



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
FACULTAD DE INGENIERIA GEOLOGICA Y
METALURGICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA METALURGICA



EVALUACION DE LOS TRATAMIENTOS TERMICOS DE
ENFRIAMIENTO Y SU INCIDENCIA EN LAS
CARACTERISTICAS DEL OXIDO DE CALCIO EN LA
EMPRESA CALQUIPA SAC. DISTRITO CALLALLI, REGION
AREQUIPA

TESIS

PRESENTADA POR:

RICHARD SANTIAGO SARMIENTO VALDIVIA

PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO METALURGISTA

PUNO – PERU

2024



NOMBRE DEL TRABAJO

**EVALUACION DE LOS TRATAMIENTOS T
ERMICOS DE ENFRIAMIENTO Y SU INCID
ENCIA EN LAS CARACTERISTICAS DEL**

AUTOR

RICHARD SANTIAGO SARMIENTO VAL

RECuento DE PALABRAS

22085 Words

RECuento DE CARACTERES

120425 Characters

RECuento DE PÁGINAS

144 Pages

TAMAÑO DEL ARCHIVO

2.3MB

FECHA DE ENTREGA

Nov 6, 2024 9:34 PM GMT-5

FECHA DEL INFORME

Nov 6, 2024 9:36 PM GMT-5

● **14% de similitud general**

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para cada base de datos.

- 13% Base de datos de Internet
- Base de datos de Crossref
- 6% Base de datos de trabajos entregados
- 2% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de contenido publicado de Crossref

● **Excluir del Reporte de Similitud**

- Material bibliográfico
- Material citado
- Bloques de texto excluidos manualmente
- Material citado
- Coincidencia baja (menos de 20 palabras)


DR. HECTOR CLEMENTE HERRERA CORDOVA
ING. METALURGISTA
CIP N° 43152


Hipólito Córdova Gutiérrez
DIRECTOR DE LA UNIDAD DE INVESTIGACIÓN DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLOGICA Y METALURGICA



DEDICATORIA

Quiero dedicar esta tesis a mis padres Richard y María del Carmen, por su apoyo incondicional, su paciencia y aliento en todo momento, todo lo que soy es gracias a ellos. A mi esposa Cynthia, mis hijos Nicolás y Rodrigo, por ser mi mayor inspiración para perseguir mis objetivos con pasión y determinación, son lo mejor y más valioso que Dios me ha dado.

Richard Santiago Sarmiento Valdivia



AGRADECIMIENTOS

Quiero extender mis más sinceros agradecimientos a todos los que han contribuido en el desarrollo de esta tesis.

En primer lugar, A la Universidad Nacional del Altiplano, Facultad de Ingeniería Geológica y Metalúrgica, Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica por su formación profesional.

Agradecer a mi director de tesis, Héctor Clemente Herrera Córdova, por su mentoría, tolerancia y apoyo continuo durante el proceso de investigación, sus valiosas aportes y comentarios han sido esenciales para lograr los objetivos propuestos.

También agradecer a la empresa Calquipa SAC, por su colaboración en la realización de las pruebas experimentales que ha permitido obtener datos valiosos para el desarrollo de esta tesis.

Richard Santiago Sarmiento Valdivia



ÍNDICE GENERAL

	Pág.
DEDICATORIA	
AGRADECIMIENTOS	
ÍNDICE GENERAL	
ÍNDICE DE TABLAS	
ÍNDICE DE FIGURAS	
ÍNDICE DE ANEXOS	
ACRÓNIMOS	
RESUMEN	17
ABSTRACT.....	18
CAPÍTULO I	
INTRODUCCION	
1.1 DESCRIPCION DE LA REALIDAD DEL PROBLEMA.....	19
1.2 FORMULACION DEL PROBLEMA	19
1.2.1 Problema general.....	19
1.2.2 Problemas específicos	20
1.3 JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO	20
1.3.1 Justificación teórica.....	20
1.3.2 Justificación practica	20
1.3.3 Justificación social	21
1.3.4 Justificación económica	21
1.4 HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN	22
1.4.1 Hipótesis general	22
1.4.2 Hipótesis especifica.....	22



1.5	OBJETIVOS.....	23
1.5.1	Objetivo general	23
1.5.2	Objetivo específico.....	23

CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1	ANTECEDENTES	24
2.2	MARCO TEÓRICO	27
2.2.1	Oxido de Calcio (cal y/o cal viva).....	27
2.2.1.1	Materia prima (la caliza)	28
2.2.1.1.1	Características de la caliza.....	29
2.2.1.1.2	Composición química de la caliza.....	31
2.2.1.1.3	Clasificación de calizas	32
2.2.1.1.4	Impurezas de las calizas	34
2.2.1.2	Origen de óxido de calcio	34
2.2.1.3	Importancia del óxido de calcio	35
2.2.1.4	Tipos de cal	36
2.2.1.4.1	Cal viva.....	36
2.2.1.4.2	Cal apagada o hidratada.....	36
2.2.1.4.3	Cal hidráulica.....	37
2.2.1.4.4	Cal aérea	37
2.2.1.4.5	Cal refractaria	38
2.2.1.5	Características del óxido de calcio.....	38
2.2.1.6	Aplicaciones del óxido de calcio.....	39
2.2.1.6.1	Industria.....	39
2.2.1.6.2	Construcción.....	40



2.2.1.6.3	Protección del medio ambiente	40
2.2.1.6.4	Agricultura.....	42
2.2.2	Proceso general de obtención de óxido de calcio.....	43
2.2.2.1	Extracción	44
2.2.2.2	Trituración.....	44
2.2.2.3	Calcinación.....	44
2.2.2.4	Clasificación granulométrica	45
2.2.2.5	Molienda y Clasificación	46
2.2.2.6	Envase y Embarque.....	46
2.2.3	Proceso de productivo en Calquiya S.A.C.	46
2.2.3.1	Configuración del Horno Maerz	47
2.2.3.2	Comprensión del proceso de calcinación.....	49
2.2.3.2.1	Reacción térmica del carbonato de calcio (CaCO_3) ..	52
2.2.3.3	Diagrama de flujo de proceso de calcinación en Horno Maerz	54
2.2.3.3.1	Alimentación de caliza	55
2.2.3.3.2	Horno.....	56
2.2.3.3.3	Alimentación de combustible sólido	57
2.2.3.3.4	Almacenamiento.....	58
2.2.3.4	Variables Críticas en la producción del óxido de calcio	58
2.2.3.4.1	Caliza.....	58
2.2.3.4.2	Combustibles	60
2.2.3.4.3	Triangulo de fuego	63
2.2.4	Características del óxido de calcio	65
2.2.4.1	Perdidas por calcinación (%PPC's)	65
2.2.4.2	Reactividad.....	66



2.2.4.3	Óxido de calcio disponible.....	67
2.2.4.4	Oxido de calcio total	69
2.2.4.5	Requemados	70

CAPÍTULO III

MATERIALES Y METODOS

3.1	LUGAR DE ESTUDIO.....	71
3.1.1	Vías de acceso	71
3.2	POBLACION Y MUESTRA.....	71
3.2.1	Población.....	71
3.2.2	Muestra.....	72
3.3	NIVEL Y DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN.....	72
3.3.1	Nivel de la investigación.....	72
3.3.2	Diseño de la investigación.....	73
3.3.2.1	Enfoque de la investigación.....	73
3.3.2.2	Tipo de Estudio	73
3.3.2.3	Variables de Estudio	73
3.3.2.3.1	Variables Independientes:	73
3.3.2.3.2	Variables Dependientes:.....	74
3.3.2.3.3	Métodos y Técnicas de Recolección de Datos	74
3.4	ANÁLISIS ESTADÍSTICO	74
3.4.1	Análisis Descriptivo	75
3.4.2	Análisis de Varianza (ANOVA)	75
3.5	MATERIALES, REACTIVOS Y EQUIPOS	76
3.5.1	Materiales	76
3.5.2	Equipos.....	77



3.5.3	Reactivos.....	77
3.6	PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.....	78
3.6.1	Selección de materias primas.....	78
3.6.1.1	Determinación de carbonato de calcio e impurezas.....	80
3.6.1.1.1	Preparación de soluciones.....	80
3.6.1.1.2	Desarrollo.....	82
3.6.2	Calcinación de muestras.....	83
3.6.3	Aplicación de los tratamientos térmicos post calcinación.....	84
3.6.4	Preparación de muestras.....	85
3.6.4.1	Chancado.....	85
3.6.4.2	Pulverizado.....	86
3.6.5	Determinación de características de óxido de calcio resultante.....	87
3.6.5.1	Determinación de pérdidas por calcinación.....	87
3.6.5.2	Determinación de reactividad.....	89
3.6.5.3	Determinación de óxido de calcio disponible.....	90
3.6.5.3.1	Preparación de soluciones.....	90
3.6.5.3.2	Desarrollo.....	92
3.6.5.4	Determinación de óxido de calcio total.....	94
3.6.5.4.1	Preparación de soluciones.....	94
3.6.5.4.2	Desarrollo.....	96
3.6.5.5	Determinación de quemados.....	97

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1	PRESENTACIÓN DE RESULTADOS.....	98
4.2	ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	99



4.2.1	Análisis descriptivo	100
4.2.2	Análisis de varianza (ANOVA)	105
4.2.2.1	Normalidad de los residuos	105
4.2.2.2	Homogeneidad de varianzas	107
4.2.2.2.1	Hipótesis planteadas:	109
4.2.2.3	Ejecución del ANOVA	109
4.2.2.3.1	Hipótesis planteadas para cada característica	110
4.2.2.3.2	Interpretación del cuadro ANOVA	112
4.2.2.4	Pruebas Post-hoc	113
4.2.2.4.1	Interpretación de las comparaciones múltiples (Tukey HSD):	116
4.3	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	118
4.3.1	Incidencia de los tratamientos térmicos de enfriamiento en el porcentaje de pérdidas por calcinación	118
4.3.2	Incidencia de los tratamientos térmicos de enfriamiento en la reactividad	120
4.3.3	Incidencia de los tratamientos térmicos de enfriamiento en el óxido de calcio disponible	122
4.3.4	Incidencia de los tratamientos térmicos de enfriamiento en el óxido de calcio total.	125
4.3.5	Incidencia de los tratamientos térmicos de enfriamiento en el contenido de requemados	126
V.	CONCLUSIONES	129
VI.	RECOMENDACIONES	131
VII.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	132



ANEXOS..... 135



ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1 Características de las calizas según su compuesto Mineralógico	33
Tabla 2 Clasificación de calizas según contenido de carbonato de calcio	34
Tabla 3 Características de los tipos de óxido de calcio teórico.....	38
Tabla 4 Configuración de Horno Maerz	48
Tabla 5 Fenómenos físico-químicos de la calcinación de óxido de calcio	51
Tabla 6 Afecciones a la producción del óxido de calcio respecto a la caliza.	60
Tabla 7 Afecciones a la producción del óxido de calcio respecto al combustible....	61
Tabla 8 Coordenadas UTM de la cantera Negro Africano.	72
Tabla 9 Resultados de la experimentación.....	98
Tabla 10 Descriptivos de los resultados alcanzados.	100
Tabla 11 Pruebas de normalidad de residuos mediante Shapiro-Wilk.	106
Tabla 12 Pruebas de homogeneidad de varianzas mediante Levene	108
Tabla 13 Análisis de varianza (ANOVA)	111
Tabla 14 Pruebas de comparaciones múltiples mediante HSD Tukey.	113



ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1 Afloramiento de caliza en la naturaleza	29
Figura 2 Tipos de poros en la caliza	30
Figura 3 Proceso general de obtención de óxido de calcio.....	43
Figura 4 Horno Maerz.....	47
Figura 5 Configuración de un Horno Maerz.....	47
Figura 6 Fenómenos físico-químicos de la calcinación de óxido de calcio.....	51
Figura 7 Composición molecular del carbonato de calcio.....	52
Figura 8 Reacción de la calcinación de carbonato de calcio.....	53
Figura 9 Diagrama de flujo de proceso de calcinación en Horno Maerz (parte 1)...	54
Figura 10 Diagrama de flujo de proceso de calcinación en Horno Maerz (parte 2)...	55
Figura 11 Triángulo de fuego.	64
Figura 12 Representación gráfica de %PPC en piedra de óxido de calcio.	66
Figura 13 Relación temperatura y tiempo de estancia.	67
Figura 14 Representación gráfica de % óxido de calcio disponible.	68
Figura 15 Óxido de calcio total.....	69
Figura 16 Cuarteo de muestra	80
Figura 17 Calcinación de muestras.	84
Figura 18 Pulverizado de muestra.....	86
Figura 19 Pulverizador de anillos.	87
Figura 20 Determinación de perdidas por calcinación	89
Figura 21 Determinación de óxido de calcio disponible.....	94
Figura 22 Resultados de perdidas por calcinación.....	119
Figura 23 Resultados de determinación de reactividad.	121



Figura 24	Resultados de determinación de óxido de calcio disponible.....	123
Figura 25	Resultados de determinación de óxido de calcio total.....	125
Figura 26	Resultados de determinación de contenido de quemados.	126



ÍNDICE DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO 1: Ficha técnica de óxido de calcio de Calquipa S.A.C.....	135
ANEXO 2: Hoja de datos de seguridad de óxido de calcio Calquipa S.A.C.	137
ANEXO 3: ASTM C25-19: Métodos de prueba estándar para análisis químico de piedra caliza, cal viva y cal hidratada.....	141
ANEXO 4: ASTM C110-09: Métodos de prueba estándar para Prueba física de cal viva, cal hidratada, y la piedra caliza.	142



ACRÓNIMOS

m.s.n.m.	: Metros sobre el nivel del mar
Ph	: Variación de hidrogeno
hrs	: Horas
PPC	: Perdidas por calcinación
°C	: Grados Celsius
°F	: Grados Fahrenheit
%	: Porcentaje
Kg	: Kilogramos
Kcal	: Kilocalorías
g	: Gramos
g/l	: Gramos por litro
g/mol	: Masa molar
Km	: Kilometro
ml	: Mililitros
%	: Porcentaje
atm	: Presión atmosférica
CO₂	: Dióxido de carbono
CaO	: Oxido de calcio
CaCO₃	: Carbonato de calcio
IC	: Impurezas concentradas
N	: Normalidad



RESUMEN

El presente trabajo de investigación aborda la problemática de la variabilidad en la calidad del óxido de calcio a consecuencia de no controlar el tratamiento térmico de enfriamiento durante su producción además responde a la necesidad de generar conocimiento técnico específico que permita implementar mejoras en los procesos productivos.

El objetivo principal es evaluar los tratamientos térmicos de enfriamiento y su incidencia en las características del óxido de calcio tales como las pérdidas por calcinación, reactividad, óxido de calcio disponible, óxido de calcio total y requemado, determinando el tipo de tratamiento térmico que concede las mejores características.

Esta investigación se enmarca en un nivel explicativo y descriptivo, con un enfoque cuantitativo ya que se busca medir y analizar las características del óxido de calcio en función de los tratamientos térmicos post calcinación aplicados y de tipo descriptivo correlacional ya que busca describir las características del óxido de calcio producido bajo diferentes condiciones de tratamiento térmico y establecer relaciones entre los tratamientos aplicados.

La metodología incluye la realización de 27 pruebas experimentales sometidas a 3 distintos tipos de tratamientos térmicos de enfriamiento (temperatura ambiente, secuencial y acelerada). Controlando las variables de producción para cada uno de los casos.

Finalmente se determinó que los tratamientos térmicos de enfriamiento inciden en las características del óxido de calcio. Además, las características más beneficiosas fueron alcanzadas por el tratamiento térmico acelerado. Estas fueron: pérdidas por calcinación 1,49 %, reactividad 19,40 °C, óxido de calcio disponible 87,73%, óxido de calcio total 90,68 % y requemados 0,67%.

Palabras clave: Calcinación, óxido de calcio, tratamientos térmicos.



ABSTRACT

The present research work addresses the problem of variability in the quality of calcium oxide as a result of not controlling the cooling thermal treatment during its production. It also responds to the need to generate specific technical knowledge that allows improvements to be implemented in production processes.

The main objective is to evaluate the cooling thermal treatments and their impact on the characteristics of calcium oxide such as losses due to calcination, reactivity, available calcium oxide, total and reburned calcium oxide, determining the type of thermal treatment that grants the best features.

This research is framed at an explanatory and descriptive level, with a quantitative approach since it seeks to measure and analyze the characteristics of calcium oxide based on the post-calcination thermal treatments applied and of a correlational descriptive type since it seeks to describe the characteristics of the oxide. of calcium produced under different heat treatment conditions and establish relationships between the treatments applied.

The methodology includes carrying out 27 experimental tests subjected to 3 different types of post-calcination cooling thermal treatments (room temperature, sequential and accelerated). Controlling the production variables for each of the cases.

Finally, it was determined that thermal cooling treatments affect the characteristics of calcium oxide. Furthermore, the most beneficial characteristics were achieved by the accelerated heat treatment. These were: losses due to calcination 1.49%, reactivity 19.40 °C, available calcium oxide 87.73%, total calcium oxide 90.68% and reburning 0.67%.

Keywords: Calcination, calcium oxide, heat treatments.



CAPÍTULO I

INTRODUCCION

1.1 DESCRIPCION DE LA REALIDAD DEL PROBLEMA

En la empresa Calquipa SAC se tiene como principal giro del negocio la producción y comercialización del óxido de Calcio.

Para la obtención del óxido de calcio la técnica aplicada es la calcinación de mineral de carbonato de calcio efectuándose el desprendimiento de dióxido de carbono, resultando óxido de calcio. Esta técnica ya bastante conocida es aplicada en las distintas empresas del rubro, más aún no se le da la debida importancia al tipo de enfriamiento que esta tiene post calcinación, ni la consecuencia que conlleva en las características del producto final.

Las características del óxido de calcio se relacionan directamente con la calidad y el rendimiento de este, así mismo en el desempeño que tendrá en las distintas industrias de su aplicación.

En este trabajo de investigación nos enfocamos en determinar la incidencia que tienen los tratamientos térmicos aplicados post calcinación en las características del óxido de calcio resultante mediante pruebas experimentales a nivel laboratorio para poder proponer el control de esta etapa durante la producción del óxido de calcio a escala real.

1.2 FORMULACION DEL PROBLEMA

1.2.1 Problema general

- ¿Los tratamientos térmicos de enfriamiento incidirán en las características del óxido de calcio en la empresa Calquipa SAC?



1.2.2 Problemas específicos

- ¿El tratamiento térmico de enfriamiento a temperatura ambiente influirá en las características del óxido de calcio en la empresa Calquipa SAC?
- ¿El tratamiento térmico de enfriamiento secuencial incidirá en las características del óxido de calcio en la empresa Calquipa SAC?
- ¿El tratamiento térmico de enfriamiento acelerado influirá en las características del óxido de calcio en la empresa Calquipa SAC?

1.3 JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO

1.3.1 Justificación teórica

Esta investigación se fundamenta en los principios de la termoquímica y la cinética química, que explican los fenómenos que ocurren durante los tratamientos térmicos posteriores a la calcinación de materiales cálcicos.

El estudio permitirá profundizar en el entendimiento de las reacciones y transformaciones que sufre el carbonato de calcio durante su conversión a óxido de calcio, así como la influencia de variables como el tipo de tratamiento térmico aplicado para su enfriamiento.

Los hallazgos contribuirán al fortalecimiento del conocimiento científico sobre los mecanismos involucrados en la producción de óxido de calcio.

1.3.2 Justificación práctica

Los resultados de esta investigación permitirán a la empresa productora de óxido de calcio optimizar sus procesos de tratamiento térmico post calcinación, con el fin de mejorar la calidad y rendimiento del producto final.



La evaluación de diferentes esquemas de tratamiento térmico brindará a la empresa opciones para seleccionar el más adecuado según sus requerimientos y condiciones de operación.

El estudio a nivel de laboratorio permitirá escalar y replicar los hallazgos en la producción a escala industrial, lo cual representa un beneficio directo para la empresa.

1.3.3 Justificación social

La producción eficiente y de alta calidad del óxido de calcio tiene implicaciones sociales positivas, ya que este material es ampliamente utilizado en diversas industrias como la construcción, siderurgia, química, entre otras.

Un mejor desempeño en la obtención del óxido de calcio se traduce en una mayor disponibilidad y accesibilidad de este producto, lo cual beneficia a los sectores que lo demandan.

Adicionalmente, la optimización de los procesos productivos puede derivar en mejores condiciones laborales y ambientales para los trabajadores de la empresa y las comunidades aledañas.

1.3.4 Justificación económica

La mejora en la eficiencia y rendimiento del óxido de calcio mediante los tratamientos térmicos post calcinación utilizados para su enfriamiento se traduce en una reducción de costos operativos para la empresa, lo cual se refleja en una mayor competitividad y rentabilidad.



La optimización de los procesos puede implicar un ahorro en el consumo de energía, insumos y mano de obra, lo que representa beneficios económicos directos para la empresa.

Los hallazgos de esta investigación pueden ser transferidos y replicados en otras empresas productoras de óxido de calcio, lo cual genera un impacto económico positivo a nivel sectorial.

En resumen, esta tesis presenta una justificación sólida desde el punto de vista teórico, práctico, social y económico, lo que la convierte en un proyecto de investigación relevante y con grandes potenciales de aplicación e impacto.

1.4 HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN

1.4.1 Hipótesis general

- Evaluando los tratamientos térmicos de enfriamiento permitirá conocer su incidencia en las características del óxido de calcio en la empresa Calquipa SAC.

1.4.2 Hipótesis específica

- Evaluando el tratamiento térmico de enfriamiento a temperatura ambiente permitirá ver su influencia las características del óxido de calcio en la empresa Calquipa SAC.
- Evaluando el tratamiento térmico de enfriamiento secuencial permitirá conocer su incidencia en las características del óxido de calcio en la empresa Calquipa SAC.



- Evaluando el tratamiento térmico de enfriamiento acelerado permitirá ver su incidencia en las características del óxido de calcio en la empresa Calquipa SAC.

1.5 OBJETIVOS

1.5.1 Objetivo general

- Evaluar los tratamientos térmicos de enfriamiento para determinar su incidencia en las características del óxido de calcio en la empresa Calquipa SAC.

1.5.2 Objetivo específico

- Evaluar el tratamiento térmico de enfriamiento a temperatura ambiente para determinar su influencia en las características del óxido de calcio a en la empresa Calquipa SAC.
- Evaluar el tratamiento térmico de enfriamiento secuencial para determinar su incidencia en las características del óxido de calcio a en la empresa Calquipa SAC.
- Evaluar el tratamiento térmico de enfriamiento acelerado para determinar su incidencia en las características del óxido de calcio en la empresa Calquipa SAC.



CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 ANTECEDENTES

El óxido de calcio (CaO) es un material fundamental en diversas industrias, particularmente en la construcción, metalurgia, medio ambiente, entre otras. La producción de CaO a través de la calcinación de carbonatos es un proceso bien establecido; sin embargo, los tratamientos térmicos post-calcination son un área de creciente interés debido a su impacto en las propiedades del producto final.

Estudios como los de Azevedo et al. (2015) destacan que la temperatura de calcinación no solo afecta la pureza del CaO, sino también su estructura cristalina y su reactividad. En particular, estos autores encontraron que calcinaciones a temperaturas más altas resultaron en un CaO con mayor reactividad, lo cual es crucial en aplicaciones químicas.

Por otro lado, la investigación de Makar et al. (2019) sugiere que los tratamientos térmicos post-calcination, como el enfriamiento controlado, pueden alterar significativamente las propiedades físicas del CaO. Según su estudio, el enfriamiento lento produce una mayor superficie específica, lo que a su vez mejora la eficacia del CaO en procesos de adsorción y neutralización.

Además, la obra de Nascimento y Pinto (2020) señala que la recalificación del CaO puede influir en su capacidad de absorción de humedad, un factor crítico para su almacenamiento. Estos tratamientos térmicos son esenciales para garantizar la calidad del producto, especialmente en entornos donde la estabilidad y la reactividad son prioritarias.



En el caso específico de la empresa Calquiya SAC, la falta de estudios detallados sobre la influencia de estos tratamientos térmicos limita la comprensión de la variabilidad en la calidad del óxido de calcio producido. Como menciona Rodríguez et al. (2021), la optimización de los tratamientos térmicos podría ofrecer mejoras significativas en la calidad del CaO, lo que a su vez permitiría a la empresa ser más competitiva en el mercado.

En resumen, aunque existe un marco teórico robusto sobre los efectos de los tratamientos térmicos en el óxido de calcio, es necesario realizar un estudio que aborde específicamente cómo estos tratamientos impactan las características del CaO producido en Calquiya SAC. Esta tesis tiene como objetivo llenar este vacío.

