

**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**



**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**EVALUACIÓN DEL GRADO DE CONVERSIÓN PARA UNA REACCIÓN DE  
CALCINACIÓN CON TRES GRADOS DISTINTOS DE DOLOMITIZACIÓN DE  
LA CALIZA PROCESADOS A DIFERENTES TIEMPOS DE CALCINACIÓN Y  
PORCENTAJES DE CARBÓN VEGETAL, A 700 °C Y UNA PRESIÓN  
ATMOSFERICA DE 640 mm. de Hg.**

**TESIS**

**PRESENTADA A LA JUNTA DIRECTIVA**

**DE LA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**POR**

**HUGO ALBERTO MONTENEGRO PEREIRA**

**AL CONFERIRSELE EL TÍTULO DE**

**INGENIERO QUÍMICO**

**GUATEMALA, OCTUBRE DE 1997**

**PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
Biblioteca Central**

**HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

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

**EVALUACIÓN DEL GRADO DE CONVERSIÓN PARA UNA REACCIÓN DE  
CALCINACIÓN CON TRES GRADOS DISTINTOS DE DOLOMITIZACIÓN DE LA  
CALIZA PROCESADOS A DIFERENTES TIEMPOS DE CALCINACIÓN Y  
PORCENTAJES DE CARBON VEGETAL, A 700 °C Y UNA PRESIÓN  
ATMOSFERICA DE 640 mm. de Hg**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de Escuela de Ingeniería Química,  
con fecha 15 de julio de 1,996.



---

**HUGO ALBERTO MONTENEGRO PEREIRA**

**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**



**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

<b>DECANO</b>	<b>Ing. Herbert René Miranda Barrios</b>
<b>Vocal 1o.</b>	<b>Ing. Miguel Ángel Sánchez Guerra</b>
<b>Vocal 2o.</b>	<b>Ing. Jack Douglas Ibarra Solórzano</b>
<b>Vocal 3o.</b>	<b>Ing. Juan Adolfo Echeverría Méndez</b>
<b>Vocal 4o.</b>	<b>Br. Víctor Manuel Lobos Aldana.</b>
<b>Vocal 5o.</b>	<b>Br. Wagner Gustavo López Cáceres</b>
<b>SECRETARIA</b>	<b>Inga. Gilda Marina Castellanos de ILescas</b>

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN  
GENERAL PRIVADO**

<b>DECANO</b>	<b>Ing. Julio Ismael González Podszueck</b>
<b>EXAMINADOR</b>	<b>Ing. Cesar Alfonso García Guerra</b>
<b>EXAMINADOR</b>	<b>Ing. Willian G. Alvarez Mejía</b>
<b>EXAMINADOR</b>	<b>Ing. Julio E. Chávez Montúfar</b>
<b>SECRETARIO</b>	<b>Ing. Francisco Javier González López</b>



Guatemala, agosto 04 de 1997

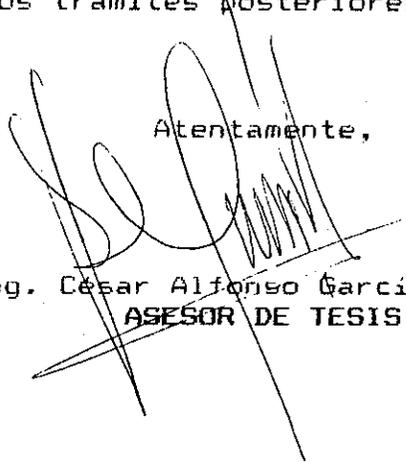
Ing. Julio Enrique Chávez Montúfar  
Director, Escuela de Ingeniería Química  
Facultad de Ingeniería, USAC  
Presente

Ingeniero Chávez.

Por este medio me permito informarle que, una vez revisado el informe final de tesis del estudiante HUGO ALBERTO MONTENEGRO PEREIRA, titulado "Evaluación del grado de conversión para una reacción de calcinación con tres grados distintos de dolomitización de la caliza procesados a diferentes tiempos de calcinación y porcentajes de carbón vegetal, a 70 °C y una presión atmosférica de 640 mm. de Hg", se ha encontrado satisfactorio para su aprobación.

Por tanto le solicito que sea autorizado el trabajo mencionado y se procede con los trámites posteriores a dicha aprobación.

Atentamente,

  
Ing. César Alfonso García Guerra  
ASESOR DE TESIS





**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, 26 de agosto de 1,997

Ingeniero

Julio Chávez Montúfar

Director Escuela Ingeniería Química

Facultad de Ingeniería

Presente.

Estimado Ingeniero Chávez.

Hago de su conocimiento que he revisado el informe final de Tesis de Hugo Alberto Montenegro Pereira, titulado: EVALUACION DEL GRADO DE CONVERSION PARA UNA REACCION DE CALCINACION CON TRES GRADOS DISTINTOS DE DOLOMITIZACION DE LA CALIZA PROCESADOS A DIFERENTES TIEMPOS DE CALCINACION Y PORCENTAJES DE CARBON VEGETAL, A 700 °C Y UNA PRESION ATMOSFERICA DE 640 mm Hg. , dejo constancia de aprobación para proceder a la autorización del respectivo trabajo de investigación.

Sin otro particular me suscribo de usted,

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS

Ing. Rodolfo Espinosa Smith

REVISOR



ESCUELA DE  
INGENIERIA QUIMICA



**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, Ing. Julio Chávez Montúfar, después de conocer el dictamen del Asesor con el Visto Bueno del Jefe de Departamento, al trabajo de Tesis del estudiante Hugo Alberto Montenegro Pereira, titulado: **EVALUACION DEL GRADO DE CONVERSION PARA UNA REACCION DE CALCINACION CON TRES GRADOS DISTINTOS DE DOLOMITACION DE LA CALIZA PROCESADOS A DIFERENTES TIEMPOS DE CALCINACION Y PORCENTAJES DE CARBON VEGETAL, A 700°C Y UNA PRESION ATMOSFERICA DE 640 mm. DE Hg**, procede a la autorización del mismo.

Ing. Julio Chávez Montúfar

ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA

DIRECTOR

ESCUELA

INGENIERIA QUIMICA

U. S. A. C.

Guatemala, 10 de octubre de 1,997.



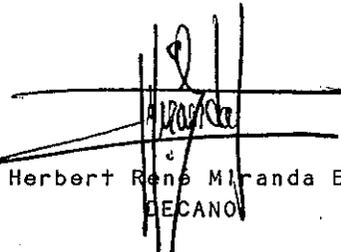
**FACULTAD DE INGENIERIA**

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, luego de conocer la autorización por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al trabajo de Tesis del estudiante **Hugo Alberto Montenegro Pereira**, titulado: **EVALUACION DEL GRADO DE CONVERSION PARA UNA REACCION DE CALCINACION CON TRES GRADOS DISTINTOS DE DOLOMITIZACION DE LA CALIZA PROCESADOS A DIFERENTES TIEMPOS DE CALCINACION Y PORCENTAJES DE CARBON VEGETAL, A 700°C Y UNA PRESION ATMOSFERICA DE 640 mm. de Hg**, procede a la autorización del mismo.

IMPRIMASE:

  
Ing. Herbert René Miranda Barrios  
DECANO



Guatemala, 10 de octubre de 1,997.

## **Dedicatoria**

- A Dios:** **Por su amor**
- A mis padres** **Hugo Humberto Montenegro Ramos, y María del Carmen Pereira por la vida que me han dado.**
- A mis hermanos** **Erick Antonio, Rosa Amelia, Vivian Fabiola y Rony por su cariño y apoyo de siempre.**
- A mis abuelitas** **Amelia Carlota y Rosa Ramos con especial cariño.**
- A mis amigos** **en especial.**

## **Agradecimientos**

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

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

**Ing. Byron Réne Aguilar Uck, por su ayuda en el análisis estadístico.**

**Ing. Otto Juárez por su colaboración para obtener las rocas calizas dolomíticas que se utilizaron en el experimento.**

**A la Universidad de San Carlos de Guatemala.**

## ÍNDICE GENERAL

<b>CONTENIDO</b>	<b>PÁGINA</b>
Índice de gráficas	ii
Glosario	iii
Resumen	v
Introducción	vi
1. Objetivos	1
2. Hipótesis	2
3. Marco teórico	3
4. Justificaciones	16
5. Método de investigación	17
6. Análisis estadístico	20
7. Resultados y discusión	21
Conclusiones	vii
Recomendaciones	viii
Bibliografía	ix
Anexo	xi
a. Guía de cálculo	xii
b. Tablas	xv
c. Gráficas	xxxvii

## ÍNDICE DE GRÁFICAS

No.	TÍTULO	PÁGINA
1	Porcentaje de conversión de caliza a cal en función de $MgCO_3$ , tiempo de calcinación y % de carbón vegetal, gráfica de barras.	22
2	Porcentaje de conversión de caliza a cal en función de $MgCO_3$ , tiempo de calcinación y % de carbón vegetal, gráfica tridimensional.	23
3	Efecto del tiempo de calcinación sobre la conversión para un 13.449 % de $MgCO_3$	25
4	Efecto del tiempo de calcinación sobre la conversión para un 24.95 % de $MgCO_3$	26
5	Efecto del tiempo de calcinación sobre la conversión para un 34.491 % de $MgCO_3$	27
6	Efecto del carbonato de magnesio sobre la conversión de caliza sin utilizar carbón vegetal como activador energético.	29
7	Efecto del carbonato de magnesio sobre la conversión de caliza utilizando 10 % de carbón vegetal como activador energético	30

## GLOSARIO

**Caliza dolomítica:** roca formada por carbonato de calcio y carbonato de magnesio  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{MgCO}_3$  en la que el carbonato de magnesio esta presente en una cantidad mayor a un 5 % en peso.

