PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
Biblioteca Central

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA

EVALUACION DE LA EFICIENCIA DE LA CONVERSION DE PIEDRA CALIZA A CAL VIVA POR EFECTO DE INCORPORACION DE CARBON VEGETAL, MEDIANTE EL PROCESAMIENTO A DIFERENTES TAMAÑOS DE PARTICULA, TIEMPOS DE CALCINACION Y PORCENTAJES DE CARBON AGREGADOS PARA UNA PRESION DE 640 mm Hg Y UNA TEMPERATURA DE 750 °C.

TESIS

PRESENTADA A LA JUNTA DIRECTIVA

DE LA

FACULTAD DE INGENIERIA

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS

POR

JOSE GABRIEL MAY CARRILLO

PREVIO A OPTAR AL TITULO DE

INGENIERO QUIMICO

GUATEMALA, FEBRERO DE 1,997

PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
Biblioteca Central

T(3910)
C.4

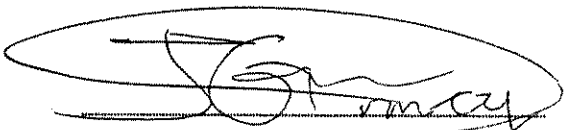
HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con lo establecido por la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, tengo a honra someter a vuestra consideración mi trabajo de tesis intitulado:

EVALUACION DE LA EFICIENCIA DE LA CONVERSION DE PIEDRA CALIZA A CAL VIVA POR EFECTO DE INCORPORACION DE CARBON VEGETAL, MEDIANTE EL PROCESAMIENTO A DIFERENTES TAMAÑOS DE PARTICULA, TIEMPOS DE CALCINACION Y PORCENTAJES DE CARBON AGREGADOS PARA UNA PRESION DE 640 mm Hg Y UNA TEMPERATURA DE 750 °C.

Tema que me fuera asignado por la Dirección de Escuela de Ingeniería Química

Guatemala, febrero de 1,997



JOSE GABRIEL MAY CARILLO

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA

MIEMBROS DE LA JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Herbert René Miranda Barrios
Vocal 1o.	Ing. Miguel Angel Sánchez Guerra
Vocal 2o.	Ing. Jack Douglas Ibarra Solórzano
Vocal 3o.	Ing. Juan Adolfo Echeverría Méndez
Vocal 4o.	Br. Víctor Manuel Lobos Aldana
Vocal 5o.	Br. Wagner Gustavo López Cáceres
SECRETARIA	Lic. Gilda Marina Castellanos de Illescas

TRIBUNAL QUE PRACTICO EL EXAMEN
GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Julio Isamael González Podszueck
EXAMINADOR	Ing. Julio Rivera
EXAMINADOR	Ing. Julio Chávez
EXAMINADOR	Ing. Rodolfo Espinoza
SECRETARIO	Ing. Francisco Javier González López

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA

FACULTAD DE INGENIERIA

Escuelas de Ingeniería Civil, Ingeniería Mecánica Industrial, Ingeniería Química, Ingeniería Mecánica Eléctrica, Técnica y Regional de Post-grado de Ingeniería Sanitaria.

Ciudad Universitaria, Zona 12
Guatemala, Centroamérica

Guatemala, 27 de julio de 1995.

Dr. Adolfo Gramajo
Director de la Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería
Presente.

Dr. Gramajo:

Por este medio informo a usted que he asesorado el trabajo de tesis del estudiante José Gabriel May C., intitulado: "EVALUACION DE LA EFICIENCIA DE LA CONVERSION DE PIEDRA CALIZA A CAL VIVA POR EFECTO DE LA INCORPORACION DE CARBON VEGETAL, MEDIANTE EL PROCESAMIENTO A DIFERENTES TAMAÑOS DE PARTICULA, TIEMPOS DE CALCINACION Y PORCENTAJES DE CARBON AGREGADOS PARA UNA PRESION DE 640 mm Hg Y UNA TEMPERATURA DE 750 °C"; estudio que me parece satisfactoriamente desarrollado y cuya aprobación, impresión y divulgación me permito recomendar.

Agradeciendo de antemano su atención, me es grato suscribirme de usted,

Atentamente.

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"

Ing. Q. César Alfonso García G.
ASESOR
COLEGIADO No. 145

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA

FACULTAD DE INGENIERIA

Escuelas de Ingeniería Civil, Ingeniería Mecánica Industrial, Ingeniería Química, Ingeniería Mecánica Eléctrica, Técnica y Regional de Post-grado de Ingeniería Sanitaria.

Ciudad Universitaria, Zona 12
Guatemala, Centroamérica

Guatemala, 17 de agosto de 1995.

Dr. Adolfo Gramajo
Director de la Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería
Presente.

Dr. Gramajo:

Por este medio me permito hacer de su conocimiento que he revisado el trabajo de tesis, intitulado: "EVALUACION DE LA EFICIENCIA DE LA CONVERSION DE PIEDRA CALIZA A CAL VIVA POR EFECTO DE LA INCORPORACION DE CARBON VEGETAL, MEDIANTE EL PROCESAMIENTO A DIFERENTES TAMAÑOS DE PARTICULA, TIEMPOS DE CALCINACION Y PORCENTAJES DE CARBON AGREGADOS PARA UNA PRESION DE 640 mm Hg Y UNA TEMPERATURA DE 750 °C", desarrollado por el estudiante José Gabriel May C. para optar al título de Ingeniero Químico.

Así mismo, informo a usted que estoy completamente de acuerdo con el desarrollo de dicho trabajo, y por lo tanto, procedo a la autorización del mismo.

Agradeciendo su atención, quedo de usted,

Atentamente.

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"

Ing. Q. Telma Maricela Cano M.
REVISORA
COLEGIADA No. 433

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA

FACULTAD DE INGENIERIA

Escuelas de Ingeniería Civil, Ingeniería Mecánica Industrial, Ingeniería Química, Ingeniería Mecánica Eléctrica, Técnica y Regional de Post-grado de Ingeniería Sanitaria.

Ciudad Universitaria, zona 12
Guatemala, Centroamérica

El Director de la Escuela de Ingeniería Química; Dr. Adolfo Gramajo, depúes de conocer el dictamen del Asesor con el Visto Bueno del Jefe de Departamento, al trabajo de tesis del estudiante **JOSE GABRIEL MAY** titulado: **EVALUACION DE LA EFICIENCIA DE LA CONVERSION DE PIEDRA CALIZA A CAL VIVA POREFECTO DE INCORPORACION DE CARBON VEGETAL, MEDIANTE EL PROCESAMIENTO A DIFERENTES TAMAÑOS DE PARTICULA, TIEMPOS DE CALCINACION Y PORCENTAJES DE CARBON AGREGADOS PARA UNA PRESION DE 640 mmHg Y UNA TEMPERATURA DE 750 ^{o}C,** procede a la autorización del mismo.

Dr. Adolfo Gramajo
DIRECTOR
ESCUELA INGENIERIA QUIMICA

FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA
INGENIERIA QUIMICA
U. S. A. C.

Guatemala, febrero de 1,996.

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA

FACULTAD DE INGENIERIA

Escuelas de Ingeniería Civil, Ingeniería Mecánica Industrial, Ingeniería Química, Ingeniería Mecánica Eléctrica, Técnica y Regional de Post-grado de Ingeniería Sanitaria.

Ciudad Universitaria, zona 12
Guatemala, Centroamérica

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la autorización por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al trabajo de tesis titulado: EVALUACION DE LA EFICIENCIA DE LA CONVERSION DE PIEDRA CALIZA A CAL VIVA POR EFECTO DE INCORPORACION DE CARBON VEGETAL, MEDIANTE EL PROCESAMIENTO A DIFERENTES TAMAÑOS DE PARTICULA, TIEMPOS DE CALCINACION Y PORCENTAJES DE CARBON AGREGADOS PARA UNA PRESION DE 640 mm Hg Y UNA TEMPERATURA DE 750 °C; del estudiante José Gabriel May, procede a la autorización de la misma.

IMPRIMASE:

Ing. Herbert Rehé Miranda Barrios
DECANO

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERIA
DECANO

Guatemala, febrero de 1,997.

DEDICATORIA:

A DIOS: Por todas las bendiciones que me ha dado a lo largo de mi vida.

A MIS PADRES: Joseito May, quien en vida inculcó en mi todos los valores y virtudes que me han hecho lo que soy.

Rosenda Carrillo de May, por todo su amor y apoyo a los largo de mi vida.

A MIS HERMANOS: Rosita, Eberto, Silvia, Noemí, Carlos, Amalia, Raúl, Anabertha y Martha, por su apoyo incondicional.

A MIS HIJOS: Venecia Joanne y Marco José, por ser el amor más puro y razón de mi vida.

A MI ESPOSA: Anelie Lenita Rodríguez, por todo el amor, apoyo y felicidad que me ha dado.

A MIS COMPAÑEROS, en especial a Isabel Girón, Mario Morales, Ricardo De León Régil, Sandino Collado, Saúl Morales, John Uribe, Walter Cobón, Ronald Monzón, Angel Coyoy.

A MIS AMIGOS: Luis Escobedo y Nery Zunúm.

AGRADECIMIENTOS:

Reciban mis sinceros agradecimientos aquellas personas que colaboraron de una u otra forma en la realización de este trabajo de investigación, especialmente:

Ing. César Alfonso García Guerra, por su valiosa asesoría y apoyo en la realización de este trabajo.

Ing. Telma Maricela Cano Morales, por la valiosa revisión de este trabajo.

Ing. Byron René Aguilar Uck, por toda su ayuda en la elaboración de gráficas y presentación final.

Al personal del Laboratorio de Investigación del Ministerio de Energía y Minas.

A la Universidad de San Carlos

y

A Guatemala.

INDICE

	CONTENIDO	PAGINA
	Sumario	1
	Introducción	3
I	Objetivos	4
II	Hipótesis	5
III	Antecedentes	7
IV	Justificaciones	20
V	Metodología	22
VI	Análisis Estadístico	26
VII	Resultados y Discusión	28
	Conclusiones	35
	Recomendaciones	36
	Referencias	38
	Apéndice	
	Guía de cálculo	39
	Tablas	43
	Gráficas	51

SUMARIO

En este trabajo de tesis, se determinaron las condiciones óptimas para el proceso de calcinación de caliza a cal viva, a nivel de laboratorio, en cuanto a los factores de tiempo de calcinación, tamaño de partícula y porcentaje de carbón vegetal de alto poder calorífico adicionado como coadyuvante energético.

La piedra caliza utilizada en el trabajo experimental es de alto grado de pureza (96.58%), y el carbón vegetal es de alto poder calorífico. Para cumplir con los objetivos de este trabajo, se tomaron como variables tres tiempos de proceso: 3, 5 y 7 horas, dos tamaños de partícula: 3.36-4.76 mm y 2.38-3.36 mm, y dos porcentajes de carbón vegetal: 5 y 10% en peso con poder calorífico de 7,563.89 kcal/kg en base seca.