Los antecedentes que presenta esta empresa en el desarrollo de la mejora continua son los siguientes:

Duran Alca Juan Carlos y Mendoza Murillo Fredy (2017) en su trabajo de investigación titulado “Influencia de la sílice en el proceso de calcinación para reducir el contenido de requemado en el óxido de calcio” determino la influencia de la sílice para reducir el contenido de requemado del óxido de calcio el cual se desarrolló calcinando piedra caliza en mufla, controlando el porcentaje de ingreso de óxido de silicio, manteniendo los parámetros de temperatura a 900 °C y 18 horas de calcinación.

Después de la calcinación realizaron los análisis respectivos para poder determinar las características de producto siguiendo el procedimiento de la ASTM.

Los resultados obtenidos y analizados cumplen con el objetivo y se obtiene un porcentaje de 80.74 por ciento de óxido de calcio disponible, 2.677 por ciento de requemado, reactividad de 18°C con pérdidas por calcinación de 0.552 por ciento, todo ello para un ingreso de 7.050 por ciento de óxido de silicio.



Gonzales Sacsi, Saúl y Ticona Cansaya, Katherine Alejandra (2016) en su trabajo de investigación titulado “Evaluación de la influencia de la granulometría de piedra caliza, concentración de carbonato de calcio, tiempo de residencia y temperatura de calcinación para mejorar el rendimiento en la obtención de óxido de calcio (cal viva)” evaluó la influencia de la granulometría de piedra caliza, concentración de carbonato de calcio, tiempo de residencia y temperatura de calcinación, con la finalidad de obtener mejores resultados que ayuden a mejorar el rendimiento en la obtención de óxido de calcio (cal viva), evitando que la cal presente características defectuosas mencionadas anteriormente, lo cual es considerado como indicador de una mala calcinación en el sector de la industria de cal. Se desarrollo con corridas estudiando las variables que rigen la obtención de cal, haciendo un seguimiento con varias corridas en laboratorio, modificando las variables de acuerdo a la evaluación de la influencia de las mismas, una vez evaluados y analizados se procede a proponer los mejores valores de las variables, esperando que éstos sean de utilidad para las empresas productoras de cal y personas interesadas en el tema, ya que esta investigación es realizada en laboratorio para luego realizar un procedimiento de escalamiento a nivel piloto y luego industrial.

Zarate Rodríguez Gabriel (2022) en su trabajo de investigación titulado “Mejoramiento de la obtención de óxido de calcio en la empresa Calquipa S.A.C.” determino los parámetros y factores con mayor influencia en el proceso de obtención de óxido de calcio que puedan afectar la calidad del producto final. Llegando a la conclusión que es posible mejorar la obtención del óxido de calcio, controlando la granulometría y el contenido de carbonato de calcio de la piedra caliza sumado a un manejo adecuado de la temperatura, tiempo y presión del horno Maerz en la Empresa Calquipa.

Avalos Miñano Luis José (2016) en su tesis titulada “propuesta de mejora en la producción de cal viva para reducir costos operativos en la empresa Phuyu Yuraq ii –



Cajamarca” realizo propuestas de mejora para la producción de óxido de calcio, mediante el desarrollo de esta tesis se concluye que la evaluación económica consta con inversiones y egresos anuales de S/. 3 028 450 y beneficios de S/. 9 585 000 generando S/. 3 748 691 TIR de 148% y la relación B/C es de 2.6

2.2 MARCO TEÓRICO

2.2.1 Oxido de Calcio (cal y/o cal viva)

El óxido de calcio o comúnmente conocida como cal o cal viva es cáustico y blanco, que se da producto de la calcinación de caliza.

La cal común es el óxido de calcio definido por la formula CaO . Es un material utilizado en distintos sectores industriales además de construcción y otras actividades económicas.

Como producto comercial contiene además óxido de magnesio, óxido de silicio y diminutas cantidades de óxidos de aluminio y hierro.

El óxido de calcio resulta de descomposición térmica de la caliza, que contiene carbonato de calcio (CaCO_3), material extraído de canteras. Es sometido a temperaturas muy altas, que van desde 900 a 1200 °C, por un período variable de acuerdo al horno donde se hace efectiva la calcinación, el proceso libera una molécula de dióxido de carbono (CO_2), resultando el óxido de calcio (CaO), de color blanco y cáustico.

Sin embargo, el proceso puede ser reversible y transcurrido un tiempo, vuelve a convertirse en CaCO_3



El óxido de calcio puede ser hidratado, resultando una reacción violenta que desprende calor. Forma el hidróxido de calcio que se comercializa conocido como cal apagada.

2.2.1.1 Materia prima (la caliza)

La caliza es una de las rocas sedimentarias que más frecuentemente encontramos en el mundo, conformada en su mayoría por carbonato de calcio (CaCO_3). La caliza contiene en menor dimensión minerales como arcilla, hematita, cuarzo, siderita, entre otros que influyen en sus características.

Las calizas tienen un aspecto mono mineral entre sus distintas variaciones lo que facilita su reconocimiento con facilidad debido a las características físicas y químicas fundamentales de la calcita: su dureza es 3 en la escala de Mohs y reacciona efervescentemente al ácido clorhídrico.

La caliza, que podemos encontrar en cualquier parte del mundo, es una importante materia prima para muchas ramas industriales.

Para asegurar un buen proceso y calidad del CaO , la piedra debe cumplir con algunas condiciones físicas y químicas, como son el contenido de carbonato de calcio, cantidad de impurezas (principalmente arcillas), para asegurar un óxido de calcio homogéneo en propiedades, tanto físicas como químicas.

Al no cumplir con las especificaciones de la materia prima, se pueden generar problemas desde la operación de los equipos ocasionados

por atascamientos, hasta problemas en especificaciones de calidad en el óxido de calcio.

Estos problemas pueden desencadenar un impacto negativo en el proceso de hidratación, afectando en los costos del proceso por estos desperdicios o en el manejo especial para dicho producto.

Figura 1

Afloramiento de caliza en la naturaleza



Nota: Extraído de geologiaweb

2.2.1.1.1 Características de la caliza

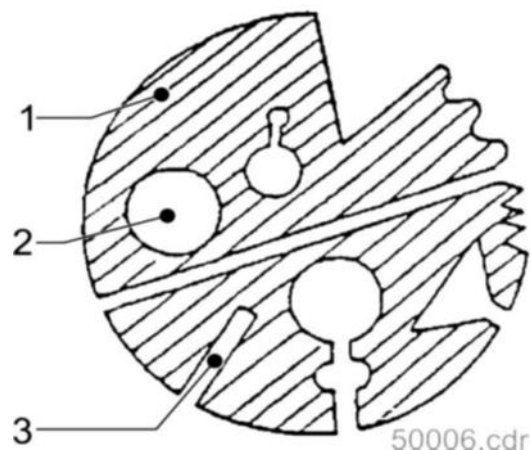
- **Color:** La piedra caliza es blanca o grisácea, también puede manifestarse entre gris, café y amarillo. Las partes grises y negras en la caliza son manchas causadas por materia orgánica. Las amarillas y cafés son consecuencia de las impurezas de óxido de hierro contenidas.
- **Textura:** La caliza naturalmente encontrada en la naturaleza varía de grueso a partículas muy finas dependiendo de su origen. Los

fragmentos fósiles, fragmentos de conchas viejas, materiales fosilizados, depósitos mineralógicos, entre otros. Forman parte de su constitución, en ocasiones, los fragmentos fosilizados se pueden distinguir con facilidad. Otras veces, el material es muy fino y cristalizado que complican su identificación.

- Blandura: La caliza es blanda, en su superficie, el viento, lluvia y contaminantes atmosféricos se combinan desencadenando su desgaste durante largos periodos de tiempo. La caliza reacciona con facilidad a ácidos comunes, tales como el ácido acético o ácido clorhídrico. Cuando se aplica, la piedra caliza presenta efervescencia.
- Porosidad: La porosidad varía considerablemente y depende del grado de compactación y estructura. Es la relación existente entre la cantidad de los poros y el volumen total. Entre los poros contenidos en la caliza contempla los accesibles y no accesibles representados en la figura 2.

Figura 2

Tipos de poros en la caliza





Nota: extraído del manual de instrucción horno maerz Calidra

- 1: Poro solido
- 2: Poro inaccesible
- 3: Poro accesible
- Dureza: La dureza relativa estimada en la escala de Mohs es de 3.
- Densidad: Depende de su altura, puede por la cantidad de restos fósiles y silicatos contenidos, comúnmente son ligeras. La caliza rica en contenido cálcico contiene una densidad de 2,65 a 2,75 kg/dm³.
- Resistencia: La resistencia a la compresión y al aplastamiento va desde 98,4 a 583,5 kg/cm².

2.2.1.1.2 Composición química de la caliza

La caliza químicamente representada refleja su composición mineralógica (CaCO₃). Se puede considerar que las calizas están constituidas por calcita, debido a esto las proporciones de CaO y CO₂ se elevan hasta el 95%.

Otros componentes incluyen MgO, que puede representar una variable influyente, si su proporción sobrepasa el 1 a 2 % dará formación al mineral dolomita. La presencia de Mg el desarrollo de procesos de alteración química. Especialmente resaltante la dolomitización, por el cual una caliza incorpora magnesio.



La sílice también puede encontrarse en compuestos carbonáticos en forma de ftanita (amorfa). surgen el óxido de potasio y el agua de combinación, cuando existen materiales arcillosos que conforman el proceso que los vinculan a las calizas.

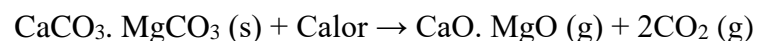
En algunos casos las calizas pueden ser portadoras de componentes menores como fósforo, óxido de hierro o sulfuro.

Las rocas de formación de tipo biogénica, presentan particularmente en los caparzones de crustáceos los que pueden contar con un contenido de fosfatos mayor, conchas aragoníticas con falta de óxido de magnesio y conchas calcínicas que son ricas en ese componente.

Los contenidos de CaCO_3 en las calizas son variables, desde menos de 85% hasta un 98,5%.

2.2.1.1.3 Clasificación de calizas

- Según su compuesto mineralógico
 - Dolomita: Es el carbonato de contenido doble de calcio - magnesio, al calcinarlo se transforma en óxido de calcio - magnesio ($\text{CaO} - \text{MgO}$), de acuerdo a la siguiente reacción química, normalmente contiene entre 35% a 40% de MgO .



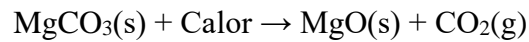
Dolomita

Cal viva dolomítica

- Magnesita: Es carbonato de magnesio que sometido al proceso de calcinación disocia en óxido de magnesio, de

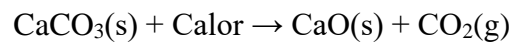


acuerdo a lo siguiente reacción química. Producto con solubilidad de $6,8 \times 10^{-3}$ g/l a 0°C y de 3×10^{-3} g/l a 100°C .



Magnesita Cal viva magnesiana

- o Calcita: Es el carbonato de calcio, que al calcinarlo se descompone en óxido de calcio (CaO) y anhídrido carbónico, de acuerdo a la siguiente reacción química.



Calcita Cal calcítica

Tabla 1

Características de las calizas según su compuesto Mineralógico

Nombre Mineralógico	Formula Química	Peso Molecular	Peso Específico	Dureza	Forma de Cristales
		gr/mol	gr/cc	escala de Mohs	
Dolomita	$\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$	184,4	2,84	3,5 - 4	Romboédrica
Calcita	CaCO_3	100,1	2,72	3	Romboédrica
Magnesita	MgCO_3	84,3	3	3,5 - 4,5	Romboédrica

Nota: Extóiraido de National Lime Association, Chemical Lime Facts

- Según su contenido de carbonato de calcio: La clasificación de las calizas por el contenido de CaCO_3 no consideran las variaciones en la composición química tales como las impurezas, más aún si le dan énfasis al contenido de CaCO_3 . Podemos distinguir la siguiente clasificación.

Tabla 2

Clasificación de calizas según contenido de carbonato de calcio

Categoría	Porcentaje de CaCO ₃
Muy alta pureza	> 98,5
Alta pureza	97 - 98,5
Media Pureza	92,5 – 97
Baja pureza	85 - 92,5
Impura	< 85

Nota: Elaborado por Alfaro León W.J., 2011

2.2.1.1.4 Impurezas de las calizas

Las impurezas más comunes que se encuentran en las calizas son: el aluminio, hierro, aluminio, azufre, magnesio y metales alcalinos, entre otras. Con menos frecuencia existen restos de fundentes y pigmentos, como: manganeso y flúor, que le atribuyen diversas coloraciones, variando desde el blanco, al beige y en algunos casos alcanzan el negro, siendo esta última característica una propiedad física, que no altera sus propiedades alcalinizantes. La presencia de los elementos en mención, puede ser fundamentales en algunos usos de la cal donde tanto el manganeso y flúor, perjudican el proceso o quedan asociados en el residuo que se genere en la cual el óxido de calcio es adicionado.

2.2.1.2 Origen de óxido de calcio

El óxido de calcio ha sido usado como material conglomerante desde la antigüedad.

Teorías sostienen que, probablemente se descubrió accidentalmente al combinar caliza y fuego en un accidente doméstico, dando como resultado la primera pasta de cal.



Los usos que se le dio en la antigüedad fueron como aglomerante en construcción. Al combinar óxido de calcio con agua y arena, se produce una especie de pegamento que se utiliza para unir piedras y también para emparejar paredes y techos. Esta aplicación principalmente se debe a que el óxido de calcio adquiere dureza al secarse y es un material resistente.

Se produce debido a que el hidróxido de calcio absorbe el dióxido de carbono que había perdido y se transforma lentamente en carbonato de calcio al secarse.

Es considerado un legado en la historia referente a la arquitectura desde tiempos ancestrales. También encontramos referencias del óxido de calcio como material de pintura en distintos momentos de la historia y a través de distintas culturas que se desarrollaron en la tierra.

2.2.1.3 Importancia del óxido de calcio

El óxido de calcio después de la sosa, es la segunda base química usada con mayor frecuencia en actividades industriales. En aquellos procesos en los que se neutraliza, precipita y protege el medio ambiente, el óxido de calcio aporta una solución. Siendo un producto ancestral, fabricado con los avances tecnológicos de la época, el óxido de calcio posee una característica muy importante: su polivalencia. De un punto de vista comercial, la polivalencia es la posibilidad de que el óxido de calcio pueda utilizarse en mercados diversos.



2.2.1.4 Tipos de cal

2.2.1.4.1 Cal viva

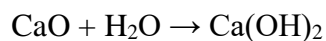
Resulta de calcinación de caliza que al desprenderse del dióxido de calcio contenido y pasa a ser en óxido de calcio.

El óxido de calcio también se encuentra en estado nativo en la naturaleza, se puede constituir a partir del agua marina, que contiene concentraciones medias de carbonatos de calcio y magnesio.

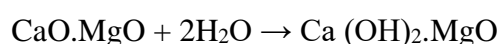
2.2.1.4.2 Cal apagada o hidratada

La cal apagada se forma de la combinación de óxido de calcio con agua suficiente hasta lograr una hidratación adecuada, obteniendo un polvo fino hidratado y seco. Existen tres tipos.

- Cal apagada de alto calcio: La cal apagada de elevado contenido cálcico tiene solubilidad de 1,85 g/l a 0°C y de 0,71 g/l a 100°C. Se da resultado de la siguiente reacción:



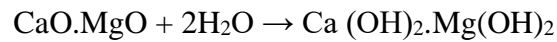
- Cal apagada dolomítica normal: es el resultado de la hidratación del óxido de calcio, conformando el hidróxido de éste y, quedando inalterable el óxido de magnesio, como se muestra en la siguiente reacción:



- La cal apagada dolomítica especial: surge hidratando los óxidos de la cal viva dolomítica, ciertas condiciones específicas de



temperatura y presión, para lograr la hidratación tanto del calcio y magnesio, representada por la siguiente reacción química:



2.2.1.4.3 Cal hidráulica

La cal apagada hidráulica es la combinación de cal apagada de alto contenido cálcico con puzolana, arcilla, ceniza volante y otros materiales que contengan alúmina y sílice libre, a fin que la hidratación se genere naturalmente, los silicatos y aluminatos cálcicos, que son los que aportan las características de conglomerante hidráulico, en palabras sencillas, que tengan la capacidad de endurecerse bajo agua y a la intemperie.

Esta reacción se debe a que, en esta combinación, el óxido de calcio toma el rol de catalizador, debido al abatimiento de la alúmina desplaza los iones H^+ , Na^+ y K^+ de estos materiales arcillosos agilizando la reacción entre el calcio y el óxido de silicio libre, permitiendo alcanzar el enlace químico para formar los silicatos y posibles aluminatos cálcicos. Esto produce un crecimiento cristalino de las partículas pequeñas y coloidales, cubriendo las partículas gruesas, aglutinándolas entre sí, actuando como un ligante.

2.2.1.4.4 Cal aérea

Es la cal viva hidratada a la intemperie, resultando una combinación de cal viva, cal apagada y cal recarbonatada.

2.2.1.4.5 Cal refractaria

Normalmente cal viva dolomítica, que ha sido sobre calcinada y posee reducida tendencia de convertirse en hidróxido.

2.2.1.5 Características del óxido de calcio

A continuación, en la tabla 3 mostramos algunas características recopiladas de los tipos teóricos de cal existentes.

Tabla 3

Características de los tipos de óxido de calcio teórico

Tipos de Cal	Unidad	Calcítica	Dolomítica	Magnesiana
Nombre químico		Óxido de calcio	Óxido doble de calcio - magnesio	Óxido de magnesio
Fórmula química		CaO	CaO.MgO	MgO
Peso molecular	g/mol	56,08	96,4	40,32
Punto de fusión	°C	2,57		2,8
Índice de refracción		1,838		1,736
Calor de solución	Kcal	19,33		
Formación cristalina		Cúbica		Cúbica
Solubilidad a 0 °C	g/l	1,4		0,0068
Solubilidad a 100 °C	g/l	0,54		0,003
Peso específico		3,2 - 3,4	3,2 - 3,4	3,65
Densidad de granza	g/l	881 - 961	881 - 961	
Calor específico a 100 °F	BTU/lb	0,19	0,21	
Ángulo de reposo			50 - 55 °	50 - 55 °
Calor carbonatación	Cal/mol	43,3		28,9
Calor form. ΔH a 25 °C	Kcal/mol	-151,7		-235,58
Energía libre ΔG a 25 °C	Kcal/mol	-144,3		
Porcentaje de CaO puro	%	100	58,17	

Nota: Extraído de National Lime Association, Chemical Lime Facts



2.2.1.6 Aplicaciones del óxido de calcio

Directa o indirectamente, es probable que el óxido de calcio se emplee en más industrias que ninguna otra sustancia natural a continuación se detallan las más relevantes:

2.2.1.6.1 Industria

- Siderurgia: Utilizado como fundente y escorificarte.
- Metalurgia: Utilizado en procesos de flotación de Pb, Cu y Zn; también en la obtención de magnesio y aluminio.
- Química: Empleada para producir jabón, en la fabricación del carburo cálcico y caucho, en industria petrolífera, en industria cosmética y de papel.
- Alimentaria: Se utiliza en la industria azucarera, piscicultura, ostricultura, industria cervecera, láctea, fabricación de gelatinas, tratamiento del trigo y del maíz, entre otras
- Vidrio: Proporciona vidrios brillantes y con mejor coloración. Ayuda a agilizar la fusión, lo cual se traducen en ahorro económico durante la fabricación del vidrio.
- Curtidos: Los baños de lechada de cal permiten la extracción de pelos y engrosamiento de las pieles antes del curtido.
- Papel: En la producción de la industria papelera permite la disolución de los elementos no celulósicos de la materia prima (madera), además influye como clarificante de la pasta de papel.



Se emplean como agente floculante, neutralizante y de clarificación en el tratamiento de aguas residuales procedentes de proceso de fabricación del papel.

2.2.1.6.2 Construcción

- Estabilización de suelos: para secar suelos húmedos, descongelar y maximizar las características de suelos arcillosos.
- Edificación: En la elaboración de prefabricados de cal: Hormigón aireado y/o celular, bloques de tierra comprimida y ladrillos sílicos calcáreos.

2.2.1.6.3 Protección del medio ambiente

- En la potabilización de aguas, para ablandar, purificar, neutralizar la acidez , disminuir turbiedad al igual que la sílice entre otras impurezas.
- Tratamiento de aguas residuales y de lodos: Se aplica habitualmente, en el tratamiento de aguas residuales de procesos industriales. También se aplica para el tratamiento de lodos en las plantas de eliminación de aguas residuales domésticas.
- Re mineralización de agua desalinizada: La adición de óxido de calcio permite acondicionar el agua desalinizada para ajustar su pH y/o su Re mineralización por el aporte de calcio del compuesto. El óxido de calcio es imprescindible para el tratamiento final de las aguas procedentes de la desalinización del agua marina puesto debido a que contribuye compuestos enriquecedores de calcio y es



fundamental para conservar el equilibrio cal-carbónico, con el fin de evitar incrustaciones o corrosiones.

- Depuración de gases: De acuerdo del proceso el óxido de calcio es el desulfurante natural y más económico que minimiza el anhídrido sulfuroso y otros gases ácidos (HCl, HF y NO_x) de los humos industriales, incineradoras de residuos sólidos domésticos, de centrales térmicas y de la industria general.
- El óxido de calcio también se emplea para eliminar los compuestos orgánicos persistentes como furanos, dioxinas y metales pesados de incineradoras.
- Tratamiento de residuos: El óxido de calcio se emplea, en diversos procesos químicos de la industria, como reductor de malos olores y contaminación de las aguas por lixiviación.
- Tratamiento de suelos contaminados: Las técnicas empleadas son las siguientes:
 - Estabilización - solidificación
 - Térmicos
 - Fisicoquímicos
 - Biológicos
- En el tratamiento físico-químico el óxido de calcio se utiliza en las técnicas de deoloración, neutralización y precipitación. Con respecto a la técnica de estabilización existe una variante



denominada “Solidificación con óxido de calcio y materiales puzolánicos”.

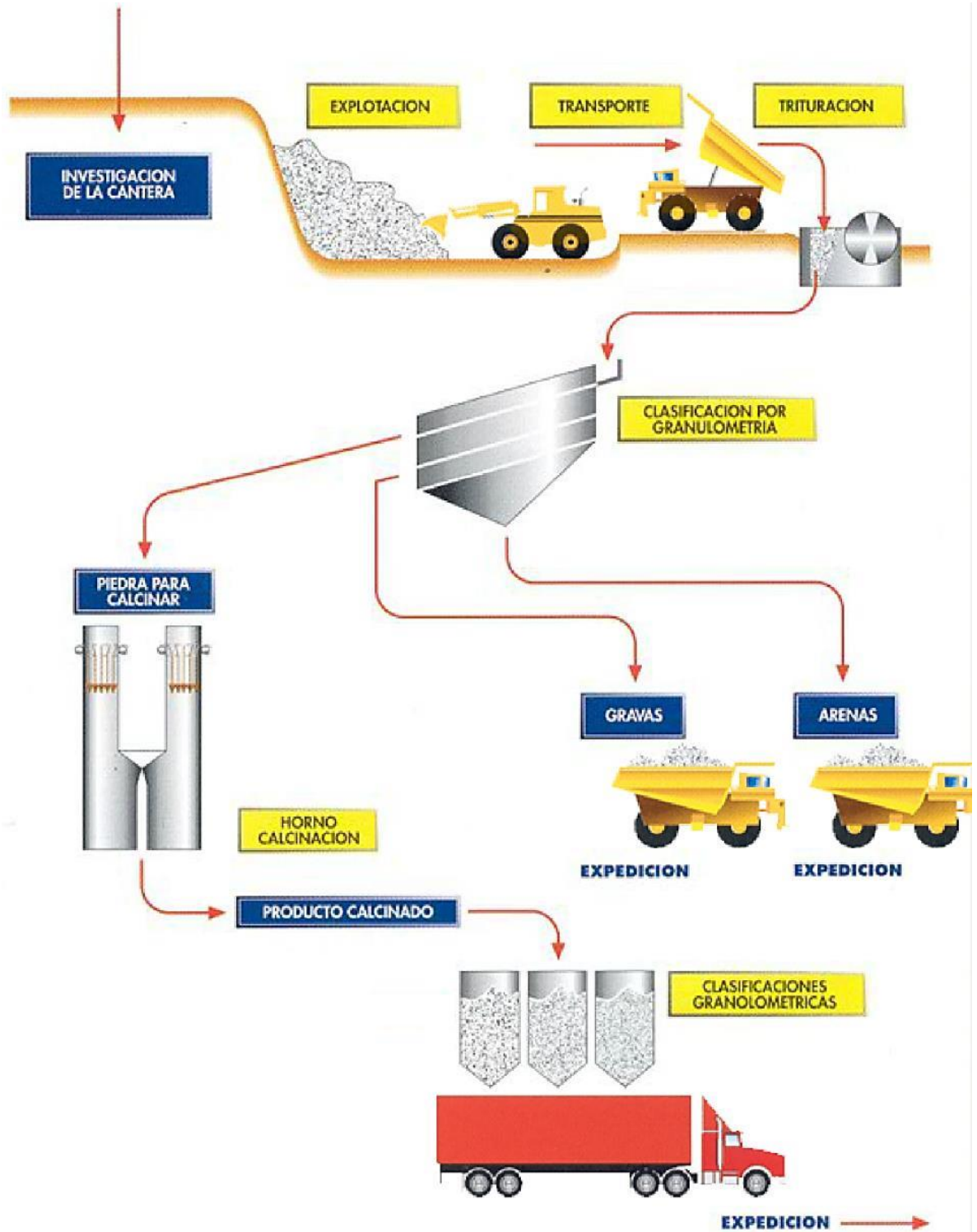
2.2.1.6.4 Agricultura

- Enmienda: El óxido de calcio se utiliza para maximizar las características de los suelos agrícolas: porosidad, acidez y actividad biológica del suelo.
- Fertilizante: Aporta calcio, nutriente importante para las plantas.
- Compost (Abono): Se emplea para la obtención de abono a partir de residuos agrarios.
- Tratamientos fitosanitarios: Se aplica en la preparación de los caldos que llevan cobre para los tratamientos de las plantas con el fin de evitar invasión de hongos.
- Biosida: Se puede aplicar como biosida para contrarrestar o ejercer el control de otro tipo, sobre otros organismos nocivos por medios químicos o biológicos.
- Alimentación animal: El óxido de calcio se utiliza como reactivo, por su velocidad de reacción, para elaborar jabones cálcicos para fabricar de aditivos y derivados de pienso animal.