**Cinética:** rama de la química que determina la velocidad a la que el sistema de reacción cambia.

**Decrepitarse:** ruido que produce un material por la acción del fuego (chisporrotear y quemarse).

**Endotermica:** proceso o cambio que se realiza con absorción de calor y que requiere altas temperaturas para la iniciación y mantenimiento, por ejemplo, reacción de calcinación.

**Estructura cristalina:** disposición de los átomos y grupos de una molécula en el estado sólido de la materia.

**Gradiente:** grado de variación de una magnitud, por ejemplo temperatura, presión, altura, concentración, etc.

**Gravedad específica:** el número que expresa la relación entre el peso de una substancia y el de un volumen igual de otra (generalmente el agua) que se tomo como un tipo de comparación.

**Interacción:** influencia reciproca,por ejemplo dos moléculas en una reacción química.

**Mufia:** es un horno en el que para uniformizar la temperatura y proteger las sustancias contra los gases de combustión, posee una capa de forma semicilíndrica hecha de material refractario.

**Ortorrombico:** sistema cristalino que posee tres ejes desiguales en longitud que se cortan en el ángulo recto.

**pH:** símbolo con el que se representa el logaritmo de la unidad dividido por la concentración de iones de hidrogeno de una solución. La neutralidad corresponde a un pH 7, la acidez a un pH menor de 7 y la alcalinidad a un pH mayor de 7

**Pollmorfas:** propiedad de algunas sustancias de cristallar en mas de una forma cristalina, como por ejemplo el carbonato de calcio

**Recarbonatación:** es la reacción inversa a la calcinación:



**Termopar:** es un termómetro termoelectrico, compuesto de dos alambres fabricados de metales distintos que están unidos en un extremo, siendo el otro extremo la unión de referencia que es mantenida a una temperatura conocida, la diferencia de temperatura entre la junta de medición y la junta de referencia genera una fuerza electromotriz que proporcional a la diferencia de temperatura.

## RESUMEN

El presente trabajo es el resultado de determinar y evaluar el grado de conversión de roca caliza en cal viva, a nivel de laboratorio, utilizando como variables del proceso de calcinación el porcentaje de carbonato de magnesio, el tiempo de calcinación y el porcentaje de carbón vegetal de alto poder calorífico como aditivo energético. La calcinación se realizó en una mufla a una temperatura de 700 °C. El tamaño promedio de la roca caliza y el carbón vegetal utilizado en la calcinación fue de  $- 4.76 + 3.36$  mm.

Para medir la conversión de roca caliza a cal viva las variables de proceso tomaron los siguientes valores: tres porcentajes de carbonato de magnesio 13.449 %, 24.954 % y 34.491 %. tres tiempos de calcinación 3 h., 5 h. y 7 h. y dos porcentajes de carbón vegetal 0 y 10% .

Para el modelo estadístico se utilizó un diseño experimental con un arreglo combinatorio, y, una distribución completamente al azar de 18 tratamientos y 3 repeticiones . La variable respuesta fue el porcentaje de conversión de roca caliza ( $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{MgCO}_3$ ) a óxido de calcio y óxido de magnesio. Los valores de porcentaje de conversión se determinaron en base al promedio de tres repeticiones.

Los datos obtenidos fueron sometidos a un análisis de varianza (Fischer) y al existir diferencias significativas se aplicó la prueba de Duncan, para determinar el mejor tratamiento. De este análisis se obtuvo que el tiempo de calcinación es la variable que tiene mayor efecto sobre la conversión, la cantidad de carbonato de magnesio presente en la roca caliza afecta también la conversión estableciéndose que a mayor cantidad de carbonato de magnesio se produce una disminución en la conversión, y el carbón vegetal adicionado en un 10 %, no disminuye el efecto del carbonato de magnesio.

## INTRODUCCIÓN

El presente trabajo tiene como objeto determinar y evaluar el grado de conversión de piedra caliza dolomítica a cal viva, a nivel de laboratorio, por la presencia de diferentes cantidades de magnesio, y, la combinación de dos factores que también influyen en la conversión que son el tiempo de calcinación y el porcentaje de carbón vegetal.

Para llevar a cabo este estudio se realizó una revisión bibliográfica relacionada con el tema, en la cual se encontraron más tesis referentes a algunas condiciones para la conversión de caliza dolomítica a cal viva, siendo estas la temperatura de calcinación de 700 °C. y el tipo de carbón utilizado el del más alto poder calorífico .

Con este estudio se espera ampliar más el conocimiento de utilizar piedra caliza dolomítica en la calcinación, puesto que no existe información respecto de como el porcentaje de magnesio presente en la piedra caliza afecta su conversión a cal viva para una granulometría de la piedra caliza de 3.36-4.76 mm.. Hay que determinar y evaluar el comportamiento del grado de conversión de piedra caliza a cal viva en función del porcentaje de magnesio, tiempo de calcinación y el porcentaje de carbón vegetal agregado como activador energético para, un tamaño de partícula de 3.36-4.76 mm. .

## **1.-OBJETIVOS**

### **1.1 Objetivo general**

**1.1.1 Determinar y evaluar el grado de conversión de caliza dolomítica a cal viva utilizando calizas con diferentes grados de dolomitización, tiempos de calcinación y porcentaje de carbón vegetal. Trabajando el proceso a una temperatura de 700 °C y un tamaño de partícula de 3.36 - 4.76 mm. .**

### **1.2 Objetivos específicos**

**1.2.1 Determinar y evaluar el grado de conversión de caliza dolomítica a cal viva en función de los grados de dolomitización de 13.449 %, 24.954% y 34.491 %.**

**1.2.2 Determinar y evaluar el grado de conversión de caliza dolomítica a cal viva en función de los tiempos de la reacción de calcinación de 3 h. , 5 h. y 7 h.**

**1.2.3 Determinar y evaluar el grado de conversión de caliza dolomítica a cal viva en función de los porcentajes de carbón vegetal de 0 % y 10 %.**

## **2. HIPÓTESIS**

### **2.1 HIPÓTESIS DE TRABAJO**

Es posible correlacionar información para determinar y evaluar el grado de conversión de caliza en función distintos grados de dolomitización y de tiempos de calcinación, tomando en cuenta la compensación favorable que aporta el carbón vegetal agregado como activador energético.

### **2.2 HIPÓTESIS ESTADÍSTICA.**

**H<sub>0</sub> :** existen variaciones significativas para la conversión de caliza dolomítica a cal viva, por la presencia de diferentes cantidades de magnesio y tiempos de calcinación cuyo efecto disminuye al utilizar carbón vegetal como activador energético.

**H<sub>1</sub> :** no existen variaciones significativas.

### 3.-MARCO TEÓRICO

#### 3.1 Aspectos generales de las piedras calizas dolomíticas y las cales dolomíticas.

La caliza es en general roca carbonosa formada o fósil, esta compuesta principalmente de carbonato de calcio o una combinación de carbonato de calcio y carbonato de magnesio, con una cantidad variable de impurezas, las más comunes de estas son los silicato y el aluminio. En contraste, la cal es invariablemente derivada de la caliza, calcinando la caliza se produce  $\text{CaO}$  o cal viva. El proceso de calcinación produce  $\text{CO}_2$  y  $\text{CaO}$ , y cuando es añadida agua al  $\text{CaO}$  se produce hidróxido de calcio o cal hidratada, este proceso se le llama hidratación o apagado de la cal, y su reacción es Exotérmica.(Austin, 345). Las cales Magnesianas son más lentas para hidratarse que las cales de calcio, debido a la aglutinación causada por el sobrequemado de la porción de carbonato de Magnesio de la piedra.(Boyton, 27).

Las calizas pueden estar compuestas de 4 minerales: Calcita, Aragonita, Dolomita y Magnesita. Los dos tipos fundamentales de calizas son las de alto contenido de calcio y las dolomitas. El aragonito y la calcita son dos formas cristalinas del  $\text{CaCO}_3$  que se presentan en forma natural y contienen 100 % de  $\text{CaCO}_3$ . El aragonito cristaliza en forma prismática del sistema Rombico, la calcita cristaliza en forma hexagonal y rombohédrica.(Boyton, 22). La dolomita es un carbonato doble de Calcio y Magnesio  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ .

La caliza pura dolomítica contiene un rango de 40 - 44 % de  $\text{MgCO}_3$  y 54.58 %  $\text{CaCO}_3$ , sin embargo el termino más usado para piedra caliza que contiene 20 % o más de  $\text{MgCO}_3$  es "dolomita", las piedras calizas que contienen carbonato de Magnesio entre 5 -

20%, que es menor que el de las dolomitas, son llamadas calizas Magnesianas (Boyton,21) . Una clasificación más general es la siguiente:

Calizas puras ----- MgO  $\leq$  6 %

Calizas dolomíticas----- MgO  $\geq$  6 % .

### 3.2 Propiedades físicas

#### 3.2.1 Calizas dolomíticas:

**Color:** usualmente las calizas dolomíticas son blancas, cuando son puras ( con una tonalidad rosada o marrón) pero de ordinario varia su color entre gris y negro, a consecuencia de las impurezas que contiene (Boyton,34).

**Textura:** la difracción con Rayos X ha revelado que todas las calizas son cristalinas. Sin embargo el tamaño, uniformidad y arreglo de su estructura cristalina varia grandemente, produciendo una gran diferencia de durezas y densidades .

**Porosidad:** hay una considerable variación en el grado de porosidad, la cual es determinada como el porcentaje de espacio del poro en el volumen total de la piedra. Los rangos de porosidad de las piedras calizas generalmente están entre 0.3 y 12 %.

**Estructura cristalina:** la difracción con rayos X revela que todas las calizas calcitas y dolomíticas son cristalinas en el sistema rombohedrico. En comparación, el aragonito  $\text{CaCO}_3$  es ortorrómbico. La estructura molecular de la calcita y la dolomita se muestra en las figura 1 y figura 2 respectivamente, demostrando esto las pequeñas diferencias en las dimensiones y ángulos de sus unidades moleculares. La inclusión del pequeño átomo de Magnesio reduce la dimensión de 6.36 Å. para la calcita a 6.02 Å. y el ángulo de  $46^\circ 6'$  a  $47^\circ 7'$ . La Magnesita  $\text{MgCO}_3$  tiene una dimensión menor de 5.61 Å. para un ángulo mayor de  $48^\circ 12'$  (Boyton, 45).

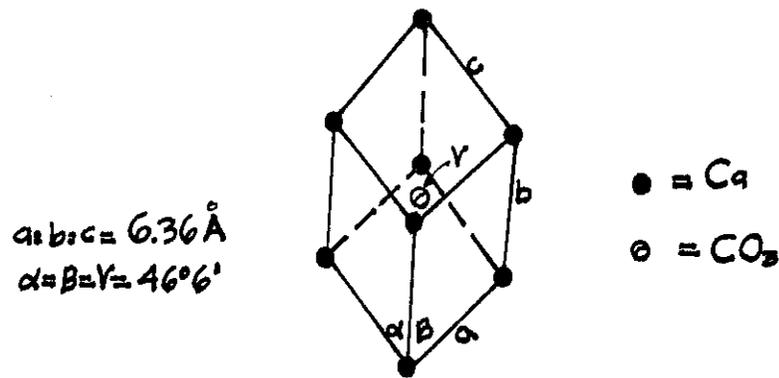


FIGURA 1. Unidad celular, estructura cristalina de calcita

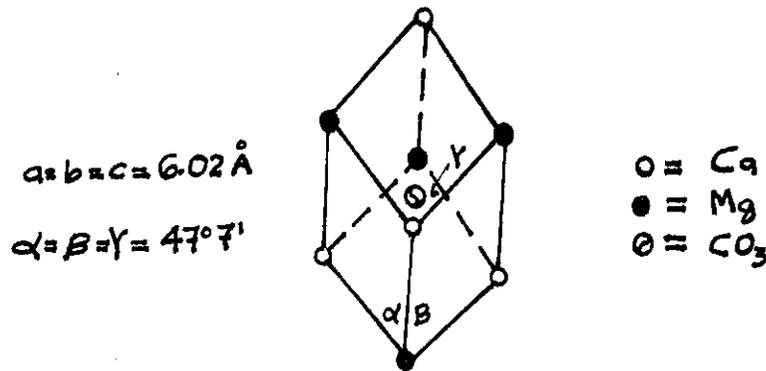


FIGURA 2. Unidad celular, estructura cristalina de dolomita

**Densidades Volumétricas:** la densidad de la caliza varía según el contenido de humedad, la textura y la porosidad de la piedra (Boyton, 32). La densidad real de la caliza dolomítica prescindiendo de los poros llenos de aire, se ve en la tabla 16 del Anexo b.

**Gravedad específica:** para las calizas dolomíticas comerciales es: 2.75 - 2.90.

**Dureza:** la calcita pura estandariza en la escala de Moh en 3, la dolomita es más dura que la piedra calcita, pero su cristal es relativamente quebradizo .

**Esfuerzo :** el esfuerzo a la compresión está entre un rango de 8.27 - 195.8 Mpa.  
**Esfuerzo a la cizalladura** valores típicos en un rango entre 4.14 - 20.27 Mapa.. El valor del esfuerzo a la tensión ha sido reportado entre 2.41 - 5.21 MPa.

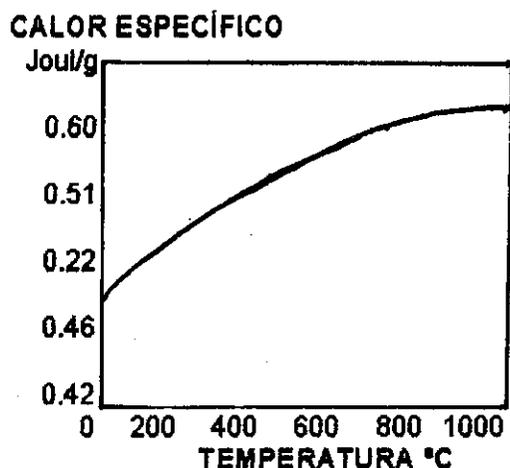
**Coefficiente de expansión :** de 0 a 300 °C la expansión de la caliza es mínima, pero el coeficiente de expansión de la caliza dolomítica tiene una medida de  $5 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}$ .

**Módulo de Young:** rango de valores entre 22.5 y  $86.2 \cdot 10^6 \text{ Kg/cm}^2$

**Conductividad térmica:** algunos investigadores han reportado lo siguiente que a 123 °C la conductividad termica de caliza dolomítica es de  $0.0034 \text{ cal/cm}^2 \cdot \text{seg} \cdot ^\circ\text{C}$

**Calor específico:** el calor específico de la caliza dolomítica a 100 °F en Joules/g 0.499 .

El calor específico se incrementa con rangos mayores, de temperatura como se aprecia en la figura 3 (Boyton, 34).



**Figura 3** Calor específico de la calcita y dolomita en función de la temperatura

**Calor de fusión:** en la formación de la calcita por  $\text{CaO} + \text{CO}_2 \rightleftharpoons \text{CaCO}_3$  el calor de la reacción es 42,600 cal/mol a 25 °C. Solamente el valor para la magnesita esta en 28,900 cal/mol, la dolomita esta intermedia entre estos dos valores.

#### 1.2.2 Propiedades físicas de la cal viva (Boyton, 36).

**Color :** la cal dolomítica (en general) presenta una tonalidad grisácea u oscura, de allí proviene su denominación de cal gris.

**Gravedad específica :** los óxidos dolomíticos tienen una gravedad específica 3.5 a 3.6 y una gravedad aparente específica 2.06-2.28 .

**Índice de refracción :** el CaO es 1.83, para el MgO puro 1.736. La cal viva dolomítica tiene un valor más bajo que el del CaO.

**Punto de fusión :** el del CaO es 2570 °C y el del MgO 2800 °C, los óxidos dolomíticos tienen un valor intermedio.

**Conductividad térmica :** ha sido estimado entre 0.0015 - 0.002 cal/(cm<sup>3</sup>.seg.°C)

**Punto ebullición :** el del CaO es 2850 °C y el del MgO es de 3600 °C, los óxidos dolomíticos tienen un valor intermedio.

**Calor específico :** para dolomitas el calor específico está entre 0.185 a 0.319.

**Porosidad :** la cal viva dolomítica tiene un valor entre 8-12 % dependiendo de la estructura de la caliza, temperatura y grado de calcinación.

