



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Química

**EVALUACIÓN DE LA CINÉTICA DE REACCIÓN DE CONVERSIÓN DE PIEDRA CALIZA A
CAL VIVA, POR EFECTO DE TRES TAMAÑOS DE PARTÍCULA, UTILIZANDO UNA
TEMPERATURA Y UN TIEMPO DETERMINADO A 640 mm Hg DE PRESIÓN
BAROMÉTRICA A NIVEL LABORATORIO**

Sergio Samuel Palacios Cano

Asesorado por el Ing. Byron René Aguilar Uck

Guatemala, julio de 2021

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**EVALUACIÓN DE LA CINÉTICA DE REACCIÓN DE CONVERSIÓN DE PIEDRA CALIZA A
CAL VIVA, POR EFECTO DE TRES TAMAÑOS DE PARTÍCULA, UTILIZANDO UNA
TEMPERATURA Y UN TIEMPO DETERMINADO A 640 mm Hg DE PRESIÓN
BAROMÉTRICA A NIVEL LABORATORIO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

SERGIO SAMUEL PALACIOS CANO
ASESORADO POR EL ING. BYRON RENÉ AGUILAR UCK

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

GUATEMALA, JULIO DE 2021

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Christian Moisés de la Cruz Leal
VOCAL V	Br. Kevin Vladimir Armando Cruz
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Herbert René Miranda Barrios
EXAMINADOR	Ing. Manuel Galván Estrada
EXAMINADOR	Ing. Jaime Carranza González
EXAMINADOR	Ing. Otto Raúl de León de Paz
SECRETARIA	Inga. Gilda Marina Castellanos de Illescas

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

EVALUACIÓN DE LA CINÉTICA DE REACCIÓN DE CONVERSIÓN DE PIEDRA CALIZA A CAL VIVA, POR EFECTO DE TRES TAMAÑOS DE PARTÍCULA, UTILIZANDO UNA TEMPERATURA Y UN TIEMPO DETERMINADO A 640 mm Hg DE PRESIÓN BAROMÉTRICA A NIVEL LABORATORIO

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 17 de mayo del 2017.

Sergio Samuel Palacios Cano

Guatemala, 07 de Agosto del 2017

Ingeniero Químico
Carlos Salvador Wong Davi
Director de la Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala
Ciudad de Guatemala

Estimado Ing. Químico Wong

Por este medio le informo que he asesorado y revisado, como Asesor, el informe final del trabajo de tesis del estudiante de la Carrera de Ingeniería Química Sergio Samuel Palacios Cano, carné 89-12121 y registro académico y CUI 2571 50323 0101, titulado:

“ EVALUACIÓN DE LA CINÉTICA DE REACCIÓN DE CONVERSIÓN DE PIEDRA CALIZA A CAL VIVA POR EFECTO DE TRES TAMAÑOS DE PARTÍCULA UTILIZANDO UNA TEMPERATURA Y UN TIEMPO DETERMINADO A 640 mmHg DE PRESIÓN BAROMÉTRICA A NIVEL LABORATORIO ”.

Trabajo que considero satisfactorio y por lo tanto recomiendo su aprobación.

Sin otro motivo en particular, me suscribo a Usted,

Atentamente,



Ing. Qco. Byron René Aguilar Uck
Colegiado 688

Byron René Aguilar Uck
Ingeniero Químico

Colegiado No. 688



Guatemala, 01 de marzo de 2018.
Ref. EIQ.TG-IF.011.2018.

Ingeniero
Carlos Salvador Wong Davi
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Wong:

Como consta en el registro de evaluación del informe final EIQ-PRO-REG-007 correlativo **005-2017** le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

**INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADUACIÓN
-Modalidad Seminario de Investigación-**

Solicitado por el estudiante universitario: **Sergio Samuel Palacios Cano.**
Identificado con número de carné: **2571 50323 0101.**
Identificado con registro académico: **89-12121**
Previo a optar al título de **INGENIERO QUÍMICO.**

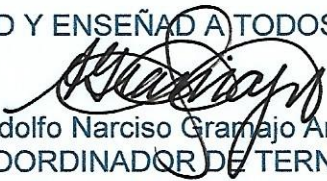
Siguiendo los procedimientos de revisión interna de la Escuela de Ingeniería Química, los Miembros de la Terna han procedido a **APROBARLO** con el siguiente título:

EVALUACIÓN DE LA CINÉTICA DE REACCIÓN DE CONVERSIÓN DE PIEDRA CALIZA A CAL VIVA POR EFECTO DE TRES TAMAÑOS DE PARTÍCULA UTILIZANDO UNA TEMPERATURA Y UN TIEMPO DETERMINADO A 640 mmHg DE PRESIÓN BAROMÉTRICA A NIVEL LABORARIO

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por el Ingeniero Químico: **Byron René Aguilar Uck.**

Habiendo encontrado el referido informe final del trabajo de graduación **SATISFACTORIO**, se autoriza al estudiante, proceder con los trámites requeridos de acuerdo a las normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”


Ing. Adolfo Narciso Gramajo Antonio
COORDINADOR DE TERNA
Tribunal de Revisión
Trabajo de Graduación



C.c.: archivo





Guatemala, 12 de julio de 2021.
Ref. EIQ.126.2021

Aprobación del informe final del trabajo de graduación

Ingeniera
Aurelia Anabela Cordova Estrada
Decana
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

Revisado el INFORME FINAL DEL TRABAJO DE GRADUACIÓN (TESIS), DENOMINADO **EVALUACIÓN DE LA CINÉTICA DE REACCIÓN DE CONVERSIÓN DE PIEDRA CALIZA A CAL VIVA, POR EFECTO DE TRES TAMAÑOS DE PARTÍCULA, UTILIZANDO UNA TEMPERATURA Y UN TIEMPO DETERMINADO A 640 mm Hg DE PRESIÓN BAROMÉTRICA A NIVEL LABORATORIO** del(la) estudiante Sergio Samuel Palacios Cano, se conceptúa que el documento presentado, reúne todas las condiciones de calidad en materia administrativa y académica (rigor, pertinencia, secuencia y coherencia metodológica), por lo tanto, se procede a la autorización del mismo, para que el(la) estudiante pueda optar al título de Ingeniería Química.

“Id y Enseñad a Todos”



Ing. Williams G. Alvarez Mejia, M.Sc., M.U.I.E.
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química

Cc. Archivo
WGAM/wgam



Agencia Centroamericana de Acreditación de
Programas de Arquitectura y de Ingeniería



Formando Ingenieros Químicos en Guatemala desde 1939



**NO SALGAS
QUÉDATE EN
CASA**

DTG. 293-2021

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al Trabajo de Graduación titulado: **EVALUACIÓN DE LA CINÉTICA DE REACCIÓN DE CONVERSIÓN DE PIEDRA CALIZA A CAL VIVA, POR EFECTO DE TRES TAMAÑOS DE PARTÍCULA, UTILIZANDO UNA TEMPERATURA Y UN TIEMPO DETERMINADO A 640 mm Hg DE PRESIÓN BAROMÉTRICA A NIVEL LABORATORIO**, presentado por el estudiante universitario: **Sergio Samuel Palacios Cano**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
DECANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
★

Inga. Anabela Cordova Estrada
Decana

Guatemala, julio de 2021

AACE/asga

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	A Él sea la gloria y la honra.
Mis padres	Thelma Leticia Cano Cano y Samuel Manolo Palacios De León, por su guía y ejemplo.
Mis abuelos	Lidia Cano, Juventino Cano, Cleotilde De León y Luis Palacios, siempre los llevo en el corazón.
Mis hijos	Jessica Palacios, Sebastian Palacios, Susan Martinez, como ejemplo de que las metas son alcanzables con valentía y dedicación.
Mi esposa	Damaris Alvarez, por su apoyo y constante motivación para alcanzar la meta.
Mis tíos	Nora Cano, Joel Cano, Gladys López, Edvin Cano y Concepción Palacios, por su amor y apoyo moral.
Mi hermana	Mariela Palacios, por su paciencia y motivación.

AGRADECIMIENTOS A:

**Universidad de San
Carlos de Guatemala**

Por brindarme años maravillosos de convivencias que forjaron mi carácter y objetivo profesional.

Facultad de Ingeniería

Recuerdo de tantas anécdotas alegres y exámenes sempiternos pero balanceados con actividades que perdurarán en la memoria.

**Mis amigos de la
Facultad**

Otto Juárez, Carlos Cano, Joaquín Garzaro, Yuri Urrutía y Jorge Gómez, que nos reuníamos a estudiar en el peladero, en alguna casa y que no solamente aprendimos química sino también de cada uno. Aun en la distancia sé que contamos los unos con los otros.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN	XI
OBJETIVOS.....	XIII
Hipótesis	XIV
INTRODUCCIÓN	XV
1. ANTECEDENTES	1
2. MARCO TEÓRICO.....	3
2.1. Generalidades de la caliza y de la cal	3
2.2. Usos de la cal	4
2.2.1. En la metalurgia.....	4
2.2.2. En la industria química	4
2.2.3. En la industria alimenticia	4
2.2.4. En la industrial de vidrio.....	5
2.2.5. En la industria de la construcción	5
2.2.6. En la protección del medio ambiente.....	6
2.2.7. En la industria agrícola	6
2.3. La descomposición de la caliza	6
3. DISEÑO METODOLÓGICO	11
3.1. Variables.....	11