2.2.2 Proceso general de obtención de óxido de calcio

Figura 3

Proceso general de obtención de óxido de calcio



Nota: Extraído del manual de competencias de calcinación Calidra



2.2.2.1 Extracción

Se procede inicialmente la identificación del lugar mineralizado rica en carbonato de calcio mediante estudios geológicos previos y se procede a llevar a cabo un plan de minado para la realización de una voladura para su posterior selección y acondicionamiento según la composición química, granulometría y humedad de la materia requerida para su proceso de transformación.

Las calizas en su mayoría tienen impurezas de arcillas, sulfuros, sílice y materias orgánicas. Al realizarse calcinación algunas se volatilizan otras se conservan cantidades minúsculas, que apenas influyen en la calidad del producto final.

2.2.2.2 Trituración

La roca proveniente cantera se reduce de tamaño y se clasifica según la granulometría requerida para el proceso de calcinación, la caliza es transportada mediante bandas transportadores hacia los stocks piles de los hornos, para rotatorios se requieren tamaños pequeños y para hornos de flujo continuo como el horno Maerz se requiere una configuración granulométrica más diversa.

2.2.2.3 Calcinación

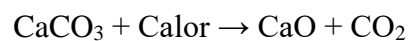
El calor suministrado a la caliza para su transformación en óxido de calcio genera un primer efecto consistente en la evaporación del agua de cantera. Posteriormente el calor aplicado va aumentando hasta conseguir la descomposición de la caliza.



El CaCO_3 es sometido a temperaturas mayores a $900\text{ }^\circ\text{C}$ dependiendo de distintos factores como impurezas, presión o tamaño de la roca, desencadenando en la liberación de dióxido de carbono, dejando una roca constituida en su mayoría por óxido de calcio.

Resaltan 3 factores esenciales en la cinética de la descomposición de la caliza, detallados a continuación:

- La roca debe ser calcinada a la temperatura de disociación de los carbonatos.
- El tiempo de residencia en la etapa de calcinación está condicionada a la forma y tamaño de los fragmentos de la materia prima, esta ocurre de la superficie hacia el centro.
- En la calcinación llevada a cabo en hornos, se aprovecha la propiedad más resaltante de la caliza, que es la descomposición térmica. Todas las rocas se descomponen a temperaturas elevadas formando óxidos y liberando CO_2 representada en la siguiente ecuación:



2.2.2.4 Clasificación granulométrica

Se somete a cribado, separando a él óxido de calcio de acuerdo a tamaño de partícula para posteriormente pasar un proceso de trituración y pulverización según el requerimiento de uso.



2.2.2.5 Molienda y Clasificación

El óxido de calcio se somete a una molienda fina según el requerimiento del cliente para la obtención de un material más homogéneo y posterior envasado.

2.2.2.6 Envase y Embarque

El óxido de calcio es llevado a una tolva de envase donde en algunos casos es introducida en sacos o transportada a través de bandas transportadoras para su carguío en medio de transporte (Encapsulados, bombonas).

Para la obtención del óxido de calcio y sus derivados a partir de caliza es importante seguir un proceso de manufactura controlado ejemplificado en la siguiente figura.

2.2.3 Proceso de productivo en Calquipa S.A.C.

Para la producción el óxido de calcio en la empresa Calquipa S.A.C. se cuenta con un horno paralelo de flujo continuo (Horno Maerz).

El horno Maerz cuenta con cubas circulares paralelas interconectadas por un canal de flujo circular, este diseño da génesis a una calcinación en corriente paralela que optimiza la fabricación de óxido de calcio altamente reactivo, este horno nos permita producciones de hasta 400 t/día.

Figura 4

Horno Maerz

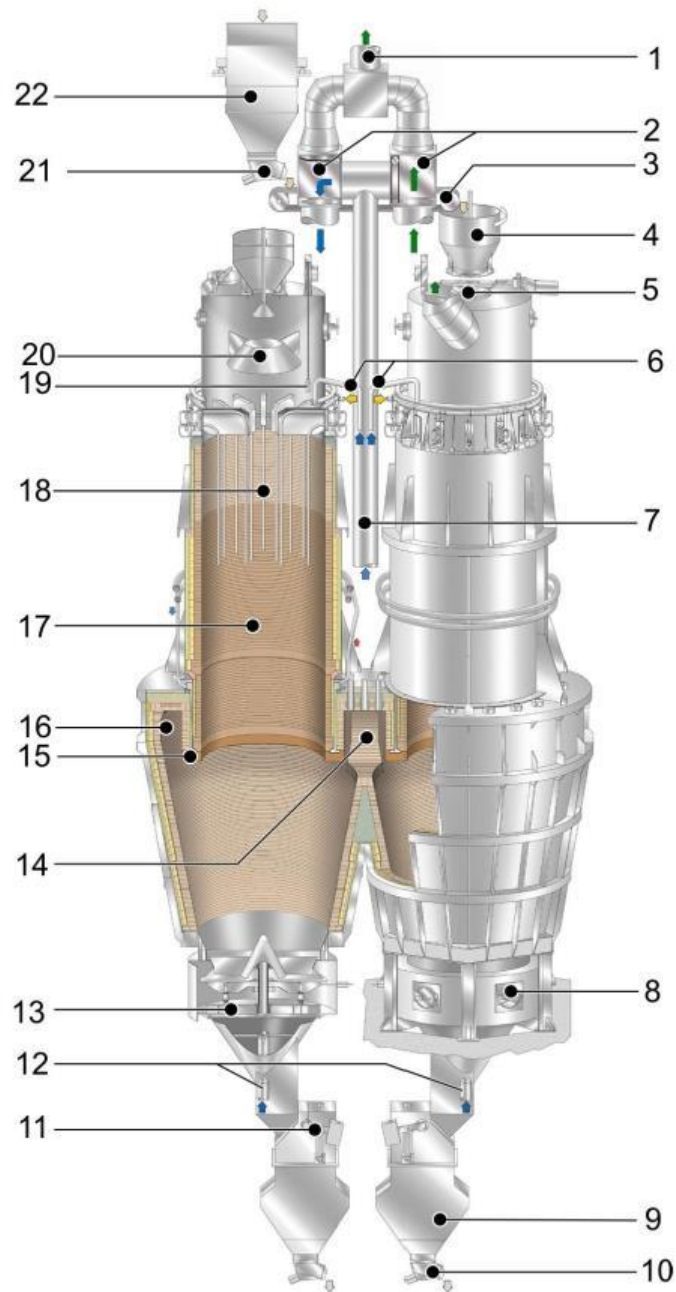


Nota: Elaboración propia.

2.2.3.1 Configuración del Horno Maerz

Figura 5

Configuración de un Horno Maerz



Nota: Extraído de manual de competencias de calcinación Calidra

Tabla 4

Configuración de Horno Maerz

N°	Descripción
1	Tubería de gases de salida
2	Compuerta reversible



N°	Descripción
3	Banda transportadora reversible
4	Tolva rotatoria
5	Compuerta de carga
6	Tubería de aire de enfriamiento de lanza
7	Tubería de aire de combustión
8	Compuerta de inspección
9	Tolva de descarga
10	Vibro alimentador de cal viva
11	Compuerta de descarga
12	Tubería de aire de enfriamiento
13	Mesa de descarga
14	Canal de unión
15	Cilindro suspendido
16	Canal de flujo de gases
17	Cuba de horno
18	Lanzas
19	Indicador de nivel
20	Distribuidor de piedra
21	Vibro alimentador de piedra
22	Tolva pesadora de piedra

Nota: Extraído del manual de competencias de calcinación Calidra

2.2.3.2 Comprensión del proceso de calcinación

Parala correcta operación en cualquier horno para producción de Cal, es requisito fundamental alcanzar un flujo constante y uniforme de



caliza, combustible y aire. Con la finalidad de sintonizar las reacciones de combustión y calcinación.

La posibilidad de lograrlo depende de las características de cada horno y no siempre es posible modificarlas, sin embargo, es importante hacerlo hasta donde cada horno lo permita.

El flujo de la piedra dependerá del tipo de descarga y alimentación al horno. Cuanto más uniformes sean los dos, será mejor para el proceso.

Por otro lado, el flujo uniforme de combustible se limita al uso de espreas en los platos distribuidores, así como a las válvulas rotatorias dosificadoras, y a una buena alineación de lanzas.

Mientras que el flujo de aire se vuelve el más difícil de controlar, sobre todo en hornos verticales, por la incertidumbre del acomodo de la piedra. Constituye el elemento central en la transferencia de calor, por lo tanto, la eficiencia del horno.

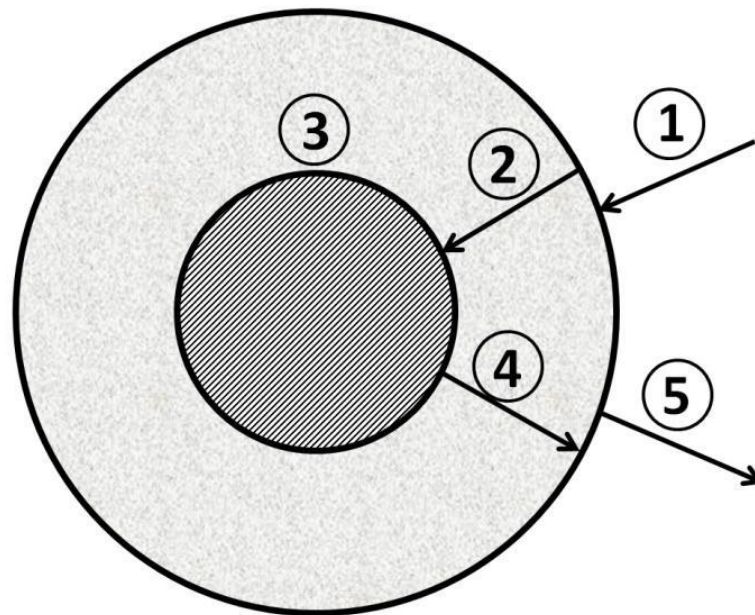
Este último depende de factores como el exceso de flujos de presión del horno, flujo regular de los sopladores y la distribución de las entradas del aire.

Durante el proceso de calentamiento, la materia prima pasa por diferentes fases de fenómenos físico-químicos y termo-mecánicos.

Estos fenómenos físico-químicos pueden describirse generalmente en 5 pasos, como se muestra en la siguiente descripción:

Figura 6

Fenómenos físico-químicos de la calcinación de óxido de calcio



Nota: Extraído del manual de competencias de calcinación Calidra

Tabla 5

Fenómenos físico-químicos de la calcinación de óxido de calcio

N°	Descripción
1	El calor es transmitido por convección y radiación desde el entorno a la superficie de una partícula de materia.
2	Transmisión de calos a través de la zona ya quemada de la piedra.
3	El calor absorbido por la reacción química en la zona limítrofe cal/materia prima en su recorrido hacia su núcleo. La piedra se descompone en cal y CO ₂ .
4	El CO ₂ producido, es difundido desde el centro de la partícula de piedra hacia su superficie.
5	El CO ₂ se desprende de la superficie de la piedra a la atmosfera circundante.

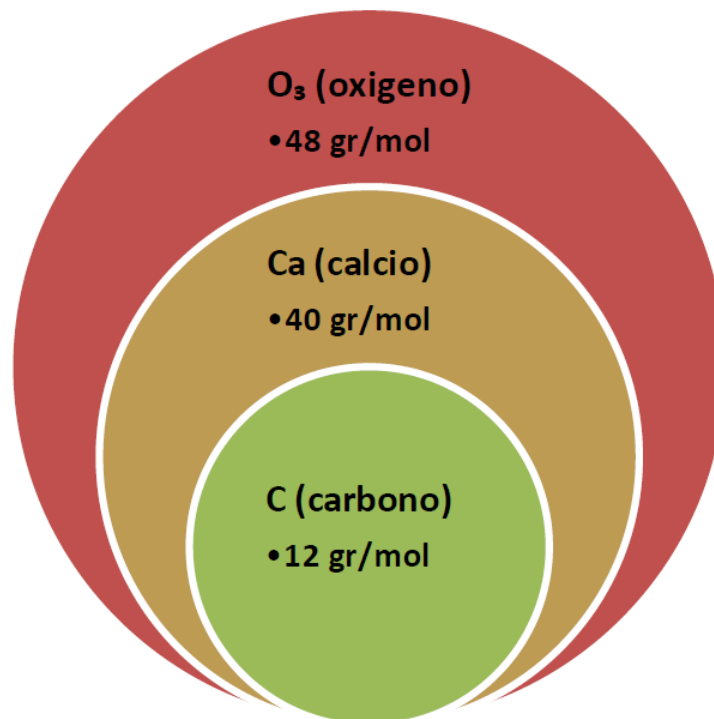
Nota: Extraído del manual de competencias de calcinación Calidra

2.2.3.2.1 Reacción térmica del carbonato de calcio (CaCO_3)

En la reacción térmica del carbonato de calcio, se descompone su estructura química, separando el dióxido de carbono (CO_2) del óxido de calcio CaO). La composición molecular del carbonato de calcio (CaCO_3), sería:

Figura 7

Composición molecular del carbonato de calcio

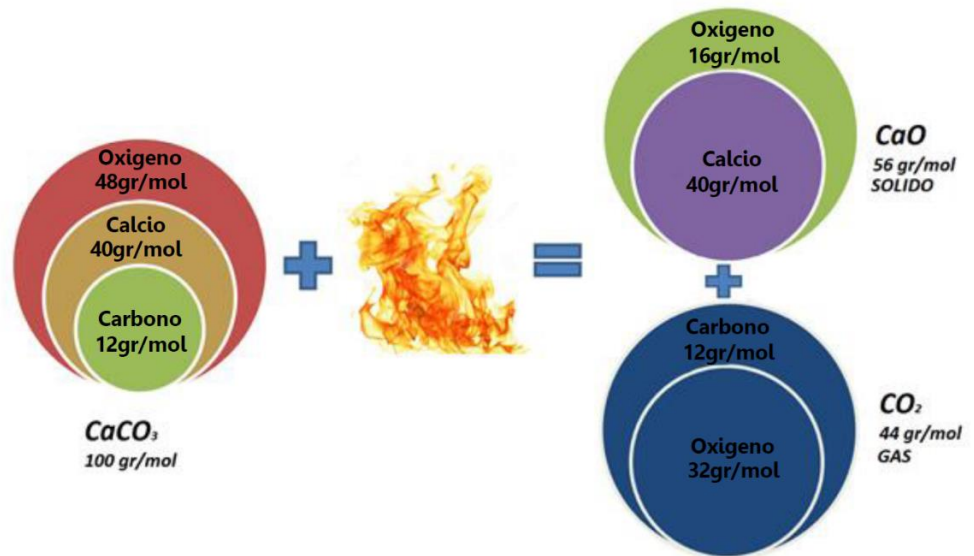


Nota: Extraído de manual de competencias de calcinación Calidra

Lo que, al someterse a una temperatura mayor a los 900°C , se daría lugar a una reacción térmica con el siguiente resultado:

Figura 8

Reacción de la calcinación de carbonato de calcio



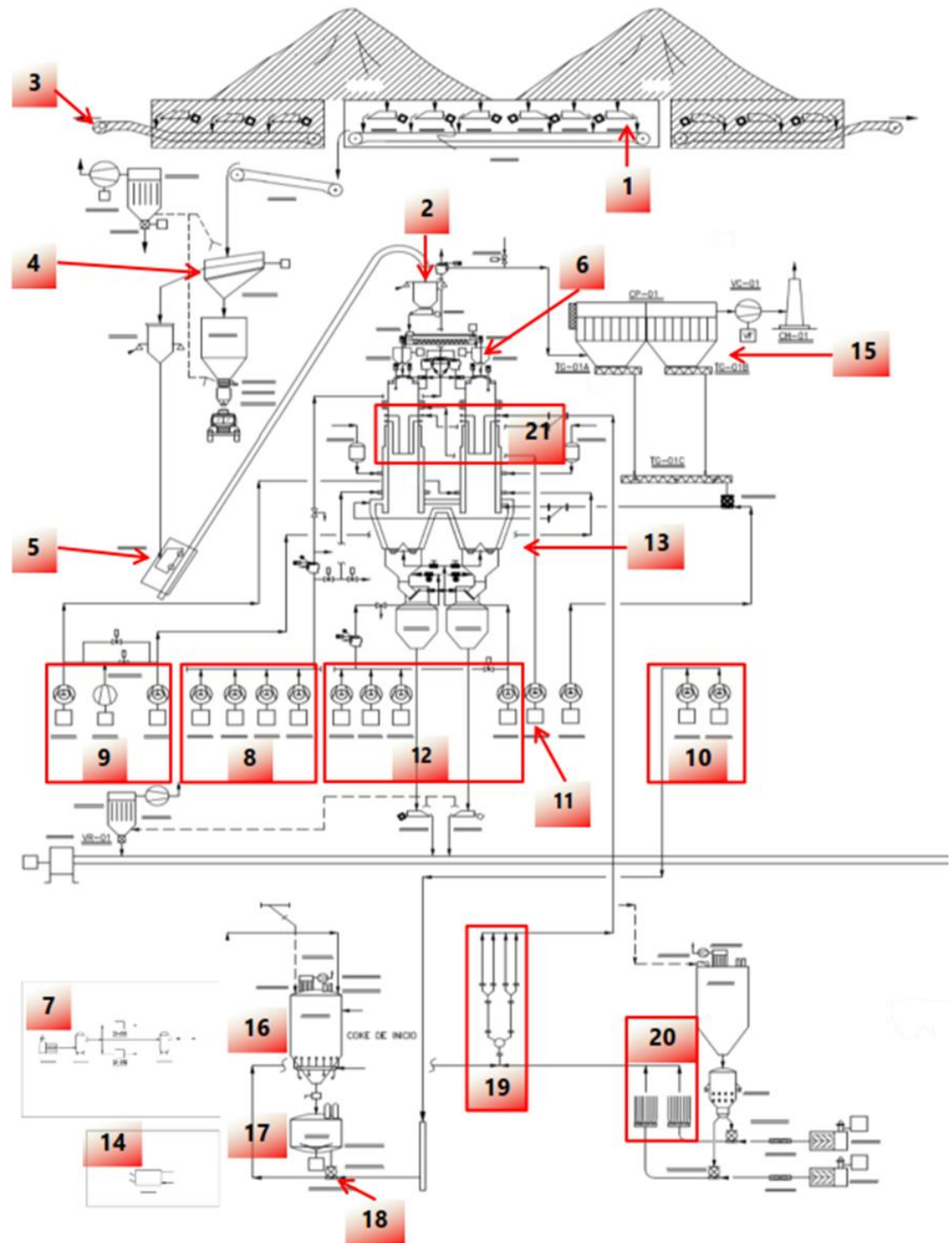
Nota: Extraído del manual de competencias de calcinación Calidra

2.2.3.3 Diagrama de flujo de proceso de calcinación en Horno

Maerz

Figura 9

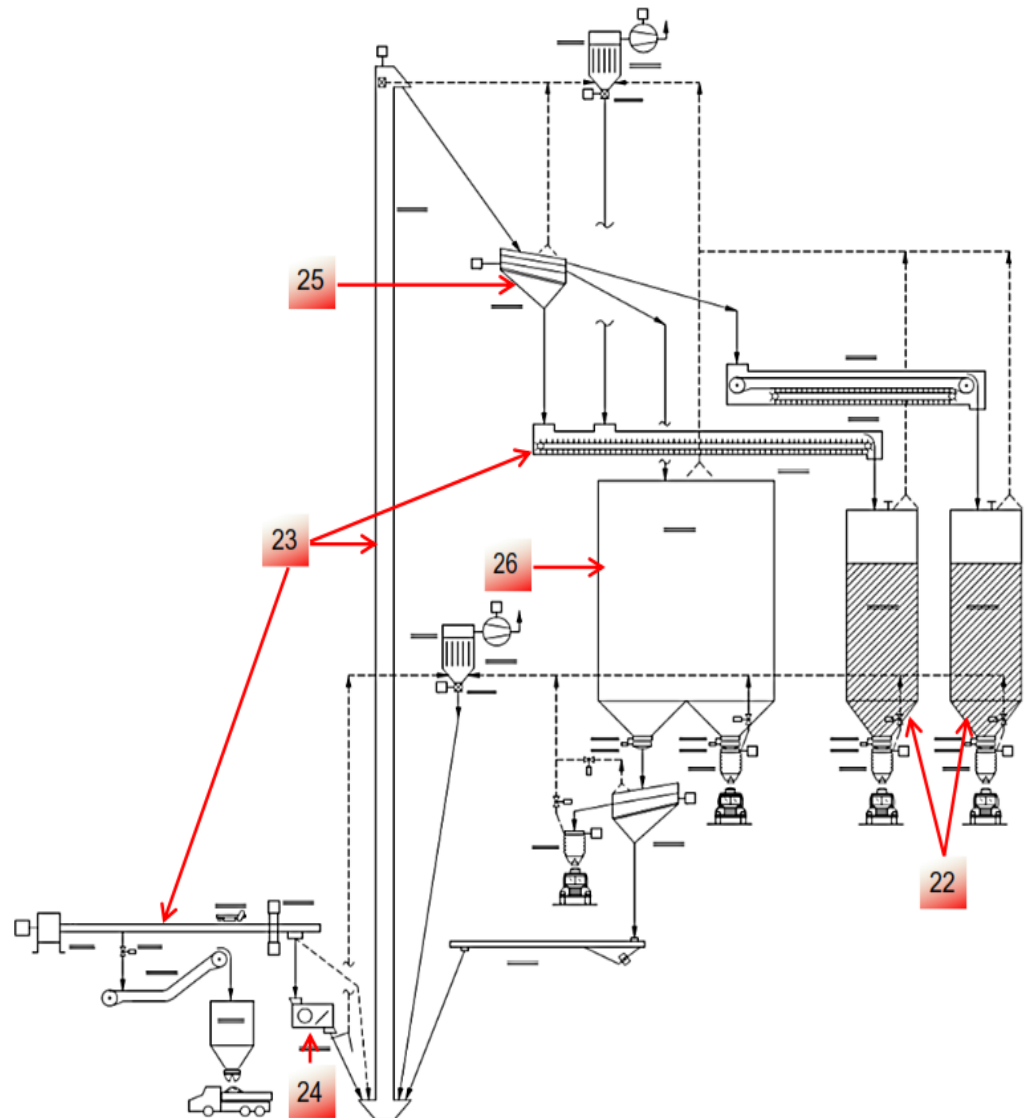
Diagrama de flujo de proceso de calcinación en Horno Maerz (parte 1)



Nota: Extraído del manual de competencias de calcinación Calidra.

Figura 10

Diagrama de flujo de proceso de calcinación en Horno Maerz (parte 2)



Nota: Extraído del manual de competencias de calcinación Calidra.

2.2.3.3.1 Alimentación de caliza

- **1:** Vibro alimentadores, permiten la descarga controlada del almacén de caliza a los equipos de transporte.
- **2:** Equipos de transporte, se encargan de transportar el material desde el almacén, hasta el edificio de manejo de piedra del horno de calcinación.



- **3:** Criba vibratoria, separan los finos contenidos en la materia prima antes de la alimentación del horno.
- **4:** Tolva pesadora, controla el peso de las cargas de piedra que se alimentarán al horno, y sirve como silo pequeño para el almacenamiento de materia prima.
- **5:** Skip, sube la carga de caliza desde la tolva de carga inferior, hasta la tolva pesadora superior del horno.
- **6:** Tolvas rotatorias, realizan la carga de piedra directamente al interior del horno.