**Resistencia :** 3 a 4 en la escala de Moh.

**Coefficiente de expansión :** los valores reportados son:

145 x 10<sup>-7</sup> (300 a 700 °C)

138 x 10<sup>-7</sup> (0 a 1700 °C)

**Conductividad térmica :** los valores están en el siguiente rango 0.0015 - 0.002 cal/cm<sup>2</sup>.°C

**Dureza :** la cal viva dolomítica esta entre 3 y 4 en la escala de Moh.

**Calor de formación :** el valor 151,900 cal/mol es generalmente reconocido para el CaO, para el MgO 143,750 cal/mol es el valor a 298 °C.

### 1.3 Propiedades químicas de las calizas

**Estabilidad química :** las calizas cálcicas y dolomíticas son compuestos químicamente estables, la descomposición nunca ocurre a temperaturas ordinarias (en fabricas, fuera del rango de temperaturas del cero absoluto hasta 600 °C). La descomposición puede ocurrir solamente a altas temperaturas, aunque puede reaccionar con ácidos fuertes (Boyton, 36).

**Valor pH :** las calizas son invariablemente alcalinas, la dolomita tiene valores altos alrededor de 9 a 9.2.

**Solubilidad :** en términos de actividad como moles/litro el valor de solución obtenido para el  $\text{CaCO}_3$  es de  $0.99 \times 10^{-6}$  moles/litro (a  $15^\circ\text{C}$ ) y para el  $\text{MgCO}_3$  de  $2.6 \times 10^{-6}$  moles/litro (a  $72^\circ\text{C}$ ).

**Disociación Térmica :** esta es la más importante propiedad química de la caliza. Todas las rocas carbonosas se disocian a alta temperatura, formando óxido de calcio y magnesio expulsando  $\text{CO}_2$  gaseoso.

**Temperatura de disociación :** para la calcita es  $898^\circ\text{C}$  y 760 mm de Hg. de presión. La temperatura de la dolomítica no ha sido nunca explícita. El carbonato de Magnesio se disocia a temperaturas mucho más bajas de  $402 - 480^\circ\text{C}$ . de acuerdo a la mayoría de investigadores. El rango en valores probablemente se debe a la diferencia en condiciones del experimento y pureza de la magnesita, los valores bajos reportados posiblemente se deben a la presencia de humedad; otras hipótesis de investigadores que la disociación ocurre en tres estados a  $402^\circ\text{C}$ ,  $438^\circ\text{C}$  y  $480^\circ\text{C}$ .

Debido a las proporciones diferentes de  $\text{MgCO}_3$  a  $\text{CaCO}_3$  de muchas especies de dolomitas y calizas magnesianas, la temperatura de disociación naturalmente también varia y es mucho más difícil calcularla.

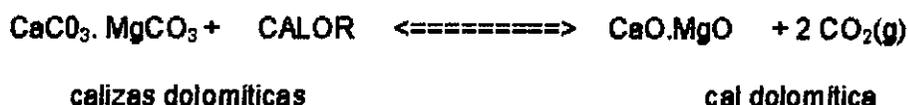
Diferencias en la cristalinidad de la roca también parecen añadir la disparidad de los datos.

El  $\text{MgCO}_3$  de la dolomita se descompone a temperaturas más altas que la magnesita natural. Azbe y otros han detectado alguna disociación de la dolomita cerca de  $510^\circ\text{C}$  pero la disociación no es apreciable hasta  $590^\circ\text{C}$ . aquí la disociación progresa rápidamente. Se ha encontrado consenso por otros de que el rango de disociación es de  $500$  a  $750^\circ\text{C}$ , para las dolomitas completando la disociación en  $800^\circ\text{C}$ ,

un buen valor común para que la disociación se complete a 760 mm. de Hg. de presión en una atmósfera 100 % de CO<sub>2</sub> es 725 °C (Boyton, 45).

### 1.3 Análisis químico de la calcinación:

Desde el punto de vista de la química, la reacción de calcinación, es una reacción reversible descrita de la siguiente manera (aplicable para calizas dolomíticas):



Existen tres factores que afectan la cinética de la reacción de descomposición de la caliza:

1. La piedra debe ser calentada hasta alcanzar la temperatura de disociación de los carbonatos.
2. Esta temperatura mínima de descomposición (aunque usualmente se trabaja a una temperatura superior) debe mantenerse para un período determinado.
3. El dióxido de carbono que es generado en forma gaseosa debe ser removido.

Respecto a los dos primeros factores: "hay una temperatura de calcinación óptima y rango de calentamiento para cada caliza que solo se puede determinar por experimentación" (Boyton, 35) . Las siguientes variables afectan el grado de conversión y la calidad de la cal viva :

1. Calidad de la piedra
  - a. características físicas (tipo de cristalinidad)
  - b. tendencia a decrepitarse
  - c. calidad y cantidad de la cal
2. Tamaño de la piedra.

3. Rango de calcinación
4. Temperatura de calcinación
5. Duración de la calcinación
6. Reactividad química
7. Densidad y porosidad
8. Espaciamiento de cristales
9. Calidad y tipo de combustible
10. Posibilidad de recarbonatación

Durante la transformación de carbonato a óxido, dos pasos pueden ser diferenciados: (Austin, 346).

1. desintegración de la estructura original de las rocas
2. formación de nuevas estructuras.

La primera puede ser subdividida en las siguientes:

- (a) rompimiento mecánico (trituration)
- (b) descomposición térmica

Para la segunda:

- (a) nuevos arreglos estructurales debidos al calor (nuevas formas polimórficas).

La disociación del  $\text{CO}_2$  en el proceso de calcinación siempre procede gradualmente de la parte externa de la superficie hacia el interior. Usualmente profundidad de la penetración se mueve uniformemente alrededor de todas las caras de la piedra. El orden para que la disociación continúe en el interior de la piedra, mayor temperatura es necesaria y debe continuar así hasta llegar al centro de la misma. (Boyton, 37).

**Granza** : se le conoce como granza en el proceso de calcinación a toda aquella porción de caliza que aun conserva  $\text{CO}_2$  después de ser calcinada. Su origen se debe a dos causas:



- (a) poco quemado de la piedra
- (b) tamaño de la piedra irregular (muy grande para el proceso)
- (c) atmósfera rica en  $\text{CO}_2$  (poca ventilación en el horno de cal).

**Perdida de fuego :** está no es más que el desprendimiento de los materiales volátiles presentes en la caliza cuando se alcanza, la temperatura de calcinación. Los volátiles son principalmente:

- Agua combinada químicamente
- Materiales orgánicos
- Dióxido de carbono

La pérdida de fuego para la caliza dolomítica es 52.2 % en peso de  $\text{CO}_2$  gaseosos.

#### 1.4 Procesos e industrias que utilizan la cal.

La cal en la industria es el segundo químico más usado después del ácido sulfúrico (Boyton,340).

Los procesos e industrias en que se usa la cal se presentan en la tabla 17 del anexo b.

Como parte de un proyecto del Centro de Investigaciones de Ingeniería de la sección de Laboratorio de Química Industrial, Universidad de San Carlos de Guatemala **EVALUACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DEL PROCESO DE CALCINACIÓN DE CALIZAS Y DOLOMITAS** se han desarrollado estudios relacionados con el proceso de calcinación, los cuales han sido asesorados por el Ingeniero César García Guerra y a continuación se mencionan :

El Ing. Manuel de León, en 1990 con su tesis Estudio del grado de conversión de caliza dolomítica a cal viva, a diferentes temperaturas y tiempos de procesamiento para una presión atmosférica de 640 mm Hg. determino las condiciones óptimas (temperatura de calcinación, tiempo y grosor de las partículas) de producción de cal dolomítica a escala de laboratorio. Obtuvo la máxima conversión de 76.95 % a una  $T = 850^{\circ}C$ , tiempo = 3 h. y grosor de la partícula 100-150 mesh.

En 1990, la Ingeniera María Morales, presento su tesis 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, en esta tesis se evaluó si existía un incremento en el porcentaje de conversión en el proceso de calcinación de piedra caliza a cal viva por incorporación de carbón vegetal y llegó a comprobar que el porcentaje de conversión de piedra caliza a cal viva se incrementa significativamente con la adición de carbón vegetal en el proceso de calcinación .

Para 1991, el Ingeniero Edy Pérez, en su tesis 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., , investigó si existía una respuesta favorable en el porcentaje de conversión durante el proceso de calcinación de piedra caliza a cal viva por el efecto de la adición de carbón vegetal con diferentes poderes caloríficos y llego a la conclusión de que el carbón vegetal de mayor poder calorífico mejora la conversión de carbonato de calcio a cal viva con un alto rendimiento, si éste se adiciona a un proceso de calcinación de  $750^{\circ}C$ .