3.1.1.	Variables independientes	11
3.1.2.	Variables dependientes y respuesta	11
3.1.3.	Variables de medición	11
3.2.	Delimitación de campo de estudio	11
3.3.	Recursos humanos disponibles	12
3.4.	Recursos materiales disponibles.....	12
3.5.	Técnica cualitativa.....	13
3.6.	Recolección y ordenamiento de la información.....	15
3.7.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información.....	15
3.7.1.	Datos predeterminados	15
3.7.2.	Datos experimentales.....	16
3.8.	Análisis estadístico.....	16
3.8.1.	Diseño de tratamientos.....	16
3.8.2.	Plan de análisis de los resultados	16
3.8.3.	Métodos y modelos de los datos según tipo de variables.....	18
4.	RESULTADOS.....	21
4.1.	Cálculo de W1 - Para obtener el peso original del CaCO ₃ en una muestra trabajada (W1).....	27
4.2.	Cálculo de W2 Para calcular el peso de CO ₂ liberado a un tiempo n	27
4.3.	Cálculo de W3 - Para calcular el peso de CaCO ₃ que se ha disociado a un tiempo n	27
4.4.	Cálculo de W4 - Porcentaje de conversión de caliza a cal viva a un tiempo n	28
4.5.	Gráficas de resultados	28
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	33
	CONCLUSIONES	37

RECOMENDACIONES	39
BIBLIOGRAFÍA.....	41
APÉNDICES.....	43

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Diseño experimental.....	14
2.	Conversión de piedra caliza a cal viva para partículas entre 2,00 a 2,38 mm (mesh 8 – 10).....	28
3.	Conversión de piedra caliza a cal viva para partículas entre 2,38 y 3,33 mm (mesh 6 – 8).....	29
4.	Conversión de piedra caliza a cal viva para partículas entre 3,33 y 4,76 mm (mesh 4 – 6).....	30
5.	Conversión de piedra caliza a cal viva versus tiempo para partículas del mesh 8 – 10, mesh 6 – 8 y mesh 4 – 6	31

TABLAS

I.	Composición química de la caliza	15
II.	Porcentaje de conversión a 60 minutos de calcinación	18
III.	Resultados ANOVA para conversiones obtenidas a 60 minutos de calcinación	19
IV.	Resultados de F y Fcrit para calcinaciones a diferentes tiempos.....	20
V.	Datos originales de pesos de la caliza durante la calcinación a 850° C a los tiempos estipulados (cada muestra tiene un peso inicial de 10g caliza), en gramos.....	21

VI.	Datos calculados a partir de tabla V durante el tiempo de calcinación	23
VII.	Datos calculados a partir de la tabla III para conversiones mesh 8-10	25
VIII.	Datos calculados a partir de la tabla III para conversiones mesh 6-8	25
IX.	Datos calculados a partir de la tabla III para conversiones mesh 4-6	26

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
CaCO₃	Carbonato de calcio
MgCO₃	Carbonato de magnesio
S^2	Cuadrado medio del error
S_1^2	Cuadrado medio del tratamiento
S	Desviación estándar
CO₂	Dióxido de carbono
f	f de pruebas para tratamientos
°C	Grados Celsius
g	Gramo
H_i	Hipótesis de investigación
H_o	Hipótesis nula
h	Hora
H	Humedad
mg	Miligramo
k	Número de tratamientos
CaO	Óxido de calcio
PM	Peso molecular
%	Porcentaje
i	Subíndice para tratamientos
SSA	Suma de cuadrados de tratamientos
SSE	Suma de cuadrados del error
SST	Suma de cuadrados totales
T	Temperatura

t	Tiempo
Y_{ij}^2	Todos los datos de todas las muestras
μ	Valor medio

GLOSARIO

Balanza analítica	Una balanza analítica es una clase de balanza de laboratorio diseñada para medir pequeñas masas, en un principio de un rango menor del miligramo (y que hoy día, las digitales, llegan hasta la diezmilésima de gramo: 0,0001 g o 0,1 mg).
Calcinación	La calcinación es el proceso de calentar una sustancia a temperatura elevada, (temperatura de descomposición), para provocar la descomposición térmica o un cambio de estado en su constitución física o química.
Desecador	Un desecador es un instrumento de laboratorio que se utiliza para mantener limpia y deshidratada una sustancia por medio del vacío.
Mufla	Es un tipo de horno que puede alcanzar temperaturas muy altas para cumplir con los diferentes procesos que requieren este tipo de característica.
Presión de equilibrio	En el proceso de calcinación, es la presión a la cual se encuentran en equilibrio el carbonato de calcio, el óxido de calcio y el dióxido de carbono, a una temperatura dada.

Reacción endotérmica Se denomina reacción endotérmica a cualquier reacción química que absorbe energía.

Reacción reversible Se llama reacción reversible a la reacción química en la cual los productos de la reacción vuelven a combinarse para generar los reactivos.

Tamizado La tamización o tamizar es un método físico para separar mezclas, en el cual se separan dos sólidos formados por partículas de tamaño diferente. Consiste en hacer pasar una mezcla de partículas de diferentes tamaños por un tamiz.

Triturado El triturado es también el nombre del proceso para reducir el tamaño de las partículas de una sustancia por la molienda, como por moler los polvos en un mortero con un mazo.

RESUMEN

Como objetivo principal de esta investigación se tiene determinar el efecto del tamaño de partícula sobre la cinética de la reacción química del proceso de calcinación de piedra caliza, con alto grado de pureza a cal viva bajo ciertas condiciones de laboratorio.

Para ello se ha solicitado a la empresa Cementos Progreso S.A., muestras de piedra caliza y un análisis químico de laboratorio, el cual servirá de base para los cálculos de conversión. Las muestras serán trituradas y tamizadas para obtener tres muestras con tamaño de rocas de 2,00 a 2,38 mm, 2,38 a 3,35 mm y 3,35 y 4,76 mm y someterán a un tratamiento de secado y almacenamiento en bolsas plásticas en una desecadora. Por limitaciones de mufla y laboratorio, los ensayos se harán con muestras de 10g de piedra caliza.

La parte experimental constará de tres calcinaciones a 850° C por un tiempo de 7 horas cada una. La primera se hará con tamaño de partículas mesh 8 a 10, la segunda con partículas mesh 6 a 8, y la tercera con partículas mesh 4 a 6. Se considera que el tiempo de calcinación será suficiente para lograr la máxima conversión de piedra caliza a cal viva bajo estas condiciones de laboratorio, lo cual se verificará cuando las muestras ya no sufran más pérdidas en peso.

En cada corrida se calcinarán 3 muestras de 10g cada una en crisoles. Cada 60 minutos se pesará cada muestra a lo largo de las 7 horas. El abrir la mufla para pesar las muestras siendo calcinadas también servirá para airear la mufla. Esto es necesario para remover el dióxido de carbono acumulado, que se genera durante el proceso de calcinación, y que puede tener un efecto sobre la reacción.

OBJETIVOS

General

Evaluar si la velocidad de conversión de piedra caliza a cal viva es una función del tamaño de partícula.

Específicos

1. Determinar la expresión matemática de la velocidad de conversión de piedra caliza a cal viva debido a diferentes tamaños de partículas calcinadas.
2. Determinar si la cinética de conversión de piedra caliza a cal viva es una función del tamaño de partícula.

Hipótesis

1. Hipótesis de trabajo

Es factible evaluar el efecto del tamaño de partícula sobre la velocidad de conversión de piedra caliza a cal viva, a través de ensayos en laboratorio.

2. Hipótesis de Investigación:

La velocidad de conversión de piedra caliza a cal viva es afectada por el tamaño de partícula a calcinar para una temperatura dada.

Donde:

- Velocidad de conversión respecto a partícula de 2,00 a 2,38 mm
- Velocidad de conversión respecto a partícula de 2,38 a 3,35 mm
- Velocidad de conversión respecto a partícula de 3,35 a 4,76 mm

3. Hipótesis Nula:

La velocidad de conversión de piedra caliza a cal viva no es afectada por el tamaño de partícula una temperatura dada.

Donde:

- Velocidad de conversión respecto a partícula de 2,00 a 2,38 mm
- Velocidad de conversión respecto a partícula de 2,38 a 3,35 mm
- Velocidad de conversión respecto a partícula de 3,35 a 4,76 mm

INTRODUCCIÓN

Uno de los objetivos de este trabajo de investigación busca ampliar la información disponible sobre el proceso de calcinación a nivel de laboratorio y comprobar lo que dice la teoría en cuanto a la cinética de una reacción química en función del tamaño de partícula para el proceso de la calcinación. Los parámetros temperatura y tiempo de calcinación se tomaron de otros estudios ya realizados sobre el tema.

Estos estudios encontraron que una temperatura de 850° C y un tiempo de 7 horas de calcinación son los óptimos para este proceso a nivel de laboratorio. Tanto el procedimiento como el análisis experimental fueron elaborados específicamente para este trabajo de investigación, en función del equipo de laboratorio disponible.

La necesidad de airear la mufla para remover el exceso de dióxido de carbono que la reacción produce es de suma importancia para no contribuir a la reversibilidad de la reacción de conversión de piedra caliza a cal viva, debido a que esto conlleva abrir la mufla por un tiempo corto definido, se usará este mismo tiempo para pesar las muestras cada media hora.

Se considera que 7 lecturas que se tomarán de peso de las muestras durante la calcinación aportarán suficiente información para establecer la conversión de piedra caliza a cal viva en función del tiempo. El objetivo principal es establecer si el tamaño de partícula afecta la cinética de las conversiones. Esto lo determinarán los modelos matemáticos resultantes para cada caso.

1. ANTECEDENTES

En 1991, en la Universidad de San Carlos de Guatemala, para obtener el título de ingeniero químico, se llevó a cabo el estudio titulado Evaluación a nivel de laboratorio del efecto en el grado de conversión de piedra caliza a cal viva por la adición de tres tipos de carbón vegetal con diferente poder calorífico, realizado a diferentes temperaturas y tiempos de calcinación para una presión atmosférica de 640 mm Hg, realizado por el estudiante Edy Pérez Orozco.