2.2.3.3.2 Horno

- **7:** Unidad hidráulica, proporciona energía hidráulica para mover las compuertas del horno, y mantiene hermético el horno durante su operación.
- **8:** Sopladores de combustión, proporcionan el flujo de aire necesario para quemar el combustible.
- **9:** Sopladores de cilindro suspendido, mantienen la temperatura del cilindro suspendido, por debajo de sus límites operativos.
- **10:** Sopladores de transporte de combustible, proporciona el flujo necesario para transportar el combustible al horno.
- **11:** Sopladores de enfriamiento de lanzas, mantiene una temperatura baja en la punta de las lanzas durante el ciclo de recuperación, ayudando a conservar la vida útil de las lanzas.



- **12:** Sopladores de enfriamiento, mantiene la temperatura del producto de modo que no afecte los equipos de descarga.
- **13:** Mesas de descarga, permite la descarga controlada de la cal, a través de estas se controla el nivel de piedra en el horno.
- **14:** Aire comprimido, proporciona el aire necesario para la operación de las válvulas de dosificación de combustible, limpieza del pirómetro, cañones y la limpieza de bolsas en los colectores de polvo.
- **15:** Colector de polvos, filtra los gases de combustión del horno, evitando la emisión de polvo a la atmosfera.

2.2.3.3.3 Alimentación de combustible sólido

- **16:** Silo de almacenamiento, asegura el almacenamiento del combustible necesario para la operación continua del horno.
- **17:** Tolva pesadora, controla el peso de las cargas de combustible que se alimentarán al horno.
- **18:** Válvula dosificadora, permite la inyección regulada del combustible, durante el ciclo de calcinación.
- **19:** Válvula divisora, estas válvulas permiten el cambio de dirección del flujo de combustible de una cuba a otra según sea el ciclo de calcinación.
- **20:** Distribuidor estático, Permite la distribución homogénea de combustible en todas las lanzas.



- **21:** Lanzas, Descargan el combustible de manera uniforme en el interior del horno.

2.2.3.3.4 Almacenamiento

- **22:** Tolvas de descarga, Permite el almacenaje de CaO producido por ciclo.
- **23:** Equipo de transporte, transporta CaO desde las tolvas de descarga hasta el edificio de cal viva
- **24:** Molino, reduce tamaño del CaO para obtener las granulometrías requeridas por los clientes.
- **25:** Criba vibratoria, Permite la clasificación por granulometría según los requerimientos de los clientes.
- **26:** Tolvas de almacenamiento, permite el almacenaje de CaO para su embasado y carga a clientes.

2.2.3.4 Variables Críticas en la producción del óxido de calcio

2.2.3.4.1 Caliza

El carbonato en la caliza se descompone en condiciones térmicas especiales y vinculadas al flujo térmico.

La temperatura de descomposición o de precalcinación se ajusta a la presión parcial que se ejerce sobre el dióxido de carbono. Para que se descomponga el núcleo calcáreo, debe penetrar el calor de descomposición adecuado en la superficie de la caliza a través de una capa aislante de cal viva.



Para ello, debe haberse precalentado la superficie calcárea. Ya que una enorme cantidad de dicho calor puede penetrar en la caliza, el rendimiento térmico total admisible resulta manifiestamente inferior al acercarse el fin del proceso de calcinación.

La alimentación de horno abarca un conjunto de pequeños y grandes tamaños de granos.

Debido a que los granos de menor tamaño absorben el calor más rápidamente, después de un breve periodo de combustión el flujo térmico admisible para estos granos desciende a un valor mínimo.

Los granos mayores deben someterse al calor durante más tiempo hasta su calcinación completa. Según la carga del horno se va acercando al final de la zona de calcinación, desciende el calor necesario para el proceso de calcinación.

La piedra debe cumplir con las especificaciones de contenido de carbonato de calcio o dolomita, según sea el caso, granulometría y su limpieza, las especificaciones de estas características, varían en función de las necesidades operativas de cada unidad de negocio y de cada horno, los requisitos del cliente, así como de las características de cada cantera.

En el proceso de calcinación, durante la alimentación al horno de materia prima, también se deberá controlar la cantidad de piedra alimentada, dicha cantidad depende del sistema de carga que se está usando y por la velocidad de producción.

El no cumplir con las especificaciones de las características mencionadas, puede generar afectaciones en el proceso, y en la calidad del producto:

Tabla 6

Afecciones a la producción del óxido de calcio respecto a la caliza.

Variación	Afectación
	Aumento en el consumo eléctrico
	Aumentan porcentaje de requemados en la cal, afectando la reactividad.
Granulometría menor a especificación	Incremento de presión en el horno. Incremento de temperatura en el horno. Aumenta el consumo eléctrico. Se elevan los costos de producción debido al aumento de la demanda de materia prima.
	Formación de puentes de caliza.
Granulometría mayor a especificación	Aumenta el porcentaje de pérdidas por calcinación (%PPC). Se requiere mayor poder calorífico.
Caliza con impurezas o suciedad	Problemas de continuidad en la operación del horno. Formación de aglomerados, en distintos puntos del proceso.

Nota: Extraído del manual de competencias de calcinación Calidra.

2.2.3.4.2 Combustibles

Las afecciones a la producción del óxido de calcio respecto al combustible vienen especificadas de manera general en la tabla 7:



Tabla 7

Afecciones a la producción del óxido de calcio respecto al combustible

Propiedades	Observaciones	Afectaciones
Costo	El coste del combustible supone un 40 hasta 70% de los gastos de explotación.	No cumplimiento con presupuestos.
Poder calorífico	El poder calorífico va unido a los costes del combustible por unidad.	<p>Poder calorífico alto:</p> <ul style="list-style-type: none"> -Reducción en el consumo de combustible. -Variaciones en la temperatura de control. -Variaciones en la calidad del producto -Disminución en %PPC -Incremento de quemado <p>Poder calorífico bajo:</p> <ul style="list-style-type: none"> -Aumento de consumo de combustible -Variación en la calidad del producto (%PPC) -Variación en temperatura de lanzas.
Humedad	Los combustibles sólidos deben ser secados para evitar un apelmazamiento durante el proceso de dosificación y en	<p>Humedad mayor:</p> <ul style="list-style-type: none"> -Taponamientos en líneas de inyección de combustible. -Discontinuidad en la operación del horno. -Aumento en el consumo de combustible. -Variación en la calidad del producto.



Propiedades	Observaciones	Afectaciones
	el transporte hacia las lanzas.	
Azufre	Aprox. un 70% del azufre contenido en el combustible es absorbido por la cal como sulfato de cal.	Puede mermar la calidad del producto.
Tamaño de partícula	El tamaño de partícula de los combustibles sólidos incide sobre el tiempo de combustión y con ello sobre el tiempo de producción.	Variación en la longitud de la flama.
Volátiles	Las propiedades de combustión de los combustibles sólidos varían en función de la cantidad que contienen en volátiles y en humedad.	El poder calorífico y la forma de la llama pueden variar a causa de ello. Los volátiles llevan a la liberación de energía, mientras que la humedad consume energía adicional para la evaporación.
Ceniza	La ceniza contamina la cal hasta cierto punto con	Se puede generar apelmazamiento de las diferentes partículas de cal. La presión sobre las partículas de cal en el material apilado puede incluso



Propiedades	Observaciones	Afectaciones
	sílices, arcillas y óxido de hierro.	reforzar este fenómeno. La mezcla de ceniza, polvo de cal y/o álcalis (sodio y potasio) forma fases de mineral de baja fusión sobre la superficie de las partículas de cal. Grandes cantidades de ceniza favorecen la tendencia al apelmazamiento, causado por un proceso de sinterización (formación de puentes) y por la formación de fases de baja fusión.

Nota: Extraído del manual de competencias de calcinación Calidra.

2.2.3.4.3 Triangulo de fuego

Para la ignición del fuego el oxígeno del aire se combina con los materiales que arden, pero en forma violenta, a esta oxidación denominamos combustión.

Para que un material entre en combustión se requieren condiciones, una de ellas es contar con oxígeno suficiente; normalmente presente debido a que el aire que nos rodea lo contiene.

La segunda condición es que exista material combustible y la tercera condición es que tengamos suficiente calor para que la combustión surja.

Las condiciones mencionadas en proporciones adecuadas conforman el triángulo del fuego. Si uno de estos elementos está ausente o no está en la proporción conveniente, no inicia el fuego.

Figura 11

Triángulo de fuego.



Nota: Extraído de manual de competencias de calcinación Calidra.

Adicionalmente, para que se inicie la combustión, requiere que los elementos se encuentren en forma de gases o vapores, por lo que los combustibles sólidos deben primero calentarse para que desprendan vapores que puedan inflamarse.

Para explicar este aspecto del fuego, la ciencia cita un cuarto elemento conocido como la reacción en cadena.

Cuando la combustión es intensa, aparecen llamas y se libera calor en exceso, facilitando que el oxígeno y los combustibles se combinen y el fuego se propague.

La combustión cumple un ciclo mientras quede material combustible y oxígeno a menos que algo interrumpa este ciclo.



2.2.4 Características del óxido de calcio

Entre las características más importantes del óxido de calcio y las más influyentes para su manufactura podemos distinguir las siguientes:

- Requemados.
- Reactividad.
- Oxido de calcio disponible.
- Oxido de calcio total.
- Requemados.

Los procedimientos, métodos y variables que se utilizan para la determinación de las características del óxido de calcio en Calquipa S.A.C., se apegan a la ASTM International (American Society for Testing and Materials) que es una organización de normas internacionales que desarrolla y publica acuerdos voluntarios de normas técnicas para una amplia gama de materiales, productos, sistemas y servicios entre ellos el cemento, yeso y cal. Existen alrededor de 12,575 acuerdos voluntarios de normas de aplicación mundial.

2.2.4.1 Perdidas por calcinación (%PPC's)

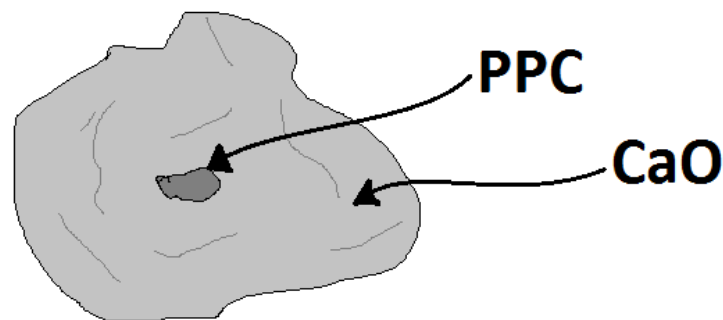
Esta característica indica la cantidad en porcentaje de material crudo (CaCO_3), en la piedra de Óxido de Calcio (CaO).

Es calculado en laboratorio mediante el equipo LECO CS-744. Que cuantifica el dióxido de carbono desprendido de la muestra durante la calcinación de la misma.

La normativa de calidad según el método ASTM C25- 96 el % de PPC en el óxido de calcio debe ser máximo 5 % para considerar un óxido de calcio aceptable.

Figura 12

Representación gráfica de %PPC en piedra de óxido de calcio.



Nota: Extraído del manual de competencias de calcinación Calidra.

2.2.4.2 Reactividad

Esta característica del óxido de calcio refiere a la velocidad de reacción del óxido de calcio al entrar en contacto con el agua. Es decir, la variación de temperatura respecto al tiempo.

Esta característica es muy importante en distintos procesos minero metalúrgicos, especialmente en aquellos que requieren de hidratación, debido a que es indispensable sea reactiva. Sin embargo, en algunos procesos como la fabricación de concreto celular se requiere un óxido de calcio de baja reactividad.

La reactividad se controla por medio de las condiciones de la calcinación, en general, entre más alta la temperatura de calcinación y más

prolongada la exposición, probablemente la reactividad del producto sea inferior.

Figura 13

Relación temperatura y tiempo de estancia.



Nota: Extraído del manual de competencias de calcinación Calidra.

La posibilidad de controlar la reactividad depende por lo tanto del tipo de horno y en menor medida de las características de la piedra.

La reactividad se cuantifica con una prueba de hidratación donde la muestra es llevada a hidratación y se mide la variación de temperatura en función del tiempo. Es válido afirmar que entre más reactivo sea el óxido de calcio, en menor tiempo se incrementara la temperatura. El método utilizado en Calquipa S.A.C. se ajusta a la norma ASTM C-110, que consiste en medir la variación de temperatura dada a los 30 segundos de la temperatura inicial, al valor resultante se le conoce como Δt_{30} . La normativa de calidad según el método ASTM C-110 indica que la reactividad del óxido de calcio debe ser mínimo 15°C.

2.2.4.3 Óxido de calcio disponible

El óxido disponible se define como el óxido de calcio útil y aprovechable que reacciona con el agua durante un proceso de hidratación.

Debido a que en la calcinación se pierde óxido de calcio, por el exceso de calor, a estas pérdidas se les conoce como requemados o recalcinados y se calculan en laboratorio mediante un proceso volumétrico potenciométrico en el cual se utiliza agua destilada como hidratante, ácido clorhídrico como solución titulante y fenolftaleína como indicador de viraje, utilizando la siguiente fórmula:

$$\% \text{ CaO disponible} = (N \cdot V \cdot 2.804) / W$$

Dónde:

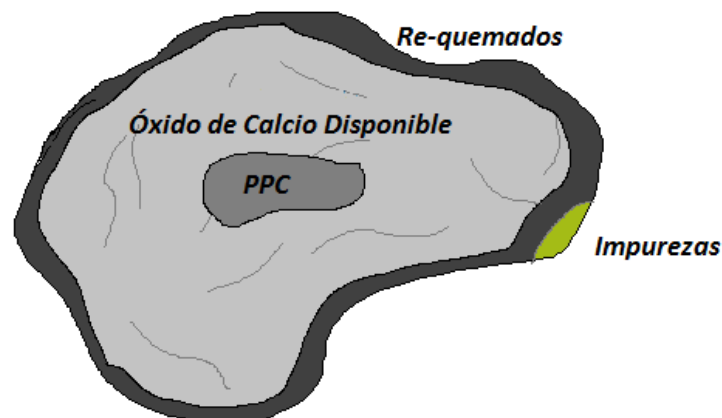
N: Normalidad del Ácido Clorhídrico

V: Cantidad de ácido clorhídrico gastado

W: Peso de la muestra

Figura 14

Representación gráfica de % óxido de calcio disponible.



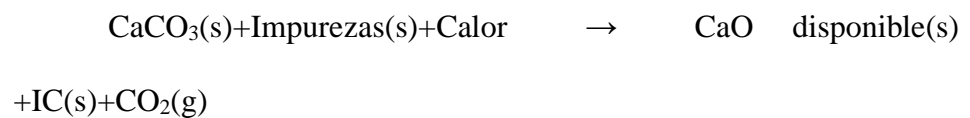
Nota: Extraído del manual de competencias de calcinación Calidra.

2.2.4.4 Óxido de calcio total

El carbonato de calcio en la cantera de Calquiipa S.A.C. se presenta en caliza, naturalmente contiene porcentajes de MgO, SiO₂, Fe₂O₃, y Al₂O₃ que son definidos como impurezas tanto para el óxido, hidróxido y carbonato de calcio.

La normativa de calidad según el método ASTM C25- 96 el % de CaO total en el óxido de calcio debe estar comprendida entre 85% - 89%.

Si incluimos estas impurezas en la reacción química de la obtención del óxido de calcio resulta:

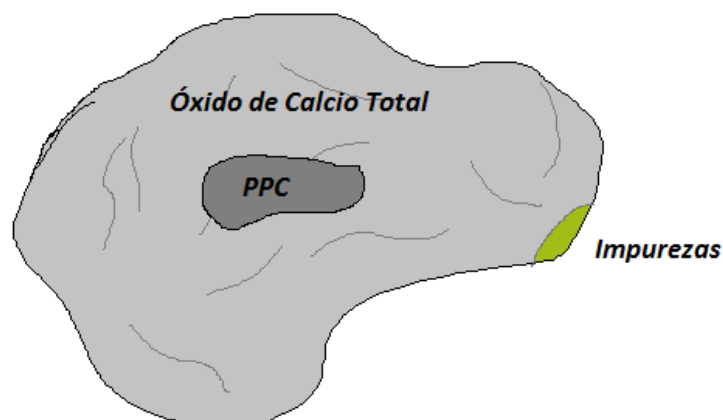


Dónde:

IC(s) corresponde a las impurezas concentradas.

Figura 15

Óxido de calcio total



Nota: Extraído del manual de calcinación Calidra.



La característica de óxido de calcio total en una muestra de óxido de calcio se cuantifica, con la ecuación siguiente:

$$\%CaO\ Total = 100 - (\%impurezas + \%crudo)$$

Estequiométricamente relacionamos el peso molecular del CaO sobre el peso molecular del CO₂. Los cuales son CaO = 56 gr./mol y CO₂ = 44gr./mol

La relación es: 56/44=1.27, esta cifra multiplicada por el %PPC (CO₂) determina los crudos, según la fórmula siguiente:

$$\%Crudo = \%PPC * 1,27$$

2.2.4.5 Requemados

Esta característica representa el porcentaje de oxido de calcio que estuvo expuesta a energía calorífica en exceso. Debido a esta sobrexposición su reacción a la hidratación es retardada e inferior provocando rotura en los sacos en el envase o caída de repellado en sus aplicaciones, cuando el producto es usado por los clientes.

Los requemados se calculan mediante la siguiente ecuación.

$$\% Requemado = \% CaO\ total - (\% CaO\ disponible + \% crudo)$$



CAPÍTULO III

MATERIALES Y METODOS

3.1 LUGAR DE ESTUDIO

El presente proyecto de investigación se llevará a cabo en el laboratorio de control de calidad de la empresa Calquipa S.A.C ubicado en “Parcialidad Urinsaya II Pampa de Fundición” del distrito de Callalli, Provincia de Caylloma, Región Arequipa.

3.1.1 Vías de acceso

Para llegar al distrito de Callalli se puede hacer por dos accesos:

- Por la carretera Arequipa-Caylloma, esta se encuentra asfaltada hasta el sector Vizcachani, de Vizcachani hasta Callalli la carretera es trocha. El total del recorrido son 156 km en un aproximado de 3 horas de viaje.
- Otra vía de acceso, es por la carretera Arequipa –Chivay –Sibayo- Callalli, toda la vía es asfaltada. El total de recorrido son 209 km en un aproximado de 4 horas de viaje.

3.2 POBLACION Y MUESTRA

3.2.1 Población

La población del presente trabajo de investigación está constituida por la cantera “Negro Africano” que está ubicada en las estribaciones de la Cordillera Occidental de los Andes en el paraje Apacheta – Callalli, las coordenadas UTM se muestran en la tabla 8. Tiene una extensión de su concesión de 400 hectáreas perteneciente a la empresa Calquipa S.A.C. que se encuentra a 4700 m.s.n.m. con



una topografía empinada y ondulada , el afloramiento calcáreo ocurre a manera de estratos de calizas.

Tabla 8

Coordenadas UTM de la cantera Negro Africano.

Norte	Este	Norte	Este
8 293 000	251 000	8 292 631,47	250 805,91
8 292 000	251 000	8 291 631,49	250 805,91
8 292 000	250 000	8 291 631,49	249 805,93
8 291 000	250 000	8 290 631,50	249 805,93

Nota: Elaboración propia.

3.2.2 Muestra

La obtención de muestra de caliza se realizó bajo el método de muestreo selectivo teniendo en consideración la característica química de la materia prima (Caliza) de contenido de carbonato de calcio (93,07%) y característica física de tamaño de partícula (1”), así mismo se tuvo cuidado como las variables de calcinación tales como temperatura (1000°C) y tiempo de residencia (10 hrs.), para obtener como única variable de alteración de rendimiento del producto final (Oxido de Calcio), al tratamiento térmico aplicado en la etapa de enfriamiento post calcinación.

La cantidad total de la muestra seleccionada para la realización de este trabajo de investigación fue aproximadamente de 20 Kg.

3.3 NIVEL Y DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

3.3.1 Nivel de la investigación.

El nivel de esta investigación es explicativo y descriptivo. La investigación es explicativa porque se busca determinar la relación causal entre los tratamientos



térmicos post calcinación y las características del óxido de calcio. Además, es descriptiva, ya que se pretende caracterizar las propiedades del óxido de calcio producido bajo diferentes condiciones de tratamiento térmico, incluyendo pérdidas por calcinación, reactividad, óxido de calcio disponible, óxido de calcio total y quemado.

3.3.2 Diseño de la investigación

3.3.2.1 Enfoque de la investigación.

La presente investigación se enmarca dentro de un enfoque cuantitativo, ya que se busca medir y analizar las características del óxido de calcio en función de los tratamientos térmicos post calcinación aplicados. Se utilizarán métodos experimentales de laboratorio para obtener datos precisos sobre las variables de interés.

3.3.2.2 Tipo de Estudio

Se llevo a cabo un estudio descriptivo y correlacional. El objetivo es describir las características del óxido de calcio producido bajo diferentes condiciones de tratamiento térmico y establecer relaciones entre los tratamientos aplicados y las características del óxido de calcio producido.

3.3.2.3 Variables de Estudio

Las variables de estudio se definirán de la siguiente manera:

3.3.2.3.1 Variables Independientes:

- Tratamientos térmicos de enfriamiento.



3.3.2.3.2 Variables Dependientes:

- Pérdidas por calcinación (%).
- Reactividad (°C)
- Óxido de calcio disponible (%).
- Óxido de calcio total (%).
- Requemados (%).

3.3.2.3.3 Métodos y Técnicas de Recolección de Datos

Se utilizarán las siguientes técnicas para la recolección de datos:

Experimentos de laboratorio: Se realizarán ensayos de calcinación bajo condiciones controladas y se someterán a diferentes tratamientos térmicos.

Análisis químico: Se llevarán a cabo análisis gravimétricos y volumétricos para determinar las características del óxido de calcio.

Registros y documentos: Se registrará los datos obtenidos en cuadros Excel.

3.4 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Para el análisis estadístico de los datos obtenidos en esta investigación se utilizó el software estadístico SPSS y se llevó a cabo de la siguiente manera.



3.4.1 Análisis Descriptivo

Para el análisis descriptivo de los resultados obtenidos para las características evaluadas, se presentará un cuadro con los datos estadísticos como media, mediana desviación estándar, mínimo y máximo, entre otros:

3.4.2 Análisis de Varianza (ANOVA)

Para determinar si los tratamientos térmicos tuvieron un efecto significativo sobre las características del óxido de calcio, se llevó a cabo un análisis de varianza (ANOVA) de un solo factor:

Suposiciones de ANOVA: Antes de realizar el ANOVA, se verifico las suposiciones de normalidad de los residuos mediante la prueba de Shapiro-Wilk y la homogeneidad de varianzas utilizando la prueba de Levene.

Ejecución del ANOVA: Se realizo un ANOVA para cada una de las características analizadas (pérdidas por calcinación, reactividad, óxido de calcio disponible, óxido de calcio total y quemado). SPSS genero un resumen de los resultados, incluyendo valores F y p.

Pruebas Post-hoc: Al encontrarse diferencias significativas ($p > 0.05$), se realizaron pruebas post-hoc, mediante el test de Tukey, para identificar cuáles tratamientos presentan diferencias significativas en cada propiedad.

Posteriormente se discutieron los resultados alcanzados y la presentación de las conclusiones.



3.5 MATERIALES, REACTIVOS Y EQUIPOS

3.5.1 Materiales

- Matraz Erlenmeyer de 500 ml
- Serie de tamices ASTM
- Espátula de pesado
- Probeta de 500 ml
- Bureta Semiautomática de 50 ml
- Matraz Erlenmeyer de 250 ml
- Matraz aforado de 250 ml
- Papel filtro N°41
- Pipeta volumétrica 10 ml
- Embudo
- Piseta de 500 ml
- Recipiente de 1000 ml
- Charola para muestras
- Baldes de 20 L
- Brochas
- Espátula



- Crisoles
- Pinzas

3.5.2 Equipos

- Horno eléctrico (Mufla)
- Agitador magnético
- Plancha de calentamiento
- Balanza analítica de precisión
- Agitador vertical
- Chancadora de quijadas
- Ro-tap
- Termómetro
- Cronometro
- Pulverizador de anillos
- Leco CS744

3.5.3 Reactivos.

- Ácido Clorhídrico
- Agua destilada
- Glucosa (azúcar)



- Rojo de metilo
- Etanol
- Carbonato de sodio
- Cloruro de amonio
- Carbonato de calcio
- Murexida
- Fenolftaleína
- Hidróxido de sodio
- Hidróxido de potasio
- EDTA
- Solución Buffer

3.6 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

3.6.1 Selección de materias primas

Se realizó la selección de materias primas (caliza) de la cantera “Negro Africano”, concesión de 400 hectáreas perteneciente a la empresa Calquipa S.A.C., se recolecto aproximadamente 50 kg de muestra que paso por una chancadora de quijadas con una abertura de 1” para mantener un solo tamaño de muestra.