El Ingeniero Byron Aguilar, en 1996 con su tesis Evaluación del efecto del tamaño de la caliza sobre el proceso de calcinación de periodo variable a 700 C. y 640 mm de Hg. de presión barométrica cuando se utiliza carbón vegetal como coadyuvante energético, evaluó el efecto que tiene el tamaño de la roca caliza, sobre el porcentaje de conversión, utilizando 5 % de carbón vegetal . Trabajo con tres periodos de calcinación (3 h., 5 h. y 7 h.) y tres tamaños diferentes de roca caliza (6.35-12.70, 19.05-25.40 y 38.10-50.80 mm.). Llegó a la conclusión que el porcentaje de conversión de una roca grande es menor que el de una roca más pequeña para un tiempo de calcinación cualquiera y que el efecto de la variable tiempo de calcinación sobre el porcentaje de conversión es más grande que el efecto de la variable tamaño de roca que se calcina .

En 1996, la Ingeniera Verónica López, con su tesis Estudio del grado de conversión de caliza dolomítica con diferentes contenidos de  $MgCO_3$  a cal viva mediante el procesamiento a diferentes temperaturas y tiempos de calcinación, investigo si existía un efecto negativo en la eficiencia de conversión de caliza dolomítica con diferentes grados de dolomitización y llegó a la conclusión de que no existe un efecto negativo por parte del carbonato de magnesio en la eficiencia de conversión de caliza dolomítica a las condiciones, sobre todo con una granulometría constante de -8+10 mallas.

Y en 1997, el Ingeniero José May, con su tesis 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 temperaturas, tiempos de

calcinación y porcentajes de carbón, agregados para una presión de 640 mm Hg, evaluó el efecto que tienen los siguientes factores en la conversión de caliza a cal viva a nivel de laboratorio: tiempo de calcinación, tamaño de partícula y porcentaje de carbón vegetal, llegando a la conclusión que la variable con mayor efecto sobre la conversión de piedra caliza a cal viva es el tiempo de calcinación, que la cantidad de carbón para porcentajes en peso del 5 % y 10 % tienen un efecto igual sobre el grado de conversión así como el tamaño de partícula ya sea de -9+6 mesh o -6+8 mesh.

#### 4.-JUSTIFICACIONES

Es importante el estudio del comportamiento del proceso de la manufactura de la cal y contar con información técnica que permita obtener un alto volumen de producción y calidad de la cal viva a un costo más bajo .

El presente trabajo se orientó a determinar la conversión de piedra caliza a cal viva, influida por la presencia de magnesio en la caliza, porcentajes de carbón vegetal y tiempos de calcinación. La piedra caliza que se dispone para la fabricación de cal viva excepcionalmente es pura ( $< 5 \% \text{ Mg}$ ), por lo que medir como varía la conversión de caliza a cal viva en función del porcentaje de magnesio es muy valioso para obtener el comportamiento de la conversión. Las otras dos variables del proceso con el que se midió la conversión: el tiempo de calcinación y el porcentaje de carbón vegetal son importantes, ya que al establecer su influencia sobre el grado de conversión se puede lograr una disminución de los requerimientos energéticos del proceso de calcinación.

## **5.- MÉTODO DE INVESTIGACIÓN**

### **5.1 Localización**

Las pruebas para determinar la conversión de caliza dolomítica, se realizaron en el Laboratorio de Química Industrial del Centro de Investigaciones de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala. La determinación del poder calorífico (Kcal/Kg.) y composición química del carbón vegetal en el Laboratorio de Química de la Dirección de Servicios Generales y Técnicos del Ministerio de Energía y Minas . Y el análisis de la composición química de la piedra caliza en el laboratorio de Cementos Progreso ( por fluorescencia de rayos X).

### **5.2 Materiales y equipo**

#### **5.2.1 Materiales**

(a) Caliza con diferentes grados de triturada a un tamaño de roca con diámetro promedio de 3.36 mm. - 4.76 mm. Muestra proporcionada por la empresa Cementos Progreso S.A..

(b) Carbón vegetal de alto poder calorífico, en base húmeda y triturado a un tamaño de roca con diámetro promedio de 3.36 - 4.76 mm.

#### **5.2.2 Equipo**

- (a) Tapas de crisoles de 100 cm<sup>3</sup>
- (b) Balanza analítica modelo Sartorius AE 200 , capacidad 160 gramos, sensibilidad 1/1000 gramos.
- (c) desecador de vidrio, agente desecante sílica gel.
- (d) mufra marca Heavy Duty, cámara 8,900 cm<sup>3</sup>, 230 voltios, 12.5 amperios , 2070 watts , 60 Hz.
- (e) Espátula.

### 5.3 Metodología experimental

#### 5.3.1 Diseño de tratamientos

Para medir el efecto que cada una de las variables seleccionadas: concentración de magnesio y tiempo de calcinación, produce sobre el porcentaje de conversión de caliza a cal utilizando un 10 % de carbón vegetal; se realizaron 18 tratamientos con tres repeticiones cada uno. Los tratamientos a realizar se presentan en la Tabla No.18. del anexo b.

#### 5.3.2 Diseño experimental

Se realizó un experimento factorial con un arreglo combinatorio y una distribución completamente al azar con [3 porcentajes de magnesio \* 3 tiempos \* 2 porcentaje de carbón] = 18 tratamientos y tres repeticiones.

#### 5.3.3 Unidad experimental

Para estudiar la influencia de cada porcentaje de magnesio, y tiempo de calcinación en la conversión de piedra caliza a cal viva

la unidad experimental de laboratorio utilizada consto de:

- (a) Tipo de carbón vegetal utilizado será de alto poder calorífico ( 7350.66 Kcal/Kg.).
- (b) El tamaño de la caliza dolomítica será de 3.36 - 4.76 mm., al igual que el del carbón vegetal.
- (c) Las cantidades de materia para cada muestra se detallan a continuación:

Caliza dolomítica	18	g
Carbón vegetal 10 %	2	g

#### 5.3.4 Manejo del experimento

La preparación del material geológico (caliza dolomítica y carbón vegetal) para el experimento se hizo triturándolo y tamizándolo a un tamaño de 3.36 - 4.75 mm. Luego se almaceno este material geológico en bolsas plásticas previamente identificadas y rotuladas, y se procedió a guardarlas en una desecadora. Cada muestra carbón vegetal y caliza dolomítica antes de ser calcinada se mezclo para que la energía liberada por el carbón fuera aprovechada uniformemente en el proceso. La calcinación se llevo a cabo en dos partes: La primera parte a una temperatura de 700 C . La recalcinacion en la segunda parte a 1000 °C. durante 5 horas hasta obtener peso constante. Durante la calcinación, se abrió la mufia 30 segundos cada 30 minutos, con el fin de renovar la atmósfera de la mufia: primero para evitar recarbonatación y segundo para facilitar la combustión completa del carbón vegetal.

## 6. Análisis estadístico.

La conversión de caliza a cal viva que se obtuvo en cada uno de los tratamientos fue sometida a un análisis de varianza, para el diseño factorial, con un arreglo combinatorio y una distribución completamente al azar con diez y ocho tratamientos y tres repeticiones. El modelo estadístico utilizado fue el siguiente:

$$Y = U + A_i + B_j C_k + AB_{ij} + AC_{ik} + BC_{jk} + ABC_{ijk} + E_{ijk}$$

Donde:

$U$  = efecto de la media general

$A_i$  = efecto del  $i$ -ésimo nivel del factor A (% Carbonato de Magnesio).

$B_j$  = efecto del  $j$ -ésimo nivel del factor B (Tiempo de calcinación).

$C_k$  = efecto del  $k$ -ésimo nivel del factor C (% carbón vegetal).

$AB_{ij}$  = interacción del  $i$ -ésimo nivel del factor A (% carbonato de magnesio) con el  $j$ -ésimo nivel del factor B (Tiempo de calcinación).

$AC_{ik}$  = interacción del  $i$ -ésimo nivel del factor A (% Carbonato de Magnesio ) con el  $k$ -ésimo nivel del factor C (% carbón vegetal).

$BC_{jk}$  = interacción del  $j$ -ésimo nivel del factor B (Tiempo de calcinación). con el  $k$ -ésimo nivel del factor C (% carbón vegetal).

$ABC_{ijk}$  = interacción del  $i$ -ésimo nivel del factor A (% Carbonato de Magnesio ) con el  $j$ -ésimo nivel del factor B (Tiempo de calcinación). y con el  $k$ -ésimo nivel del factor C (% carbón vegetal).

$E_{ijk}$  = error experimental asociado a la  $ijk$ -ésima unidad experimental.

$Y$  = Variable respuesta (% conversión de caliza a cal viva).

Posteriormente, se aplicó la prueba de medias de Duncan como resultado de las diferencias altamente significativas entre tratamientos.

