

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA JUAN MISAEL SARACHO

FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA

CARRERA DE INGENIERÍA QUÍMICA



**OBTENCIÓN DE ÓXIDO DE CALCIO POR CALCINACION DE PIEDRA
CALIZA A ESCALA LABORATORIO**

POR:

EVELIN GABRIELA ABAN VILCA

Modalidad de graduación (Proyecto de Grado: Investigación aplicada)
presentado a consideración de la “UNIVERSIDAD AUTÓNOMA JUAN
MISAEL SARACHO”, como requisito para optar el grado académico de
Licenciatura en Ingeniería Química.

OCTUBRE DE 2025

TARIJA-BOLIVIA

VºBº

M.Sc. Ing. Marcelo Segovia Cortez
DECANO FACULTAD DE
CIENCIAS Y TECNOLOGIA

M.Sc. Ing. Fernando Cortes
VICEDECANO FACULTAD DE
CIENCIAS Y TECNOLOGIA

M.Sc. Ing. Rene Emilio Michel Cortes
DIRECTOR DE CARRERA DE INGENIERIA QUIMICA

APROBADA POR:

TRIBUNAL:

M.Sc. ING. IGNACIO VELASQUEZ SOZA

M.Sc. ING. ERNESTO CAIHURA ALEJANDRO

ING. GUSTAVO MORENO LOPEZ

ADVERTENCIA

El tribunal calificador del presente trabajo, no se solidariza con la forma, términos, modos y expresiones vertidas en el mismo, siendo estas responsabilidad de la autora.

DEDICATORIA

A Dios, por ser mi guía constante, por darme la fortaleza y sabiduría necesarias para culminar esta etapa.

A mi querido hijo Benjamín por ser mi mayor motivación para seguir adelante y superarme cada día.

A mi madre Margarita por siempre motivarme a concluir mis sueños y por enseñarme el valor del esfuerzo.

A mi querida abuelita Verónica Castrillo que siempre me cuido, que me enseñó humildad y gratitud, que creyó en mí y ahora me acompaña desde el cielo como mi guía y mi inspiración eterna.

A mi esposo Fernando por el cariño y la paciencia en cada paso de este camino.

A mi hermana Magali por siempre escucharme

AGRADECIMIENTOS

A Dios por su infinita bondad y amor que me guio en cada etapa para poder concluir esta meta.

A mi madre por todo el sacrificio que hizo para sacarme adelante porque gracias a su esfuerzo y amor estoy donde estoy.

A mi familia por siempre motivarme a concluir mis sueños, por transmitirme buenas enseñanzas, ser inspiración para salir adelante y nunca rendirme.

A mis docentes y a mis amigos que conocí en la carrera que me transmitieron con cariño conocimientos y habilidades que me ayudaron a alcanzar esta meta.

A la empresa SOBOCE , al laboratorio CEANID, por abrirme sus puertas y brindarme apoyo en este proyecto.

FRASE

“Lo que Dios tiene destinado para ti, ni la envidia lo para, ni el destino lo aborta, ni la suerte lo cambia”

Fátima Bosch

INDICE

ADVERTENCIA.....	i
DEDICATORIA.....	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
FRASE	iv
RESUMEN.....	v

INTRODUCCIÓN

ANTECEDENTES	1
OBJETIVOS.....	6
JUSTIFICACIÓN.....	6

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO

1.MARCO TEÓRICO	8
1.1. Piedra Caliza.....	8
1.1.2. Composición química de la piedra caliza	9
1.1.3. Clasificación de piedra caliza.....	10
1.1.4. Características de la piedra Caliza	11
1.1.5. Usos de la piedra caliza.....	13
1.2. Óxido de calcio (Cal).....	13
1.2.1. Introducción.....	13
1.3. Propiedades del óxido de calcio	14
1.3.1. Propiedades Físicas.....	14
1.3.2. Propiedades químicas	15
1.4. Tipos de Cal.....	17