Concluida la etapa de chancado, se procedió a pasar toda la muestra por malla de 1” desechando el material fino y conservando solo las calizas del tamaño predefinido para la investigación.

Posteriormente se redujo la cantidad de muestra mediante el método de cuarteo por incrementos (se divide el mineral en una gran cuadrícula, seguidamente se subdivide en 20 cuadrículas y dejando un casillero se saca la muestra, luego se procede a sacar de los que falta) con el objetivo de reducir la muestra a una cantidad aproximada de 20 kg.

Mediante un cuarteador cilíndrico se procedió a tomar una muestra representativa de los 20 kg de caliza para la determinación de contenido de carbonato de calcio e impurezas del total de la muestra seleccionada para la experimentación.

Figura 16

Cuarteo de muestra



Nota: Elaboración propia.

3.6.1.1 Determinación de carbonato de calcio e impurezas

3.6.1.1.1 Preparación de soluciones

- Solución E.D.T.A de 0.02 N (normal): pesar 4 g de E.D.T.A y disuelva en agua destilada libre de CO₂ en un matraz aforado de 1000 ml. La valoración de normalidad se realiza con carbonato de sodio grado reactivo mediante los siguientes pasos:



- Pesar de 5 a 10 g. de Carbonato de calcio grado reactivo, secar a 120°C por 10 minutos, pesar un 1g de carbonato de Calcio seco luego deposítela en un matraz Erlenmeyer de 250 ml, que contenga 7.5 ml. de HCl (1:1) más 7.5 ml. de agua destilada libre de CO₂.
- Llevar el matraz a la plancha de calentamiento por 5 minutos luego tapar el matraz con un tapón y enfriarlo en agua.
- Trasvasar la solución en un matraz aforado de 250 ml, y proceder a enjuagar el matraz Erlenmeyer con agua destilada libre de CO₂ 5 veces y termine de aforar a 250 ml.
- Agitar el matraz para homogenizar la solución.
- Tomar una alícuota de 10 ml con una pipeta previo encebado y depositarlo en un matraz Erlenmeyer de 250 ml agregar 20 ml de agua destilada, 2 ml de hidróxido de potasio, colocar el matraz en el agitador magnético y adicionar el indicador murexida poco a poco hasta que la solución tenga un color rosado.
- Titular la muestra con la solución E.D.T.A hasta que vire de color rosado a morado, anotar el gasto de la solución y calcular la normalidad de la solución, Hacer la valoración 3 veces como mínimo hasta tener un dato constante, el



cálculo para hallar la normalidad esta predeterminado por la siguiente formula:

$$\text{Normalidad} = \frac{\text{Peso de la muestra}}{\text{ml Gastados de E.D.T.A} * 5.004} * 100$$

- Solución de HCl (1:1): Adicionar 500 ml de agua destilada y 500 ml de ácido clorhídrico grado reactivo en un matraz aforado de 1000 ml.
- Solución de Hidróxido de Potasio al 20%: Diluir 20g hidróxido de potasio en un matraz de 1000 ml.
- Solución Buffer: Diluir 67.5 de cloruro de amonio (NH_4Cl) en un matraz aforado de 1000 ml que contenga 200 ml de agua destilada y 570 ml de Hidróxido de amonio concentrado.

3.6.1.1.2 Desarrollo

- Pesar 1.0 g. de muestra, depositarla en un matraz Erlenmeyer de 250 ml, que contenga 7.5 ml. de HCl (1:1) y 7.5 ml. de agua destilada libre de CO_2 .
- Llevar a la plancha de calentamiento por 5 minutos luego enfriar al medio ambiente.
- Filtrar la solución, en el papel filtro N°41 colocado en un matraz aforado de 250 ml enjuagando el matraz Erlenmeyer con agua destilada libre de CO_2 5 veces.



- Homogenizar la solución y tomar una alícuota de 10ml previo encebado de la misma, y depositarla en un matraz Erlenmeyer de 250 ml, adicionar 20 ml de agua destilada y 2 ml de hidróxido de potasio, colocar el matraz en el agitador magnético y adicionar el indicador murexida poco a poco hasta que la solución tenga un color rosado.
- Titular la muestra con la solución E.D.T.A hasta que vire de color rosado a morado, anotar el gasto de la solución, para hallar el contenido de CaCO_3 .

Calculo:

$$\% \text{CaCO}_3 = \frac{(\text{ml Gastados de E.D.T.A}) * (\text{Normalidad E.D.T.A}) * 2.804 * 1.7846}{\text{Peso de la muestra}}$$

Nota:

Cada mililitro de EDTA 0.02N equivale a 2.804 mg de CaO,

Relación $\text{CaCO}_3/\text{CaO} = 1.7846$

El contenido de impurezas esta predeterminado por la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Impurezas} = \%100 - \% \text{CaCO}_3$$

3.6.2 Calcinación de muestras

Se colocó la muestra de caliza previamente seleccionada en 27 crisoles debidamente codificados para luego ingresar a la mufla eléctrica.

Debido a la cantidad de muestra considerada para esta investigación y la capacidad del horno mufla, se realizó la calcinación en 3 etapas. Cada etapa de calcinación tuvo una capacidad de 9 crisoles de muestras.

La fase de calcinación de la materia prima se llevó a cabo durante 10 horas a una temperatura constante de 1000 °C.

Para determinar el tiempo y temperatura ideal de calcinación de las muestras, se consideró la información de datos históricos de pruebas preliminares realizadas a nivel laboratorio en la empresa Calquipa S.A.C.

Figura 17

Calcinación de muestras.



Nota: Elaboración propia.

3.6.3 Aplicación de los tratamientos térmicos post calcinación.

Una vez transcurrido el tiempo óptimo de calcinación para cada una de las 3 etapas respectivamente, se le aplicaron los tratamientos térmicos planteados en la investigación de la siguiente manera:



3 crisoles con muestras fueron retiradas y colocadas a temperatura ambiente para su enfriamiento, a estas muestras se les consideró abordadas por el tratamiento térmico de enfriamiento a temperatura ambiente.

3 crisoles con muestras se quedaron en el horno mufla previamente apagado para su enfriamiento según la temperatura de la mufla vaya descendiendo, a estas muestras se les consideró afectas por el tratamiento térmico de enfriamiento secuencial.

Y finalmente 3 crisoles con muestras fueron colocados en la cabina de extracción de aire previamente acondicionada a una velocidad de inyección de aire de (0.5m/s), estas muestras se consideraron dentro del alcance del tratamiento térmico de enfriamiento acelerado.

Este procedimiento se llevó a cabo para cada una de las 3 etapas de calcinación, obteniendo un total de 27 muestras, 9 por cada tipo de tratamiento térmico aplicado.

Una vez culminado el enfriamiento de las muestras se procedió a enviarlas a preparación de muestras para su acondicionamiento para la determinación de rendimiento de cada una de estas.

3.6.4 Preparación de muestras

3.6.4.1 Chancado

Se vierte lentamente las muestras a la chancadora de quijadas para la disminución de su tamaño, cerrar la tolva de recepción y esperar que triture la muestra, descargar el cajón de recepción de la chancadora.

Se procedió a realizar el paso antes mencionado para cada una de las muestras respetando la codificación según el tipo de tratamiento térmico aplicado.

3.6.4.2 Pulverizado

Debido a la cantidad de muestra obtenida de cada crisol calcinado para la experimentación, se obvia la etapa de cuarteo y se procede a pulverizar toda la muestra contenida en cada crisol previamente chancada.

Figura 18

Pulverizado de muestra.



Nota: Elaboración propia.

Esta etapa se lleva a cabo en un pulverizador de anillos considerando obtener la muestra $>90\%$ de pasante en #200 para una adecuada determinación de rendimiento.

Figura 19

Pulverizador de anillos.



Nota: Elaboración propia.

Posterior al pulverizado de la muestra se procedió a colocar en un recipiente debidamente codificado con el tipo de tratamiento térmico aplicado a la muestra.

3.6.5 Determinación de características de óxido de calcio resultante

3.6.5.1 Determinación de pérdidas por calcinación

Se determino el porcentaje de pérdidas por calcinación en el óxido de calcio mediante el equipo LECO CS744 según el método ASTM C25-96 (Standard Test Methods for Chemical Analysis of Limestone,



Quicklime, and Hydrated Lime). El procedimiento se lleva a cabo de la siguiente manera:

- Seleccionar en el equipo la opción análisis.
- Seleccionar el número de muestras que se van a analizar en ese momento y colocar la codificación de manera que se identifique cada muestra analizada
- Colocar el crisol en la balanza y tarar.
- Pesar 0.1 g de muestra y anotar el peso en el equipo.
- Adicionar con la cucharilla de acelerador el iron chip y una cucharilla el leco cell respectivamente a cada muestra.
- Colocar el crisol con muestra en el pedestal del equipo y presionar analizar
- Esperar que el equipo proceda con el análisis y anotar el dato en la columna de %CO₂, con la pinza retirar el crisol y desecharlo.

Figura 20

Determinación de pérdidas por calcinación



Nota: Elaboración propia.

3.6.5.2 Determinación de reactividad

- Homogenizar, y pesar de 200 g de muestra de óxido de calcio en un recipiente.
- Vaciar 400 ml de agua a previamente temperada a 25 °C al recipiente del agitador vertical previamente configurado a 400 rpm.
- Tomar la temperatura inicial del agua con un termómetro en contacto permanente con el agua.
- Vaciar al recipiente del agitador vertical los 200g de la muestra previamente pesada y arrancar la agitación, simultáneamente iniciar el cronómetro.
- Tomar la lectura de la temperatura a los 30 seg.

Cálculo:



$$\text{Reactividad} = T \text{ (30 segundos)} - T \text{ inicial}$$

3.6.5.3 Determinación de óxido de calcio disponible

La determinación el porcentaje de óxido de calcio disponible se lleva a cabo considerando el método ASTM C25-96 (Standard Test Methods for Chemical Analysis of Limestone, Quicklime, and Hydrated Lime).

3.6.5.3.1 Preparación de soluciones

- Preparación del rojo de metilo al 0.1%: Pesar 0.25 g y agregarle 250 ml de alcohol etílico grado reactivo y poner en agitación.
- Preparación del Ácido Clorhídrico 1 Normal (HCl): Diluir 83 ml de Ácido Clorhídrico concentrado con agua destilada, aforando a un litro.
 - Valoración de Ácido Clorhídrico 1N con Carbonato de Sodio.
 - Pesar 20 g de Carbonato de Sodio, colocarlo en un crisol llevarlo a secado en una estufa a 250°C durante 4 horas posteriormente enfriarlo en un desecador.
 - Disolver 4.4gr \pm 0.1 mg de Carbonato de Sodio seco en 50 ml de agua destilada en un matraz de 500 ml.
 - Añadir 2 gotas del indicador rojo de metilo al 0.1%.



- Titular con la solución de Ácido Clorhídrico hasta la primera desaparición del color amarillo a rosado, calentar la solución hasta hervir si el vire de rosado regresa continuar la titulación, hervir la solución hasta que se mantenga el color rosado.
- El cálculo de la Normalidad es como sigue:

$$\text{Normalidad del HCl} = (B * 18.87) / C$$

Dónde:

B = cantidad del carbonato de sodio utilizado en gramos.

C = solución de HCl consumida, en mililitros.

- Preparación de la fenolftaleína como indicador (al 4%): Disolver 4 g de fenolftaleína en un matraz de 100 ml utilizando como medio alcohol al 95%.
- Preparación de la solución de azúcar (al 40%):
 - Pesar 40 gramos de azúcar en un vaso de precipitado.
 - Aforar a 100 ml con agua destilada.
 - Agitar la solución hasta que se disuelva el azúcar.
 - Neutralización: Se añaden de 3 a 5 gotas del indicador fenolftaleína y se añade solución de NaOH 0.1N gota a gota, mientras se está agitando hasta observar un color rosa pálido persistente.



3.6.5.3.2 Desarrollo

- La muestra de óxido de calcio como se recibe en el laboratorio debe ser mezclada para asegurar que la muestra sea homogénea.
- Pesar 2.804 g o 1.402 de óxido de calcio pulverizada.
- Depositarla en un matraz Erlenmeyer de 500 ml contenido de 40 ml de agua libre de CO₂, tapar inmediatamente el matraz.

(Nota: El agua no debe ser agregada a la muestra porque, especialmente con óxido de calcio, existe una tendencia del material de aglutinarse y formar grumos que dificultan después la completa disolución en la solución de azúcar. Por otro lado, si el óxido de calcio se agrega a una menor cantidad de agua, ocurre una mejor dispersión de partículas finas, permitiendo una disolución más rápida de la muestra. Es posible que, en el caso del óxido de calcio, ocurra alguna acción de apagado para facilitar la dispersión y disolución.)

- Si se forman grumos en el apagado dentro del matraz, desechar el análisis y empezar nuevamente.
- Llevarlo a una plancha de calentamiento e inmediatamente se añaden 50 ml de agua hervida libre de CO₂, agitar constantemente y dejar hervir por 1 minuto para dejar que se apague completamente la muestra.
- Quitar el matraz de la plancha de calentamiento y enfriar en un chorro de agua.



- Adicionar 100 ml de Solución de azúcar neutralizada, tapar el matraz y agitar. Reposar 15 minutos para completar la reacción. Agitar periódicamente.
- Lavar el interior del cuello del matraz con agua libre de CO₂.
- Llevar a titulación con ácido clorhídrico 1N hasta la primera desaparición del color rosa que persista durante 3 segundos.
- Anotar los mililitros gastados del punto final del viraje e ignorar cualquier retorno de color.

Cálculo:

$$\% \text{ CaO disponible} = (N * V * 2.804) / W$$

Dónde:

N = Normalidad de la solución ácida

V = Ácido Clorhídrico estándar utilizado (mililitros)

W = Peso de la muestra (gramos)

Figura 21

Determinación de óxido de calcio disponible.



Fuente: Elaboración propia.

3.6.5.4 Determinación de óxido de calcio total

3.6.5.4.1 Preparación de soluciones

- Solución E.D.T.A de 0.02 N: pesar 4 g de E.D.T.A y disolverlo en agua destilada libre de CO₂ en un matraz aforado de 1000 ml. La valoración de normalidad se realiza con carbonato de sodio grado reactivo mediante los siguientes pasos:
 - Pesar de 5 a 10 g. de Carbonato de calcio grado reactivo, secar a 120°C por 10 minutos, pesar un 1g de carbonato de Calcio seco luego deposítela en un matraz Erlenmeyer de 250 ml, que contenga 7.5 ml. de HCl (1:1) más 7.5 ml. de agua destilada libre de CO₂.



- Llevar el matraz a digestión en una plancha de calentamiento por 5 minutos luego tapar el matraz con un tapón y enfriarlo en agua.
- Trasvasar la solución en un matraz aforado de 250 ml, enjuagar el matraz Erlenmeyer con agua destilada libre de CO₂ 5 veces y aforar a 250 ml.
- Homogenizar la solución y tomar una alícuota de 10 ml con una pipeta previo encebado y depositarlo en un matraz Erlenmeyer de 250 ml agregar 20 ml de agua destilada, 2 ml de hidróxido de potasio, colocar el matraz en el agitador magnético y adicionar el indicador murexida poco a poco hasta que la solución tenga un color rosado.
- Titular la muestra con la solución E.D.T.A hasta que vire de color rosado a morado, anotar el gasto de la solución y calcular la normalidad de la solución, Hacer la valoración 3 veces como mínimo hasta tener un dato constante, el cálculo para hallar la normalidad esta predeterminado por la siguiente formula:

$$\text{Normalidad} = \frac{\text{Peso de la muestra}}{\text{ml Gastados de E.D.T.A} * 5.004} * 100$$

- Solución de HCl (1:1): Adicionar 500 ml de agua destilada y 500 ml de ácido clorhídrico grado reactivo en un matraz aforado de 1000 ml.



- Solución de Hidróxido de Potasio al 20%: Pesar 20 g de hidróxido de potasio aforar con agua destilada en una fiola de 100 ml.
- Solución Buffer: Pesar 67.5 de cloruro de amonio (NH_4Cl) y depositarlo en una fiola de 1000 ml contenida de 200 ml de agua destilada y 570 ml de Hidróxido de amonio concentrado, terminar de aforar.

3.6.5.4.2 Desarrollo

- Pesar 1.0 g. de la muestra, deposítela en un matraz Erlenmeyer de 250 ml contenida de 7.5 ml. de HCl (1:1) y 7.5 ml. de agua destilada libre de CO_2 .
- Llevar el matraz a una plancha de calentamiento por 5 minutos luego enfriar al medio ambiente.
- Filtrar la solución, en el papel filtro N°41 colocado en un matraz aforado de 250 ml enjuagando el matraz Erlenmeyer con agua destilada libre de CO_2 5 veces, termine de aforar a 250 ml.
- Homogenizar la solución y tomar una alícuota de 10ml previo encebado de la misma, y depositarla en un matraz Erlenmeyer de 250 ml agregar también 20 ml de agua destilada, 2 ml de Hidróxido de potasio, colocar el matraz en el agitador magnético y adicionar el indicador murexida poco a poco hasta que la solución tenga un color rosado.



- Titular la muestra con la solución E.D.T.A hasta que vire de color rosado a morado, anotar el gasto de la solución, para hallar el contenido de CaCO_3 .

Calculo:

$$\% \text{CaCO}_3 = \frac{(\text{ml Gastados de E.D.T.A}) * (\text{Normalidad E.D.T.A}) * 2.804}{\text{Peso de la muestra}}$$

Nota: Cada mililitro de EDTA 0.02N equivale a 2.804 mg de CaO.

3.6.5.5 Determinación de quemados

Para la determinación de quemados necesitamos previamente cuantificar las características del óxido de calcio antecesoras tales como las perdidas por calcinación, el óxido de calcio disponible y el óxido de calcio total.

El contenido de quemados se cuantifica mediante la siguiente ecuación.

$$\% \text{ Quemado} = \% \text{ CaO total} - \% \text{ CaO disponible} - \% \text{ crudo}$$

El porcentaje de crudo lo podemos definir mediante la ecuación

$$\% \text{ Crudo} = \% \text{ PPC} * 1,27$$

Donde: 1,27 es la relación del peso molecular del CaO sobre el peso molecular del CO_2 . Los cuales son $\text{CaO} = 56 \text{ gr./mol}$ y $\text{CO}_2 = 44 \text{ gr./mol}$

La relación es: $56/44=1.27$, este valor es multiplicado por el porcentaje de PPC (CO_2) que determina los crudos.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

A continuación, en la tabla 9 se presentan los resultados alcanzados de las pruebas experimentales para los objetivos específicos planteados en la investigación.

Mencionar que para la obtención del óxido de calcio a nivel laboratorio se controlaron las características físicas de la materia prima tales como el contenido de carbonato de calcio que fue 93.07%, así mismo se usó un solo tamaño de partícula de 1”.

Las condiciones de calcinación también fueron controladas tales como temperatura de calcinación utilizada (1000°C) y el tiempo de residencia que fue de 10 hrs. para mantener como única variable de alteración de características del producto final (óxido de calcio), al tratamiento térmico aplicado post calcinación.

El procedimiento experimental se encuentra detallado en el apartado 3.6. del presente documento.

Tabla 9

Resultados de la experimentación

N° de Ensayo	N° de Muestra	Tipo de T. Térmico	PPC's (%)	Reactividad (°C)	CaO Disponible (%)	CaO Total (%)	Requemados (%)
1	1	Tratamiento Térmico a	1,21	17,50	87,03	90,89	2,32
2	2		1,11	17,30	87,22	91,02	2,39
3	3		1,36	16,50	87,08	90,79	1,98
4	4		1,20	16,30	87,12	90,91	2,27



N° de Ensayo	N° de Muestra	Tipo de T. Térmico	PPC's (%)	Reactividad (°C)	CaO Disponible (%)	CaO Total (%)	Requemados (%)
5	5		1,26	17,90	87,39	90,85	1,86
6	6		1,30	16,10	86,99	90,69	2,05
7	7		1,18	17,40	87,24	91,00	2,26
8	8		1,24	17,70	87,17	90,85	2,11
9	9		1,18	16,90	87,33	90,81	1,99
10	1	Tratamiento Térmico Secuencial	0,66	14,50	86,83	91,56	3,89
11	2		0,87	14,90	86,62	91,42	3,70
12	3		0,77	15,10	86,77	91,79	4,04
13	4		0,63	15,30	86,68	91,47	3,99
14	5		0,58	14,80	86,89	91,54	3,91
15	6		0,79	15,50	86,95	91,61	3,65
16	7		0,64	15,90	86,86	91,58	3,90
17	8		0,80	14,30	86,91	91,64	3,72
18	9		0,83	16,00	86,73	91,72	3,94
19	1	Tratamiento Térmico Acelerado	1,57	18,80	87,71	90,48	0,78
20	2		1,49	18,10	87,65	90,39	0,85
21	3		1,72	19,00	87,48	90,34	0,67
22	4		1,67	18,50	87,38	90,37	0,87
23	5		1,61	19,40	87,59	90,51	0,88
24	6		1,56	18,40	87,61	90,30	0,71
25	7		1,70	19,10	87,54	90,68	0,98
26	8		1,62	18,30	87,36	90,34	0,92
27	9		1,52	18,90	87,73	90,49	0,83

Nota: Fuente elaboración propia

4.2 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

El análisis estadístico de la presente investigación se llevó a cabo en el Software estadístico SPSS.

4.2.1 Análisis descriptivo

Tabla 10

Descriptivos de los resultados alcanzados.