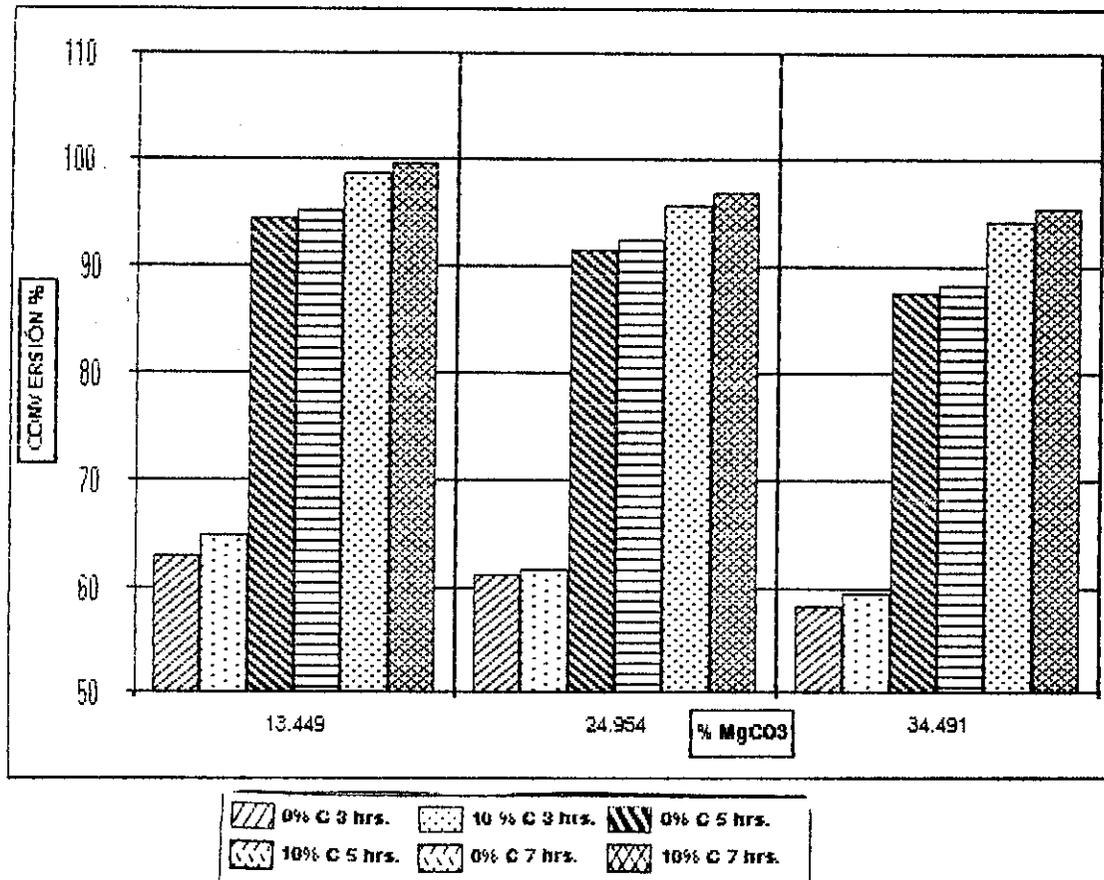
## 7.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El objetivo general de este trabajo de tesis es medir la variación en la conversión de caliza dolomítica a cal viva, por el efecto de tres parámetros : porcentaje de carbonato de magnesio presente en la caliza, tiempo de calcinación y porcentaje de carbón vegetal para una temperatura de calcinación de 700 °C. y una granulometría promedio de la piedra caliza de 3.36-4.76 mm. . Los resultados obtenidos aparecen en la tabla 6 del anexo b y en las gráficas No. 1 y la No. 2. A continuación se presenta una discusión acerca de cada una de las variables mencionadas.

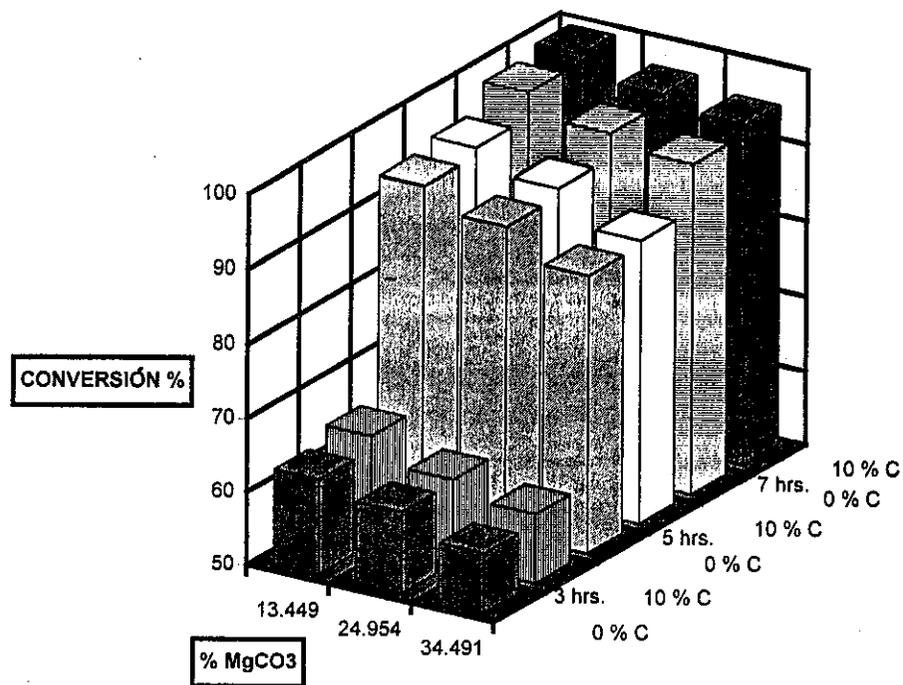
Experimentalmente, se ha encontrado que cada una de las variables involucradas, tienen un efecto significativo en la conversión de caliza a cal viva.

Estadísticamente (según prueba de Fisher) el tiempo de calcinación es el factor que más afecta la conversión de caliza, después el porcentaje de carbonato de magnesio y por último el carbón vegetal como aditivo energético. .

De acuerdo a la prueba de fisher no es significativo el efecto de la interacción de las tres variables juntas sobre la conversión de caliza a cal viva. Sin embargo si es significativo el efecto de la interacción entre el factor tiempo de calcinación y el factor carbonato de magnesio sobre la conversión.



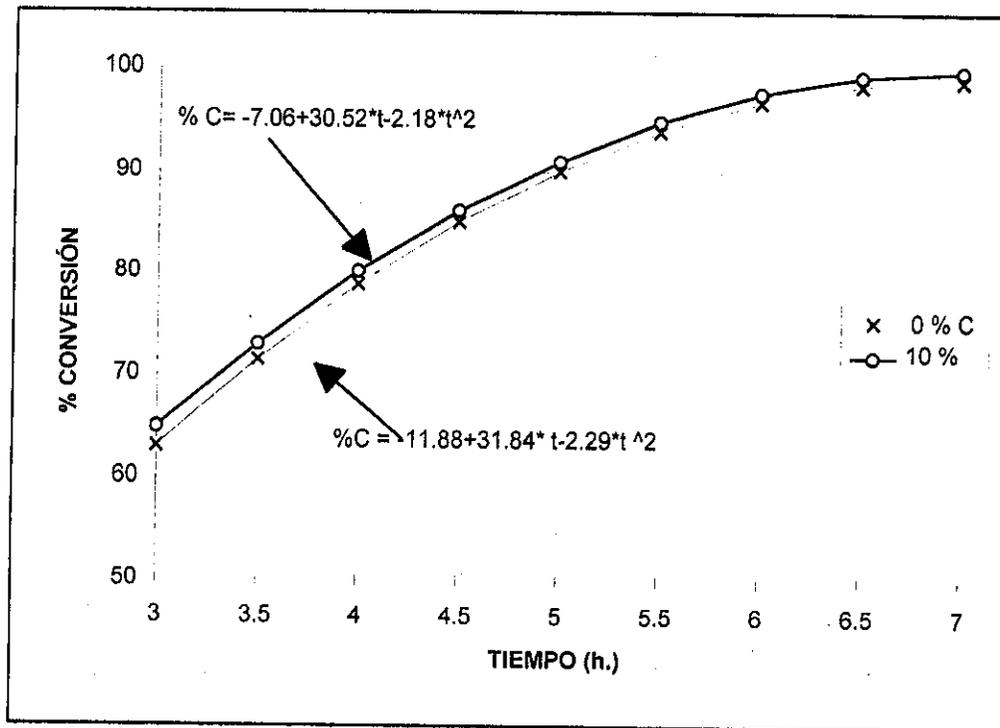
**GRÁFICA No. 1** Porcentaje de conversión de piedra caliza a cal viva en función del carbonato de magnesio, tiempo de calcinación y % de carbon vegetal. Proceso realizado a una temperatura de 700 °C., presión barométrica de 640 mm. Hg. y un tamaño de piedra caliza promedio de 3.36 mm- 4.76 mm.