Para el modelo experimental, se utilizó un modelo de bloques completamente al azar que consiste de doce tratamientos con tres repeticiones; la variable respuesta es el porcentaje de conversión de piedra caliza a cal viva. Los resultados se basaron en el promedio de las tres repeticiones.

El análisis estadístico consistió en la prueba de varianzas de Fischer y para los casos en los cuales se encontraron diferencias significativas se aplicó la prueba de medias múltiples de Duncan. El tratamiento óptimo resultó

ser el de 5 hr, 3.36-4.76 mm y 5% carbón vegetal, para una temperatura de 750 °C, correspondiente al tratamiento C1T2M2, en el cual se obtuvo una conversión del 97.37%.

INTRODUCCION

El presente trabajo de tesis busca ampliar la información técnica en cuanto a las variables de control para el proceso de calcinación.

Aunque la eficiencia de la conversión de caliza a cal viva depende de muchos factores, el presente estudio tendrá como variables el tiempo de calcinación, el porcentaje de carbón como coadyuvante energético y el tamaño de partícula; la temperatura de calcinación se fija en un valor determinado y se utiliza solamente un tipo de carbón. La temperatura de calcinación para este trabajo es un resultado de estudios anteriores sobre el tema, así como el tipo de carbón: se utiliza el de mayor poder calorífico.

El trabajo se hará con la finalidad de encontrar la combinación óptima de parámetros que proporcione la mejor conversión de caliza a cal viva.

La consideración de la utilización de carbón vegetal es debido a que su combustión es altamente exotérmica y por lo tanto se busca aprovechar esta energía, al determinar la cantidad óptima de carbón requerido para un alto grado de conversión.

UNIVERSIDAD DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
Biblioteca Central

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar la eficiencia de conversión de piedra caliza a cal viva en un proceso de calcinación a una temperatura de 750°C, en función del tiempo, tamaño de partícula y porcentaje de carbón vegetal como aditivo.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1.2.1 Determinar la conversión máxima de caliza a cal viva en función del tiempo de calcinación, trabajando con tres tiempos: 3, 5 y 7 horas.

1.2.2 Determinar la conversión máxima de caliza a cal viva en función del tamaño de partícula, trabajando entre dos rangos: 3.36-4.76 mm y 2.38-3.36 mm.

1.2.3 Determinar la conversión máxima de caliza a cal viva en función del porcentaje de carbón vegetal adicionado, trabajando con dos porcentajes: 5 y 10% en peso.

2. HIPOTESIS

Existe diferencia significativa en el grado de conversión de caliza a cal viva, trabajando a una temperatura óptima en función del tiempo de calcinación, tamaño de partícula y porcentaje de carbón vegetal como coadyuvante energético.

HIPOTESIS ESTADISTICA

Ho : Existe diferencia significativa en el grado de conversión de caliza a cal viva, trabajando a una temperatura óptima de 750°C con carbón de máximo poder calorífico a diferentes tiempos, tamaño de partícula y porcentaje de carbón como aditivo.

Ha : No existe variación significativa.

3. ANTECEDENTES

3.1 GENERALIDADES

La cal viva es el producto de la conversión de la caliza, una calcárea estratificada compuesta principalmente del mineral calcita, por medio del proceso de la calcinación. La caliza se encuentra en la naturaleza en distintos grados de pureza; esto es, respecto al porcentaje del carbonato de calcio en su composición. Cuando el carbonato de calcio se encuentra en una proporción mayor que el 95%, se dice que la piedra es rica en calcio; si el carbonato de magnesio está en proporción mayor que el 5%, se dice que la piedra es magnesiana. Una caliza que contenga entre 30 y 45% de magnesio se clasifica como dolomítica. Se dice que ésta está compuesta del mineral dolomítica (carbonato doble de calcio y magnesio - $CaCO_3.MgCO_3$), que contiene aproximadamente 46% de magnesio.

A partir de la caliza se pueden obtener tres productos principales: cal viva, cal hidratada o cal hidráulica.

La cal viva se obtiene por medio de la descomposición térmica de la caliza (bajo condiciones controladas de temperatura), desprendiéndose dióxido de carbono y produciéndose los óxidos de calcio y magnesio.

La cal hidratada se obtiene por medio del proceso de apagado de la cal. Tratando la cal viva con suficiente agua

para satisfacer su afinidad química por el agua en la condición de hidratación, se obtiene un polvo seco llamado cal hidratada. Dado que la mayoría de la cal viva producida es dolomítica, el grado de hidratación también varía porque el MgO tiene poca afinidad química por el agua. Por lo tanto, si el proceso de apagado se lleva a cabo bajo condiciones normales, se obtiene una cal hidratada normal (h.n.) compuesta de hidróxido de calcio, óxido de magnesio y un poco de hidróxido de magnesio (ref. 1). Con presiones más altas o tiempos de retención más largos a la presión atmosférica, se obtiene una mayor conversión de MgO a $Mg(OH)_2$ y por lo tanto se llama "cal hidratada a presión" (h.p.) o cal muy hidratada.

La cal hidráulica es un producto cementicio producido al calcinar una caliza que contiene grandes cantidades de sílice y aluminio, suficientes para que el material fragüe y se endurezca debajo del agua (ref. 3).

3.2 PROPIEDADES FISICAS DE LA CALIZA Y LA CAL

En cuanto a las propiedades de la caliza, éstas dependen del grado de pureza del mineral; mientras que las propiedades de la cal depende de las condiciones de la calcinación.

3.2.1 Color

El color de las calizas depende del grado de impurezas contenidas. Si son puras, las calizas ricas en calcio y dolomíticas son blancas, pero generalmente su color varía entre el gris y el negro a consecuencia de las impurezas carbonosas que contienen. Las cales comerciales tienen color blanco o débilmente gris; a veces tienen un tono rojizo debido al óxido de hierro.

3.2.2 Resistencia

La resistencia de la caliza a la compresión o aplastamiento oscila entre 98.4 y 583.5 Kg/cm^2. Esta resistencia excede mucho a la compresión a que se somete las piedras. Como piedra de cantería, la resistencia de la caliza es una propiedad importante.

3.2.3 Densidad

Para las calizas, la densidad depende del contenido de humedad, la textura y porosidad de la piedra. La densidad de las cales depende de su origen, estructura, porosidad y temperatura de calcinación. Cuanto más alta sea la temperatura de calcinación, tanto mayor será la densidad de la cal viva producida (ref. 1).

TABLA No. 1		
	DENSIDAD RELATIVA	
	RICAS EN CALCIO	DOLOMITICAS
Calizas	2.65 - 2.75	2.80 - 2.90
Cales:		
Cales vivas	3.20 - 3.40	3.20 - 3.40
Cales hidratadas	2.30 - 2.40	2.70 - 2.90 (h.n.) 2.40 - 2.60 (h.p.)

3.2.4 Textura, dureza y porosidad

La textura se refiere al tamaño, la uniformidad y la disposición de sus granos. Por medio de análisis espectral con rayos X, se ha comprobado que la caliza tiene textura cristalina.

La dureza de la caliza es una propiedad importante, dado que influye en la facilidad para trabajarla y se ha comprobado que la dureza de la piedra depende de la textura y dureza de las impurezas presentes (ref. 1).

La porosidad se define como el porcentaje del espacio ocupado por los poros en referencia al volumen total de la roca, y se ha encontrado que es una propiedad muy variable. En las calizas comerciales, esta propiedad varía entre 0.5 y 5%. Dado que la porosidad causa infiltración de agua, afecta la duración de la piedra. La dureza de la cal viva depende de la pureza de la caliza y de la temperatura de calcinación; una

PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
Biblioteca Central

caliza impura da una cal dura si se calcina a temperatura elevada.

3.2.5 Plasticidad

Esta se refiere a la capacidad de una masa de cal para cambiar su forma cuando se le somete a presión, sin que se produzca la ruptura y para retener la forma alterada. Las cales que tienen una plasticidad mayor de 200 medidas con el plasticímetro de Emley sirven para la mayoría de las aplicaciones de la construcción (ref. 1).

3.2.6 Resistividad eléctrica

La cal tiene una resistividad de 71 * 10^{9} ohms/cm a 15 °C declinando a 91 ohms/cm a 146 °C; cuando hay presencia de nitrógeno, baja esta valuación (ref. 5).

3.2.7 Conductividad térmica

Para la cal viva, está estimado entre 0.0015 y 0.002 cal/cm^{3}.seg.°C (ref. 5).

3.2.8 Capacidad calorífica

Para caliza pura, Cp = 0.255 Btu/lb caliza.°F

Para caliza dolomítica Cp = 0.2053 Btu/lb caliza. °F

3.2.9 Solubilidad y pH

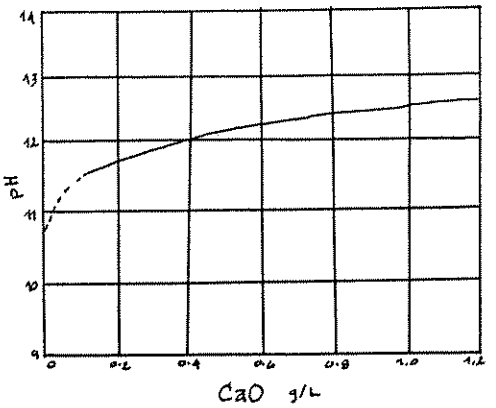
La caliza es virtualmente insoluble en agua pura que no contenga CO_2 disuelto. La solubilidad a 17 °C de $CaCO_3$ en agua destilada hervida es de 0.0145g/l.

Los óxidos de calcio y magnesio no se disuelven en agua si no se convierten primero a hidróxidos. Su solubilidad disminuye cuando aumenta la temperatura.

La solubilidad de las cales comerciales en agua no varía más del 7% comparado con la solubilidad de $Ca(OH)_2$ puro. Además, la cal recientemente apagada, cuyas partículas son de pequeño tamaño, es aproximadamente 10% más soluble que la cal apagada vieja. Esto se debe al crecimiento de las partículas de cal seca durante almacenamiento. Las soluciones de hidróxido cálcico manifiestan un pH alto, como se ve en la gráfica No. 1 (página 13).

Puesto que la solubilidad de la cal disminuye a medida que aumenta la temperatura, el pH de las soluciones saturadas de cal es más bajo a temperaturas altas.

PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
Biblioteca Central



Gráfica No. 1. Valores del pH de las soluciones de hidróxido cálcico a 25°C.