Características	Tipo de Tratamiento Térmico Aplicado	Descriptivos	Estadístico	
PPC's	Tratamiento Térmico a	Media	1,23	
		95% de intervalo de confianza para la media	Límite inferior 1,17 Límite superior 1,28	
	Temperatura Ambiente	Media recortada al 5%	1,23	
		Mediana	1,21	
		Varianza	0,01	
		Desviación estándar	0,07	
		Mínimo	1,11	
		Máximo	1,36	
		Rango	0,25	
		Rango intercuartil	0,10	
		Asimetría	0,40	
		Curtosis	0,36	
		Tratamiento Térmico Secuencial	Media	0,73
			95% de intervalo de confianza para la media	Límite inferior 0,65 Límite superior 0,81
	Media recortada al 5%		0,73	
	Mediana		0,77	
	Varianza		0,01	
	Desviación estándar		0,10	
	Mínimo		0,58	
	Máximo		0,87	
Rango	0,29			
Rango intercuartil	0,18			
Asimetría	-0,16			
Curtosis	-1,69			
Tratamiento Térmico Acelerado	Media	1,61		
	95% de intervalo de confianza para la media	Límite inferior 1,55 Límite superior 1,67		

Características	Tipo de Tratamiento Térmico Aplicado	Descriptivos	Estadístico	
		Media recortada al 5%	1,61	
		Mediana	1,61	
		Varianza	0,01	
		Desviación estándar	0,08	
		Mínimo	1,49	
		Máximo	1,72	
		Rango	0,23	
		Rango intercuartil	0,15	
		Asimetría	0,04	
		Curtosis	-1,16	
Reactividad	Tratamiento Térmico	Media	17,07	
		95% de intervalo de confianza para la media	Límite inferior	16,57
			Límite superior	17,56
		Media recortada al 5%	17,07	
		Mediana	17,30	
		Varianza	0,42	
		Desviación estándar	0,64	
		Mínimo	16,10	
		Máximo	17,90	
		Rango	1,80	
	Rango intercuartil	1,20		
	Asimetría	-0,35		
	Curtosis	-1,44		
	Tratamiento Térmico Secuencial	Media	15,14	
		95% de intervalo de confianza para la media	Límite inferior	14,69
			Límite superior	15,60
		Media recortada al 5%	15,14	
		Mediana	15,10	
		Varianza	0,35	
Desviación estándar		0,59		
Mínimo		14,30		
Máximo		16,00		
Rango		1,70		
Rango intercuartil	1,05			
Asimetría	0,14			
Curtosis	-1,03			

Características	Tipo de Tratamiento Térmico Aplicado	Descriptivos	Estadístico
	Tratamiento Térmico Acelerado	Media	18,72
		95% de intervalo de confianza para la media	Límite inferior 18,40 Límite superior 19,05
		Media recortada al 5%	18,72
		Mediana	18,80
		Varianza	0,18
		Desviación estándar	0,42
		Mínimo	18,10
		Máximo	19,40
		Rango	1,30
		Rango intercuartil	0,70
		Asimetría	0,07
		Curtosis	-0,97
CaO Disponible	Tratamiento Térmico Ambiente	Media	87,17
		95% de intervalo de confianza para la media	Límite inferior 87,07 Límite superior 87,28
	Media recortada al 5%	87,17	
	Mediana	87,17	
	Varianza	0,02	
	Desviación estándar	0,13	
	Mínimo	86,99	
	Máximo	87,39	
	Rango	0,40	
	Rango intercuartil	0,23	
	Asimetría	0,26	
	Curtosis	-0,89	
	Tratamiento Térmico Secuencial	Media	86,80
		95% de intervalo de confianza para la media	Límite inferior 86,72 Límite superior 86,89
		Media recortada al 5%	86,81
		Mediana	86,83
		Varianza	0,01
		Desviación estándar	0,11
Mínimo		86,62	
Máximo		86,95	
Rango		0,33	

Características	Tipo de Tratamiento Térmico Aplicado	Descriptivos	Estadístico			
CaO Total		Rango intercuartil	0,19			
		Asimetría	-0,41			
		Curtosis	-1,00			
		Media	87,56			
	Tratamiento Térmico Acelerado	95% de intervalo de confianza para la media	Límite inferior	87,46		
			Límite superior	87,66		
		Media recortada al 5%		87,56		
		Mediana		87,59		
		Varianza		0,02		
		Desviación estándar		0,13		
		Mínimo		87,36		
		Máximo		87,73		
		Rango		0,37		
		Rango intercuartil		0,25		
		Asimetría		-0,38		
		Curtosis		-1,07		
			Temperatura Ambiente	Media	90,87	
				95% de intervalo de confianza para la media	Límite inferior	90,79
					Límite superior	90,95
			Media recortada al 5%		90,87	
Mediana			90,85			
Varianza			0,01			
Desviación estándar			0,10			
Mínimo			90,69			
Máximo			91,02			
Rango			0,33			
Rango intercuartil			0,15			
Asimetría			-0,05			
Curtosis			-0,03			
Tratamiento Térmico Secuencial	Media			91,59		
	95% de intervalo de confianza para la media		Límite inferior	91,50		
			Límite superior	91,68		
	Media recortada al 5%		91,59			
	Mediana		91,58			
	Varianza		0,01			
Desviación estándar		0,12				

Características	Tipo de Tratamiento Térmico Aplicado	Descriptivos	Estadístico	
Requemados		Mínimo	91,42	
		Máximo	91,79	
		Rango	0,37	
		Rango intercuartil	0,18	
		Asimetría	0,30	
		Curtosis	-0,17	
	Tratamiento Térmico Acelerado	Media	90,43	
		95% de intervalo de confianza para la media	Límite inferior	90,34
			Límite superior	90,52
		Media recortada al 5%	90,43	
		Mediana	90,39	
		Varianza	0,01	
		Desviación estándar	0,12	
		Mínimo	90,30	
		Máximo	90,68	
		Rango	0,38	
		Rango intercuartil	0,16	
		Asimetría	1,09	
		Curtosis	1,10	
		Temperatura Ambiente	Tratamiento Térmico a	Media
Temperatura Ambiente	95% de intervalo de confianza para la media		Límite inferior	2,00
			Límite superior	2,28
	Media recortada al 5%		2,14	
	Mediana		2,11	
	Varianza		0,03	
	Desviación estándar		0,18	
	Mínimo		1,86	
	Máximo		2,39	
	Rango		0,53	
	Rango intercuartil		0,31	
	Asimetría		-0,06	
	Curtosis		-1,37	
Tratamiento Térmico Secuencial	Media	3,86		
	95% de intervalo de confianza para la media	Límite inferior	3,75	
		Límite superior	3,97	
	Media recortada al 5%	3,86		

Características	Tipo de Tratamiento Térmico Aplicado	Descriptivos	Estadístico	
		Mediana	3,90	
		Varianza	0,02	
		Desviación estándar	0,14	
		Mínimo	3,65	
		Máximo	4,04	
		Rango	0,39	
		Rango intercuartil	0,25	
		Asimetría	-0,46	
		Curtosis	-1,24	
		Tratamiento Térmico Acelerado	Media	0,83
	95% de intervalo de confianza para la media		Límite inferior	0,76
			Límite superior	0,91
	Media recortada al 5%		0,83	
	Mediana		0,85	
	Varianza		0,01	
	Desviación estándar		0,10	
	Mínimo		0,67	
	Máximo		0,98	
	Rango		0,31	
	Rango intercuartil	0,16		
Asimetría	-0,37			
Curtosis	-0,39			

Nota: Elaboración propia

4.2.2 Análisis de varianza (ANOVA)

Suposiciones de ANOVA: Antes de realizar el ANOVA, se verifico las suposiciones de normalidad de los residuos mediante la prueba de Shapiro-Wilk y la homogeneidad de varianzas utilizando la prueba de Levene.

4.2.2.1 Normalidad de los residuos

Debido a que la cantidad de datos a evaluar son inferiores a 50 se realiza mediante la prueba de Shapiro-Wilk.

Tabla 11

Pruebas de normalidad de residuos mediante Shapiro-Wilk.

Pruebas de normalidad				
Características	Tipo de T. Térmico Aplicado	Shapiro-Wilk		
		Estadístico	gl	Sig. (p)
PPC's	Tratamiento Térmico a Temperatura Ambiente	0,98	9,00	0,94
	Tratamiento Térmico Secuencial	0,92	9,00	0,38
	Tratamiento Térmico Acelerado	0,96	9,00	0,83
Reactividad	Tratamiento Térmico a Temperatura Ambiente	0,93	9,00	0,50
	Tratamiento Térmico Secuencial	0,96	9,00	0,84
	Tratamiento Térmico Acelerado	0,97	9,00	0,92
CaO Disponibile	Tratamiento Térmico a Temperatura Ambiente	0,97	9,00	0,91
	Tratamiento Térmico Secuencial	0,96	9,00	0,79
	Tratamiento Térmico Acelerado	0,94	9,00	0,57



CaO Total	Tratamiento Térmico a Temperatura Ambiente	0,97	9,00	0,87
	Tratamiento Térmico Secuencial	0,98	9,00	0,97
	Tratamiento Térmico Acelerado	0,90	9,00	0,25
Requemados	Tratamiento Térmico a Temperatura Ambiente	0,95	9,00	0,66
	Tratamiento Térmico Secuencial	0,91	9,00	0,30
	Tratamiento Térmico Acelerado	0,97	9,00	0,89

Nota: Elaboración propia

Los datos son normales debido a que el p-valor supera el nivel de significancia ($\alpha=0.05$) en todos los casos con la prueba de Shapiro-Wilk por lo tanto, los datos son normales a un 95% de confianza.

4.2.2.2 Homogeneidad de varianzas

La prueba de homogeneidad de varianza se realizó mediante Levene.

Tabla 12

Pruebas de homogeneidad de varianzas mediante Levene

Prueba de homogeneidad de varianza					
Características	Tipo de T. Térmico	Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig. (p)
PPC's	Se basa en la media	1,85	2,00	24,00	0,18
	Se basa en la mediana	0,91	2,00	24,00	0,42
	Se basa en la mediana y con gl ajustado	0,91	2,00	21,52	0,42
	Se basa en la media recortada	1,84	2,00	24,00	0,18
Reactividad	Se basa en la media	1,24	2,00	24,00	0,31
	Se basa en la mediana	0,69	2,00	24,00	0,51
	Se basa en la mediana y con gl ajustado	0,69	2,00	20,08	0,51
	Se basa en la media recortada	1,22	2,00	24,00	0,31
CaO Disponible	Se basa en la media	0,15	2,00	24,00	0,86
	Se basa en la mediana	0,14	2,00	24,00	0,87
	Se basa en la mediana y con gl ajustado	0,14	2,00	23,22	0,87
	Se basa en la media recortada	0,15	2,00	24,00	0,86
CaO Total	Se basa en la media	0,16	2,00	24,00	0,85
	Se basa en la mediana	0,09	2,00	24,00	0,92
	Se basa en la mediana y con gl ajustado	0,09	2,00	23,10	0,92
	Se basa en la media recortada	0,14	2,00	24,00	0,87
Requemados	Se basa en la media	3,08	2,00	24,00	0,07
	Se basa en la mediana	2,03	2,00	24,00	0,15
	Se basa en la mediana y con gl ajustado	2,03	2,00	22,01	0,16
	Se basa en la media recortada	3,07	2,00	24,00	0,07

Nota: Elaboración propia.



4.2.2.2.1 Hipótesis planteadas:

Para cada una de las variables (PPC's, Reactividad, CaO Disponible, CaO Total y Requemados), la hipótesis para la prueba de Levene sería:

Hipótesis nula (H_0): Las varianzas de los grupos son iguales.

Hipótesis alternativa (H_1): Las varianzas de los grupos no son iguales.

El valor de significación (Sig.) indica si rechazamos o no la hipótesis nula. Si este valor es menor que 0,05, se rechaza H_0 , lo que indica que las varianzas no son homogéneas (diferentes entre los grupos). Si el valor es mayor que 0,05, no se rechaza H_0 , indicando que las varianzas son homogéneas.

En general, las pruebas de homogeneidad de varianza (prueba de Levene) muestran que no hay evidencia significativa para rechazar la hipótesis de homogeneidad de varianzas en ninguna de las variables, lo que significa que se pueden considerar las varianzas de los grupos como iguales.

4.2.2.3 Ejecución del ANOVA

Se realizó un ANOVA para cada una de las características analizadas (pérdidas por calcinación, reactividad, óxido de calcio disponible, óxido de calcio total y quemado) para determinar si existe diferencias significativas entre las características obtenidas para cada



tratamiento térmico. SPSS genero un resumen de los resultados, incluyendo valores F y p.

4.2.2.3.1 Hipótesis planteadas para cada característica

- **Pérdidas por calcinación (PPC's):**

Hipótesis nula (H_0): No hay diferencias significativas en las pérdidas por calcinación entre los tratamientos térmicos (Temperatura ambiente, Secuencial, Acelerado).

Hipótesis alternativa (H_1): Al menos uno de los tratamientos térmicos produce diferencias significativas en las pérdidas por calcinación.

- **Reactividad:**

Hipótesis nula (H_0): No hay diferencias significativas en la reactividad entre los tratamientos térmicos.

Hipótesis alternativa (H_1): Al menos uno de los tratamientos térmicos produce diferencias significativas en la reactividad.

- **CaO disponible:**

Hipótesis nula (H_0): No hay diferencias significativas en el CaO disponible entre los tratamientos térmicos.

Hipótesis alternativa (H_1): Al menos uno de los tratamientos térmicos produce diferencias significativas en el CaO disponible.

- **CaO total:**

Hipótesis nula (H_0): No hay diferencias significativas en el CaO total entre los tratamientos térmicos.

Hipótesis alternativa (H_1): Al menos uno de los tratamientos térmicos produce diferencias significativas en el CaO total.

- **Requemados:**

Hipótesis nula (H_0): No hay diferencias significativas en los quemados entre los tratamientos térmicos.

Hipótesis alternativa (H_1): Al menos uno de los tratamientos térmicos produce diferencias significativas en los quemados.

Tabla 13

Análisis de varianza (ANOVA)

ANOVA						
Características		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig. (p)
PPC's	Entre grupos	3,48	2	1,74	233,22	0,00
	Dentro de grupos	0,18	24	0,01		
	Total	3,66	26			
Reactividad	Entre grupos	57,71	2	28,85	92,12	0,00
	Dentro de grupos	7,52	24	0,31		
	Total	65,23	26			
CaO Disponible	Entre grupos	2,58	2	1,29	80,21	0,00
	Dentro de grupos	0,39	24	0,02		
	Total	2,96	26			
CaO Total	Entre grupos	6,17	2	3,09	243,29	0,00
	Dentro de grupos	0,30	24	0,01		
	Total	6,47	26			
Requemados	Entre grupos	41,52	2	20,76	1018,49	0,00
	Dentro de grupos	0,49	24	0,02		
	Total	42,01	26			

Nota: Elaboración propia.



4.2.2.3.2 Interpretación del cuadro ANOVA

- **Pérdidas por calcinación (PPC's):**

$F = 233.220$, $p = 0.000$: Dado que $p < 0.05$, rechazamos la hipótesis nula. Esto indica que existen diferencias significativas en las pérdidas por calcinación entre los diferentes tratamientos térmicos.

- **Reactividad:**

$F = 92.116$, $p = 0.000$: Nuevamente, $p < 0.05$, lo que significa que hay diferencias significativas en la reactividad entre los tratamientos térmicos.

- **CaO Disponible:**

$F = 80.207$, $p = 0.000$: El resultado es significativo ($p < 0.05$), lo que implica que los tratamientos térmicos influyen en el CaO disponible de manera significativa.

- **CaO Total:**

$F = 243.294$, $p = 0.000$: Se rechaza la hipótesis nula, por lo que también existen diferencias significativas en el CaO total entre los distintos tratamientos térmicos.

- **Requemados:**

$F = 1018.490$, $p = 0.000$: Este valor extremadamente alto de F, acompañado de un p valor menor a 0.05, indica diferencias significativas entre los tratamientos en cuanto a los valores de quemados.

4.2.2.4 Pruebas Post-hoc

Al encontrarse diferencias significativas ($p < 0.05$), se realizaron pruebas post-hoc, mediante el test de Tukey, para identificar cuáles tratamientos presentan diferencias significativas en cada propiedad.

Tabla 14

Pruebas de comparaciones múltiples mediante HSD Tukey.

Comparaciones múltiples HSD Tukey							
Variable dependiente	(I) Tipo de T. Térmico Aplicado	(J) Tipo de T. Térmico Aplicado	Diferencia de medias (I-J)	Desv. Error	Sig. (p)	Intervalo de confianza al 95%	
						Límite inferior	Límite superior
PPC's	Tratamiento Térmico a Temperatura Ambiente	Tratamiento Térmico	0,50	0,04	0,00	0,40	0,60
		Tratamiento Térmico a Temperatura Ambiente Acelerado	-0,38	0,04	0,00	-0,48	-0,28
	Tratamiento Térmico a Temperatura Ambiente Acelerado	Tratamiento Térmico a Temperatura Ambiente	-0,50	0,04	0,00	-0,60	-0,40
		Tratamiento Térmico a Temperatura Ambiente Acelerado	-0,88	0,04	0,00	-0,98	-0,78
	Tratamiento Térmico a Temperatura Ambiente Acelerado	Tratamiento Térmico a Temperatura Ambiente	0,38	0,04	0,00	0,28	0,48
		Tratamiento Térmico a Temperatura Ambiente Acelerado	0,88	0,04	0,00	0,78	0,98



Comparaciones múltiples HSD Tukey								
Variable dependiente	(I) Tipo de T. Térmico Aplicado	(J) Tipo de T. Térmico Aplicado	Diferencia de medias (I-J)	Desv. Error	Sig. (p)	Intervalo de confianza al 95%		
						Límite inferior	Límite superior	
Reactividad	Tratamiento Térmico a Temperatura Ambiente	Tratamiento Térmico	1,92	0,26	0,00	1,26	2,58	
		Tratamiento Térmico Secuencial	-1,66	0,26	0,00	-2,31	-1,00	
	Tratamiento Térmico Secuencial	Tratamiento Térmico a Temperatura Ambiente	-1,92	0,26	0,00	-2,58	-1,26	
		Tratamiento Térmico Acelerado	-3,58	0,26	0,00	-4,24	-2,92	
		Tratamiento Térmico a Temperatura Ambiente Acelerado	1,66	0,26	0,00	1,00	2,31	
	Tratamiento Térmico Acelerado	Tratamiento Térmico	3,58	0,26	0,00	2,92	4,24	
		Tratamiento Térmico Secuencial	0,37	0,06	0,00	0,22	0,52	
	CaO Disponible	Tratamiento Térmico a Temperatura Ambiente	Tratamiento Térmico	-0,39	0,06	0,00	-0,54	-0,24
			Tratamiento Térmico Acelerado	-0,37	0,06	0,00	-0,52	-0,22
		Tratamiento Térmico Secuencial	Tratamiento Térmico a Temperatura Ambiente					



Comparaciones múltiples HSD Tukey							
Variable dependiente	(I) Tipo de T. Térmico Aplicado	(J) Tipo de T. Térmico Aplicado	Diferencia de medias (I-J)	Desv. Error	Sig. (p)	Intervalo de confianza al 95%	
						Límite inferior	Límite superior
CaO Total	Tratamiento Térmico Acelerado	Tratamiento Térmico	-0,76	0,06	0,00	-0,91	-0,61
		Tratamiento Térmico a Temperatura Ambiente	0,39	0,06	0,00	0,24	0,54
		Tratamiento Térmico Secuencial	0,76	0,06	0,00	0,61	0,91
	Tratamiento Térmico a Temperatura Ambiente	Tratamiento Térmico Secuencial	-0,72	0,05	0,00	-0,86	-0,59
		Tratamiento Térmico Acelerado	0,43	0,05	0,00	0,30	0,57
		Tratamiento Térmico a Temperatura Ambiente	0,72	0,05	0,00	0,59	0,86
	Tratamiento Térmico Secuencial	Tratamiento Térmico Acelerado	1,16	0,05	0,00	1,03	1,29
		Tratamiento Térmico a Temperatura Ambiente	-0,43	0,05	0,00	-0,57	-0,30
		Tratamiento Térmico Secuencial	-1,16	0,05	0,00	-1,29	-1,03

Comparaciones múltiples HSD Tukey							
Variable dependiente	(I) Tipo de T. Térmico Aplicado	(J) Tipo de T. Térmico Aplicado	Diferencia de medias (I-J)	Desv. Error	Sig. (p)	Intervalo de confianza al 95%	
						Límite inferior	Límite superior
Requemados	Tratamiento Térmico a Ambiente	Tratamiento Térmico	-1,72	0,07	0,00	-1,89	-1,56
		Tratamiento Secuencial					
	Tratamiento Térmico Acelerado	Tratamiento Térmico	1,30	0,07	0,00	1,14	1,47
		Tratamiento Secuencial					
	Tratamiento Térmico Secuencial	Tratamiento Térmico a Ambiente	1,72	0,07	0,00	1,56	1,89
		Tratamiento Térmico Acelerado	3,03	0,07	0,00	2,86	3,20
	Tratamiento Térmico Acelerado	Tratamiento Térmico a Ambiente	-1,30	0,07	0,00	-1,47	-1,14
		Tratamiento Térmico Secuencial	-3,03	0,07	0,00	-3,20	-2,86

Nota: Elaboración propia.

4.2.2.4.1 Interpretación de las comparaciones múltiples (Tukey HSD):

- **Pérdidas por calcinación (PPC's):**

Los tres tratamientos (Temperatura ambiente, Secuencial, y Acelerado) son significativamente diferentes entre sí, como lo indican los valores de significación ($p = 0.00$). Esto significa que cada tratamiento

térmico afecta las pérdidas por calcinación de manera distinta. Por ejemplo, el Tratamiento Secuencial tiene la media más baja (0.73), y el Tratamiento Acelerado tiene la media más alta (1.61).

- **Reactividad:**

Hay diferencias significativas entre todos los pares de tratamientos térmicos. El tratamiento acelerado tiene la mayor reactividad (media = 18.72), seguido del tratamiento a temperatura ambiente (media = 17.07), y el tratamiento secuencial es el que tiene la menor reactividad (media = 15.14). Esto indica que el tratamiento acelerado genera un óxido de calcio más reactivo.

- **CaO Disponible:**

Los tres tratamientos también son significativamente diferentes. El tratamiento acelerado tiene el mayor CaO disponible (media = 87.56), mientras que el tratamiento secuencial tiene el valor más bajo (media = 86.80). Esto muestra que los diferentes tratamientos afectan el porcentaje de CaO disponible en el producto.

- **CaO Total:**

Aquí, las diferencias entre los tres tratamientos también son significativas. El tratamiento secuencial tiene el mayor valor de CaO total (media = 91.59), y el tratamiento acelerado tiene el menor valor (media = 90.43).

- **Requemados:**



Las diferencias entre todos los pares de tratamientos son muy significativas ($p = 0.00$). El tratamiento secuencial tiene la mayor cantidad de quemados (media = 3.86.), mientras que el tratamiento acelerado tiene la menor cantidad (media = 0.83), lo que indica que este último es el menos eficiente en evitar el sobrecalentamiento del material.

4.3 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

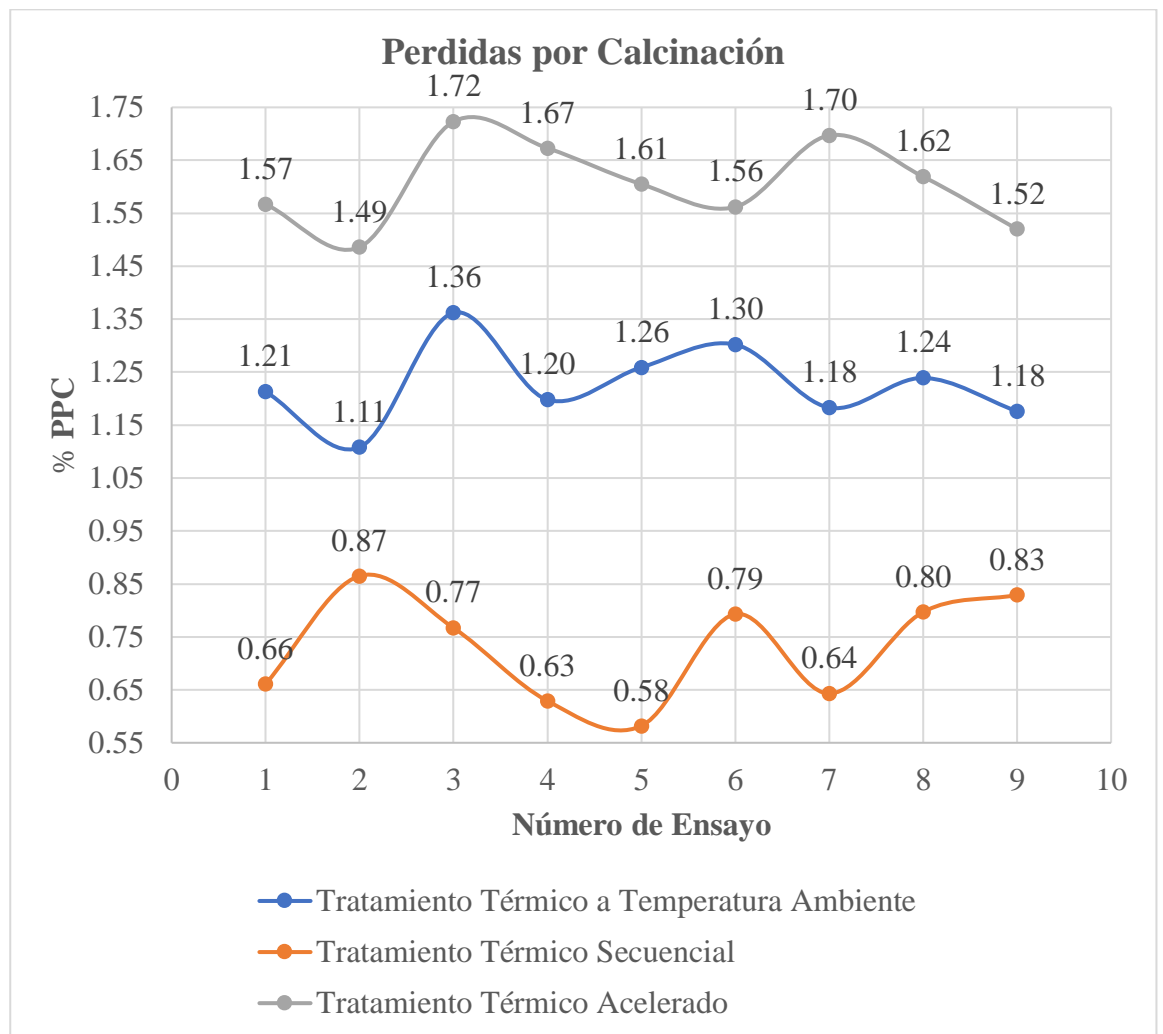
Para una mejor comprensión y discusión de los resultados de la incidencia de los tratamientos térmicos post calcinación en las características del óxido de calcio obtenido de la experimentación, agruparemos los resultados según el tipo de característica que representan, así mismo desarrollaremos gráficos para cada uno de estas.

4.3.1 Incidencia de los tratamientos térmicos de enfriamiento en el porcentaje de perdidas por calcinación

A continuación, en la figura 22 se presentan un gráfico de dispersión con los resultados alcanzados de las pruebas experimentales de la incidencia de los tratamientos térmicos post calcinación en la característica de perdidas por calcinación.

Figura 22

Resultados de perdidas por calcinación



Fuente: Elaboración propia.

Como se aprecia en la figura 22, las muestras que fueron sometidas al tratamiento térmico acelerado presentan un mayor porcentaje de perdidas por calcinación respecto a los otros tratamientos térmicos aplicados, siendo el valor máximo resultante de la experimentación 1,72 y el valor mínimo 1,49.

Las muestras que fueron sometidas al tratamiento térmico a temperatura ambiente presentan un porcentaje de perdidas por calcinación intermedia, siendo el valor máximo determinado 1,36 y el valor mínimo 1,11.



En el caso de las muestras fueron afectas por tratamiento térmico secuencial muestran los resultados con el menor porcentaje de perdidas por calcinación, siendo el superior para este tipo de tratamiento térmico 0,87 y el valor inferior 0,58.