**GRÁFICA No. 2** Porcentaje de conversión de piedra caliza a cal viva en función del carbonato de magnesio, tiempo de calcinación y % de carbon vegetal. Proceso realizado a una temperatura de 700 °C., presión barométrica de 640 mm. Hg. y un tamaño de piedra caliza promedio de 3.36 mm- 4.76 mm.

En las gráficas 3, 4 y 5 se observa el efecto del tiempo sobre la conversión, la conversión promedio para un tiempo de 3 horas es de 61.95 %, para un tiempo de 5 horas es de 91.98 % y para un tiempo de 7 horas es de 97.30%. Este comportamiento de la conversión en función del tiempo de calcinación concuerda con investigaciones anteriores; para un tiempo mayor de calcinación el % de conversión es mayor tanto en calizas dolomíticas (López, 21), como en calizas puras (Morales, 26 ). La prueba de Duncan, indica que la diferencia de la conversión entre 3 y 5 horas, y entre 5 y 7 horas es significativa, siendo mayor la diferencia significativa entre 3 y 5 horas. Este comportamiento de la conversión de la piedra caliza dolomítica en función del tiempo de calcinación es el mismo comportamiento que presentan las calizas dolomíticas de acuerdo al trabajo de tesis de la Inga. Verónica López, aclarando que es el comportamiento el mismo y no los valores numéricos de la conversión, ya que estos sí difieren de las calizas dolomíticas a las calizas puras para un mismo tiempo de calcinación. La función matemática que describe el comportamiento del % de conversión en función del tiempo ( tiempo dado en horas de calcinación) se determinó por el método de mínimos cuadrados obteniendo ecuaciones polinomiales de orden 2, que se observan en las gráficas 3, 4 y 5, y en la tabla 19 del anexo b.

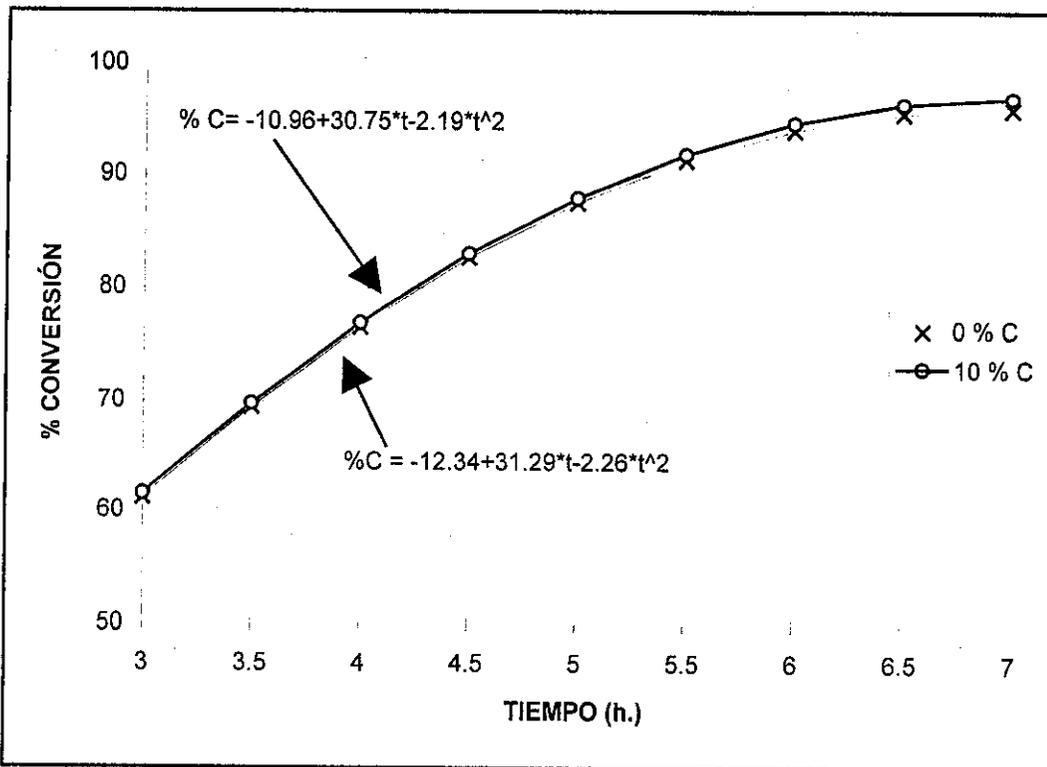
El tiempo de precalentamiento necesario para aumentar la temperatura de 20 °C a 700 °C en la mufla fue de 1 hora y 14 minutos como se observa en la gráfica No. 1 del anexo c., durante este tiempo de precalentamiento hay eliminación de agua y de materiales volátiles. En la investigación de tesis del Ingeniero, Edy Pérez, (Pérez, 27), llegó a determinar que para un tiempo de precalentamiento de 1 hora y 25 minutos, existe un 2.56 % de conversión (sin utilizar carbón vegetal) y 29.14 % de conversión (utilizando 10 % de carbón vegetal), según Boyton, esto es debido a que la "disociación de las calizas dolomíticas comienzan a los 500 °C "



**GRÁFICA 3** Efecto del tiempo de calcinación sobre la conversión para un 13.449 % de  $MgCO_3$

**NOMENCLATURA :**

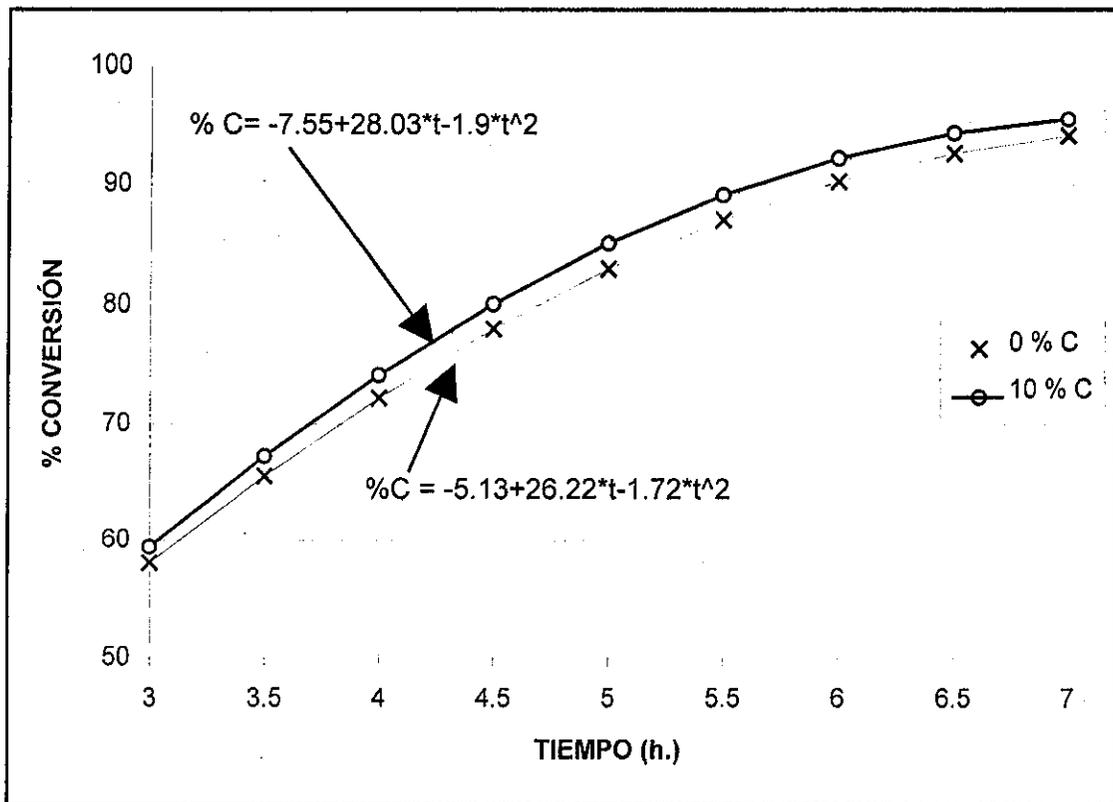
% C = porcentaje de conversión de caliza a cal viva  
 t = tiempo de calcinación



**GRÁFICA 4** Efecto del tiempo de calcinación sobre la conversión para un 24.95 % de  $MgCO_3$

**NOMENCLATURA :**

% C = porcentaje de conversión de caliza a cal viva  
 t = tiempo de calcinación



GRÁFICA 5 Efecto del tiempo de calcinación sobre la conversión para un 34.491 %  $MgCO_3$

NOMENCLATURA :