3.3 TEORÍA DE LA CALCINACIÓN

El proceso de calcinación se refiere a la descomposición térmica de la caliza pura o dolomítica, que depende del origen de la piedra. Este es un proceso endotérmico que requiere bastante energía, en forma de calor, para que se lleve a cabo. La reacción química se puede representar como:

$$CaCO_3 \longrightarrow CaO + CO_2$$

caliza pura

$$CaCO_3.MgCO_3 \longrightarrow CaO.MgO + 2CO_2$$

caliza dolomítica

Para producir una libra de cal viva, se requiere 1.79 lb de caliza pura o 1.92 lb de caliza dolomítica. Asimismo, para producir una tonelada de cal viva, se requieren 3 millones Btu y 2.77 Btu para una tonelada de cal dolomítica. Estos valores son empíricos y aplicables para estimaciones.

En el proceso de calcinación, el calor total es la suma del calor sensible y el calor necesario para mantener la temperatura de calcinación (o de disociación). Esta temperatura se refiere a la temperatura de descomposición del carbonato y varía de acuerdo a la composición química de la caliza, que generalmente se ve afectada por el contenido de magnesio y la cristalinidad.

Por medio de rayos X, se ha encontrado que el cristal del CaO es cúbico, tal como se muestra en la siguiente figura:

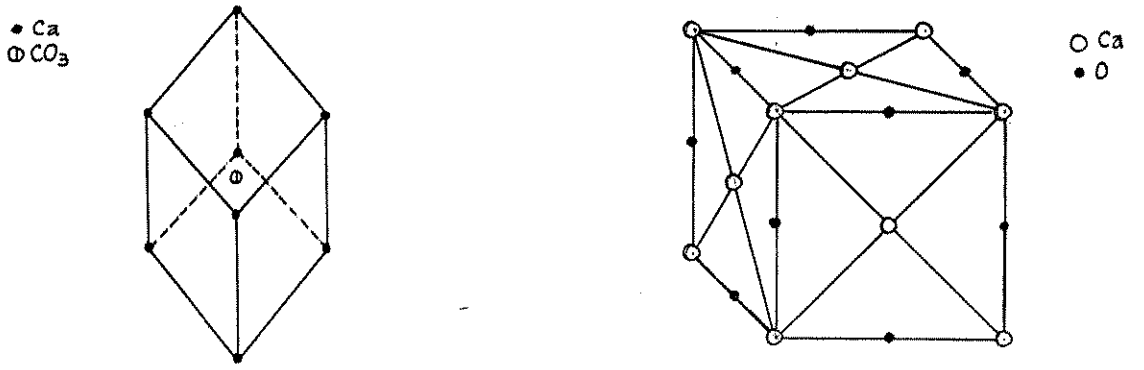


Figura 1. Transformación de la estructura cristalina del material por acción de la calcinación: cristales de carbonato de calcio y de óxido de calcio.

El MgO tiene similar estructura, excepto que para éste el cristal es más pequeño y más denso. Esto explica la densidad más alta promedio de la cal dolomítica.

Se ha observado que durante el calentamiento inicial, se da un 2% de expansión de la caliza y posteriormente (después de la calcinación) una contracción de la cal viva. La caliza con más alta granulometría se expande menos y contrae más luego de la calcinación, mientras que las calizas con tamaño de partícula mayor demuestran una mayor expansión y menor

contracción. La piedra dolomítica exhibe un comportamiento distinto. Se expande lentamente hasta 615°C, luego se contrae y posteriormente se da una segunda expansión a 960°C. En general, se tiene que la dilatación y contracción está en función del tamaño de partícula y de las variaciones de las temperaturas de disociación de las calizas. La temperatura de calcinación es mayor para una piedra bien cristalinizada y densa que para una piedra con estructura no uniforme y porosa (ref. 7).

Tres de los factores que afectan la calcinación son:

1) que la piedra debe ser calentada hasta que se alcance la temperatura de disociación (el calor para esta etapa depende de la capacidad calorífica de la caliza).
2) el tiempo durante el cual se mantiene la temperatura de disociación.
3) la atmósfera en la cual se lleva a cabo el quemado (esto depende de la ventilación proporcionada).

La eficiencia de la calcinación depende de dos factores principales, aparte del tiempo de calcinación y de la temperatura de disociación; estos son: la presencia de granza y la recarbonatación. Granza es toda aquella porción de caliza que conserva su estructura original, aun después de ser calcinada. Las causas son: el poco quemado de la piedra, el tamaño irregular de las piedras y una atmósfera rica en CO_2 (producto de una mala ventilación).

El $MgCO_3$ se descompone más fácilmente (a una temperatura

menor) que el $CaCO_3$ y lo hace en etapas: la primera es rápida y en ella se pierde aproximadamente el 50% de CO_2 a una temperatura aproximada de 402°C; la segunda etapa es lenta y aquí pierden otros 30% de CO_2 a, aproximadamente 458°C; la tercera etapa también es lenta y se pierden los otros 20% de CO_2 y ocurre a 480°C. Dado que el $CaCO_3$ se descompone a temperaturas mayores, las partes de la piedra que contienen $MgCO_3$ dan origen a lo conocido como puntos de sobre quemado. Estas regiones luego adquieren una baja reactividad química (lo cual afecta luego en el proceso de apagado de la cal).

La recarbonatación se refiere a la reformación del $CaCO_3$ por medio de la reacción entre CaO y CO_2. Durante la calcinación, el CO_2 se acumula debido al cerrado de los microporos. Al ponerlo en contacto con otra piedra, se abren los microporos y se da un proceso de difusión de CO_2 a otras piedras descarbonatadas, y resulta la recarbonatación.

En el proceso de calcinación, es necesario tener una buena ventilación por lo anteriormente expuesto y explicable por medio de la regla de le Chatelier. Dado que la reacción produce CO_2, si éste no se remueve (por ventilación), la concentración del mismo sobrepasará un cierto límite, lo cual provocará que el equilibrio vire hacia la izquierda y por lo tanto se dará la reacción inversa: formación del carbonato a partir del óxido y el CO_2.

3.4 USOS DE LA CAL

La cal puede utilizarse con propósitos médicos, como insecticida, como alimento para las plantas y los animales, para la absorción de los gases, en la precipitación, deshidratación y caustificación. Se emplea como reactivo en el proceso del sulfito para la fabricación de papel, y se utiliza en la manufactura de acero y del cemento de alto grado, en la manufactura del jabón, hule, barnices, refractorios y ladrillos de arena-cal. La cal es indispensable para usarse con mortero y con yeso; sirve como materia prima básica en la producción de sales de calcio y para mejorar la calidad de ciertos suelos. Ya sea en forma directa o indirecta, la piedra caliza y la cal se emplean en más industrias que ninguna otra sustancia natural. La adaptabilidad de la cal para cualquier empleo particular, depende de su composición y sus propiedades físicas, todo lo cual puede controlarse mediante la selección de la piedra caliza y los detalles del proceso de manufactura (ref. 2).

Por lo tanto, las aplicaciones principales de la caliza y la cal son en el área de construcción, la agricultura y en la industria química.

3.5 CARBÓN VEGETAL

El carbón es el más importante de los combustibles

sólidos. Su consumo en el mundo es alrededor de $4 * 10^9$ ton/año. El empleo de carbón pulverizado ha ido en aumento durante los años recientes, para alimentación por suspensión en las instalaciones de las plantas de energía, debido a la alta eficiencia térmica con la que puede ser quemado, a su bajo costo de operación y de mantenimiento, y a su gran flexibilidad.

El carbón es el principal producto industrial de la destilación de la madera. Es el material que queda como residuo después que se han desprendido los productos volátiles de la descomposición. El carbón consiste principalmente en carbono, junto con material orgánico de descomposición incompleta y sustancias absorbidas, además de la humedad.

La proporción de estos materiales secundarios, asociados con el carbono, disminuyen al incrementar la temperatura de destilación. El carbón comercial corresponde al producto de 400 - 500°C y tiene un contenido de volátiles (residuos orgánicos) de 15 - 25% (ref. 2).

El carbón, además de servir como combustible, es un material importante para la industria química en la fabricación de sustancias tales como carburo de calcio, cianuro de sodio, ácido clorhídrico, electrodos, pólvora negra, caucho y pigmentos para pinturas.

El poder calorífico del carbón depende de la temperatura de carbonización. Por medio de métodos analíticos o por bomba calorimétrica, se ha determinado que para temperaturas de

carbonización en un rango de 500 - 650°C, se obtienen carbones con poder calorífico entre 7,900 - 8,100 Kcal/Kg (ref. 3).

4. JUSTIFICACIONES

La industria de calcinación en el país aún es bastante ineficiente y una de las principales causas es la falta de información técnica disponible. Como consecuencia de ello, se desperdicia valiosa energía, y repercute en un elevado costo de producción; factor que es controlable y por lo tanto se puede disminuir para beneficio de todos. Aunque se han hecho tres estudios previos sobre el tema, éste tiene como objetivo ampliar la información aplicable a la industria.

El Ingeniero Químico Manuel de León recopiló información de las condiciones óptimas de operación a nivel de laboratorio, para la calcinación de la caliza dolomítica. Estableció un tiempo de 3 horas y una temperatura de 850 °C para un grosor de partícula de 100 - 150 mesh (ref. 5).

La Ingeniera Química María Ana Morales comprobó que el porcentaje óptimo de carbón vegetal adicionado con un poder calorífico de 6,700 Kcal/Kg rinde variación significativa en el porcentaje de conversión de piedra caliza a cal viva: Encontró que las condiciones óptimas corresponden a 10% en peso de carbón vegetal, 5 horas de procesamiento y 750 °C de temperatura de calcinación (ref. 3).

El Ingeniero Químico Edy Perez Orozco investigó el efecto sobre la conversión de caliza a cal viva, por la adición de tres tipos de carbón vegetal con diferente poder calorífico (adicionado a un porcentaje fijo) y llegó a la

conclusión de que la eficiencia es máxima cuando se utiliza carbón vegetal con un poder calorífico de 7,514 Kcal/Kg, un tiempo de calcinación de 5 horas, una temperatura de calcinación de 750°C y un tamaño de partícula de 8 - 10 mesh (ref. 4).

En este trabajo de investigación, se estudiará el rendimiento de conversión de caliza a cal viva cuando se trabaja con una temperatura óptima de 750°C y carbón vegetal de mayor poder calorífico, y se observarán las variaciones en dicho rendimiento en función de tres tiempos (3, 5 y 7 horas), dos tamaños de partícula (3.36-4.76 mm y 2.38-3.36 mm) y dos porcentajes de carbón (5 y 10% en peso).

5. METODOLOGIA

5.1 LOCALIZACION

La parte experimental de la presente investigación se llevará a cabo en los siguientes laboratorios:

5.1.1 Laboratorio de Sección de Química del Ministerio de Energía y Minas - para el estudio preliminar mediante el análisis químico del carbón vegetal (poder calorífico y composición).

5.1.2 Laboratorio de Análisis de la compañía CEMENTOS PROGRESO para el análisis químico de composición de la caliza por medio de Rayos X.