1.5. Usos de la cal.....	19
1.6. Calcinación	21
1.6.1. Temperatura de disociación	21
1.6.2. Precalentamiento y Tasa de calentamiento.....	23
1.6.4. Pérdida por peso	24
1.7. Etapas Fisicoquímicas del Proceso de calcinación	24
1.8. Cinética de la reacción de la calcinación.....	26
1.9. Especificaciones del producto óxido de calcio	26
1.9.1 Óxido de calcio disponible.....	26
1.9.2. Porcentaje de pérdidas por calcinación (%PPC).....	27
1.9.3. Velocidad de apagado de la cal	27

CAPÍTULO II

PARTE EXPERIMENTAL

2. PARTE EXPERIMENTAL	28
2.1. Materia prima para la obtención de óxido de calcio	28
2.2. Selección del método de obtención experimental del óxido de calcio	28
2.3. Diseño Experimental.....	32
2.3.1. Variables dependientes	32
2.3.2. Variables independientes	32
2.3.3. Selección de las variables para el proceso de obtención de óxido de calcio	32
2.4. Diseño Factorial.....	35
2.4.1. Especificación de las variables del diseño factorial.....	38
2.5. Descripción del método experimental para la obtención de óxido de calcio	39
2.5.1. Recolección de materia prima	40
2.5.2. Trituración de piedra Caliza.....	41
2.5.3. Selección de la materia prima	42

2.5.4. Caracterización de la materia prima	44
2.5.5. Calcinación de la piedra Caliza	44
2.5.7. Trituración de la muestra óxido de calcio.....	46
2.5.8. Tamizado	47
2.5.9. Almacenamiento del óxido de calcio	48
2.6. Caracterización del Producto Obtenido.....	48
2.6.1. Determinación del óxido de calcio disponible.....	49
2.6.2. Ensayo para determinar la velocidad de apagado del óxido de calcio	53

CAPÍTULO III

DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

3. DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	56
3.1. Resultado de la Caracterización de la piedra Caliza.....	56
3.1.1. Determinación de la pureza de CaCO_3	57
3.2. Resultados de la determinación del óxido de calcio disponible.....	58
3.2.1. Ecuaciones utilizadas para el cálculo de determinación de óxido de calcio.....	58
3.3. Resultados del Ensayo para determinar la velocidad de apagado del óxido de calcio	60
3.3.1. Resultados y gráficas de tiempo contra temperatura	61
3.3.2. Incremento de la temperatura en 3 minutos.....	67
3.3.3. Tiempo total de apagado activo	68
3.4. Cuantificación de la muestra separada de óxido de calcio por ensayo de (XRF)-ISO 29581.....	70
3.5. Resultados de óxido de calcio requemado y % de crudo	71
3.6. Balance de Materia y Energía	71
3.6.1. Balance de materia del proceso tecnológico experimental	72
3.6.2. Balance de masa por componentes del óxido de calcio	79
3.7. Balance de energía	82

3.7.1. Balance de entalpía	82
3.7.2. Balance de entropía de reacción.....	84
3.7.3. Calculo de energía libre de Gibss.....	86
3.7.4. Cálculo de calor suministrado al sistema para llegar a la temperatura de 1223,5°K.....	86
3.7.5. Balance de energía del sistema de calcinación en la mufla.....	87
3.7.6. Consumo de energía.....	91
3.8. Determinación del rendimiento	92
3.9. Análisis estadístico	92
3.9.1. Análisis de varianza univariante.....	93
3.9.2. Determinación del modelo matemático	95

CAPÍTULO IV

COSTOS DEL PROYECTO

4.COSTOS DEL PROYECTO	100
4.1. Evaluación de costos.....	100
4.2. Costo de producción	103

CAPITULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	105
5.1 Conclusiones.....	105
5.2 Recomendaciones	106

BIBLIOGRAFÍA

BIBLIOGRAFÍA	107
--------------------	-----

ANEXOS

Anexo I: Resultados de SOBOCE de los análisis químicos de la piedra caliza	110
Anexo II: Resultados de SOBOCE de los análisis químicos del óxido de calcio. ...	111

Anexo III: Resultados de análisis de óxido de calcio disponible CEANID	112
Anexo IV: Especificaciones de los equipos utilizados	113
Anexo V: Especificaciones de los materiales utilizados.....	116
Anexo VI: Galería de fotos	119
Anexo VII: Norma Boliviana 647.....	123