Las variables fueron tres: tiempo - 3, 5 y 7 horas de calcinación, temperatura - 650o C y 750o C y poder calorífico de coadyuvante – 10 % de carbón vegetal con tres poderes caloríficos: 5,740, 6,861 y 7,514 Kcal/Kg. En función del análisis estadístico hecho, se demostró que, para una temperatura de 650o C, no se lograba una conversión completa. Para 750° C, la conversión de piedra caliza aumenta en función de tiempo, pero el efecto del carbón vegetal no es significativo.

En febrero de 1997, siempre en la USAC, para obtener el título de ingeniero químico, se llevó a cabo el estudio titulado Evaluación de la eficiencia de la conversión de piedra caliza a cal viva por efecto de incorporación de carbón vegetal mediante el procesamiento a diferentes tamaños de partícula, tiempos de calcinación y porcentajes de carbón agregados para una presión de 640 mm Hg y una temperatura de 750o C, realizado por el estudiante José Gabriel May.

Las variables fueron tres: tamaño de partícula – 2,38 a 3,35 mm y 3,36 – 4,76 mm, tiempo de calcinación – 3,5, y 7 horas, y dos porcentajes de carbón vegetal. En función del análisis estadístico hecho, se demostró que el efecto de agregar carbón vegetal no es significativo y no se encontraron diferencias significativas para los tiempos de 5 y 7 horas de calcinación.

En septiembre de 2015, para obtener el título de ingeniero químico, se llevó a cabo el estudio titulado Evaluación de la cinética de reacción de conversión de piedra caliza a cal viva por efecto de tres temperaturas, utilizando un tamaño de partícula y un tiempo determinado a 640 mm hg de presión barométrica a nivel laboratorio, realizado por el estudiante Henry Estuardo Quiñonez Fernández.

La única variable fue la temperatura – 750° C, 850° C y 950° C. El tiempo y tamaño de partícula fueron constantes. En función del análisis estadístico hecho, se demostró que la relación conversión – tiempo varió significativamente. Estos resultados fueron presentados como modelos matemáticos.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Generalidades de la caliza y de la cal

La industria de la cal es una de las más antiguas aplicaciones de ingeniería química. La necesidad de construir con un material barato, accesible y práctico es lo que llevó al descubrimiento del proceso de calcinación. La reacción de calcinación se define así:



La calcinación es básicamente un proceso de calentamiento térmico para provocar descomposición de la piedra caliza por medio de la liberación de dióxido de carbono del carbonato de calcio. Este desprendimiento requiere energía y por lo tanto es una reacción endotérmica. Sin embargo, la reacción también es reversible. La reversibilidad es en función de la presión parcial del dióxido de carbono presente en la mufla. Si la presión parcial es menor a la presión de equilibrio, la descomposición procederá. Por esto es necesario airear la mufla a intervalos regulares.

Existen distintas clasificaciones de piedra caliza, dependiendo del contenido de carbonato de calcio y carbonato de magnesio. Debido a esto, este estudio está definido como la conversión de piedra caliza, y no carbonato de calcio. Las impurezas en la piedra caliza tienen un efecto sobre la descomposición del carbonato de calcio. Se espera trabajar con una piedra caliza rica en calcio (un contenido mayor al 95 % en peso de carbonato de calcio).

Cuanto mayor es el contenido de carbonato de magnesio, se clasifican como magnesianas, y las piedras que contengan arriba de 30 % de carbonato de

magnesio son clasificadas como dolomíticas. Otras impurezas tales como minerales pueden afectar las propiedades físicas de la piedra caliza.

2.2. Usos de la cal

El uso de la cal es amplio y nuevas aplicaciones y tecnología han aumentado la demanda con el tiempo.

2.2.1. En la metalurgia

La cal es ampliamente utilizada en esta industria para la producción de hierro y acero. Es particularmente eficaz para la eliminación de impurezas tales como el silicio y el fósforo, neutraliza el azufre y la formación de escorias que pueden ser separadas. La cal también se utiliza en la producción de aluminio.

2.2.2. En la industria química

Se emplea en la producción de jabón, en la fabricación del caucho y de carburo cálcico, en la industria petrolífera, en la industria del papel y en cosmética.

2.2.3. En la industria alimenticia

Se utiliza en la industria azucarera (en concreto en la elaboración del azúcar de remolacha), en ostricultura, en piscicultura, en la industria cervecera, en la industria láctea, en la fabricación de colas y gelatinas, en el tratamiento del trigo y del maíz, en la industria vinícola, en la conservación de alimentos en contenedores de alimentos autocalentables, y en la nixtamalización del maíz para

obtener masa de maíz nixtamalizada, para hacer tortillas mexicanas y todos los derivados de ella.

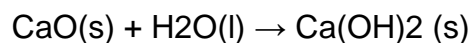
2.2.4. En la industrial de vidrio

Su utilización proporciona vidrios más brillantes y con mejor color. La fusión es más rápida, lo cual supone un ahorro económico durante el proceso de fabricación del vidrio.

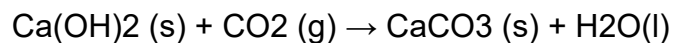
2.2.5. En la industria de la construcción

Se usa en estabilización de suelos para secar suelos húmedos, descongelar los helados y mejorar las propiedades de los suelos arcillosos. También en la fabricación de prefabricados de cal: hormigón celular o aireado, ladrillos silicocalcáreos y bloques de tierra comprimida.

Además, se usa en el repello o construcción de muros en que se busca la reformación de cal a carbonato de calcio. Al mezclar la cal con agua y arena se forma el hidróxido de calcio en forma de pasta que se usa para pegar blocks o repello. Esto se da por medio de la reacción:



La reacción del hidróxido de calcio y el dióxido de carbono en el ambiente produce carbonato de calcio y causa que esta pasta endurezca, cumpliendo con su objetivo, y se da por medio de la reacción:



2.2.6. En la protección del medio ambiente

La aplicación de la cal para protección del medio ambiente incluye la potabilización de agua de consumo, tratamiento de aguas residuales, remineralización de agua desmineralizada, depuración de gases, tratamiento de residuos y tratamiento de suelos contaminados.

2.2.7. En la industria agrícola

Los usos de la cal en esta industria son extensos e incluyen: enmienda, fertilizante, *compost*, tratamientos fitosanitarios, biocida y alimentación animal.

2.3. La descomposición de la caliza

La propiedad química más importante de la piedra caliza es su descomposición térmica, con a cual se produce la cal viva y el dióxido de carbono. Aunque esta reacción química sea directa, tiene sus complejidades debido al número de variables que la afectan. Las reacciones se pueden expresar así:



Existen tres elementos esenciales para lograr el proceso de calcinación:

- La piedra debe ser calentada hasta la temperatura de descomposición de los carbonatos.
- Se debe mantener una temperatura (o mayor) por un tiempo debido.
- Se debe remover el dióxido de carbono de la cámara.

La temperatura de descomposición de una piedra caliza es determinada por su composición. Esto es, el contenido de carbonato de calcio y carbonato de magnesio. El carbonato de magnesio puro tiene una temperatura de descomposición más bajo que la de carbonato de calcio. El carbonato de magnesio se descompone a una temperatura de unos 500° C, mientras el carbonato de calcio se descompone entre los 800° y 900° C.

En la práctica se ha encontrado que, para optimizar un proceso de calcinación, se deben hacer muchas pruebas hasta encontrar el equilibrio entre calor y tiempo. Esto se debe a que, si hay un calentamiento fuerte, esto puede quemar el óxido de magnesio. Mientras que, si no hay una temperatura lo suficientemente alta, no se logrará una alta conversión del carbonato de calcio. En general, es preferible no elevar demasiado la temperatura, pero prolongando el tiempo de calcinación.

La descomposición se da desde la superficie de la piedra hacia su núcleo. Según avanza la descomposición hacia el centro de las piedras, se requiere una mayor temperatura que la de descomposición teórica. Esto es debido a que va aumentando la presión parcial del dióxido de carbono liberado. Se ha encontrado que se pueden requerir más de 100° C en demanda de temperatura para lograr una buena conversión, dependiendo del diámetro de la piedra.

En una cámara cerrada, la descomposición puede dejar de darse, independientemente de la temperatura alcanzada, si existe un equilibrio entre presión y temperatura. Siempre existe una relación directa entre la presión parcial del dióxido de carbono y la temperatura. En general, a mayor presión parcial de dióxido de carbono, mayor será la temperatura de disociación.

Un efecto que suele suceder es cuando se quema la cal viva debido a un exceso de temperatura. Según avance la descomposición, se va acumulando el dióxido de carbono, elevando su presión, las zonas ya calcinadas se sobrecalientan y colapsan; esto provoca que el dióxido de carbono ya no pueda evacuar. Al enfriarse las piedras este dióxido atrapado se reabsorbe en las zonas calcinadas, afectando la conversión total.

La piedra caliza tiende a variar en su estructura cristalina, y esto también afecta su comportamiento durante la calcinación. Las piedras que mantienen su estructura cristalina tienden a mantenerse sin colapsar, esto ayuda en que el dióxido de carbono puede escapar y esto permite que la reacción proceda. Si una piedra tiende a colapsar o pulverizarse durante el proceso de calcinación, esto afectará la conversión. Esta propiedad es puramente física y relacionada a la estructura cristalina, independiente de la composición química de la piedra.

Teóricamente, un calentamiento gradual es mejor para obtener una buena conversión, en lugar de un calentamiento brusco. La disociación del carbonato también depende del tamaño de la piedra, su densidad y la formación de fisuras en la estructura cristalina que facilita la evacuación del dióxido de carbono. En cuanto a la energía necesaria para la calcinación se tiene que considerar que parte de la energía suministrada es para eliminar la humedad y materia orgánica en la piedra. Después de esto se tiene que calentar la piedra hasta su temperatura de descomposición y luego sostener esa temperatura por un tiempo específico.