5.1.3 Laboratorio de Química Industrial del Centro de Investigaciones de Ingeniería, Universidad de San Carlos - para los diversos tratamientos de calcinaciones a estudiar (implementación del trabajo de investigación).

PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
Biblioteca Central

5.2 MATERIALES Y EQUIPO EMPLEADOS

5.2.1 Materiales

5.2.1.1 Piedra caliza triturada a 3.36-4.76 mm y 2.38-3.36 mm, muestra proporcionada por la compañía CEMENTOS PROGRESO, también ha sido proporcionado el análisis de su composición química por Fluorescencia de Rayos X.

5.2.1.2 Carbón vegetal de máximo poder calorífico, analizado, triturado y clasificado en el laboratorio de Química del Ministerio de Energía y Minas.

5.2.2 Equipo

5.2.2.1 crisoles

5.2.2.2 balanza analítica

5.2.2.3 desecador

5.2.2.4 mufla

5.3 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

5.3.1 Diseño de tratamientos

El efecto que produce la presencia de carbón vegetal

en el proceso de calcinación se evaluará seleccionando tiempos de calcinación, grosor de partícula y porcentajes de carbón adicionados, por lo que se realizarán 12 tratamientos con 3 repeticiones.
La descripción de los tratamientos se presenta en las tablas 2, 3 y 4.

5.3.2 Diseño experimental

Se realizó un diseño experimental tomando un arreglo factorial de 2 PORCENTAJES DE CARBON * 3 TIEMPOS DIFERENTES * 2 TAMAÑOS DE PARTICULA = 12 TRATAMIENTOS con una distribución completamente al azar de 12 tratamientos y tres repeticiones para dar un total de 36 pruebas (ver tabla 3).

5.3.3 Unidad experimental

La unidad experimental que se va a utilizar es de 9g de caliza con rangos de partícula de 3.36-4.76 mm y 2.38-3.36 mm de tal manera que durante la experimentación permanezca constante la cantidad de $CaCO_3$; se agrega carbón vegetal a la muestra para llegar al 5 y 10% (0.4737g y 1.0000g respectivamente). Estas muestras serán calcinadas bajo condiciones controladas; se realizarán tres repeticiones para cada uno de los tratamientos.

5.4 MANEJO DEL EXPERIMENTO

La preparación del material geológico (caliza y carbón) consta de la trituración y tamizado de ambos a tamaños de partícula de 3.36-4.76 mm y 2.38-3.36 mm, los que se almacenan en bolsas plásticas previamente identificadas y rotuladas, y enseguida se guardan en una desecadora. Las muestras combinadas caliza - carbón se tratarán de manera que al estar sometidas a la calcinación, se encuentren homogéneamente mezcladas con la finalidad de que el aprovechamiento de la energía liberada por el carbón sea la más uniforme posible.

Al realizarse la calcinación, se harán aperturas periódicas de la mufla de 30 segundos a cada 20 minutos con la finalidad de remover la cámara de aire y facilitar la combustión completa del carbón vegetal.

6. ANALISIS ESTADISTICO DE LOS DATOS

Se tiene un experimento factorial de 2 * 2 * 3 en un diseño en bloques al azar con tres repeticiones. Las unidades experimentales serán de 9g de caliza más carbón vegetal agregado en proporción de 5 y 10% en peso en un crisol que se someterá al tiempo experimental para la calcinación. Según este diseño, se trabajará con tandas de 12 crisoles en la mufla.

El modelo que se va a utilizar:

$$Y_{ijkl} = \tau_i + \alpha_j + \beta_k + (\tau\alpha)_{ij} + (\tau\beta)_{ik} + (\alpha\beta)_{jk} + (\tau\alpha\beta)_{ijk} + \epsilon_{ijkl} + \Omega_n$$

TRIBUNAL DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
BIBLIOTECA CENTRAL

donde,

Y_{ijkl} = variable respuesta (grado conversión de caliza a cal viva).

τ_i = efecto del i-ésimo tiempo de calcinación.

α_j = efecto del j-ésimo porcentaje de carbón vegetal.

β_k = efecto del k-ésimo tamaño de partícula a calcinar.

$(r\alpha)_{ij}$ = efecto de la interacción tiempo de calcinación - porcentaje de carbón.

$(r\beta)_{ik}$ = efecto de la interacción tiempo de calcinación - tamaño de partícula.

$(\alpha\beta)_{jk}$ = efecto de la interacción porcentaje de carbón - tamaño de partícula.

$(r\alpha\beta)_{ijk}$ = efecto de la interacción tiempo de calcinación - porcentaje de carbón - tamaño de partícula.

ϵ_{ijkl} = efecto del error experimental.

η_m = efecto del error de la mufla.

Para todos los efectos que resulten ser significativos, se hará posteriormente un análisis de comparación de medias.

7. RESULTADOS Y DISCUSION

En este trabajo de tesis, se determinaron las condiciones óptimas para el proceso de calcinación de caliza a cal viva, a nivel de laboratorio, en cuanto a los factores de tiempo de calcinación, tamaño de partícula y porcentaje de carbón vegetal de alto poder calorífico adicionado como coadyuvante energético.

Los resultados obtenidos tienen un comportamiento esperado y concuerdan generalmente con los trabajos de investigación anteriores, aunque no de una manera exacta. Estos resultados se pueden apreciar en la tabla 9 y en las gráficas 4 y 5 donde se representan todos los efectos estudiados.

El efecto de la cantidad de carbón vegetal utilizado como coadyuvante energético se puede observar en las gráficas 4 y 5. Debido a que sólo se trabajó con dos porcentajes de carbón (5% y 10%), la representación gráfica corresponde a una recta. Esto no necesariamente representa el comportamiento real, aunque se puede observar que el grado de conversión correspondiente al caso del 10% de carbón es mayor que en el caso del 5%. Sin embargo, esta diferencia no es significativa estadísticamente, como se puede comprobar en la tabla 10. Debido a este resultado y al hecho que el empleo de carbón vegetal para el proceso implica un costo, se tomará el porcentaje mínimo como el valor óptimo.

El carbón vegetal utilizado es de alto poder calorífico (7,563.89 kcal/kg en base seca). La composición química de éste se presenta en la tabla 5; en la gráfica 2, se muestra el comportamiento de la temperatura en función del tiempo para el análisis de poder calorífico en la bomba calorimétrica. En la tabla 6, se presenta la composición química de la piedra caliza utilizada.

El efecto del tamaño de partícula sobre la conversión de la caliza a cal viva también resulta ser estadísticamente insignificante. Este efecto se puede observar claramente en las gráficas 4 y 5. Aunque la conversión, en promedio, es menor para el caso de un tamaño de partícula de 2.38-3.36 mm, esta diferencia es solamente de 1 - 1.5% y según el análisis estadístico esta diferencia no es suficiente como para hacer un análisis de medias para averiguar el tamaño óptimo entre ellos. "Dado que la disociación siempre penetra gradualmente desde la superficie al interior de la piedra, el tiempo de calcinación es proporcional al tamaño de la piedra." (Boynton). Esto es cierto para piedras de tamaños apreciables, tales como se emplean a nivel industrial, pero para el tamaño de partículas utilizadas en la investigación este efecto se ve disminuido. Debido a la forma natural en la cual se encuentra la caliza, para reducir su tamaño se requiere trabajo, por lo tanto el tamaño óptimo se tomará como el mayor.

El efecto principal sobre la conversión es debido al tiempo de calcinación. Esto se puede apreciar en las gráficas

4, 5, 6 y 7. La conversión promedio para un tiempo de tres horas es de 78.83%, para un tiempo de cinco horas es de 97.16% y para siete horas es de 97.45%. El análisis estadístico, por medio de la prueba de Duncan, indica que la diferencia de la conversión entre tres y cinco horas es significante; no es este el caso para la comparación entre cinco y siete horas. La conversión promedio obtenida para un tiempo de tres horas es mayor que las reportadas por los investigadores anteriores. Este resultado es debido al tiempo de precalentamiento de la piedra caliza, que fue de 2 1/2 horas. Esto se observa en la gráfica 3 que muestra la calibración de la mufla. De manera igual, se puede observar, a partir de las gráficas 5, 6 y 7, que la conversión máxima obtenida es de 97.82%. "La calcinación completa no infiere la ausencia total del dióxido de carbono en la cal; se ha confirmado repetidamente que la eliminación completa del CO_2 es virtualmente imposible de obtener, inclusive a nivel de laboratorio." (Boynton). Aunque la caliza se caliente hasta el punto de sobre quemado para asegurar la conversión del núcleo de carbonato, siempre se dará el efecto de absorción del CO_2 en la superficie debido a la recarbonatación, que está en función de la concentración de CO_2 en la mufla.

Para las Gráficas 6 y 7, la correlación de los puntos da como resultado las siguientes ecuaciones:

Para C1M1 $\quad \%\ conv. = 38.017 - 1.25t^2 + 17.612t$

Para C1M2 $\quad \%\ conv. = 37.394 - 1.26t^2 + 17.696t$

Para C2M1 $\quad \%\ conv. = 38.650 - 1.25t^2 + 17.458t$

Para C2M2 % conv. = $37.806 - 1.26t^2 + 17.668t$

De estos resultados, se observa que la variable independiente con mayor efecto sobre la conversión es el tiempo. Se llega a esta conclusión debido a que las cuatro curvas tienen formas similares independientemente de los efectos de las otras variables. Este resultado también es evidente de la gráfica 5. Por ejemplo, Las conversiones en el caso de ambos tamaños de partículas son similares, y estadísticamente iguales. Además, se logra apreciar que los efectos de las interacciones concentración - tiempo son insignificantes.

Estas ecuaciones son de orden dos para el intervalo de tres a siete horas de calcinación. El Ing. Edy Perez encontró que el comportamiento de la conversión para un tiempo completo de calcinación de ocho horas, para una temperatura de 750°C, se representa por un polinomio de orden tres. Es interesante notar que existen ecuaciones empíricas tanto para la temperatura dentro de la caliza en función del tiempo, como para la conversión en función del tiempo y constantes características de la forma de la partícula:

$$T = A + Bt + Ct^2$$

$$1 - (1 - x)^{1/3} = at + bt^2 + ct^3$$

(Perry)

Todas las interacciones con dos factores, que son: concentración - tamaño de partícula, concentración - tiempo y tamaño de partícula - tiempo, son insignificantes en cuanto a su efecto sobre la conversión de la piedra caliza. Lo mismo

resulta para la interacción con tres factores, concentración -tiempo - tamaño de partícula. Esto se puede apreciar claramente de la gráfica 5.