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro I-1 Clasificación de piedras calizas y margas	10
Cuadro I-2 Clasificación de caliza por su calidad	11
Cuadro I- 3 Características físico-químicas	16
de los distintos tipos de cal viva.....	16
Cuadro I-4: Clasificación de tipos de cal de acuerdo a su pureza.....	18
Cuadro I-5 Clasificación de usos de la cal por sectores.....	20
Cuadro I-6: Valores de equilibrio para la presión del dióxido de carbono a diversas	22
Cuadro I-7: Fenómenos de la calcinación	25
Cuadro II-1: Factores a evaluar.....	30
Cuadro II-2: Parámetros utilizados en la calcinación de diferentes autores.....	33
Cuadro II-1: Datos de precisión, tipo de cal.....	61
Cuadro III-2: Clasificación de la reactividad de la cal	68
Cuadro III-3: Corrientes de proceso.....	73
Cuadro III-4: Nomenclatura de fórmulas química.....	73
Cuadro III-5: Datos para balance	78
Cuadro III-6: Peso Molecular de componentes	78
Cuadro III-7: Datos de calor específico para mufla.....	87

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Yacimientos de calizas en Bolivia.....	4
Tabla 2: Datos geologicos dela zona El puente, Tarija.....	5
Tabla II-1: Escala de calificación	29
Tabla II-2. Selección del método experimental para la obtención de óxido de calcio.	31
Tabla II-3: Datos de concentración , pruebas preliminares.....	34
Tabla II-4: Variables y niveles.....	36
Tabla II-5: Matriz de experimentos y plan de experimentos.....	36
Tabla II-6: Codificación de los experimentos de obtención de óxido de calcio.....	37
Tabla II-7: Características de tamices.....	43
Tabla III-1 Composición química de la muestra de caliza mediante XRF.....	56
Tabla III-2: Resultados del óxido de calcio disponible.....	59
Tabla III-3: Registro de la evolución térmica de muestras de óxido de calcio.....	62
Tabla III-4: Registro de réplicas de la evolución térmica de muestras de óxido de calcio	63
Tabla III-5: Resultados del incremento de la temperatura en 3 minutos.....	67
Tabla III-6: Resultados de tiempo total de apagado activo.....	69
Tabla III-7 Resultados de óxido de calcio.....	70
Tabla III-8: Resultados del Balance por componentes de óxido de calcio.....	81
Tabla III-9: Datos para el uso del programa IBM SPSS.....	93
Tabla III-10: Factores inter-sujetos.....	94
Tabla III-11: Pruebas inter-sujetos.....	94
Tabla III-12: Resumen del modelo matemático.....	95
Tabla III-13: Resultado del análisis ANOVA.....	96

Tabla III-14: Coeficientes del modelo matemático.....	96
Tabla III-15: Comparación del rendimiento obtenido experimentalmente y la corrección del rendimiento obtenido por el programa SPSS.....	98
Tabla IV-1: Detalle de costos de materia prima y reactivos utilizados en la parte experimental de la obtención de óxido de calcio por calcinación de piedra caliza a escala laboratorio.....	100
Tabla IV-2: Detalle de costos de materiales adquiridos en la parte experimental de la obtención de óxido de calcio por calcinación de piedra caliza a escala laboratorio.	1100
Tabla IV-3: Detalle de costos de análisis fisicoquímicos.....	1102
Tabla IV-4: Detalle de costos de material de apoyo.....	1102
Tabla IV-5: Detalle de costos de energía en equipos utilizados.....	103
Tabla IV-6: Detalle de costos totales del estudio.....	103
Tabla IV-7: Detalle de costos del proceso de obtención.....	104
Tabla IV-8: Detalle de costos de energía en los equipos utilizados.....	104

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Producción mundial de cal.....	2
Figura 2: Países exportadores de cal.....	3
Figura 3: Mapa de Yacimientos de calizas.....	3
Figura 4: Mapa de Tarija con zonas de potencial minero.....	4
Figura 5: Mapa geológico de zonas de calizas en El Puente, Méndez, Tarija.....	5
Figura I-1: Diferentes tipos de poros.....	12
Figura I-2: Influencia de la concentración y presión en la temperatura de disociación de.....	22
Figura I-3: Modelo de reacción de la calcinación (CaCO_3).....	23