Durante la calcinación, la pérdida en peso depende de la composición de la piedra caliza. Como referencia, para carbonato de calcio puro, la pérdida teórica es del 44,0 %, mientras que, para carbonato de magnesio puro, la pérdida sería del 52,2 %. Por lo tanto, mientras más mayor sea la presencia de carbonato de

magnesio, mayor será la pérdida en peso. Sin embargo, la recarbonatación siempre está presente y es literalmente imposible lograr un 100,0 % de conversión. Esto es debido a que siempre habrá un nivel de reabsorción del dióxido de carbono. La reabsorción se puede dar por varios factores, incluyendo temperaturas muy elevadas, una ineficiente distribución de calor en distintas zonas, resultando en un pobre intercambio de calor y una mala aireación de la cámara, entre otras.

El tamaño de partícula también tiene un efecto en la conversión. A mayor tamaño se requiere mayor tiempo y temperatura de calcinación. Mayor temperatura se requiere para elevar lo suficiente la presión del dióxido de carbono dentro la piedra para que logre escapar. Sin embargo, estas mismas elevadas temperaturas también queman la superficie y causan que colapse la estructura cristalina, afectando la porosidad. Cuanto aumenta el tamaño de la piedra, mayor es la distancia que debe atravesar el dióxido de carbono para escapar.

3. DISEÑO METODOLÓGICO

3.1. Variables

Son aquellas que no tienen un valor fijo en la realización del estudio. Estas variables son independientes, dependientes y respuesta y variables de medición.

3.1.1. Variables independientes

Las variables independientes en este trabajo son el tiempo (horas), la temperatura (oC) y el tamaño de partícula (2,00 a 2,38 mm, 2,38 a 3,35 mm y 3,35 a 4,76 mm).

3.1.2. Variables dependientes y respuesta

La variable dependiente es la conversión de piedra caliza a cal viva (gramos).

3.1.3. Variables de medición

La variable medible será = Caliza no calcinada + Cal viva + Crisol

3.2. Delimitación de campo de estudio

- Área: cinética de reacciones químicas
- Industria: los resultados de este estudio servirán para tener un mejor entendimiento del proceso de calcinación, específicamente el efecto del

tamaño de partículas (piedra caliza) sobre la velocidad de conversión a cal viva.

- Línea de investigación: cinética de descomposición térmica de caliza como una función del tamaño de partícula a calcinar.
- Proceso: calcinación de piedra caliza a cal viva.
- Ubicación: la preparación de las muestras a calcinar (trituration y tamizado) se hará en el laboratorio de Cementos Progreso S.A., el secado y la calcinación de las muestras se llevarán a cabo en el laboratorio del Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

3.3. Recursos humanos disponibles

- Investigador Sergio Samuel Palacios Cano
- Asesor Ing. Qco. Byron René Aguilar Uck

3.4. Recursos materiales disponibles

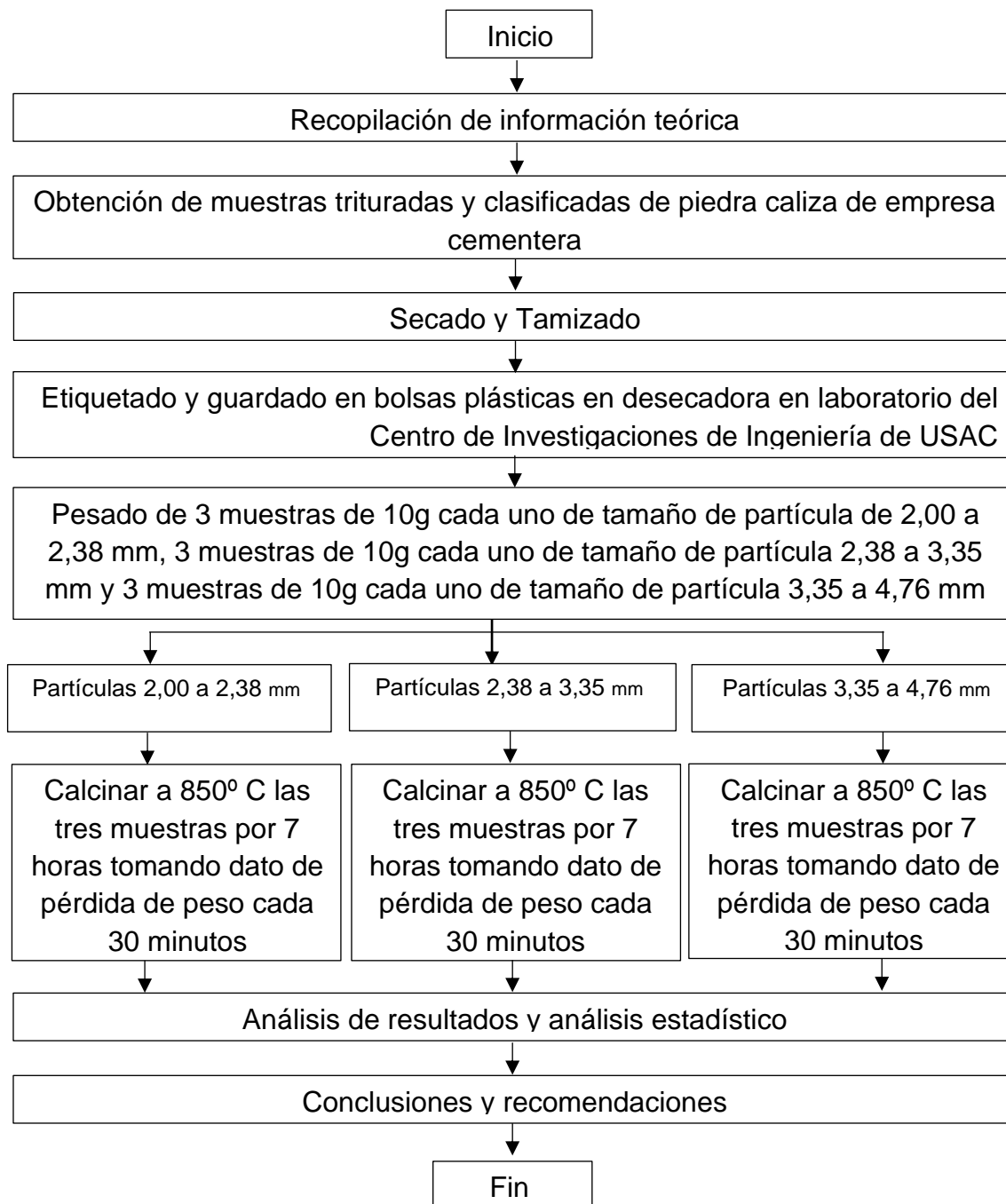
- Materia:
 - Piedras de caliza
- Equipo y cristalería:
 - Equipo:
 - Instrumentos de medición
 - Balanza Analítica

- Otros Equipos
 - Mufla
 - Desecadora
 - Trituradora
 - Tamiz
- Cristalería y otros
 - Crisoles
 - Pinzas

3.5. Técnica cualitativa

Considerando los diferentes tamaños las partículas expuestas a una temperatura de 850° C en tiempos iguales según hipótesis.

Figura 1. **Diseño experimental**



Fuente: elaboración propia.

3.6. Recolección y ordenamiento de la información

La empresa Cementos Progreso S. A. proveerá las muestras trituradas y clasificadas de la piedra caliza. Para cada tamaño de partícula solicitada, la cementera proveerá 250g. También proveerá el análisis de composición de las muestras brindadas.

3.7. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información

Procesamiento de los datos de la composición química de la caliza.

3.7.1. Datos predeterminados

Datos obtenidos antes de hacer las pruebas de laboratorio.

Tabla I. Composición química de la caliza

COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA CALIZA	
COMPONENTE	PORCENTAJE
CaCO ₃	96,87%
MgCO ₃	1,31%
Al ₂ O ₃	1,82%
SiO ₂	
Fe ₂ O ₃	
K ₂ O	

Fuente: elaboración propia.

3.7.2. Datos experimentales

Los datos originales serán los pesos en gramos de las muestras a calcinar a los tiempos especificados (cada 60 minutos durante las 7 horas de calcinación).

3.8. Análisis estadístico

Análisis estadístico del tamaño de partícula.

3.8.1. Diseño de tratamientos

Se realizarán tres corridas de 7 horas a 850° C.

- Tratamientos a realizar: 3 X 3
 - En el primer tratamiento se hará una corrida de tres muestras de 10g cada una, a una temperatura de 850° C por un tiempo de 7 horas de calcinación, utilizando partículas de 2,00 a 2,38 mm.
 - En el segundo tratamiento se hará una corrida de tres muestras de 10g cada una, a una temperatura de 850° C y 7 horas de calcinación, utilizando partículas de 2,38 a 3,35 mm.
 - En el tercer tratamiento se hará una corrida de tres muestras de 10g cada una, a una temperatura de 850° C y 7 horas de calcinación, utilizando partículas de 3,35 a 4,76 mm.

3.8.2. Plan de análisis de los resultados

Los resultados obtenidos durante la realización de la experimentación se someterán a un análisis con programas de computadora para establecer las correlaciones adecuadas y determinar un modelo matemático:

Conversión = f (tamaño de partícula)

Para el análisis estadístico se hará un cálculo de promedio para obtener datos más exactos con las corridas inicialmente planteadas. El promedio se calcula de la siguiente manera:

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n}$$

Donde:

- \bar{x} = valor promedio
- x_i = valor i
- $n = 3$

A partir del promedio también se encuentra la desviación estándar (S), que permite observar la dispersión entre valores para una misma medición respecto al promedio. El cálculo de la desviación estándar se representa por:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_i^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

Donde:

- \bar{x} = valor promedio
- x_i = valor i
- n = número de datos
- S = desviación estándar

3.8.3. Métodos y modelos de los datos según tipo de variables

Correlación de los resultados para expresar matemáticamente la relación entre la conversión de piedra caliza a cal viva y el tamaño de partícula calcinada. Análisis estadístico para determinar si el tamaño de partícula influye en la velocidad de conversión de piedra caliza a cal viva para la temperatura estudiada.