El otro efecto que resultó ser significante sobre la conversión fue el de las repeticiones. Según el diseño experimental, se hicieron tres repeticiones y su efecto se muestra en la tabla 10. Este efecto se puede atribuir a distintas condiciones atmosféricas, la calibración de la termocopla y el efecto de la ventilación de la mufla que tiene un efecto debido a la recarbonatación. Según Boynton, "Si la temperatura y la presión están en equilibrio, sin importar sus valores, la disociación es estática. Pero si se da alguna variación en cualquiera de estas variables, tal como una disminución de la presión del CO_2 o un aumento de la temperatura, la disociación procederá imediatamente con el desprendimiento de CO_2." De aquí, se puede inferir que para el caso del efecto de las repeticiones, éste se debe a la variación en la ventilación de la mufla.

Además de los efectos sobre la conversión debido al tiempo, tamaño de partícula, temperatura y presión o concentración de CO_2, también se tienen los efectos de transferencia de masa y de transferencia de calor. En cuanto a la transferencia de masa, se encuentra que ésta está en función de la permeabilidad de la capa exterior del óxido de calcio que se forma en el transcurso de la calcinación, y de la presión generada de CO_2 en la zona de reacción. Este efecto se puede estimar suponiendo que la descomposición se

da por capas, y que el efecto de la presión sobre la temperatura de descomposición permanace en condiciones de equilibrio.

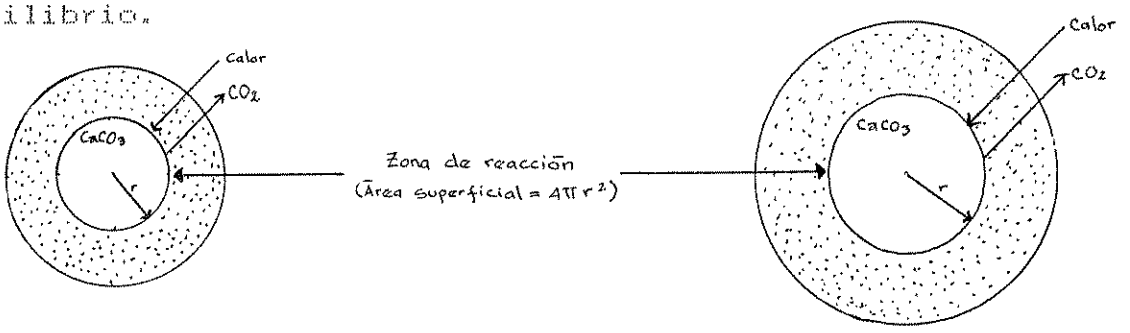


Figura 2. Descomposición de esferas de carbonato de calcio (modelo de capas). Para esferas de tamaño (2.38-3.36 mm) y (3.36-4.76 mm) no existe variación en la descomposición para un mismo tiempo de calcinación.

La transferencia de calor tiene un efecto sobre la temperatura de reacción debido a que esta temperatura se determina por medio de un balance entre la velocidad de transferencia de calor a la zona de reacción y la velocidad de consumo de calor por la reacción endotérmica. La transferencia de calor hacia la zona de reacción es mayor al inicio de la calcinación debido a que la capa de CaO es mínima. A medida que procede la calcinación, esta capa aumenta y el calor debe transferirse por conducción a través de esta capa, en consecuencia la transferencia de calor disminuye. Por lo tanto, la temperatura de calcinación debe ser mayor que la temperatura de descomposición (en la zona de reacción) para que la transferencia de calor sea efectiva.

En este estudio, se trabajó a una temperatura de 750 °C. Aunque se dieron pequeñas variaciones de +/- 6 °C durante la

calcinación, el Ing. Edy Perez da una excelente explicación del porqué en esta pequeña variación de temperatura se puede omitir del análisis y que la calcinación se puede considerar como un proceso adiabático.

Aunque, técnicamente la disociación de la caliza se da en etapas, que están en función de su temperatura, se ha encontrado que la temperatura óptima, a nivel de laboratorio, es de 750°C. Sin embargo, se debe tomar en cuenta que esta temperatura no es eficiente a nivel industrial. " Las operaciones reales de calcinación, debido a consideraciones prácticas, por ejemplo, el tamaño del grumo y el tiempo, requieren que la roca se caliente entre 1200 - 1300°C ... cerca del 40% es calor sensible; y el resto es calor latente de temperatura." (Austin).

Además de esto, con referencia a la temperatura "Se ha mostrado de forma conclusiva, que la temperatura de reacción no es igual a la temperatura de la mufla u horno." (Satterfield/Feaks).

CONCLUSIONES

1. La variable con mayor efecto sobre la conversión de piedra caliza a cal viva es el tiempo de calcinación.

2. La cantidad de carbón vegetal, para porcentajes en peso del 5 y 10%, tienen un efecto estadísticamente igual sobre el grado de conversión de caliza a cal viva.

3. El grado de conversión de piedra caliza a cal viva no es afectado, si se trabaja con partículas de tamaño de 3.36-4.76 mm ó 2.38-3.36 mm.

4. No se obtiene una conversión del 100% de piedra caliza a cal viva bajo las condiciones de tiempo de calcinación y temperatura como se trabajaron.

5. Las condiciones óptimas para la conversión de la piedra caliza de alto grado de pureza son: 5 horas, 3.36-4.76 mm y 5% de carbón vegetal de 7,563.89 kcal/kg de poder calorífico.

RECOMENDACIONES

1. Al efectuar la calcinación de piedra caliza a nivel de laboratorio, se debe realizar a las condiciones óptimas presentadas en este trabajo, como resultado de cuatro investigaciones independientes.

2. Se debe tomar siempre muy en cuenta la ventilación de la mufla u horno de calcinación, ya que la recarbonatación depende directamente de la concentración del dióxido de carbono presente.

3. Construir un horno prototipo de calcinación para efectos de demostración del proceso y sus variables de control, como parte de la formación académica de estudiantes de la carrera de Ingeniería Química, en el que se trabaje con rocas de diámetros mayores que los investigados.

4. Llevar a cabo un trabajo de investigación, a nivel de laboratorio, de la preparación de cal hidratada a partir de cal viva para estudiar los efectos caloríficos involucrados.

5. Efectuar un estudio sobre la cinética de la

conversión de piedra caliza a cal viva, tomando como variable medible la pérdida de peso en función del tiempo.

6. Determinar un modelo cinético para la reacción de hidratación de cal viva, tomando como variable medible el pH de la mezcla reactante en función del tiempo.

PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
Biblioteca Central

REFERENCIAS

1. AUSTIN, George. "Manual de procesos químicos en la industria". Tomo I, 5ta ed. en español. México: Editorial McGraw-Hill 1,990.

2. A. I. Ch. E. Journal. "Kinetics of the thermal decomposition of calcium carbonate" Vol. 5, No. 1, March, 1,959.

3. BOYNTON, Robert. "Chemistry and technology of lime and limestone". 2da ed. U.S.A.: Editorial John Wiley & Sons, 1,980.

4. DE LEON, Manuel. "Estudio del grado de conversion de caliza dolomitica a cal viva, a diferentes temperaturas y tiempos de procesamiento para una presion atmosférica de 640 mmHg". (tesis: Facultad de Ingeniería, USAC). Guatemala, 1,990.

5. KIRK, Raymond & OTHMER, Donald. "Enciclopedia de tecnología química". TOMO III 1era ed. en español. México: Unión Tipográfica, Editorial Hispano-Americana. 1,961.

6. MILLER, Irwin & FREUND, John. "Probabilidad y estadística para ingenieros". 3era ed. México: Editorial Prentice-Hall, 1,986.

7. MORALES, María. "Evaluación de la eficiencia en el grado de conversión de piedra caliza a cal viva por efecto de incorporación de carbón vegetal, mediante el procesamiento a diferentes temperaturas y tiempos de calcinación". (Tesis: Facultad de Ingeniería, USAC). Guatemala, 1,990.

8. PEREZ, 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 640mmHg". (Tesis: Facultad de Ingeniería, USAC). Guatemala 1,991.

9. REYES CASTAÑEDA, Pedro. "Diseño de experimentos aplicados". Segunda reimpresión. s.l.i.,s.p.i.,Septiembre 1,992.

GUIA DE CALCULO

Cálculo del porcentaje de pérdida de peso

La experimentación se manejó en dos fases: la primera a la temperatura experimental y la segunda consistió en calcinar el residuo de esta primera calcinación a 1000 °C, con el fin de averiguar la cantidad de $CaCO_3$ que no reaccionó a la temperatura de diseño ($CaCO_3$ residual). En la primera calcinación, se consideró que todo el $MgCO_3$ presente en la muestra reaccionó para dar MgO.

La reacción para la primera fase:

$$\text{Caliza} + \text{Carbón} \xrightarrow{T\ ^\circ C} \underbrace{CaO.MgO + CaCO_3}_{\text{Muestra Calcinada}} + CO_2$$

La reacción para la segunda fase:

$$\text{Muestra Calcinada} \xrightarrow{1000\ ^\circ C} CaO.MgO + CO_2$$

Como ejemplo para el cálculo, se tomó la corrida C1T3M2.

Si se toma:

Wo = masa caliza + carbón vegetal + crisol

W1 = masa después de la primera calcinación

entonces,

W2 = Wo - W1 (peso de CO_2 liberado en la primera calcinación) (Ec. 1)

W2 = 29.7287 - 24.2741

= 5.4545 g de CO_2 desprendidos en la primera calcinación.

y por lo tanto, el porcentaje de pérdida en peso;

%Pp = (W2 * 100)/(masa caliza y C vegetal)

(Ec. 2)

%Pp = 5.4545 g/(9.0228 + 0.5134)g *100

= 57.1985 % que representa el porcentaje de pérdida en peso para la primera calcinación.

Cálculo de $CaCO_3$ residual que no reaccionó en la primera calcinación

Para encontrar la masa de $CaCO_3$ que no reaccionó en la primera calcinación se llevó la muestra calcinada (de la fase 1) hasta 1000°C. Aquí, se supone que todo el $CaCO_3$ residual reaccionó.

Si se toma:

W1 = masa de muestra calcinada de fase 1

W3 = masa después de la segunda calcinación

entonces,

W4 = W1 - W3 (que es el peso de CO_2 liberado por el $CaCO_3$ que estaba presente después de la primera calcinación)

(Ec. 3)

W4 = 24.2741 g - 24.1731 g

= 0.1010 g de CO_2 desprendidos debido a la segunda calcinación.

A partir de la reacción:

$CaCO_3$ ---------> CaO + CO_2

1 mol 1 mol 1 mol (Ec. C)

se obtiene la relación estequiométrica para la descomposición del carbonato de calcio, por lo tanto, el peso de $CaCO_3$ que no reacciona en la primera calcinación (W5) se da como:

$W5 = W4 * PM\ CaCO_3 / PM\ CO_2$ (Ec. 4)

$W5 = 0.101\ g\ CO_2 * 100.0892 g CaCO_3 / 44.0985 g CO_2$

W5 = 0.2292 g $CaCO_3$ no se calcinaron en la primera fase.