Figura I-4: Dinámica de calcinación de la caliza.....	25
Figura II-1: Piedra caliza de la zona "El Puente".....	28
Figura II-2: Curva de pruebas preliminares.....	34
Figura II-3: Diagrama de bloques del método de obtención de óxido de calcio.....	40
Figura II-4: Cantera en la localidad "El Puente".....	41
Figura II-5: Piedra Caliza.....	41
Figura II-6: Método del cuarto aplicado en piedra caliza.....	42
Figura II-7: Técnica de Tamizaje.....	44
Figura II-8: Calcinación.....	45
Figura II-9: Pesado materia prima.....	46
Figura II-10:Trituración.....	47
Figura II-11:Tamizaje.....	47
Figura II-12:Almacenamiento.....	48
Figura II-13:Preparación del HCl.....	50
Figura II-14:Valoración del HCl	51
Figura II-15: Neutralización	53
Figura II-16: Detalles de equipo para el ensayo de velocidad de apagado.....	54
Figura II-17:Construcción de calorímetro.....	54
Figura III-1: Diagrama de bloques para el proceso experimental de la obtención de óxido de calcio por calcinación de piedra caliza a escala laboratorio.....	72
Figura III-2: Diagrama de flujo del balance de materia para obtención de óxido de calcio por calcinación de piedra caliza.....	81
Figura III-3: Sistema de balance de energía en la calcinación de la piedra caliza.....	82
Figura III-4: Modelo lineal.....	97

Figura III-5: % Óxido de calcio disponible experimental vs % Óxido de calcio disponible del modelo vs Error.....	99
--	----

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Grafica III-1: Curvas de evolución térmica de cal del ensayo de velocidad de apagado	62
Grafica III-2: Curva de mayor incremento de temperatura durante el ensayo de velocidad apagado.....	63
Grafica III-3: Curvas de réplicas de evolución térmica de cal del ensayo de velocidad de apagado.....	64
Grafica III-4: Curva de mayor incremento de temperatura durante el ensayo de velocidad de apagado.....	65

SIGLAS Y/O ABREVIACIONES

ASTM = American Society for Testing and Materials.

NB = Norma Boliviana.

ISO = International Organization for Standardization.

XRF = Fluorescencia de Rayos X.

CEANID = Centro de Ensayos Analíticos y Desarrollo Industrial.

SOBOCE = Sociedad Boliviana de Cemento S.A.

SERGEOMIN = Servicio Geológico Minero de Bolivia.

ILA = International Lime Association.

ITC = International Trade Centre.

PF = Peso Final.

PI = Peso Inicial.

CaCO_3 = Carbonato de calcio.

CaO = Óxido de calcio.

CO_2 = Dióxido de carbono.

H_2O = Agua.

Ca(OH)_2 = Hidróxido de calcio.

MgCO_3 = Carbonato de magnesio.

MgO = Óxido de magnesio.

SiO_2 = Óxido de silicio.

SO_3 = Trióxido de azufre.

Al_2O_3 = Óxido de aluminio.

Fe_2O_3 = Óxido de hierro.

ΔH = Variación de entalpía o calor de reacción.

ΔG = Energía libre de Gibbs.

T = Temperatura.

P = Potencia.

Q = Energía o calor suministrado.

W = Trabajo o potencia eléctrica.

kW = Kilowatt.

kWh = Kilowatt-hora.

°C = Grado Celsius.

g = Gramo.

mol = Mol.

% = Porcentaje.

h = Hora.

Mx-y = Muestra número x, réplica y.

Tr = Tiempo de residencia.

T° = Temperatura de calcinación.

PPC = Pérdida por calcinación. Ec. = Ecuación.

%CaO = Porcentaje de óxido de calcio disponible.

Q_{eléctrico} = Energía eléctrica suministrada.

E total = Energía total consumida.

g/cm³ = Gramos por centímetro cúbico.

g/L = Gramos por litro.

mm = Milímetro.

" = Pulgada.

kJ = Kilojulio.

Bs = Bolivianos.

USD = Dólares americanos.

ANOVA = Análisis de varianza

IBM SPSS = Statistical Package for the Social Sciences (Paquete Estadístico para la Ciencia Social)

LOU = Laboratorio de Operaciones Unitarias.