Se utilizó el programa ANOVA (de un solo factor) para el análisis estadístico. Esto debido a que la única variable de interés en esta tesis es el tamaño de partícula. Para el análisis se tomaron grupos de datos de acuerdo a los tiempos establecidos en los cuales se tomaron las medidas. Por lo tanto, de acuerdo al diseño experimental, se analizaron 7 grupos de datos, consistiendo cada uno de 9 datos (debido a que se hicieron tres repeticiones a tres tamaños de partícula; $3 \times 3 = 9$).

A continuación se presenta como ejemplo el análisis hecho para 9 datos de conversiones a los 60 minutos, los demás resultados se presentan en la tabla III.

Tabla II. **Porcentaje de conversión a 60 minutos de calcinación**

No.	Mesh 8-10	Mesh 6 - 8	Mesh 4 - 6
Corrida 1	65,8	77,7	90,3
Corrida 2	70,9	79,8	89,3
Corrida 3	65,0	77,5	97,1

Fuente: elaboración propia.

Tabla III. **Resultados ANOVA para conversiones obtenidas a 60 minutos de calcinación**

RESUMEN				
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
Mesh 8 - 10	3	2,093955	0,697985	0,001794
Mesh 6 - 8	3	77,639463	25,879821	1883,323779
Mesh 4 - 6	3	96,132685	32,044228	2891,363410

ANÁLISIS DE VARIANZA (ANOVA)			
Origen de las variaciones	Entre Grupos	Dentro de los grupos	Total
Suma de cuadrados	1654,711761	9549,377966	11204,08973
Grados de libertad	2	6	8
Promedio de los cuadrados	827,355880	1591,562994	
F	0,519838		
Probabilidad	0,619149		
Valor crítico para F	5,143252		

Fuente: elaboración propia.

Debido a que $F < F_{crit}$ se acepta la hipótesis nula, debido a que este resultado indica que no hay un efecto significativo del tamaño de partícula sobre la conversión de las muestras de piedra caliza a cal viva a 60 minutos de calcinación. Por lo menos para estos tamaños de partícula.

A continuación, en la tabla IV, se presentan los F y F_{crit} resultantes para cada uno de los tiempos de calcinación de acuerdo al diseño experimental:

Tabla IV. **Resultados de F y Fcrit para calcinaciones a diferentes tiempos**

Tiempo de Calcinación (minutos)	F	F_{crit}
60	0,51983	5,14325
120	1,01061	5,14325
180	2,33754	5,14325
240	1,13669	5,14325
300	1,01451	5,14325
360	1,01143	5,14325
420	1,02047	5,14325

Fuente: elaboración propia.

De los resultados obtenidos, se acepta la hipótesis nula para todos los tiempos de calcinación. La tabla IV muestra que todos los valores de F tomados durante las corridas son menores que el valor de Fcrit, lo cual se evidencia en las gráficas en donde todas las curvas coinciden a lo largo del ensayo, alcanzando las tres muestras una calcinación completa (arriba del 99 % de conversión de piedra caliza a cal viva).

4. RESULTADOS

Los datos recolectados corresponden a los valores de pérdida de peso de las muestras calcinadas a tiempos determinados, los cuales se pueden visualizar en la tabla V.

Tabla V. **Datos originales de pesos de la caliza durante la calcinación a 850° C a los tiempos estipulados (cada muestra tiene un peso inicial de 10g caliza), en gramos**

Tiempo de tomas de pesos (minutos)	Mesh 8 - 10		
	Peso crisol	7,018	7,016
0	10,011	10,082	10,016
30	7,121	6,895	7,066
60	6,449	6,085	6,208
90	5,934	5,505	5.765
120	5,713	5,496	5,450
150	5,712	5,494	5,407
180	5,712	5,495	5,410
210	5,715	5,494	5,413

Continuación tabla V.

Tiempo de tomas de pesos (minutos)	Mesh 6 - 8		
Peso crisol	16,838	16,837	16,836
0	10,092	10,057	10,186
30	6,645	6,553	6,653
60	5,657	5,357	5,563
90	5,602	5,765	5,470
120	5,604	5,756	5,465
150	5,600	5,757	5,467
180	5,601	5,753	5,466
210	5,602	5,754	5,464

Tiempo de tomas de pesos (minutos)	Mesh 4 - 6		
Peso crisol	30,83	30,877	30,867
0	10,435	10,536	10,027
30	6,220	6,266	5,712
60	5,839	6,089	5,382
90	5,844	5,928	5,381
120	5,851	5,868	5,383
150	5,845	5,868	5,382
180	5,845	5,873	5,380
210	5,846	5,870	5,379

Fuente: elaboración propia.

Tabla VI. **Datos calculados a partir de tabla V durante el tiempo de calcinación**

Muestra 1											
Datos originales				Masa (g)			Porcentajes de masa (%)			Promedio	Desv
Tara	7.02	7.02	7.10							%	%
Masa inicial	10.0	10.1	10.0	10.0	10.1	10.0	100.0	100.0	100.0	100.0	0.0
1	14.1	13.9	14.2	7.1	6.9	7.1	71.1	68.4	70.6	70.0	1.4
2	13.5	13.1	13.3	6.4	6.1	6.2	64.4	60.4	62.0	62.3	2.1
3	13.0	12.5	12.9	5.9	5.5	5.8	59.3	54.6	57.6	57.1	2.4
4	12.7	12.5	12.6	5.7	5.5	5.5	57.1	54.5	54.4	55.3	1.5
5	12.7	12.5	12.5	5.7	5.5	5.4	57.1	54.5	54.0	55.2	1.7
6	12.7	12.5	12.5	5.7	5.5	5.4	57.1	54.5	54.0	55.2	1.6
7	12.7	12.5	12.5	5.7	5.5	5.4	57.1	54.5	54.0	55.2	1.6
Muestra 2											
Datos originales				Masa (g)			Porcentajes de masa (%)			Promedio	Desv
Tara	16.8	16.8	16.8							%	%
Masa inicial	10.1	10.1	10.2	10.1	10.1	10.2	100.0	100.0	100.0	100.0	0.0
1	23.5	23.4	23.5	6.6	6.6	6.7	65.8	65.2	65.3	65.4	0.4
2	22.5	22.2	22.4	5.7	5.4	5.6	56.1	53.3	54.6	54.6	1.4
3	22.4	22.6	22.3	5.6	5.8	5.5	55.5	57.3	53.7	55.5	1.8
4	22.4	22.6	22.3	5.6	5.8	5.5	55.5	57.2	53.7	55.5	1.8
5	22.4	22.6	22.3	5.6	5.8	5.5	55.5	57.2	53.7	55.5	1.8
6	22.4	22.6	22.3	5.6	5.8	5.5	55.5	57.2	53.7	55.5	1.8
7	22.4	22.6	22.3	5.6	5.8	5.5	55.5	57.2	53.6	55.5	1.8

Continúa tabla VI.

Muestra 3											
Datos originales			Masa (g)			Porcentajes de masa (%)			Promedio	Desv	
Tara	30.8	30.9	30.9							%	%
Masa inicial	10.4	10.5	10.0	10.4	10.5	10.0	100.0	100.0	100.0	100.0	0.0
1	37.1	37.1	36.6	6.2	6.3	5.7	59.6	59.5	57.0	58.7	1.5
2	36.7	37.0	36.2	5.8	6.1	5.4	55.9	57.8	53.7	55.8	2.1
3	36.7	36.8	36.2	5.8	5.9	5.4	56.0	56.3	53.7	55.3	1.4
4	36.7	36.7	36.3	5.9	5.9	5.4	56.1	55.7	53.7	55.2	1.3
5	36.7	36.7	36.2	5.8	5.9	5.4	56.0	55.7	53.7	55.1	1.3
6	36.7	36.8	36.2	5.8	5.9	5.4	56.0	55.7	53.7	55.1	1.3
7	36.7	36.7	36.2	5.8	5.9	5.4	100.0	100.0	100.0	100.0	0.0

Fuente: elaboración propia.

Para los cálculos de las conversiones se toma el promedio de los pesos de las tres muestras para cada tiempo, es decir, para cada tiempo de muestreo en las tablas siguientes:

$$W_o = \frac{M1 + M2 + M3}{3}$$

3

Tabla VII. **Datos calculados a partir de la tabla III para conversiones mesh 8-10**

Tiempo de tomas de pesos (minutos)	96,87%				
	Wo	W1	W2	W3	W4
0	10,036	9,722	0,000	0,000	0,0%
60	7,027	6,817	2,906	6,604	67,9%
120	6,247	6,060	0,757	8,323	85,6%
180	5,735	5,563	0,497	9,454	97,2%
240	5,553	5,386	0,176	9,854	101,4%
300	5,538	5,372	0,015	9,888	101,7%
360	5,539	5,373	-0,001	9,885	101,7%
420	5,541	5,374	-0,002	9,881	101,6%

Fuente: elaboración propia.

Tabla VIII. **Datos calculados a partir de la tabla III para conversiones mesh 6-8**

Tiempo de tomas de pesos (minutos)	96,87%				
	Wo	W1	W2	W3	W4
0	10,112	9,795	0,000	0,000	0,0%
60	6,617	6,418	3,377	7,674	78,3%
120	5,526	5,360	1,059	10,080	102,9%
180	5,612	5,444	-0,084	9,889	101,0%
240	5,608	5,440	0,004	9,898	101,0%
300	5,608	5,440	0,000	9,899	101,1%

Continúa tabla VIII.

360	5,607	5,438	0,001	9,902	101,1%
420	5,607	5,438	0,000	9,902	101,1%

Fuente: elaboración propia.