Cálculo del porcentaje de conversión de caliza a cal viva

Primeramente, se calcula el peso de $CaCO_3$ presente en la muestra original (W7):

W6 = 9g caliza * % pureza/(100g caliza pura) (Ec. 5)

W6 = 9.0228 g caliza * 0.9658 g $CaCO_3$/1 g caliza

W6 = 8.7142 g caliza en la muestra original.

El $CaCO_3$ que reaccionó en la primera calcinación (W7), se obtiene por la diferencia entre el $CaCO_3$ inicial y el que no reaccionó:

$W7 = W6 - W5$ (Ec. 6)

W7 = 8.7142 g - 0.2292 g

W7 = 8.4849 g caliza que se convirtió en cal viva durante la primera fase.

El porcentaje de conversión (W8) se calcula mediante la siguiente ecuación:

W8 = W7 * 100/ W6 (Ec. 7)

W8 = 8.4849 g / 8.7142 g *100

W8 = 97.3694 % de conversión de caliza a cal viva durante la primera fase de calcinación.

Cálculo del CaO producido

Por medio de la reacción química (Ec. C), se tiene la relación estequiométrica entre el $CaCO_3$ y el CaO producido:

W9 = W7 * PM CaO/ PM $CaCO_3$ (Ec. 8)

W9 = 8.4849 g $CaCO_3$ * 56.0794g CaO/100.0892 g $CaCO_3$

W9 = 4.7541 g CaO

TABLA No. 2
DISTRIBUCION DE LOS TRATAMIENTOS

No. Tratamiento	tiempo(hrs.)	Granulometría(mesh)	%Carbón
1	3	- 4 + 6	5
2	3	- 4 + 6	10
3	3	- 6 + 8	5
4	3	- 6 + 8	10
5	5	- 4 + 6	5
6	5	- 4 + 6	10
7	5	- 6 + 8	5
8	5	- 6 + 8	10
9	7	- 4 + 6	5
10	7	- 4 + 6	10
11	7	- 6 + 8	5
12	7	- 6 + 8	10

mesh - 4 + 6 --> 3.36-4.76 mm
- 6 + 8 --> 2.38-3.36 mm

TABLA No. 3
DESCRIPCION DE LOS TRATAMIENTOS

		NIVELES		
FACTOR	DIMENSIONES	1	2	3
C	%	5	10	-
T	hrs.	3	5	7
M	mesh	- 4 + 6	- 6 + 8	-

mesh - 4 + 6 --> 3.36-4.76 mm
- 6 + 8 --> 2.38-3.36 mm

TABLA No. 4
DISTRIBUCION AL AZAR DE LOS TRATAMIENTOS EN BLOQUES

Número de Orden	Tratamiento
1	C1T1M1
2	C1T1M2
3	C1T2M1
4	C1T2M2
5	C1T3M1
6	C1T3M2
7	C2T1M1
8	C2T1M2
9	C2T2M1
10	C2T2M2
11	C2T3M1
12	C2T3M2

PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
Biblioteca Central

TABLA 5

COMPOSICION QUIMICA DEL CARBON UTILIZADO EN EL TRABAJO DE INVESTIGACION.

COMPONENTE	PORCENTAJE
% AZUFRE	0.0163%
% CENIZAS	3.14%
% MATERIAL VOLATIL	16.73%
% HUMEDAD	7.74%
% CARBON FIJO	72.37%
PODER CALORIFICO	7,563.89 kcal/kg (BASE SECA)

TABLA 6

COMPOSICION QUIMICA DE LA CALIZA UTLIZADA EN EL TRABAJO DE INVESTIGACION

COMPONENTE	PORCENTAJE
$CaCO_3$	96.58%
$MgCO_3$	1.47%
Al_2O_3	0.98%
SiO_2	0.97%
Fe_2O_3	0.00%
K_2O	0.00%

TABLA 7

DATOS ORIGINALES

% CARBON	MESH	TIEMPO	Wo	W1	W3
5 %	+4-6	3 hr	25.879	21.118	20.306
		5 hr	29.500	24.039	23.927
		7 hr	28.971	23.492	5.479
	+6-8	3 hr	24.871	20.148	19.322
		5 hr	26.529	21.083	20.963
		7 hr	29.729	24.274	24.173
10 %	+4-6	3 hr	27.047	21.746	20.946
		5 hr	28.265	22.261	22.159
		7 hr	30.260	24.236	24.152
	+6-8	3 hr	29.982	24.671	23.853
		5 hr	28.354	22.339	22.237
		7 hr	30.000	23.967	23.874

donde %C = porcentaje en peso de carbón utilizado
Wo = peso inicial total (crisol + carbón + caliza)
W1 = peso final después de la primera calcinación
W3 = peso final después de la segunda calcinación
mesh +4-6 = 3.36-4.76 mm
+6-8 = 2.38-3.36 mm

TABLA 8

DATOS CALCULADOS

%CARBON	MESH	TIEMPO	W2	%Pp	W4	W5
5 %	+4-6	3 hr	4.761	49.761	0.812	1.843
		5 hr	5.461	57.074	0.113	0.255
		7 hr	5.479	57.377	0.084	0.190
	+6-8	3 hr	4.723	49.588	0.826	1.875
		5 hr	5.446	57.000	0.20	0.272
		7 hr	5.454	57.198	0.101	0.229
10 %	+4-6	3hr	5.301	52.523	0.799	1.814
		5 hr	6.005	59.439	0.101	0.229
		7 hr	6.024	59.601	0.084	0.192
	+6-8	3 hr	5.310	52.352	0.818	1.857
		5 hr	6.014	59.411	0.103	0.234
		7 hr	6.033	59.511	0.093	0.210

donde W2 = pérdida en peso de la caliza durante la primera calcinación

%Pp = porcentaje de pérdida en peso durante la primera calcinación

W4 = pérdida en peso de la caliza durante la segunda calcinación

W5 = peso de carbonato de calcio que no había reaccionado durante la primera calcinación

mesh +4-6 = 3.36-4.76 mm

+6-8 = 2.38-3.36 mm

TABLA 9

DATOS CALCULADOS

% CARBON	MESH	TIEMPO	W6	W7	W8	W9
5 %	+4-6	3 hr	8.745	6.901	78.920	3.867
		5 hr	8.745	8.489	97.080	4.757
		7 hr	8.72	8.536	97.821	4.784
	+6-8	3 hr	8.703	6.887	79.151	3.859
		5 hr	8.732	8.481	97.371	4.752
		7 hr	8.714	8.523	97.799	4.775
10 %	+4-6	3 hr	8.701	6.829	78.459	3.826
		5 hr	8.710	8.461	96.888	4.740
		7 hr	8.714	8.485	97.369	4.754
	+6-8	3 hr	8.749	6.892	78.770	3.862
		5 hr	8.730	8.496	97.320	4.760
		7 hr	8.745	8.535	97.599	4.782

donde; W6 = peso de carbonato de calcio presente en la muestra original
W7 = peso de carbonato de calcio que reaccionó en la primera calcinación
W8 = conversión de la piedra caliza a cal viva
W9 = peso de cal viva producida
mesh +4-6 = 3.36-4.76 mm
+6-8 = 2.38-3.36 mm

TABLA 10

ANALISIS DE VARIANZA DE FISCHER

FUENTE	G.L.	SUM. C	MED. C	F.OBTEN.	F.T.
REPETICIONES	2	2.94E-4	1.47E-4	10.26163	3.44
CONCENTRACION	1	2.76E-5	2.76E-5	1.92305	4.3
TIEMPO	2	0.264398	0.132199	92.23	3.44
MESH	1	5.7E-5	5.7E-5	3.977094	4.3
CONCENTRACION *TIEMPO	2	7.73E-6	3.86E-6	0.269547	3.44
CONCENTRACION *MESH	1	1.8E-6	1.8E-6	0.12716	4.3
TIEMPO *MESH	2	1E-5	5.1E-6	0.35792	3.44
CONCENTRACION *TIEMPO *MESH	2	2.34E-5	1.17E-5	0.814774	2.82
ERROR	22	3.15E-4	1.43E-5		

ANALISIS MULTIPLE DE MEDIAS SEGUN DUNCAN

TABLA DE MEDIAS EN FUNCION DEL TIEMPO			
TIEMPO DE CALCINACION	3 HR	5 HR	7 HR
MEDIAS DE CONVERSIONES	0.78825	0.97165	0.97448

VALORES DE Rp DE DUNCAN		
P	2	3
Rp	0.00321	0.00337

Rango de las tres medias = 0.97448 - 0.78825
0.1188225

- Como el rango de las tres medias excede R3, hay diferencia significativa entre los tres tiempos.

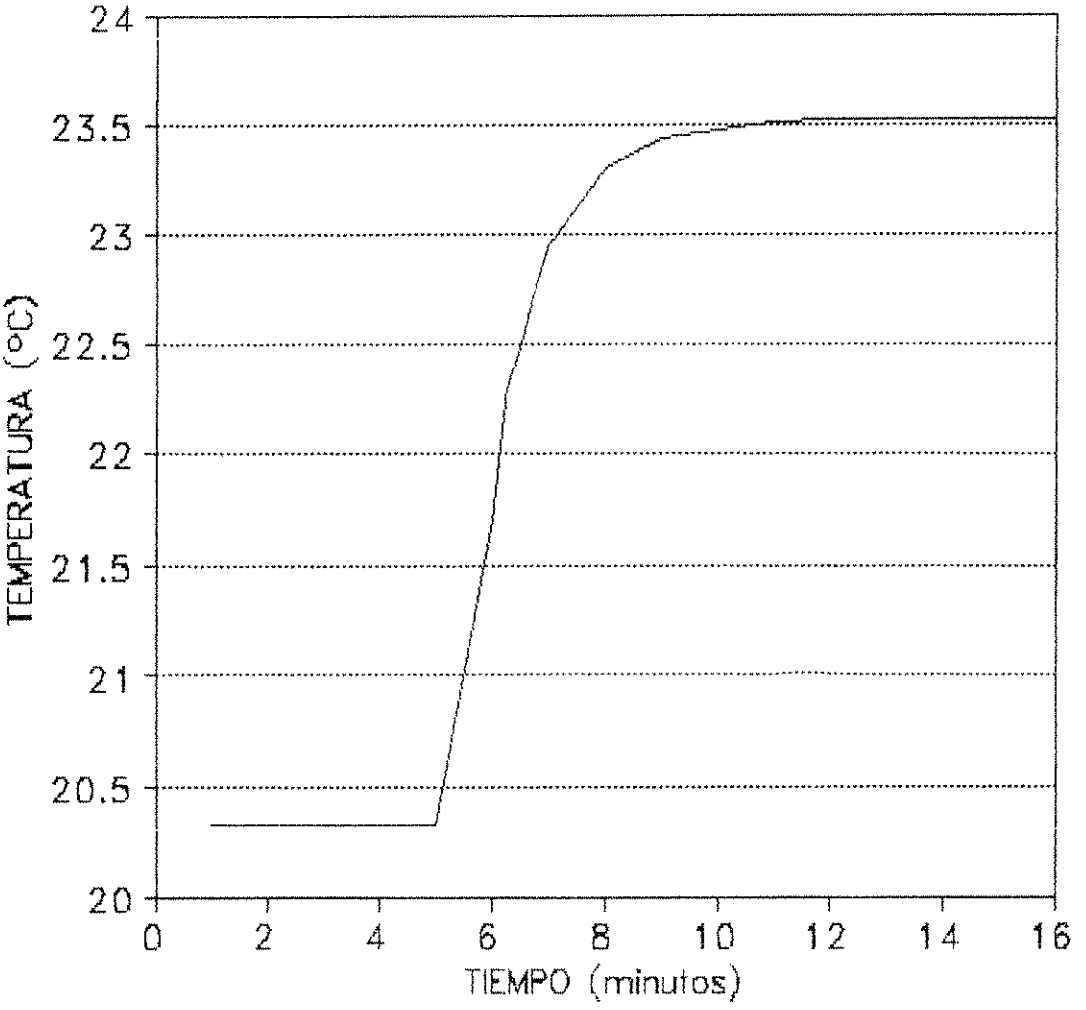
Para parejas adyacentes:

