 10(3), 185–190. https://doi.org/10.2113/gselements.10.3.185

Jackson, M. D., Landis, E. N., Brune, P. F., Vitti, M., Chen, H., Li, Q., Kunz, M., & Wenk, H. R. (2014). Mechanical resilience and cementitious processes in Imperial Roman architectural mortar. Proceedings of the National Academy of Sciences, 111(52), 18484–18489. https://doi.org/10.1073/pnas.1417456111

Kurdowski, W. (2014). Cement and concrete chemistry. Springer.

Lea, F. M. (1998). Lea's chemistry of cement and concrete (4th ed.). Elsevier Butterworth-Heinemann.

McCabe, W. L., Smith, J. C., & Harriott, P. (2005). Unit operations of chemical engineering (7th ed.). McGraw-Hill.

Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2014). Concrete: Microstructure, properties, and materials (4th ed.). McGraw-Hill Education.

Mindess, S., Young, J. F., & Darwin, D. (2003). Concrete. Prentice Hall.

Murray, H. H. (2007). Applied clay mineralogy: Occurrences, processing and application of kaolins, bentonites, palygorskite–sepiolite, and common clays. Elsevier.

Neville, A. M. (2011). Properties of concrete (5th ed.). Pearson Education Limited.

Odler, I. (Ed.). (2000). Special inorganic cements. CRC Press.

Schneider, M., Romer, M., Tschudin, M., & Bolio, H. (2011). Sustainable cement production—present and future. Cement and Concrete Research, 41(7), 642–650. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.03.019

Scrivener, K. L., Juilland, P., & Monteiro, P. J. M. (2015). Advances in understanding hydration of Portland cement. Cement and Concrete Research, 78, 38–56. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.05.025

Scrivener, K. L., Snellings, R., & Lothenbach, B. (2018). A practical guide to microstructural analysis of cementitious materials. CRC Press.

Taylor, H. F. W. (1997). Cement chemistry (2nd ed.). Thomas Telford Publishing.

Vitruvio. (2007). Los diez libros de arquitectura (J. Ortiz y Sanz, Trad.). Alianza Editorial. (Obra original publicada ca. 15 a.C.).

Wills, B. A., & Finch, J. A. (2016). Wills' mineral processing technology (8th ed.). Butterworth-Heinemann.

Cemento y operaciones unitarias, se publicó en el mes de noviembre de 2026.

ISBN: 978-9907-852-08-0

Grupo Editorial BLR
Ecuador
Cel: +593 98 320 4362
https://grupoblr.com/
publicaciones@grupoblr.com

BIOGRAFÍA DE AUTORES

Lenin Vicente Loayza Peñaranda:
Ingeniero Químico graduado por la Universidad Técnica de Machala, con maestría en Química Aplicada por la Universidad Técnica Particular de Loja. Docente en la Universidad Técnica de Machala en la Facultad de Ciencias Agropecuarias, con experiencia en la industria y la producción. Actualmente imparte las asignaturas de Química y Bioquímica.

María Elena Yánez Romero:
Ingeniera Química, magíster en Ingeniería Industrial y Productividad, y magíster en Docencia y Educación. Actualmente es docente titular y coordinadora de la carrera de Ingeniería Química en la Universidad Técnica de Machala. Su labor académica articula la docencia, la investigación y la gestión universitaria, con énfasis en ingeniería química, materiales y producción científica. Ha participado en proyectos de investigación, procesos de evaluación académica y publicaciones en revistas científicas, consolidando una trayectoria orientada al fortalecimiento de la educación superior.

Andréi Nikolay Sánchez Rodríguez:
Ingeniero Químico de profesión por la Universidad Técnica de Machala con estudios de posgrado en Docencia Universitaria en la misma Universidad, Especialista en Gestión Pública por el Instituto de Altos Estudios Nacionales, IAEN, y Maestría en Desarrollo Local por la Universidad Católica de Cuenca. Cuenta con una amplia experiencia profesional en el sector público y privado. En el sector público ha desempeñado varios cargos,desde la gerencia de empresas, dirección, docencia, técnico y analista. Ha publicado varios artículos de investigación en temas como: modelos de gestión de recursos hídricos, modelos de desarrollo local, educación, entre otros. Actualmente ejerce la docencia en la Universidad Técnica de Machala.

CEMENTO Y OPERACIONES UNITARIAS

Estimado lector, este libro concebido desde el enfoque formativo y aplicado de la Ingeniería Química, se presenta como un material complementario para las asignaturas de Tecnología Inorgánica y Tecnología Química en carreras afines a los procesos industriales. Su propósito central es brindar una guía técnica estructurada sobre la manufactura, caracterización y generalidades del cemento, insumo de trascendencia global para la infraestructura y la construcción.

La obra desarrolla una sólida base conceptual centrada en las formulaciones del cemento Portland y sus derivados. Examina minuciosamente la composición química y el rol operativo de las materias primas individuales dentro de la línea de producción. Asimismo, profundiza en la termoquímica de la síntesis, detallando las reacciones de clinkerización o sinterización que determinan las propiedades del aglutinante.

Para vincular la teoría con la práctica fabril, el texto integra las operaciones unitarias esenciales de la planta cementera y dedica un apartado al aseguramiento y control de la calidad en cada fase productiva, criterio indispensable para el futuro profesional. Con cuestionarios de autoevaluación al cierre de cada capítulo, la obra consolida competencias analíticas y operativas orientadas a la optimización de procesos y a la eficiencia técnica en la industria inorgánica.

.

GRUPO BLR

Grupo Editorial BLR
Ecuador
Cel: +593 98 320 4362
https://grupoblr.com/
publicaciones@grupoblr.com

ISBN: 978-9907-852-08-0

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE MACHALA
1969