Tabla IX. **Datos calculados a partir de la tabla III para conversiones mesh 4-6**

Tiempo de tomas de pesos (minutos)	96,87%				
	W ₀	W ₁	W ₂	W ₃	W ₄
0	10,333	10,009	0,000	0,000	0,0%
60	6,066	5,884	4,125	9,376	93,7%
120	5,770	5,597	0,287	10,028	100,2%
180	5,718	5,546	0,051	10,143	101,3%
240	5,701	5,530	0,016	10,181	101,7%
300	5,698	5,527	0,002	10,186	101,8%
360	5,699	5,528	-0,001	10,184	101,7%
420	5,698	5,527	0,001	10,186	101,8%

Fuente: elaboración propia.

Donde:

- W₀ = Peso de caliza a un tiempo X
- W₁ = Peso de CaCO₃ presente en la muestra original
- W₂ = Peso de CO₂ liberado hasta ese momento
- W₃ = Peso de CaCO₃ que se ha disociado hasta ese momento
- W₄ = Porcentaje de conversión de caliza a cal viva hasta ese momento

Se repetirán estos cálculos para cada muestra acorde a los tamaños de partícula trabajadas. Esto con el fin de calcular el porcentaje de conversión de cada muestra a los tiempos y temperatura indicados.

4.1. Cálculo de W1 - Para obtener el peso original del CaCO₃ en una muestra trabajada (W1)

$$W1 = W_0 * \% \text{ Contenido de CaCO}_3 \text{ (según certificado de calidad de caliza)}$$

4.2. Cálculo de W2 - Para calcular el peso de CO₂ liberado a tiempo n

$$W_{2n} = W_{on-1} - W_{on}$$

4.3. Cálculo de W3 - Para calcular el peso de CaCO₃ que se ha disociado a un tiempo n

De la ecuación estequiométrica de la reacción se tiene:



Y se establece la relación molar de 1 : 1 :1 entre el carbonato de calcio, el óxido cálcico y el dióxido de carbono.

Sabiendo que los pesos molares son:

- CaCO₃ = 100 g
- CaO = 56 g y,
- CO₂ = 44 g

$$W3_n = \frac{W2_n \text{ g de CO}_2}{44 \text{ g / mol CO}_2} * \frac{1 \text{ mol de CaCO}_3 \text{ disociado}}{1 \text{ mol de CO}_2 \text{ liberado}} * \frac{100 \text{ g de CaCO}_3}{1 \text{ mol de CaCO}_3}$$

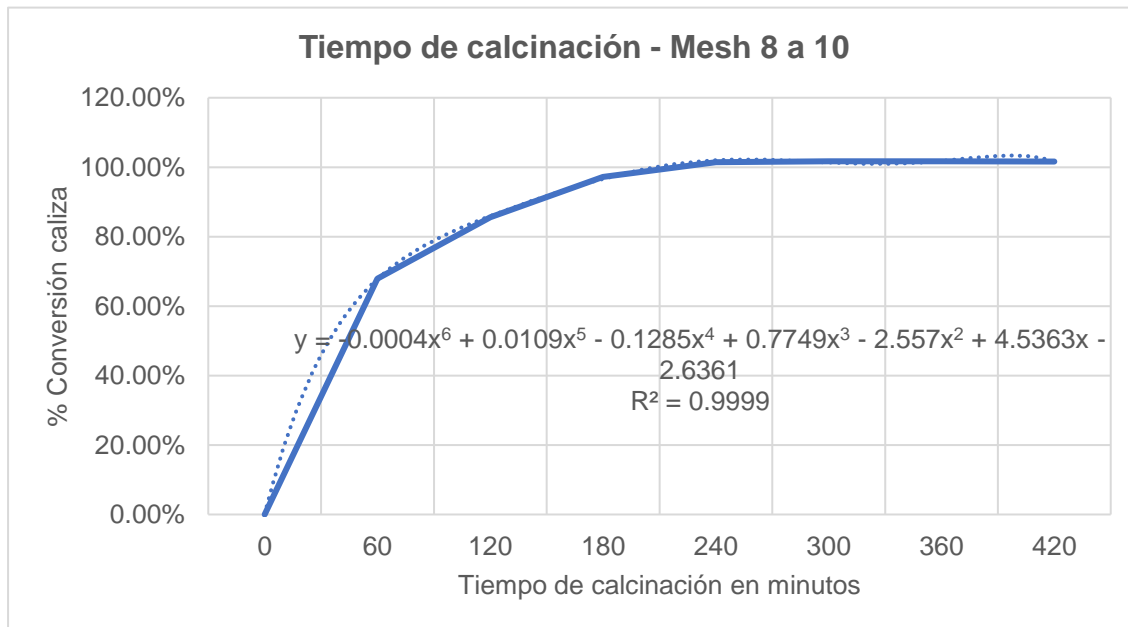
4.4. Cálculo de W4 - Porcentaje de conversión de caliza a cal viva a un tiempo n

$$W4_n = \frac{W3_n}{W1} * 100$$

4.5. Gráficas de resultados

A continuación, en las figuras 2, 3, 4 y 5, se muestran gráficamente los resultados obtenidos de las calcinaciones para cada tamaño de partícula.

Figura 2. Conversión de piedra caliza a cal viva para partículas entre 2,00 a 2,38 mm (mesh 8 – 10)



Fuente: elaboración propia.

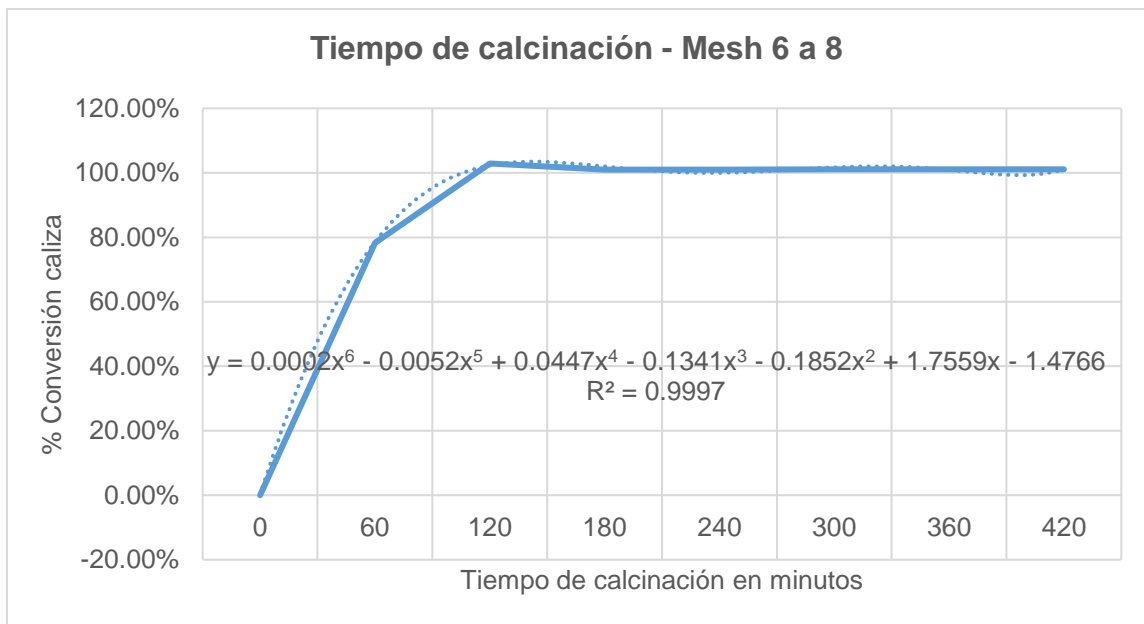
Los resultados indican una correlación de sexto orden con una regresión R² de 0,9999.

Ecuación 1: $y = -0.0004x^6 + 0.0109x^5 - 0.1285x^4 + 0.7749x^3 - 2.557x^2 + 4.5363x - 2.6361$

Donde:

- x es el tiempo de calcinación en minutos
- y es el porcentaje de conversión

Figura 3. **Conversión de piedra caliza a cal viva para partículas entre 2,38 y 3,33 mm (mesh 6 – 8)**



Fuente: elaboración propia.

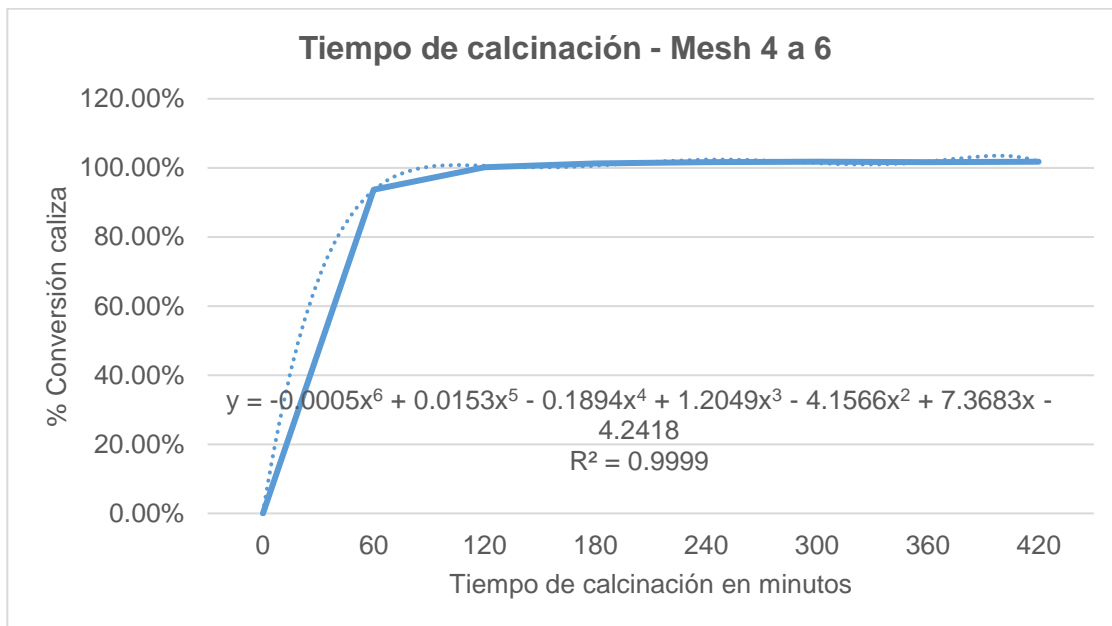
Los resultados indican una correlación de sexto orden con una regresión R² de 0,9997.