Rango entre 3 y 5 hrs = 0.1834
Rango entre 5 y 7 hrs = 0.002825

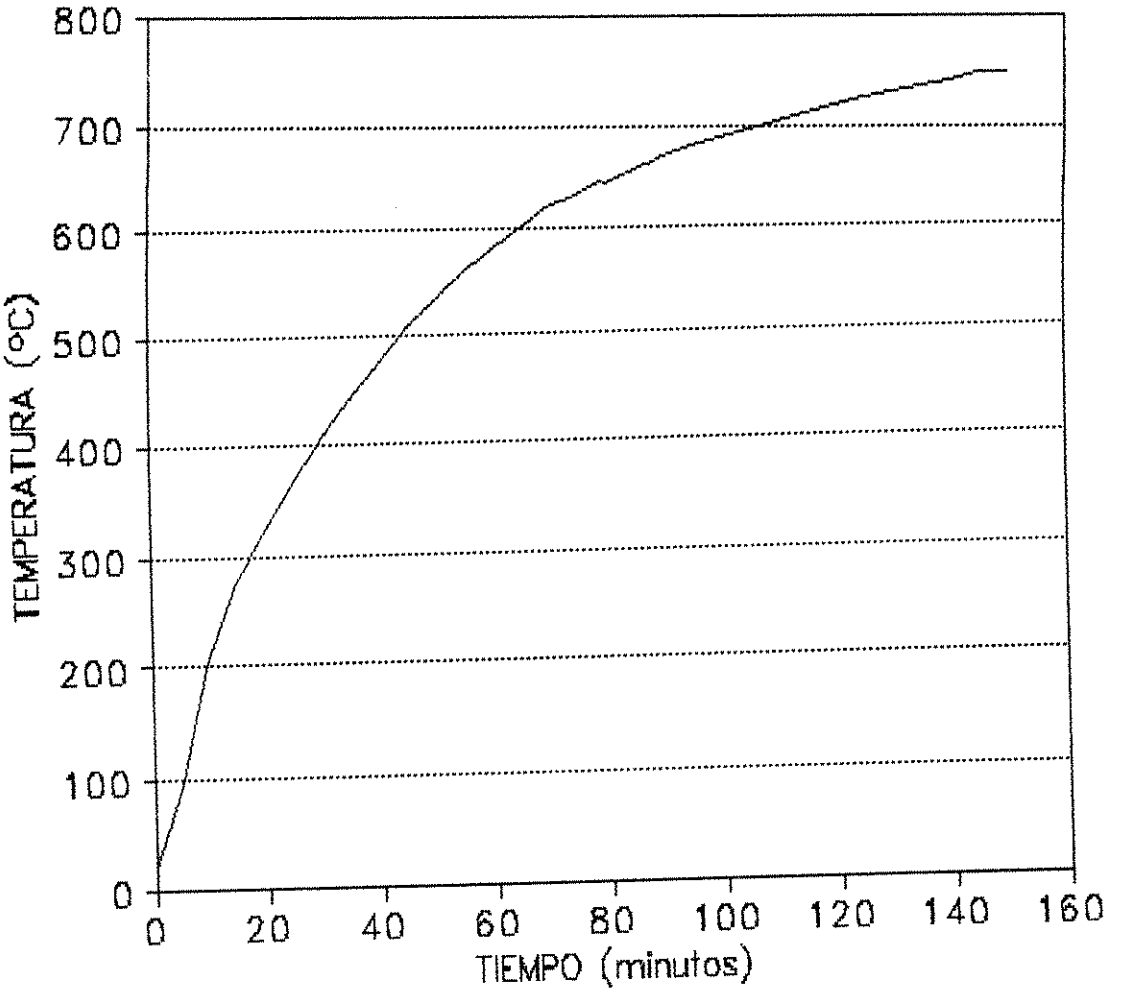
- Como 0.1834 excede R2, hay diferencia significativa entre 3 y 5 hrs.

- Como 0.002825 no excede R2, no hay diferencia significativa entre 5 y 7 hrs.

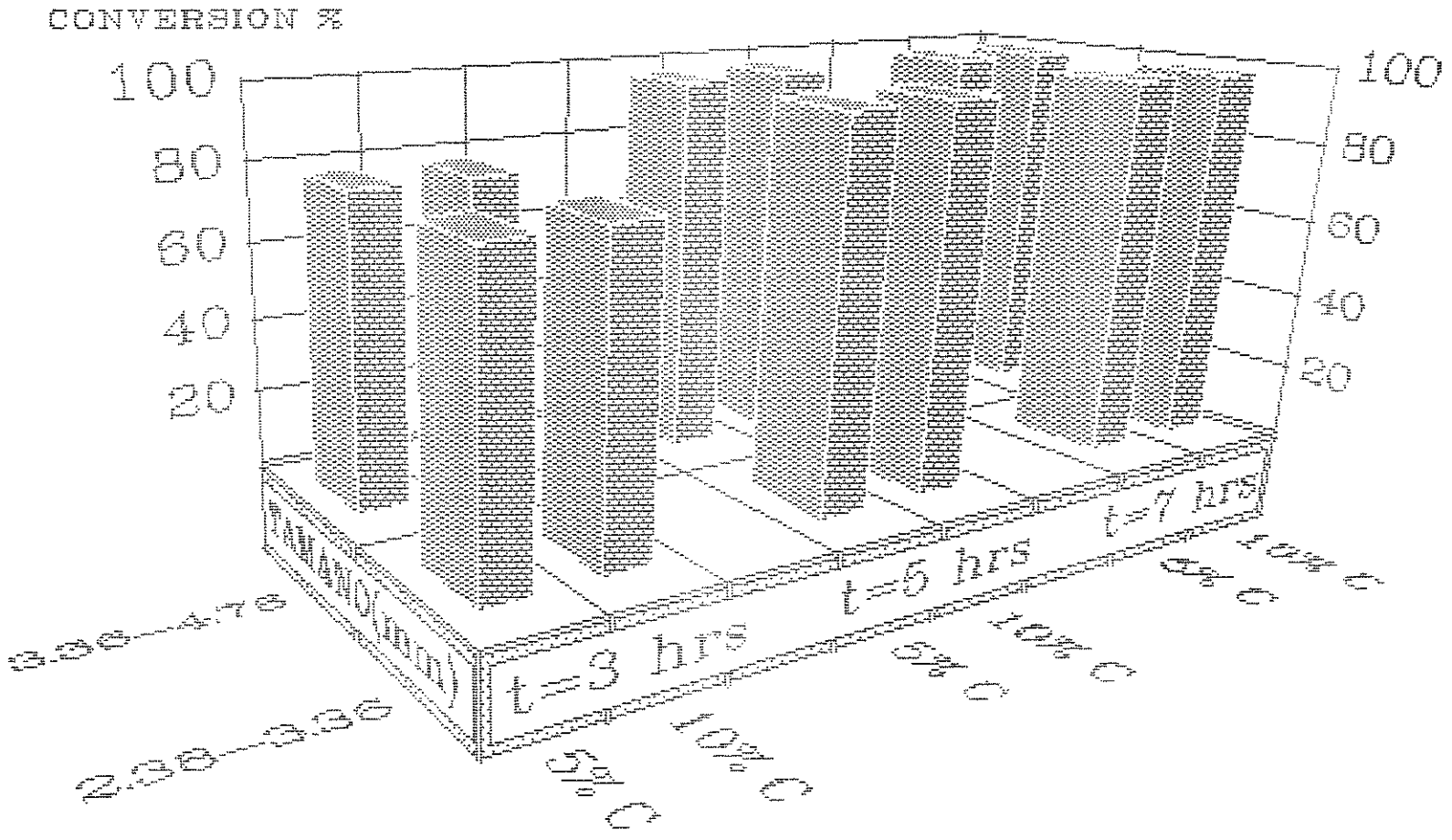
PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
Biblioteca Central