Según la importante data obtenida de la experimentación podemos afirmar que mientras más violento es el cambio de temperatura de enfriamiento post calcinación, mayor es el contenido de perdidas por calcinación en el óxido de calcio resultante.

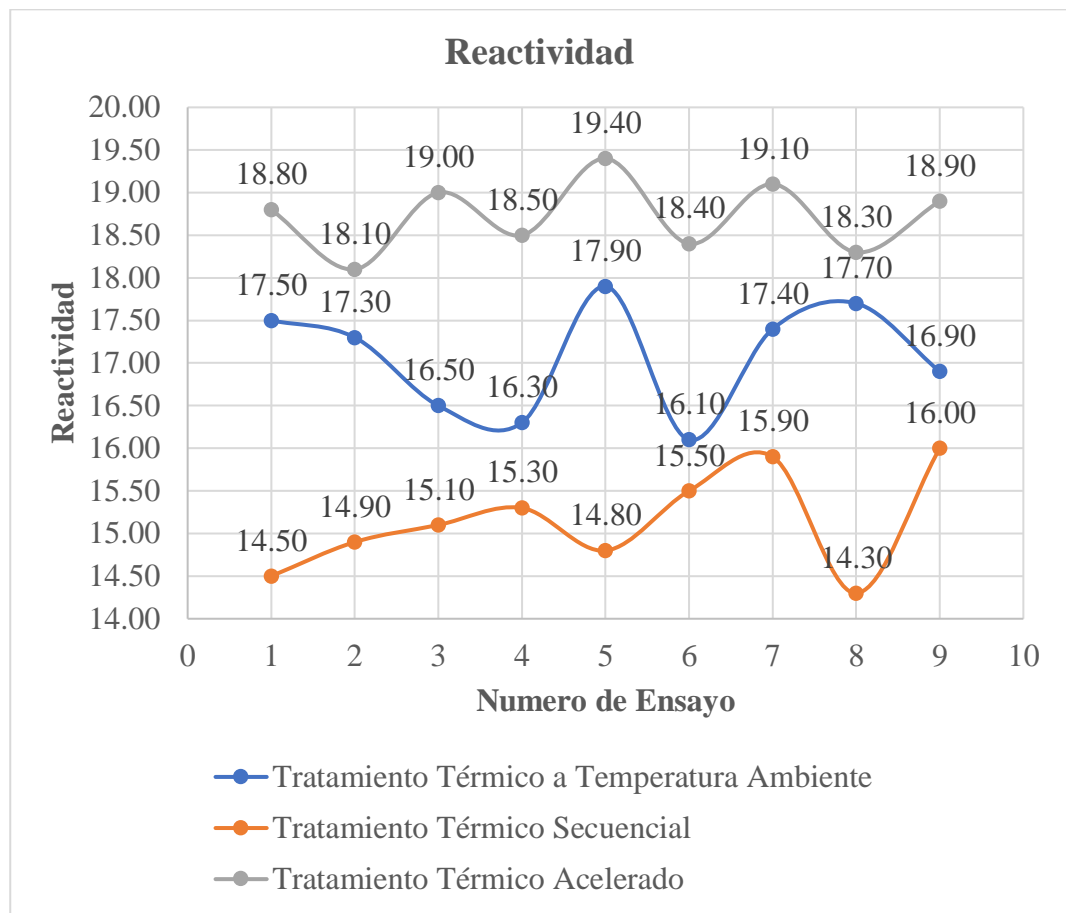
La característica de pérdidas por calcinación nos indica el porcentaje crudo de caliza queda contenido en la muestra, por lo que se puede definir que el tratamiento térmico que concede el mejor valor para la característica de perdidas por calcinación, es el tratamiento térmico secuencial.

4.3.2 Incidencia de los tratamientos térmicos de enfriamiento en la reactividad

A continuación, en la figura 23 mediante un gráfico de dispersión presentamos los valores de la tabla 9 para la característica de reactividad del óxido de calcio.

Figura 23

Resultados de determinación de reactividad.



Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con los resultados representados en la figura 23, obtuvimos los valores más altos en reactividad en las muestras que fueron sometidas al tratamiento térmico acelerado, siendo el valor máximo detectado de 19,40 °C y el valor mínimo de 18,10 °C.

Para las muestras sometidas al tratamiento térmico a temperatura ambiente conseguimos resultados de reactividad intermedios, como valor más elevado alcanzado tenemos 17,90 °C y el inferior de 16,10 °C.



Para las muestras supeditadas por el tratamiento térmico secuencial los valores resultantes en el indicador de reactividad fueron los inferiores de la experimentación, siendo el mayor para este caso de 16 °C y el menor de 14,30 °C.

La característica de reactividad representa la velocidad de reacción del óxido de calcio al contacto con el agua para la preparación de lechada, por lo mismo a mayor reactividad es más eficiente para la regulación de PH en las diversas industrias de su aplicación.

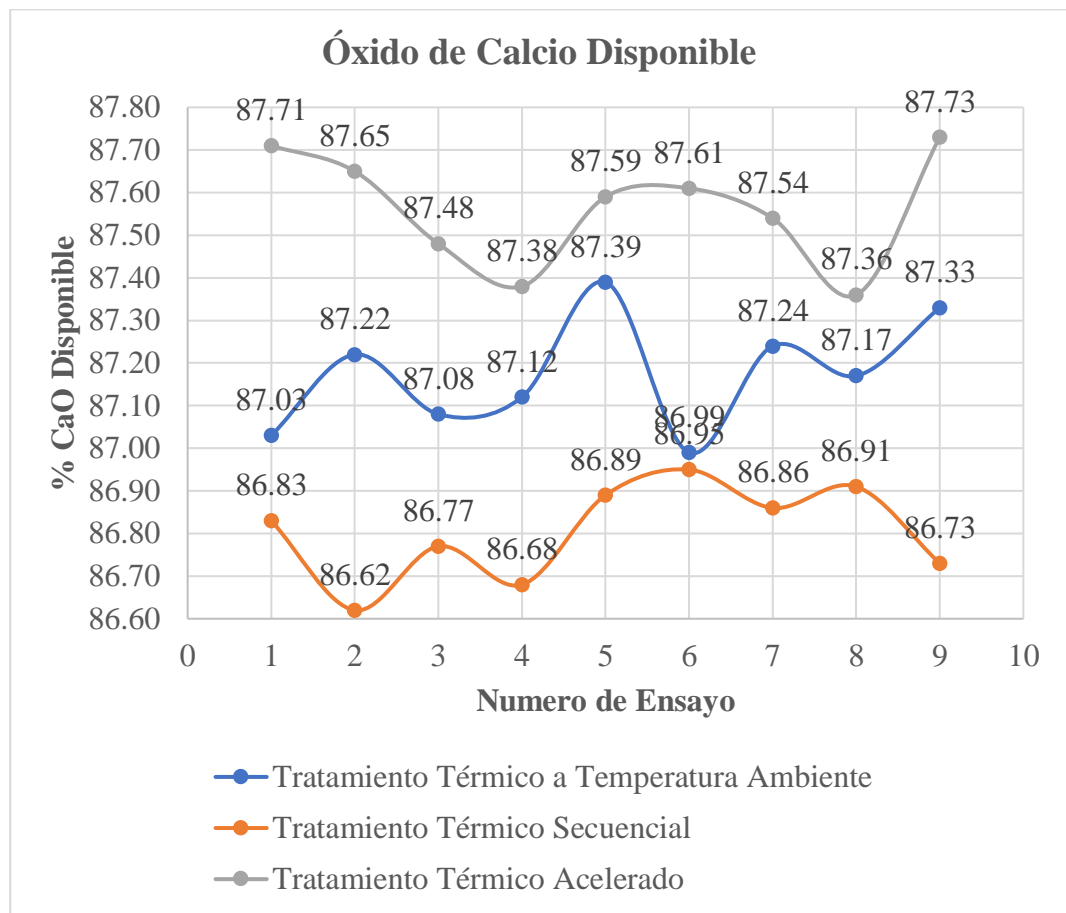
Conforme los resultados alcanzados para este indicador, podemos afirmar que el tratamiento térmico que nos concede la reactividad más óptima en el óxido de calcio es el tratamiento térmico acelerado.

4.3.3 Incidencia de los tratamientos térmicos de enfriamiento en el óxido de calcio disponible

En la figura 24 exponemos por medio de un gráfico de dispersión los resultados adquiridos de determinación de óxido de calcio disponible de las 27 muestras ensayadas para los tipos de tratamientos térmicos aplicados.

Figura 24

Resultados de determinación de óxido de calcio disponible.



Fuente: Elaboración propia.

Los valores superiores de este indicador fueron impuestos por el tratamiento térmico acelerado, resultando como el valor superior encontrado 87,73 % y el dígito inferior de 87,36 %.

Para el tratamiento térmico a temperatura ambiente obtuvimos dígitos intermedios, resultando el mayor dígito de 87,39% y el menor de 86,99 %.

En el caso del tratamiento térmico secuencial los valores resultantes fueron los más bajos detectados, como mayor cifra de este caso tenemos 86,95% y menor de 86,62%.



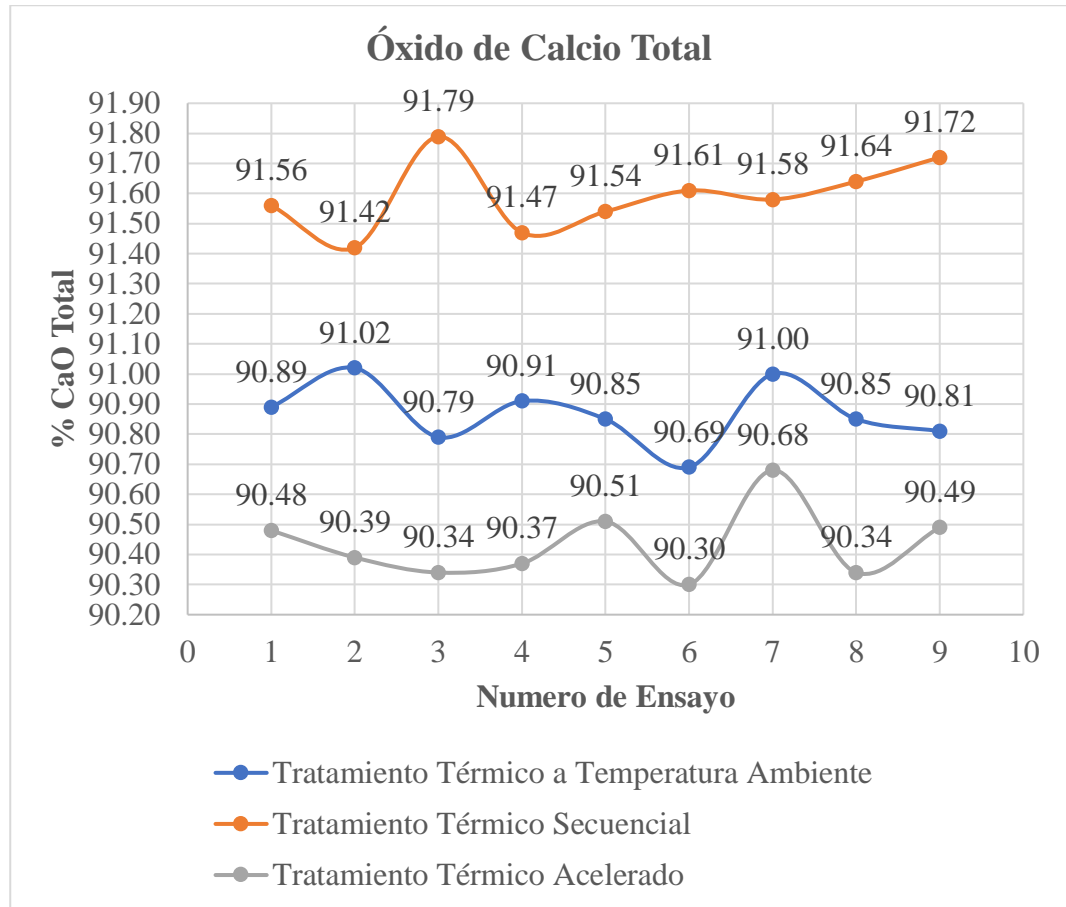
Mencionar que la característica de óxido de calcio disponible representa la pureza del producto final, siendo el indicador más importante y en consecuencia el más influyente para la comercialización del óxido de calcio.

En repercusión de los resultados obtenidos de la experimentación para la característica de óxido de calcio disponible, podemos manifestar que el tratamiento térmico que nos permite resultados inmejorables, es el tratamiento térmico acelerado.

4.3.4 Incidencia de los tratamientos térmicos de enfriamiento en el óxido de calcio total.

Figura 25

Resultados de determinación de óxido de calcio total.



Fuente: Elaboración propia.

En la figura 25 podemos denotar que el mayor contenido de óxido de calcio total nos los brinda el tratamiento térmico secuencial debido al mayor tiempo de exposición al calor que existe en este tipo de tratamiento térmico.

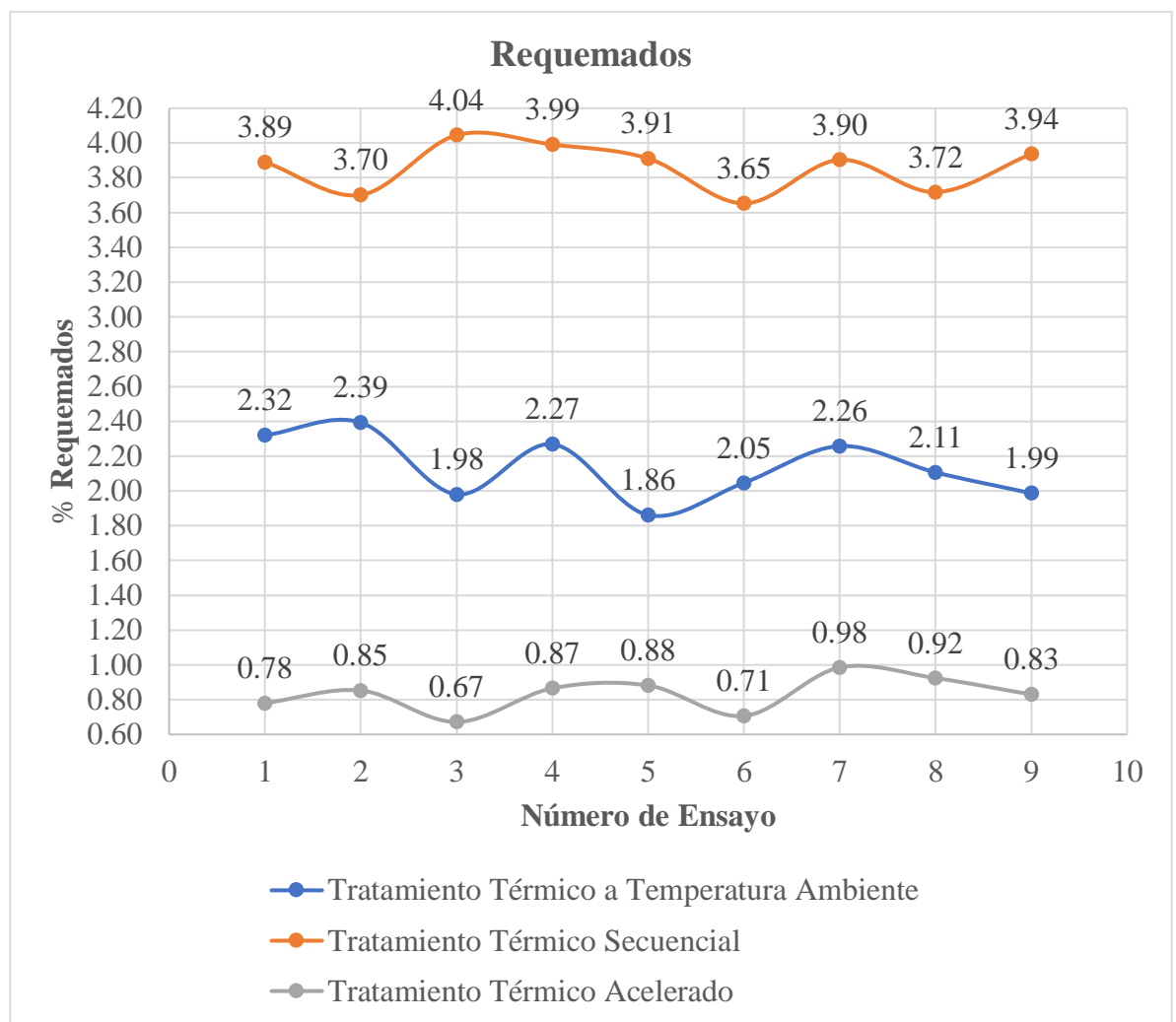
Por lo mismo, del tratamiento térmico de enfriamiento acelerado resultan los valores inferiores para esta característica

Por lo que podemos definir que el tratamiento térmico que nos brinda los mejores valores para esta característica es el tratamiento térmico de enfriamiento secuencial.

4.3.5 Incidencia de los tratamientos térmicos de enfriamiento en el contenido de requemados

Figura 26

Resultados de determinación de contenido de requemados.



Fuente: Elaboración propia.

En la figura 26 se puede observar que el contenido de requemados es más representativo en las muestras que fueron sometidas al tratamiento térmico



secuencial por lo que podemos afirmar que mientras más exposición al calor existe el contenido de quemados se eleva, la cifra superior alcanzada para esta característica fue 4,04.

Caso contrario fue el que ocurrió en el tratamiento térmico de enfriamiento acelerado que debido a la rápida acción de enfriamiento que tuvo, el contenido de quemados se redujo siendo el valor más óptimo encontrado 0,67.

Por lo tanto, podemos concluir que el tratamiento térmico que nos brinda el mejor valor para la característica de contenido de quemados es el tratamiento térmico de enfriamiento acelerado.

Una vez concluida la experimentación pudimos dar respuesta a la pregunta general de la investigación: ¿Cuál será la incidencia de los tratamientos térmicos post calcinación en las características del óxido de calcio obtenido a nivel laboratorio en la empresa Calquipa S.A.C. y cual influye positivamente?

Desglosando según las distintas características evaluadas podemos hacer referencia que, en la característica de pérdidas por calcinación que nos indica el porcentaje de CaCO_3 contenido en la muestra. El tratamiento térmico que nos permite los valores más óptimos es el tratamiento térmico de enfriamiento secuencial debido a que, al estar en mayor tiempo en contacto con el calor, pudo terminar de calcinar la parte céntrica de la caliza. Caso contrario ocurre en el tratamiento térmico de enfriamiento acelerado ya que al inducir al enfriamiento más brusco no termina de calcinar las partes más céntricas de la caliza.

Para el caso de la reactividad que lleva relación directa con la característica de contenido de quemados se puede notar que debido a la sobre exposición al calor que se dio en la superficie de la caliza en el tratamiento térmico de



enfriamiento secuencial la reactividad se ve drásticamente afectada así mismo el contenido de requemados aumenta, retardando el tiempo de reacción del óxido de calcio con el agua. En estas características de reactividad y contenido de requemados el tratamiento térmico de enfriamiento acelerado nos proporcionó los mejores valores.

En tanto para el porcentaje de óxido de calcio disponible el tratamiento térmico de enfriamiento acelerado nos permite los valores más óptimos debido a que alcanza un equilibrio sostenible entre su contenido de perdidas por calcinación y el contenido de requemados.

Para la característica de óxido de calcio total obtenemos que el tratamiento térmico de enfriamiento secuencial nos da los mayores contenidos de óxido de calcio total, más aún debido al mayor porcentaje de contenido de requemados se rompe el equilibrio necesario para obtener un óxido de calcio de alta calidad.

Es así que podemos definir que el tipo de tratamiento térmico que nos permite lograr las mejores características en el óxido de calcio obtenidas a nivel laboratorio en la empresa Calquipa S.A.C. es el tratamiento de enfriamiento acelerado.



V. CONCLUSIONES

PRIMERA: Se concluye que el tipo de tratamiento térmico de enfriamiento a temperatura ambiente influye positivamente parcialmente en las características del óxido de calcio en la empresa Calquipa SAC. A continuación, los valores más óptimos alcanzados para cada característica evaluada:

Perdidas por calcinación: 1,11%

Reactividad: 17,90 °C

Oxido de calcio disponible: 87,39%

Oxido de calcio total: 91,02%

Requemados: 1,86%

SEGUNDA: Se concluye que el tipo de tratamiento térmico de enfriamiento secuencial no influye positivamente en las características del óxido de calcio en la empresa Calquipa SAC., a continuación, los valores más óptimos para cada característica en estudio alcanzados:

Perdidas por calcinación: 0,63%

Reactividad: 16 °C

Oxido de calcio disponible: 86,95%

Oxido de calcio total: 91,79%

Requemados: 3,65%



TERCERA: Podemos afirmar que el tipo de tratamiento térmico de enfriamiento acelerado influye positivamente en las características del óxido de calcio debido al equilibrio que debe existir entre estas, concediendo óxido de mejores características, por tanto, el óxido de calcio de mejor calidad y rendimiento. Seguidamente mencionaremos los valores más beneficiosos para cada característica logrados.

Perdidas por calcinación: 1,49 %

Reactividad: 19,40 °C

Oxido de calcio disponible: 87,73%

Oxido de calcio total: 90,68%

Requemados: 0,67%



VI. RECOMENDACIONES

PRIMERA: Instar a la realización de las mismas pruebas utilizando la configuración granulométrica de la caliza utilizada en escala real por el Horno Maerz durante la producción del óxido de calcio en la empresa Calquipa S.A.C.

SEGUNDA: Se recomienda controlar la etapa de enfriamiento post calcinación durante la producción del óxido de calcio sin restarle importancia a los flujos de presión que se deben mantener para la correcta operación del Horno Maerz.



VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Duran J. & Mendoza F. (2017). Influencia de la sílice en el proceso de calcinación para reducir el contenido de quemado en el óxido de calcio. Universidad Nacional de San Agustín. Perú, Arequipa.

Coloma G. (2008). La Cal ¡Es un Reactivo! 1° edición. Chile

Hernández, V. & Arenas, A. & Cárcamo, H. & Conejeros, V. & Coloma G. (1995). La Cal en la Metalurgia Extractiva, 1° edición: Universidad Católica del Norte. Chile, Antofagasta

Alfaro L. (2011). La Caliza. Universidad de Guayaquil. Ecuador, Guayaquil.

Gonzales S. & Ticona K. (2016). Evaluación de la influencia de la granulometría de piedra caliza, concentración de carbonato de calcio, tiempo de residencia y temperatura de calcinación para mejorar el rendimiento en la obtención de óxido de calcio (cal viva). Universidad Nacional de San Agustín. Perú, Arequipa.

Grupo Calidra Química Natural (Sin año). Manual de competencias de calcinación. México.

Campos M. & Limón J. & Rangel J. & Fernades R. (2015). Manual de estudio usos de la cal. Grupo Calidra Química Natural. México.

Grupo Calidra Química Natural (Sin año). Manual de calcinación. Capítulo I, II y III. México.

National Lime Association (1976). Chemical Lime Facts, Bulletin 214,131. 4a ed., Washington D.C. - USA.



- Cengel Y. (1996) Termodinámica. Tomo II. 2° edición. México
- Montaluisa E. & Tipan H. (2008). Diseño de un horno para la producción de cal viva y cal hidratada de 120 toneladas de producción diaria. Escuela Politécnica Nacional. Ecuador, Quito.
- Luna J. (2010). Minería Metálica y no Metálica en el Perú. Ministerio de Energía y Minas. Perú.
- Mohamad, H. (2002). Factores que Afectan La Calidad de La Cal Viva (CaO). Chile.
- Chuquilin E. & Intor G. (2018). Análisis económico para el inicio de producción de óxido de calcio en la concesión Juan de Dios I Cajamarca. Universidad Privada del Norte. Perú, Cajamarca.
- Vilca D. (2019). Estudio de la influencia de la pureza de la caliza, tamaño de partícula y temperatura para obtener oxido de calcio de alta reactividad mediante un diseño experimental 2k. Universidad Nacional de San Agustín. Perú , Arequipa.
- Quintana J. (2017). Mejoramiento de suelos de NAICM usando Oxido de Calcio. Universidad Nacional Autónoma de México. México, CDMX
- Azevedo, A. M., Silva, J. R., & Costa, L. (2015). Influence of calcination temperature on the properties of calcium oxide. *Journal of Industrial Chemistry*, 12(3), 234-245.
- Makar, J. M., Chen, T., & Yadav, K. (2019). Effects of post-calcination thermal treatments on calcium oxide properties. *Materials Science and Engineering*, 45(1), 102-110.



Nascimento, M. A., & Pinto, R. (2020). The role of thermal treatments in enhancing the properties of calcium oxide. *International Journal of Chemical Engineering*, 10(2), 56-67.

Rodríguez, F., López, H., & Valdés, C. (2021). Optimization of thermal processes in the production of calcium oxide. *Chemical Engineering Journal*, 15(5), 654-661.