Ecuación 2: $y = 0.0002x^6 - 0.0052x^5 + 0.0447x^4 - 0.1341x^3 - 0.1852x^2 + 1.7559x - 1.4766$

Donde:

- x es el tiempo de calcinación en minutos
- y es el porcentaje de conversión

Figura 4. **Conversión de piedra caliza a cal viva para partículas entre 3,33 y 4,76 mm (mesh 4 – 6)**



Fuente: elaboración propia.

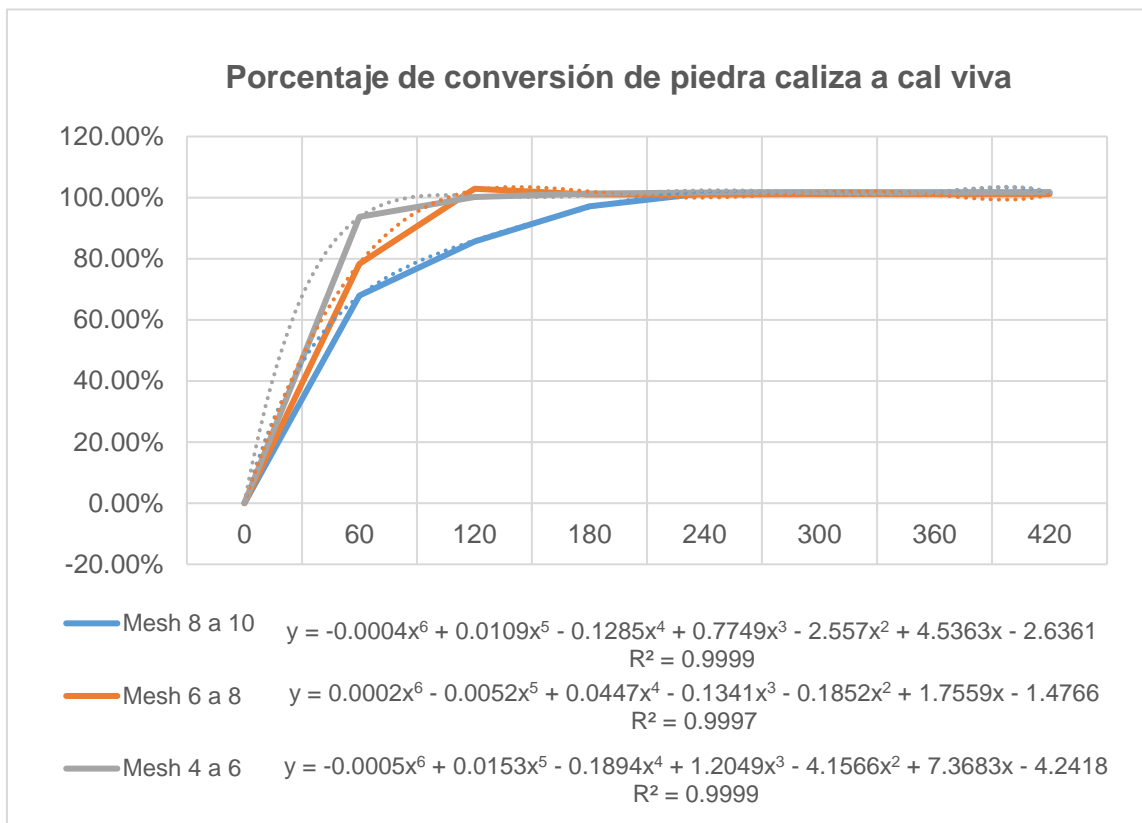
Los resultados indican una correlación de sexto orden con una regresión R^2 de 0,9999.

Ecuación 3: $y = -0.0005x^6 + 0.0153x^5 - 0.1894x^4 + 1.2049x^3 - 4.1566x^2 + 7.3683x - 4.2418$

Donde:

- x es el tiempo de calcinación en minutos
- y es el porcentaje de conversión

Figura 5. **Conversión de piedra caliza a cal viva versus tiempo para partículas del mesh 8 – 10, mesh 6 – 8 y mesh 4 – 6**



Fuente: elaboración propia.

Las tendencias son el resultado de las correlaciones polinómicas de sexto grado para cada una de las corridas, utilizando diferentes tamaños de partículas: mesh 8 – 10, mesh 6- 8 y mesh 4 – 6, respectivamente.

5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

El objetivo principal de esta investigación es determinar el efecto del tamaño de partícula sobre la cinética de la reacción química del proceso de calcinación de piedra caliza con alto grado de pureza a cal viva bajo ciertas condiciones de laboratorio. Se trabajó con tres tamaños de partículas: mesh 8 – 10, mesh 6 – 8 y mesh 4 – 6, trabajando con una temperatura de calcinación de 850 °C y un tiempo de calcinación de 7 horas. Para cada tamaño de partícula se hicieron tres corridas o muestras, siendo la única variante el tamaño de partícula.

Las muestras fueron obtenidas de la empresa Cementos Progreso S.A., que proporcionó un análisis de composición químico, mientras las pruebas se llevaron a cabo en el Laboratorio de Química del Centro de Investigaciones de la Facultad de Ingeniería.

Los resultados obtenidos para las tres pruebas tienen una correlación matemática de sexto grado. Esto indica que en la calcinación de cada grupo de muestras se obtiene el mismo comportamiento, pero a diferentes velocidades de descomposición. Esto era de esperar, ya que todas las muestras provienen de la misma fuente de piedra, con el tamaño de partícula como la única variable.

El comportamiento de la velocidad de descomposición fue tal que después de la primera hora de calcinación todas las muestras ya habían alcanzado una descomposición superior al 60 %, y después de la segunda hora de calcinación dos grupos de muestras ya habían alcanzado prácticamente una descomposición total, mientras el tercer grupo ya había alcanzado una descomposición superior al 80 % y después de tres horas de calcinación todas las muestras ya habían alcanzado prácticamente la calcinación completa.

El factor principal para la descomposición en tres horas de todas las muestras es el sometimiento de estas con tamaños de partícula pequeña a la temperatura de calcinación. Se considera que 850 °C era una temperatura elevada que permitió una calcinación en menos de la mitad del tiempo esperado, influenciado por el tamaño de partícula según el diseño experimental y aunque no era necesario, las pruebas se llevaron a cabo por siete horas según el diseño.

El proceso de calcinación de piedra caliza a cal viva es un proceso cuyos factores principales son: el tipo de piedra caliza, el tamaño de partícula, la temperatura de calcinación, el tiempo de calcinación y la aireación de la cámara de calcinación para liberar el dióxido de carbono que se va formando. Tal como se vió, debido a que las muestras provienen de la misma roca proporcionada por la empresa cementera, era de esperar que las tendencias de las calcinaciones sean similares, ya que las composiciones de las muestras eran iguales. Esto es porque el carbonato de calcio y el carbonato de magnesio tienen diferentes temperaturas de descomposición térmica, pero siendo todas las partículas con composición igual, este factor no influyó.

El tamaño o diámetro de partícula es muy importante porque influye en la velocidad de transferencia de calor de la superficie de la partícula hacia su centro. Mientras mayor es el diámetro de partícula, mayor es la dificultad con la que el calor llega a la zona de reacción. Además de esto, también es cierto que mientras mayor sea el diámetro, más difícil será para la liberación del dióxido de carbono de la zona de reacción hacia la superficie de la partícula.

La temperatura de calcinación es quizá el factor más importante entre las variables a considerar. Aunque la temperatura de descomposición de carbonato de calcio y del carbonato de magnesio son diferentes, la calcinación se practica a temperaturas altamente suficientes para descomponer ambas moléculas.

Para este trabajo, se tomó la temperatura de 850° C con base en estudios realizados anteriormente sobre el tema. Debido a que todas las muestras llegaron a una descomposición total a las tres horas de calcinación, se considera que una temperatura de 750° C habría sido mejor para este estudio con estos tamaños de partícula, y verificar si a menor tamaño de partícula hay ahorros energéticos que compensen el costo mecánico de reducción de tamaños de la piedra caliza. Por otra parte, también puede realizarse el mismo estudio con tamaños de partícula más representativos en su diferencia de tamaño.

La aireación de la mufla se hizo de acuerdo a los intervalos definidos en el diseño experimental y, por lo tanto, no se considera que este factor haya influenciado en los resultados. Los datos calculados arrojan resultados por lo general esperados, según la teoría sobre la calcinación.

Sin embargo, en algunas mediciones se obtienen descomposiciones mayores al 100 % teórico respecto al valor de la composición química de pureza esperada, lo cual se atribuye a que el dato de CaCO₃ indicado en el análisis representa un valor representativo de la muestra original, que fue de aproximadamente 1000gr y de ella se tomó una cantidad de 10 gr para desarrollar el ensayo. El valor máximo de conversión obtenido fue de 101,8 %, lo que, considerando el valor del análisis de composición de 96,87 %, indica que el 101,8 % de conversión equivale a un valor de 98,6 % de composición de CaCO₃ en las muestras, lo cual es factible.

Como es de esperar, todas las correlaciones son polinomios que tienden hacia una asíntota. Esto es porque el proceso de calcinación es reversible debido a la carbonatación. Este proceso se da cuando las moléculas de dióxido de carbono liberadas en la zona de reacción vuelven a adherirse al óxido de calcio

para volver a formar carbonato de calcio. Este fenómeno se da tanto a nivel industrial como a nivel de laboratorio.