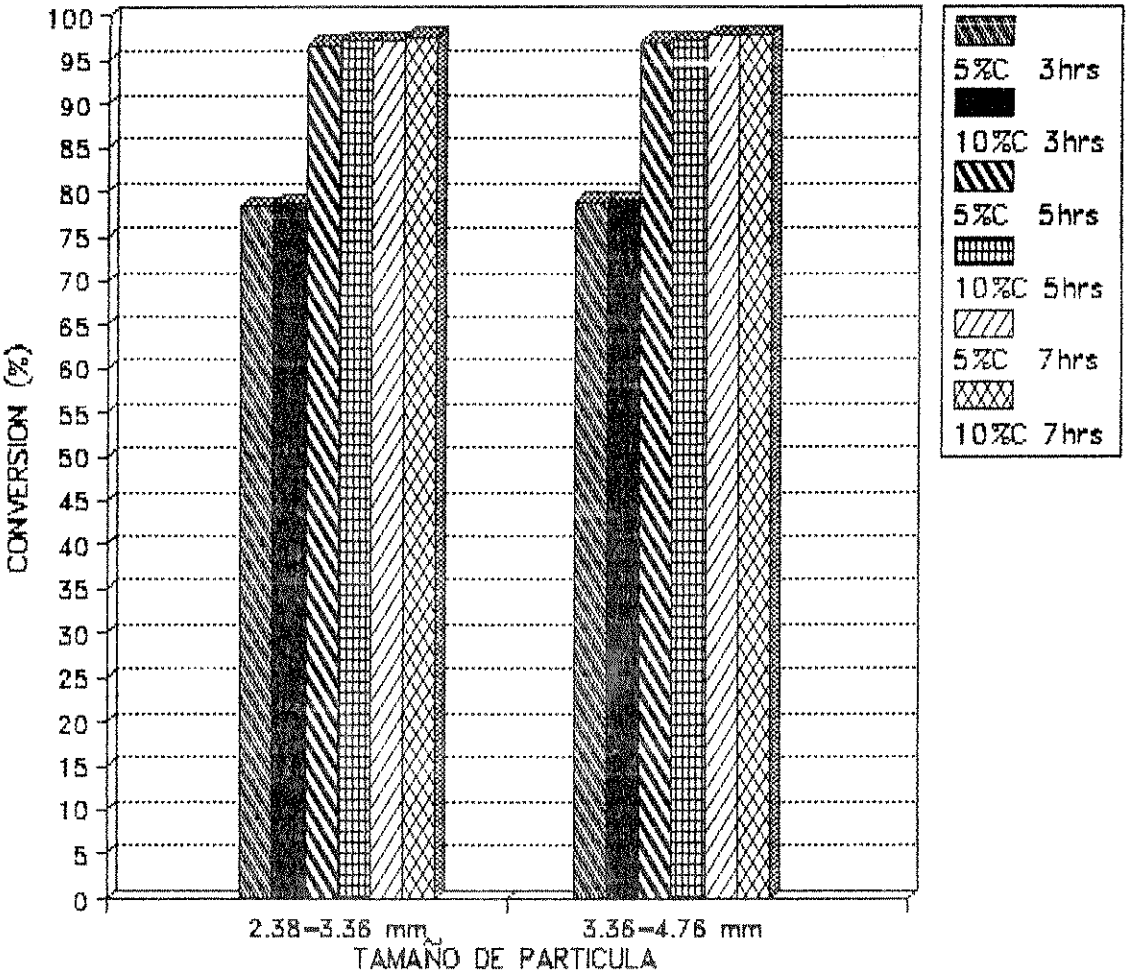
Gráfica 2. Resultados de temperatura en función del tiempo en el análisis del poder calorífico del carbón utilizado.



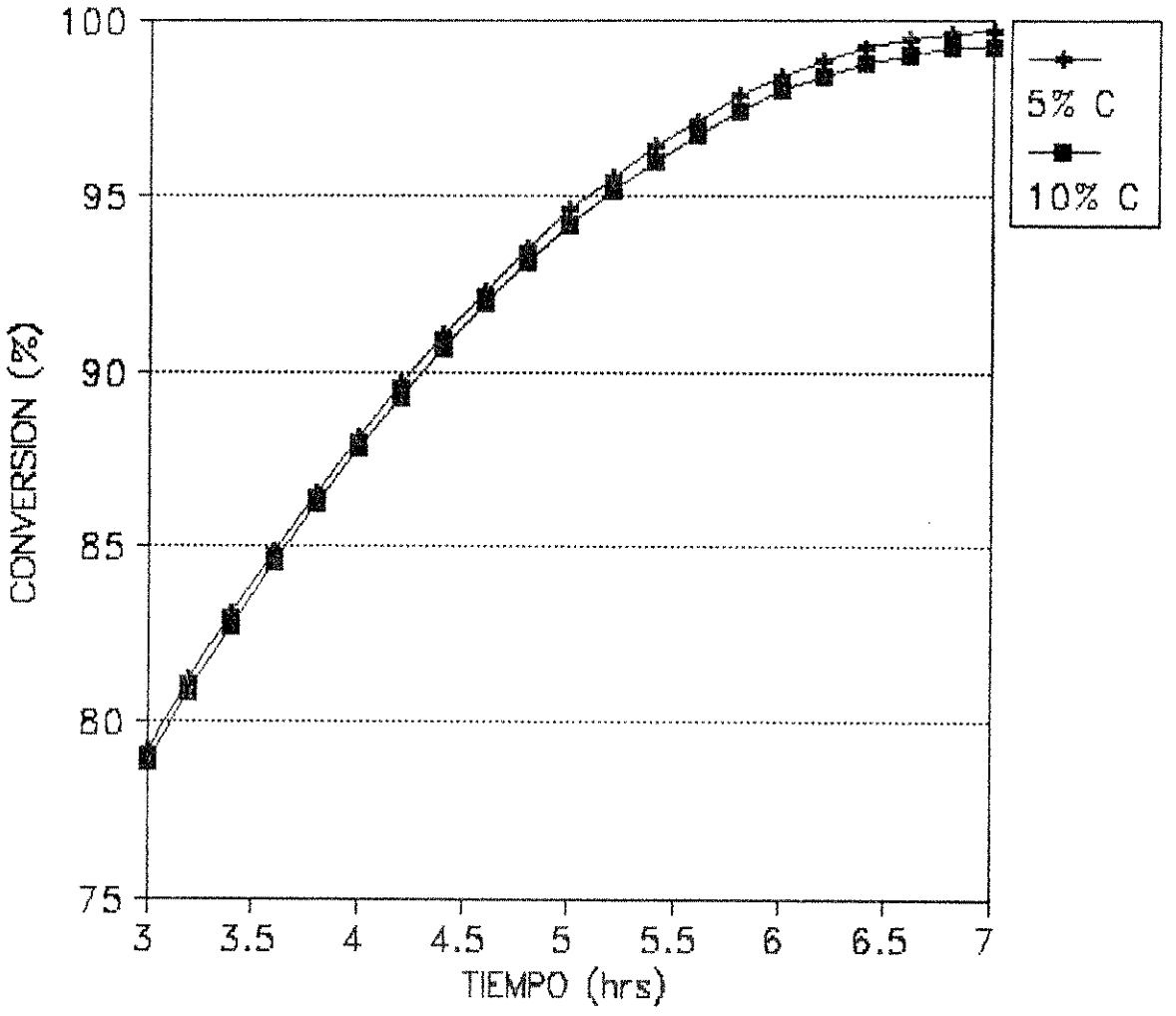
Gráfica 3. Curva de calibración de la mufla: temperatura de la mufla en función del tiempo.



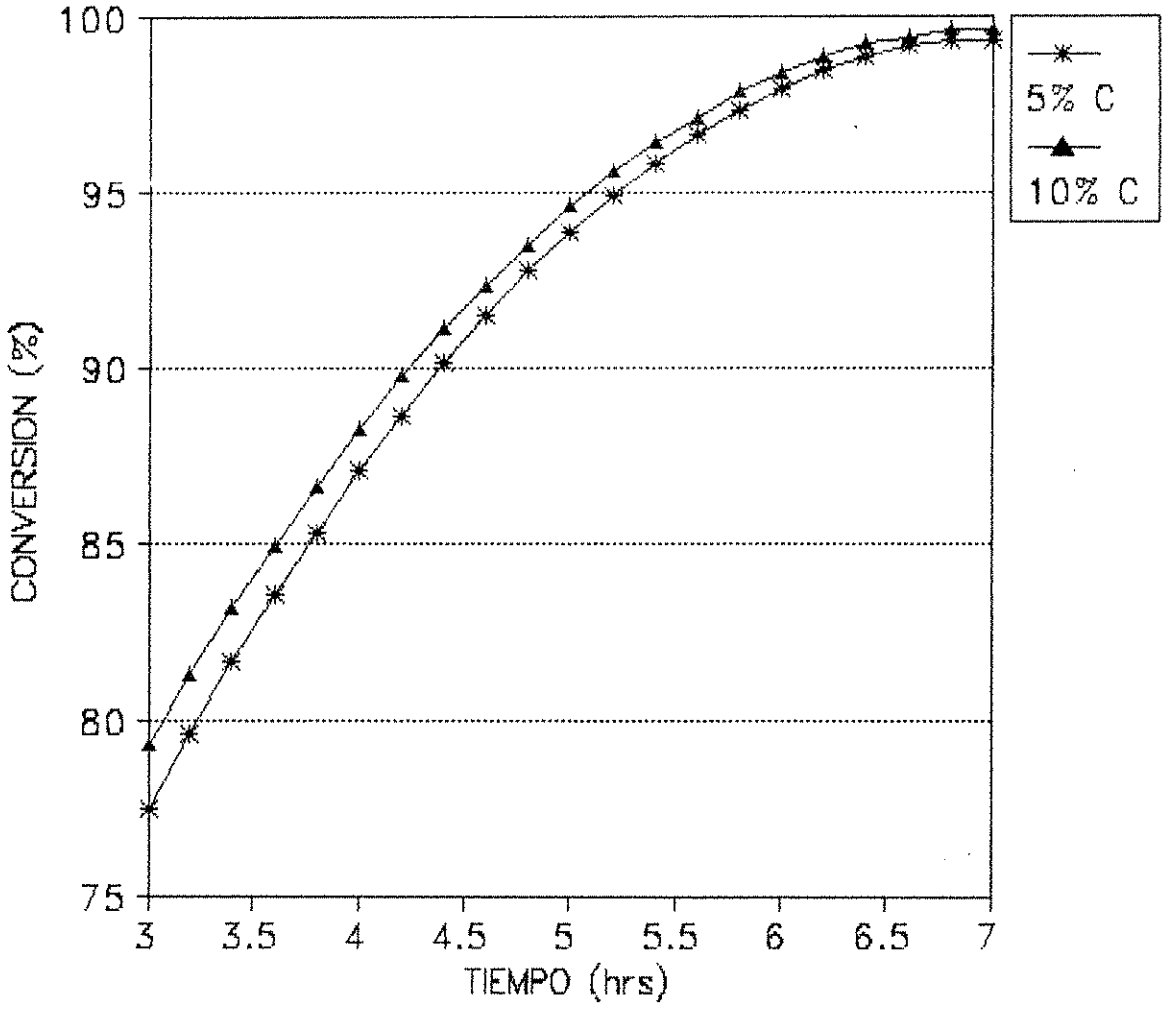
Gráfica 4. Porcentaje de conversión de la piedra caliza a cal viva en función del tiempo, porcentaje de carbón vegetal y tamaño de partícula para un proceso de calcinación a 750°C y 640 mm Hg de presión barométrica.



Gráfica 5. Efecto de las tres variables (tiempo, porcentaje de carbón vegetal y tamaño de partícula) sobre la conversión de piedra caliza a cal viva en un proceso de calcinación a 750°C y 640 mm Hg de presión barométrica.



Gráfica 6. Efecto del tiempo de calcinación sobre la conversión de piedra caliza, de un tamaño de partícula 3.36-4.76 mm, a cal viva cuando se incorporan diferentes porcentajes de carbón vegetal en un proceso de calcinación a 750°C y 640 mm Hg de presión barométrica.



Gráfica 7. Efecto del tiempo de calcinación sobre la conversión de piedra caliza, de un tamaño de partícula 2.38-3.36 mm, a cal viva cuando se incorporan diferentes porcentajes de carbón vegetal en un proceso de calcinación a 750°C y 640 mm Hg de presión barométrica.