ANEXOS

ANEXO 1: Ficha técnica de óxido de calcio de Calquipa S.A.C.



FICHA TÉCNICA DE PRODUCTO

NOMBRE COMERCIAL: Cal Viva

MARCA: OXID

FORMULA QUÍMICA: CaO

NOMBRE QUÍMICO: Oxido de Calcio



† CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS

- CaO Disponible / Útil	<=	85 %	ASTM C-25
- CaO Total	<=	90 %	ASTM C-25
- MgO	<	0.5 %	ASTM C-25
- PPC	<	3.0 %	LECO CS744
- SiO ₂	<	2.0 %	XRF
- Fe ₂ O ₃	<	0.5 %	XRF
- C	<	1.0 %	LECO CS744
- Azufre (S)	<	1.0 %	LECO CS744
- Flúor (F)	<	150 Ppm	

† CARACTERÍSTICAS FÍSICAS

- Reactividad (ΔT° 30 seg) Mínimo 15 °C ASTM C-110
- Granulometría típica para distribución

Nota: Puede adecuarse de acuerdo a especificación del cliente.

GRUESO		GRANULADO		PULVERIZADO	
MALLAS	RETENIDO	MALLAS	RETENIDO	MALLAS	RETENIDO
> 3"	< 10 %	> ½"	0 %	> #100	0 %
3" - 1"	50 - 60 %	½" - #100	50 - 60 %	> #200	< 17 %



< 1"	30 – 40 %	< #100	40 – 50 %		
------	-----------	--------	-----------	--	--

Nota: Los valores aquí reportados son valores típicos de nuestros productos, los cuales pueden variar.

✚ PRESENTACIÓN

- Big Bag 1.0 Tm y 1.5 Tm
- Saquillo de 25 kg
- Granel Bombona
- Granel Góndola
- Granel Encapsulado

CALQUIPA SAC

Planta: Parcialidad Urinsaya II Pampa de Fundición – Callalli – Caylloma – Arequipa
Oficinas y almacén: Av. Italia 105 Interior 5B 6B Zamacola – Cerro Colorado - Arequipa
Teléfono: 01 - 4080214 www.calquipa.com www.calidra.com

ANEXO 2: Hoja de datos de seguridad de óxido de calcio Calquipa S.A.C.

	HOJA DE DATOS DE SEGURIDAD DE MATERIALES HOJA RESUMEN	F2-SEG-PRO-003	
		Versión: 00	
		Página 1 de 2	
NOMBRE DEL PRODUCTO	Cal Viva	CÓDIGO	MP-001A

1.- IDENTIFICACIÓN DE LA SUSTANCIA

Familia química: óxido de tierras alcalinas. N°ONU: UN 1910 N°CAS: 1305-78-8 *Fabricante: CALQUIPA SAC, Av. Italia 105, Zamácola, Cerro Colorado, Arequipa. Tel.

+511 408 0214

2.- IDENTIFICACIÓN DE PELIGROS

*La exposición a la cal por las vías de inhalación, contacto con la piel, ojos o por ingestión causa severa irritación y quemaduras en toda el área de contacto. *La exposición aguda a corto plazo, causa irritación de los ojos, nariz, garganta y piel. *La exposición a largo plazo puede producir dermatitis, úlceras y perforaciones al tabique nasal.



3.- INFORMACIÓN SOBRE LOS COMPONENTES

*Fórmula Química: CaO. *Pureza = 80% - 85% (CaO)

3.- PRIMEROS AUXILIOS

*Contacto con la piel: Suave y cuidadosamente lave las superficies contaminadas para remover todos los residuos de cal. Consulte a su médico si el área expuesta es grande o si la irritación persiste.

*Contacto con los ojos: Inmediatamente enjuague ojos con agua tibia (solución Glucosada preferentemente) de 15 a 20 minutos. Consulte a su médico inmediatamente.

*Inhalación: Retire la fuente de polvo o lleve la víctima a tomar aire fresco. Consiga atención médica de inmediato, si la víctima no respira brinde respiración artificial. *Ingestión: Si la víctima está consciente dele 300ml de agua, seguido de vinagre diluido 1:2 o jugo de fruta para neutralizar lo alcalino. No induzca al vomito. Contacte un médico inmediatamente.

4.- MEDIDAS DE LUCHA CONTRA INCENDIOS

*Agentes de extinción: El producto no se inflama. Use el agente extintor adecuado para el fuego circundante.

*Procedimientos especiales: En lo posible use agentes extintores en polvo, no use agua porque reacciona con el producto, use neblina de agua para enfriar.

*Equipo de protección personal: Solo protección contra incendios (traje bombero o buzo encapsulado).



5.- MEDIDAS A ADOPTAR EN CASO DE VERTIDO ACCIDENTAL

*Medidas de emergencia: Aislar eliminar fuentes de ignición, represar recuperar el máximo de producto derramado.

*Equipo de protección personal: Use traje Tyvex desechable, guantes de nitrilo y protección fácil completa (full face).

*Precauciones medio ambiente: Evitar derrames en curso de agua superficial. *Métodos de limpieza: Recoger el material derramado y envasarlo en recipientes plásticos herméticos.

*Eliminación de desechos: El polvo residual de óxido de calcio se podrá neutralizar con una solución diluida de ácido clorhídrico para ajustar a pH 7.


6.- MANIPULACIÓN Y ALMACENAMIENTO

*Información general: Antes de trabajar con cal, el personal debe ser entrenado en la manipulación y el almacenamiento apropiados para esta sustancia.

*Manipuleo: Lavarse cuidadosamente luego de manipular. Evitar el contacto con la piel y la ropa. No ingerir o inhalar.

*Almacenamiento: Almacenar en recipientes bien cerrados, en un área fría, bien ventilada y lejos del AGUA y la HUMEDAD. La cal aumenta su volumen cuando entra en contacto con el agua y puede hacer explotar recipientes de almacenamiento. No almacenar o transportar en recipientes de aluminio.

7.- CONTROLES DE EXPOSICIÓN/PROTECCIÓN PERSONAL

	HOJA DE DATOS DE SEGURIDAD DE MATERIALES	F2-SEG-PRO-003
	HOJA RESUMEN	Versión: 00
		Página 2 de 2

*Ventilación: Aplicar la ventilación adecuada y mantener el polvo debajo del límite inferior permisible.

*Protección respiratoria: En operaciones usar respiradores aprobados. Respirador adecuado para partículas con filtro de alta eficiencia.

*Protección ocular: Antiparras con ventilación indirecta y con banda de exudación o asociada a la protección respiratoria.

*Ropa de protección: traje descartable tyvek.

*Guantes de protección: Preferentemente de cuero con caña larga. Alternativamente de neopreno o PVC.

*Prácticas de higiene: crema protectora aplicada al cuello, puño, tobillos, cintura y manos

9.- PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS



*Estado físico: sólido. *Ph: 12 a 15 *Densidad aparente: 0.98 g/ml

10.- ESTABILIDAD Y REACTIVIDAD

*Estabilidad: Estable en condiciones normales de uso y almacenamiento.

*Condiciones a evitar: Contacto con humedad y materiales ácidos.

*Incompatibilidad: Ácidos, agua, fluoruro, compuestos orgánicos, explosivos, pentóxido fosforoso.

*Productos descomposición: ninguno. *Polimerización peligrosa: no ocurre.

11.- INFORMACIÓN TOXICOLÓGICA

*TOXICIDAD A CORTO PLAZO: LD50 (oral, intraperitoneal). Ratones: 40 mg/Kg; Conejos: 500 mg/KG.

*TOXICIDAD A LARGO PLAZO: Dermatitis, úlceras, perforaciones al tabique nasal. *EFECTOS LOCALES O SISTÉMICOS: Bronquitis, neumonía, quemaduras, irritación severa.

*SENSIBILIZACIÓN ALÉRGICA: No aplica.

*OTRA INFORMACIÓN: Se conoce de casos de dermatitis recurrentes que han ocasionado incapacidad permanente.

12.- INFORMACIÓN ECOLÓGICA

*PERSISTENCIA / DEGRADABILIDAD: La cal viva al hidratarse se convierte en Hidróxido de Calcio el cual reacciona lentamente con el CO₂ del ambiente convirtiéndose en Carbonato de Calcio que es un material no peligroso presente en la naturaleza.

13.- CONSIDERACIONES SOBRE LA ELIMINACIÓN

*El material residual después de neutralizarlo con ácido débil y envasarlo en contenedores plásticos puede depositarse en vertederos autorizados.

14.- INFORMACIONES RELATIVAS AL TRANSPORTE

*Por carretera transportar en bombonas encapsuladas, en caso de transportar envasado deberá ser en camiones con baranda y carpa.

15.- INFORMACIONES REGLAMENTARIAS (ENVASADO Y ETIQUETADO)

*Los requerimientos regulatorios están sujetos a cambios y podrían diferir de una localidad a otra.

Es responsabilidad del comprador asegurar que sus actividades cumplan con las leyes locales, regionales y del país donde opere.

16.- OTRAS INFORMACIONES



*Los datos consignados en esta Hoja Informativa fueron obtenidos de fuentes confiables. Las opiniones expresadas en este formulario son las de profesionales capacitados. La información consignada es la conocida actualmente sobre la materia.

ANEXO 3: ASTM C25-19: Métodos de prueba estándar para análisis químico de piedra caliza, cal viva y cal hidratada.

Este estándar internacional fue desarrollado de acuerdo con principios reconocidos internacionalmente sobre estandarización establecidos en la Decisión sobre Principios para el Desarrollo de Estándares, Guías y Recomendaciones Internacionales emitida por el Comité de Obstáculos Técnicos al Comercio (TBT) de la Organización Mundial del Comercio.



Designación: C25 – 19

Métodos de prueba estándar para: Análisis químico de piedra caliza, cal viva y cal hidratada¹

Esta norma se emite bajo la designación fija C25; el número que sigue inmediatamente a la designación indica el año de adopción original o, en el caso de revisión, el año de la última revisión. Un número entre paréntesis indica el año de la última re-aprobación. Un apéndice (i) en superíndice indica un cambio editorial desde la última revisión o reaprobación.

Este estándar ha sido aprobado para su uso por agencias del Departamento de Defensa de los Estados Unidos.

1.2 Alcance

1.1 Estos métodos de prueba cubren el análisis químico de caliza dolomítica y con alto contenido de calcio, cal viva y cal hidratada. Estos métodos de prueba se clasifican como estándar (preferido) o alternativo (opcional).

1.2 Los métodos de prueba estándar son aquellos que emplean procedimientos analíticos gravimétricos o volumétricos clásicos y, por lo general, son los requeridos para análisis de referencia donde los requisitos de especificación química son una parte esencial del acuerdo contractual entre el comprador y el vendedor.

1.3 Se proporcionan métodos de prueba alternativos u opcionales para aquellos que deseen utilizar procedimientos más cortos o más convenientes que los métodos estándar para las determinaciones de rutina de ciertos constituyentes. Los métodos de prueba opcionales a veces pueden preferirse a los métodos de prueba estándar, pero con frecuencia se indica el uso de instrumentación moderna y costosa que puede no ser accesible para todos. Por lo tanto, el uso de estos métodos de prueba debe dejarse a discreción de cada laboratorio.

1.4 Los procedimientos analíticos aparecen en el siguiente orden:

	Section
Oxido de Aluminio	15
Índices de cal disponible	28
Oxido de Calcio y Magnesio:	
Método alternativo de titulación con EDTA	31
Carbonato de Calcio Equivalente	33
Oxido de Calcio:	
Método Gravimétrico	16
Método Volumétrico	17
Dióxido de Carbono por Método Estándar	22
Oxidos combinados de hierro y aluminio	12
Hierro Ferroso	Apéndice X5
Oxido de Calcio Libre	Apéndice X6
Humedad Libre en Cal Hidratada	21
Humedad Libre en la caliza	20
Silicio Libre	29
Material Insoluble Incluyendo Dióxido de Silicio:	
Método estándar	8
Método opcional usando Acido Perclórico	9

Material Insoluble excluyendo el dióxido de silicio	11	19
Pérdida por Ignición		18
Oxido de Magnesio		
Manganeso:		Appendix X4
Bismuthate Method		27
Periodate (Photometric) Method		34
Determinación del pH de soluciones alcalinotérricas		
Fósforo:		Appendix X3
Titrimetric Method		26
Molybdovanadate Method		10
Dióxido de Silicio		Appendix X2
Oxido de Estroncio		23
Tríóxido de Azufre		
Carbon Total:		32
Direct Combustion-Thermal Conductivity Cell Method		
Carbono y azufre Totales:		35
Combustion /Infrared Detection Method		
Hierro Total:		13
Standard Method, Potassium Dichromate Titration		
Potassium Permanganate Titration Method		Apéndice X1
Ortho-Phenanthroline, Photometric Method		14
Azufre Total:		24
Fusión con Carbonato de Sodio		25
Método de titulación por combustión del yodato		30
Óxidos no Hidratados		

1.5 Esta norma no pretende abordar todos los problemas de seguridad, si los hubiere, asociados con su uso. Es responsabilidad del usuario de esta norma establecer prácticas apropiadas de seguridad, salud y medio ambiente y determinar la aplicabilidad de las limitaciones reglamentarias antes de su uso. Para declaraciones de precaución específicas, consulte 9.3, 10.2.1, 18.4.3, 31.6.4.2, X2.3.1 y X5.4.1.1.

1.6 Esta norma internacional fue desarrollada de acuerdo con principios reconocidos internacionalmente sobre normalización establecidos en la Decisión sobre Principios para el Desarrollo de Normas, Guías y Recomendaciones Internacionales emitida por el Comité de Obstáculos Técnicos al Comercio (OTC) de la Organización Mundial del Comercio.

2.2 Documentos de Referencia:

2.1 Estándares ASTM:²

¹ Estos métodos de prueba están bajo la jurisdicción del Comité C07 de ASTM sobre cal y piedra caliza y son responsabilidad directa del Subcomité C07.05 sobre Pruebas químicas.

Edición actual aprobada el 1 de mayo de 2019. Publicado en julio de 2019. Aprobado originalmente en 1919. Última edición anterior aprobada en 2017 como C25-17. DOI: 10.1520/C0025-19.

² Para consultar las normas de ASTM, visite el sitio web de ASTM, www.astm.org, o comuníquese con el Servicio al cliente de ASTM en service@astm.org. Para obtener información sobre el volumen del Libro anual de normas de ASTM, consulte la página Resumen de documentos de la norma en el sitio web de ASTM.

ANEXO 4: ASTM C110-09: Métodos de prueba estándar para Prueba física de cal viva, cal hidratada, y la piedra caliza.



Designación: C 110 - 09

Métodos de prueba estándar para Prueba física de cal viva, cal hidratada, y la piedra caliza

Esta norma ha sido publicada bajo la designación fijada C 110; el número inmediatamente después de la designación indica el año de adopción original o, en el caso de revisión, el año de la última revisión. Un número entre paréntesis indica el año de la última aprobación. A espaldas superíndice (*) indica un cambio editorial desde la última revisión o re-aprobación.

Esta norma ha sido aprobada para su uso por agencias del Departamento de Defensa.

1 Alcance*

1.1 Estos métodos de ensayo cubren las pruebas físicas de cal viva y cal hidratada, y de piedra caliza que no están cubiertos en las normas ASTM.

Los métodos de ensayo para cal viva y cal hidratada tienen una alta sensibilidad por la humedad y el dióxido de carbono. Se debe tener precaución para proteger tanto la hidratada y cal viva durante el muestreo, el almacenamiento, y los ensayos (véase la norma C 90).

1.2 Los procedimientos de ensayo aparecen en el siguiente orden:

	Sección
El secado de aire	6
La densidad aparente de cal hidratada, Pulverizado Cal y piedra caliza	20
Densidad aparente de tipo de cal hidratada, Pulverizado Cal y piedra caliza	21
Exposición Automata de cal hidratada	9
Grillo en seco de piedra caliza pulverizada	12
La absorción de agua por el agua	18
Pulverizado fuera de cal viva y cal hidratada por el Permeabilidad	15
Molécula de piedra caliza	13
Tamaño de las partículas de piedra caliza pulverizada	17
Pruebas de muestra de cal	6
Humedad residual y plásticos de cal hidratada	10
Humedad y análisis granulométrico	15
La tasa de endurecimiento de cal hidratada	14
Apagado Tasa de cal viva	11
Gravedad específica de los productos de cal hidratada	22
Estándar La consistencia de muestra de cal	8
La intensidad de agua de cal hidratada	7
Met Análisis Sieve de Aglutinos materiales de ensalado	19

1.3 Los valores indicados en unidades SI deben ser considerados como estándar. Los valores dados en paréntesis son conversiones matemáticas a unidades pulgada-libra que se proporcionan sólo con información y no se consideran estándar.

1.4 Esta norma no pretende considerar todos los problemas de seguridad, si los hay, asociados con su uso. Es responsabilidad del usuario de esta norma establecer procedimientos apropiados.

Los procedimientos de ensayo están bajo la jurisdicción del Comité ASTM C07 sobre Cal y son responsabilidad directa del Subcomité C07.05 sobre Pruebas físicas.
Edición actual aprobada el 1 de marzo de 2009. Publicado en marzo de 2009; aprobado originalmente en 1934.
Última edición anterior aprobada en 2006 como C 110-06a.
* En los ensayos de la piedra caliza como agregado, véase Vol 04.02 de la Annual Book of ASTM Standards. En los ensayos de la piedra caliza como piedra de construcción, véase Vol 04.05 de la Annual Book of ASTM Standards.

prácticas de seguridad y salud de Private y determinar la aplicabilidad de las limitaciones reglamentarias antes de su uso.

2 Documentos de referencia

2.1 Normas ASTM:

- C 28 / 28M C Especificación para el yeso Enlucidos
- C 50 Metodología para el muestreo, preparación de muestras, Packaging, y Marcado de cal y piedra caliza Productos
- C 51 Terminología relacionada con la cal y piedra caliza (como el usado por la industria)
- C 91 Especificación para Cemento Albañilería
- C 109 / C 109M Método de prueba para resistencia a compresión del cemento hidráulico Morteros (Usando 2-in. O [50-mm] Cubo especímenes)
- C 135 Método de prueba para análisis granulométrico de los áridos finos y gruesos
- C 150 Especificación para el cemento Portland
- C 185 Método de prueba para aire contenido del hidráulico mortero de cemento
- C 188 Método de prueba para determinar la densidad del cemento hidráulico
- C 192 / C 192M Prácticas para elaborar y curar especímenes de concreto en el Laboratorio
- C 204 Métodos de prueba para Finura de cemento hidráulico por permeabilidad al aire Aparato
- C 207 Especificación de cal hidratada para Propósitos de mampostería
- C 230 / C 230M Especificación de la tabla de flujo para uso en pruebas de cemento hidráulico
- C 231 Método de prueba para aire contenido del recién Concreto Mezclado por el Método de Presión
- C 305 La práctica de mezclado mecánica de pastas de cemento hidráulico y morteros de consistencia plástica
- C 430 Método de prueba para Finura de cemento hidráulico por el 45 mm (No. 325) Sieve
- C 472 Métodos de prueba para las pruebas físicas de yeso, yeso yesos y hormigón de yeso

Para obtener más información, visite el sitio web de ASTM, www.astm.org, o el contacto de cliente en ASTM.service@astm.org por Annual Book of ASTM Standards información de volumen, consulte la página Resumen de documentos de la serie en el sitio web de ASTM.

* Un resumen de los cambios de sección aparece al final de esta norma.

Copyright © ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19380-2900, Estados Unidos



Declaración jurada de autenticidad



Universidad Nacional
del Altiplano Puno



VRI
Vicerrectorado
de Investigación



Repositorio
Institucional

DECLARACIÓN JURADA DE AUTENTICIDAD DE TESIS

Por el presente documento, Yo RICHARD SANTIAGO SARHUENTO VALDIVIA
, identificado con DNI 70000350 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional, Programa de Segunda Especialidad, Programa de Maestría o Doctorado

INGENIERIA METALURGICA
, informo que he elaborado el/la Tesis o Trabajo de Investigación para la obtención de Grado
 Título Profesional denominado:

"EVALUACIÓN DE LOS TRATAMIENTOS TERMICOS DE ENFRIAMIENTO Y SU
INCIDENCIA EN LAS CARACTERISTICAS DEL OXIDO DE CALCIO EN LA EMPRESA CALQUIPA SAC."
"Es un tema original. DISTRITO CALLALI, REGION AREQUIPA."

Declaro que el presente trabajo de tesis es elaborado por mi persona y **no existe plagio/copia** de ninguna naturaleza, en especial de otro documento de investigación (tesis, revista, texto, congreso, o similar) presentado por persona natural o jurídica alguna ante instituciones académicas, profesionales, de investigación o similares, en el país o en el extranjero.

Dejo constancia que las citas de otros autores han sido debidamente identificadas en el trabajo de investigación, por lo que no asumiré como tuyas las opiniones vertidas por terceros, ya sea de fuentes encontradas en medios escritos, digitales o Internet.

Asimismo, ratifico que soy plenamente consciente de todo el contenido de la tesis y asumo la responsabilidad de cualquier error u omisión en el documento, así como de las connotaciones éticas y legales involucradas.

En caso de incumplimiento de esta declaración, me someto a las disposiciones legales vigentes y a las sanciones correspondientes de igual forma me someto a las sanciones establecidas en las Directivas y otras normas internas, así como las que me alcancen del Código Civil y Normas Legales conexas por el incumplimiento del presente compromiso

Puno 07 de NOVIEMBRE del 2024


FIRMA (obligatoria)



Huella



Autorización de depósito de tesis



Universidad Nacional
del Altiplano Puno



Vicerrectorado
de Investigación



Repositorio
Institucional

AUTORIZACIÓN PARA EL DEPÓSITO DE TESIS O TRABAJO DE INVESTIGACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Por el presente documento, Yo RICHARD SANTIAGO SARTUENTO VALDIVIA
, identificado con DNI 70000350 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional, Programa de Segunda Especialidad, Programa de Maestría o Doctorado

INGENIERIA METALURGICA

, informo que he elaborado el/la Tesis o Trabajo de Investigación para la obtención de Grado Título Profesional denominado:

"EVALUACIÓN DE LOS TRATAMIENTOS TÉRMICOS DE ENFRIAMIENTO Y SU INCIDENCIA EN LAS CARACTERÍSTICAS DEL ÓXIDO DE CALCIO EN LA EMPRESA CALQUIA SAC. DISTRITO CALLALI, REGIÓN AREQUIPA"

" Por medio del presente documento, afirmo y garantizo ser el legítimo, único y exclusivo titular de todos los derechos de propiedad intelectual sobre los documentos arriba mencionados, las obras, los contenidos, los productos y/o las creaciones en general (en adelante, los "Contenidos") que serán incluidos en el repositorio institucional de la Universidad Nacional del Altiplano de Puno.

También, doy seguridad de que los contenidos entregados se encuentran libres de toda contraseña, restricción o medida tecnológica de protección, con la finalidad de permitir que se puedan leer, descargar, reproducir, distribuir, imprimir, buscar y enlazar los textos completos, sin limitación alguna.

Autorizo a la Universidad Nacional del Altiplano de Puno a publicar los Contenidos en el Repositorio Institucional y, en consecuencia, en el Repositorio Nacional Digital de Ciencia, Tecnología e Innovación de Acceso Abierto, sobre la base de lo establecido en la Ley N° 30035, sus normas reglamentarias, modificatorias, sustitutorias y conexas, y de acuerdo con las políticas de acceso abierto que la Universidad aplique en relación con sus Repositorios Institucionales. Autorizo expresamente toda consulta y uso de los Contenidos, por parte de cualquier persona, por el tiempo de duración de los derechos patrimoniales de autor y derechos conexos, a título gratuito y a nivel mundial.

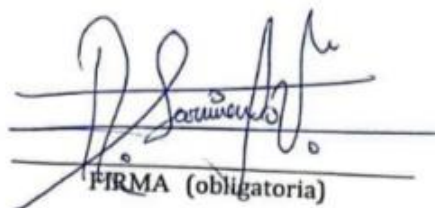
En consecuencia, la Universidad tendrá la posibilidad de divulgar y difundir los Contenidos, de manera total o parcial, sin limitación alguna y sin derecho a pago de contraprestación, remuneración ni regalía alguna a favor mío; en los medios, canales y plataformas que la Universidad y/o el Estado de la República del Perú determinen, a nivel mundial, sin restricción geográfica alguna y de manera indefinida, pudiendo crear y/o extraer los metadatos sobre los Contenidos, e incluir los Contenidos en los índices y buscadores que estimen necesarios para promover su difusión.

Autorizo que los Contenidos sean puestos a disposición del público a través de la siguiente licencia:

Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional. Para ver una copia de esta licencia, visita: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

En señal de conformidad, suscribo el presente documento.

Puno 07 de NOVIEMBRE del 2024


FIRMA (obligatoria)



Huella