Un resultado sorprendente que se obtuvo es que las muestras de mayor tamaño llegaron a la descomposición más rápidamente que las partículas de menor tamaño. Aunque este resultado se nota en las gráficas y sus correlaciones matemáticas, el análisis estadístico arroja que no existe diferencia significativa entre estos resultados. Esto quiere decir que, estadísticamente, la velocidad de descomposición para los tres tamaños de partículas estudiadas no es afectada por el tamaño de las partículas a la temperatura del trabajo. Por lo tanto, se acepta la hipótesis nula de que para tamaño de partícula de mesh 4 a 6, mesh 6 a 8 y mesh 8 a 10, estas tienen la misma velocidad de descomposición a una temperatura de calcinación de 850° C.

Mesh 4 a 6 son partículas de diámetro promedio de 3,35 a 4,76 mm, mesh 6 a 8 son partículas de diámetro promedio de 2,38 a 3,35 mm, mientras que mesh 8 a 10 son partículas con diámetro promedio de 2,00 a 2,38 mm. El análisis estadístico de los resultados obtenidos en este estudio indica que no hay diferencia estadística en la velocidad de conversión de piedra caliza a cal viva entre partículas de diámetro promedio de 2,00 mm y 4,76 mm.

Aunque se puede decir que una partícula de 4,76 mm es más del doble en diámetro que una partícula de 2,00 mm, este rango de diferencia no es suficiente para tener un mayor efecto sobre la velocidad de transferencia de calor de sus superficies hacia sus centros (zona de reacción), ni sobre la velocidad de liberación de dióxido de carbono de la zona de reacción hacia la superficie de las partículas, en la descomposición de piedra caliza a cal viva a una temperatura de calcinación de 850° C.

CONCLUSIONES

1. Para partículas de mesh 4 a 6, 6 a 8 y 8 a 10, el tamaño de partícula no afecta la velocidad de conversión de piedra caliza a cal viva, bajo las condiciones de este trabajo de investigación.
2. La correlación entre conversión de piedra caliza a cal viva y el tiempo de calcinación, para una temperatura de 850°C, se puede expresar por polinomios de sexto grado para partículas comprendidas entre el mesh 4 al mesh 10.
3. Para tamaños de partícula de piedra caliza entre mesh 4 y mesh 10 la velocidad de reacción de calcinación a 850°C aumenta, reduciendo el tiempo del proceso.

RECOMENDACIONES

1. Para trabajos de estudio del proceso de calcinación utilizando caliza de alta pureza y tamaños de partícula pequeñas, se recomienda trabajar a una temperatura menor que 850° C para poder determinar una tendencia a largo plazo.
2. Para estudios a nivel de laboratorio se recomienda trabajar con muestras de mayor diferencia en diámetro que las utilizadas en este estudio, para determinar si existe una variación en la velocidad de conversión con partículas de mayores diámetros.
3. Realizar un estudio sobre la termodinámica de la hidratación de cal viva a nivel de laboratorio.

BIBLIOGRAFÍA

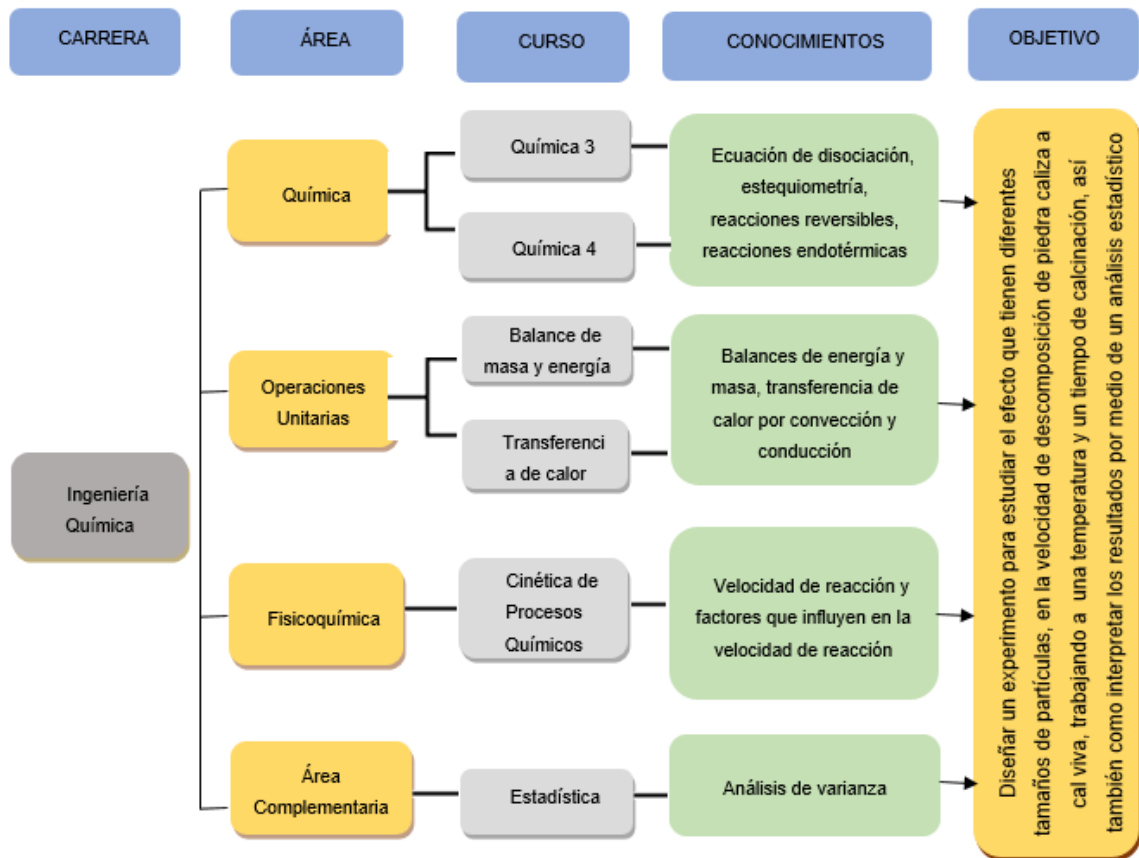
1. BOYNTON, Robert. *Chemistry and technology of lime and limestone*. 2da Edición. U.S.A.: Editorial John Wiley @ Sons. 1980. 592 p.
2. Caleras San Juan. Calcinación de caliza. [en línea].
<https://www.google.com.gt/search?q=CALCINACION+DE+CALIZA&oq=CALCINACION+DE+CALIZA&aqs=chrome..69i57.6902j0j8&sourceid=chrome&es_sm=93&ie=UTF-8>. [Consulta: 13 de marzo de 2017].
3. Wikipedia. Hidróxido de calcio. [en línea].
<https://en.wikipedia.org/wiki/Calcium_hydroxide>. [Consulta: 14 de marzo de 2017].
4. MAY CARILLO, José Gabriel. *Evaluación de la eficiencia de la conversión de piedra caliza a cal viva por efecto de incorporación de carbón vegetal, mediante el procesamiento a diferentes tamaños de partícula, tiempos de calcinación y porcentajes de carbón agregados para una presión de 640 mm Hg y una temperatura de 750o C*. Trabajo de graduación de Licenciatura en Ingeniería Química. Universidad San Carlos de Guatemala. 1997. 66 p
5. PÉREZ OROZCO, Edy. *Evaluación a nivel de laboratorio del efecto en el grado de conversión de piedra caliza a cal viva por la adición de tres tipos de carbón vegetal con diferente poder calorífico, realizada a diferentes temperaturas y tiempos de calcinación para una presión*

atmosférica de 640 mm Hg. Trabajo de graduación de Licenciatura en Ingeniería Química. Universidad San Carlos de Guatemala. 1991. 56 p.

6. QUIÑÓNEZ FERNÁNDEZ, Henry Estuardo. *Evaluación de la cinética de reacción de conversión de piedra caliza a cal viva por efecto de tres temperaturas, utilizando un tamaño de partícula y un tiempo determinado a 640 mm hg de presión barométrica a nivel laboratorio.* Trabajo de graduación de Licenciatura en Ingeniería Química. Universidad San Carlos de Guatemala. 2015. 70 p.

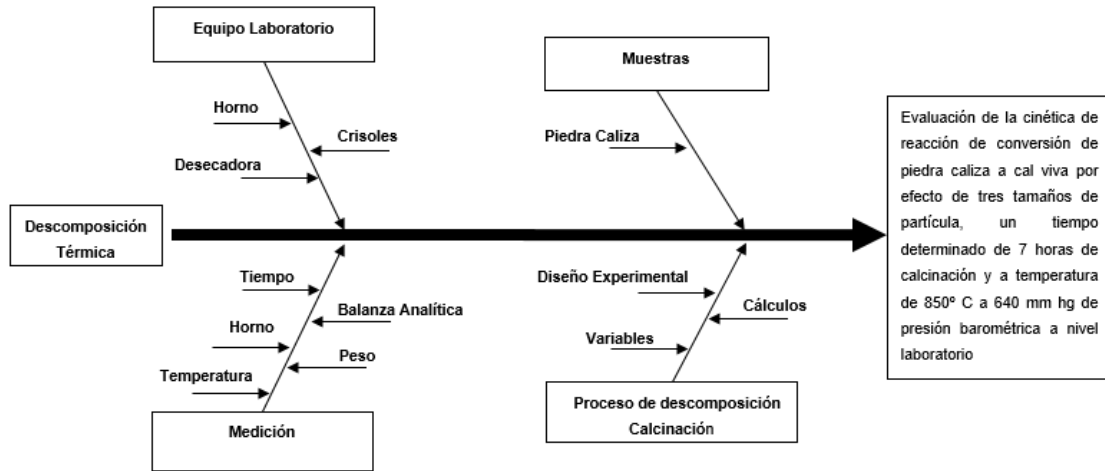
APÉNDICES

Apéndice 1: **Tabla de requisitos académicos**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2: Diagrama de Ishikawa



Fuente: elaboración propia.