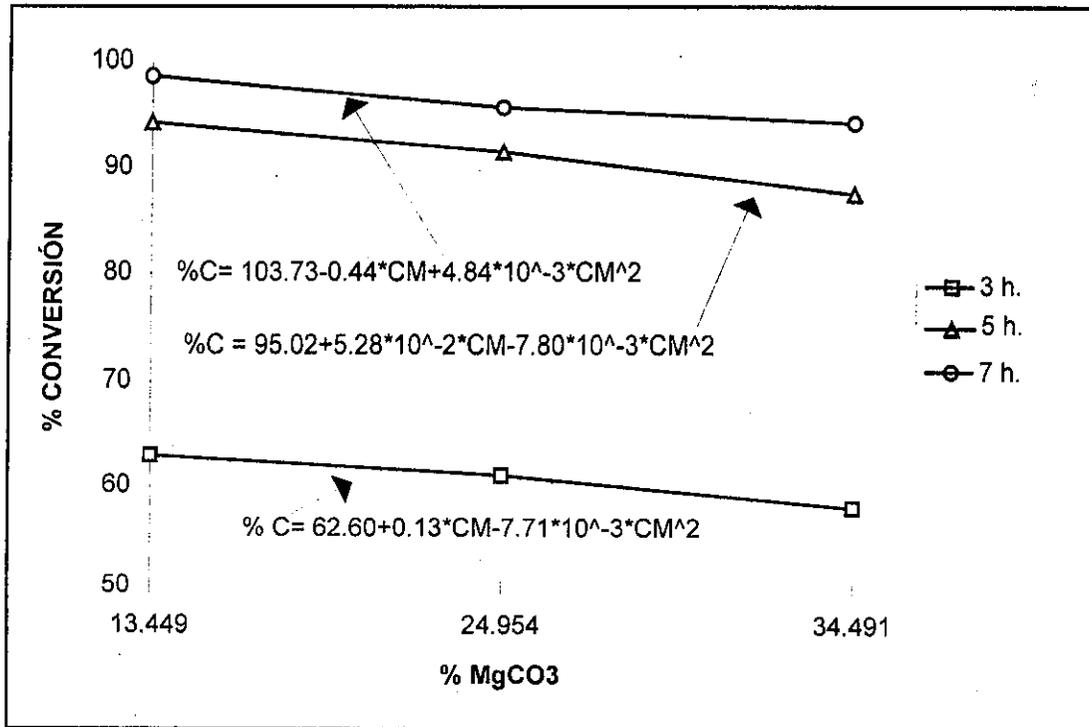
% C = porcentaje de conversión de caliza a cal viva  
 t = tiempo de calcinación

(Boyton,83) al llegar a 700 °C ya ha reaccionado  $MgCO_3$  y algo de  $CaCO_3$  esto explica del porque de esta conversión temprana antes de llegar al "tiempo de 0 h."

El efecto del carbonato de magnesio presente en la roca caliza sobre la conversión se observa en las gráficas 6 y 7. En estas gráficas y en la tabla No. 20 del anexo b se observa que al incrementar la cantidad de carbonato de magnesio en la roca caliza la conversión a cal viva disminuye durante un mismo tiempo de calcinación.

Este comportamiento de la conversión de acuerdo a los resultados analizados depende de la relación  $MgCO_3/ CaCO_3$ . De acuerdo a estos resultados se nota que al incrementar la cantidad de  $MgCO_3$  la conversión disminuye, lo que implica que la presencia de  $MgCO_3$ , incide en forma negativa en la conversión, la Inga. Verónica López, en su trabajo de investigación obtuvo resultados en donde "la presencia de  $MgCO_3$  en la caliza no incide en forma negativa en la eficiencia de conversión" (López, 22). La Inga. Verónica López, realizó la calcinación con un tamaño de partícula de 2.00 - 2.38 mm. (López, 18); en este trabajo se utilizó un tamaño mayor de partícula de 3.36-4.76 mm. lo cual implica que si el tamaño de partícula es mayor la presencia de  $MgCO_3$  comienza afectar negativamente la conversión; se tiene que un cambio en el tamaño de roca caliza que se calcina afecta la manera en que el porcentaje de Carbonato de Magnesio afecta la conversión .

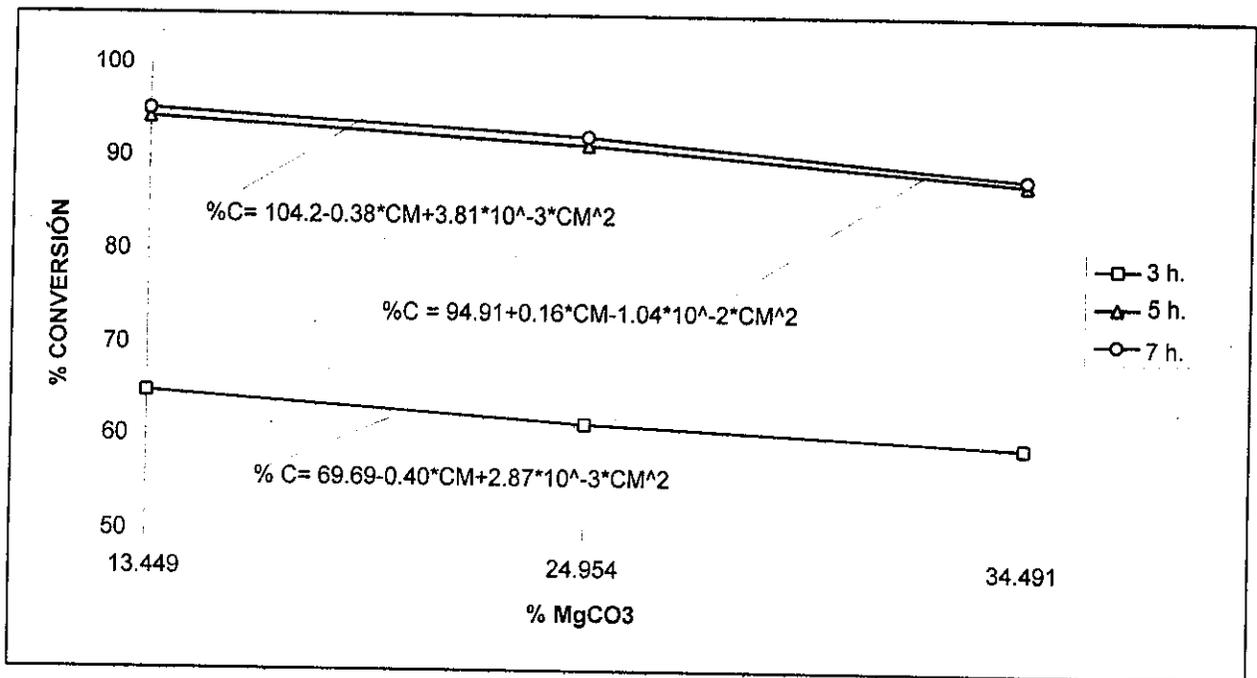
El Ing. Byron Aguilar, en su tesis, concluye que para calizas puras "una disminución en el porcentaje de conversión se da cuando la roca es más grande a un tiempo de duración dado" (Aguilar, 36) calcinando a 700 °C, que es la misma temperatura a la que se trabajó esta investigación. Las moléculas de óxido de magnesio se forman a una temperatura menor que la temperatura con que se forma el óxido de calcio ósea que durante la calcinación se empieza a formar primero una capa de óxido de magnesio en la superficie de la roca, luego comienza a formarse la capa de óxido de calcio; esto hace que cuando la cantidad de carbonato de magnesio al inicio aumente se formara una capa más gruesa de óxido de magnesio, antes de



**GRÁFICA 6** Efecto del carbonato de magnesio sobre la conversión de caliza sin utilizar carbón vegetal como activador energético.

**NOMENCLATURA:**

- %C =** Porcentaje de conversión de caliza a cal viva  
**CM=** Porcentaje de carbonato de magnesio presente en la roca caliza.



GRÁFICA 7 Efecto del carbonato de magnesio sobre la conversión de caliza utilizando 10 % de carbón vegetal como activador energético.

NOMENCLATURA:

- %C = Porcentaje de conversión de caliza a cal viva  
 CM= Porcentaje de carbonato de magnesio presente en la roca caliza.

que se forme el óxido de calcio, provocando esto una resistencia mayor para la transferencia de calor hacia la zona de reacción y para la transferencia de desde la zona de reacción hacia la superficie produciendo esto, un retraso de la conversión por efecto del  $\text{MgCO}_3$  presente al inicio. Interactuando el carbonato de magnesio con el tiempo de calcinación, ya que cuanto más avanzada esta la reacción, mayor será el espesor de la capa de óxido de calcio y de óxido de magnesio provocando retraso en la conversión. Estadísticamente, es significativa la interacción entre el tiempo y el carbonato de magnesio. La función matemática que describe el comportamiento del % de conversión en función del Carbonato de Magnesio (en porcentaje), se determinó por el método de regresión de mínimos cuadrados, las siguientes ecuaciones polinomiales de orden 2 que se observan en las gráficas 6 y 7, y en la tabla 21 del anexo b

El efecto del porcentaje de carbón vegetal, incorporado como aditivo energético, sobre la conversión de calizas se observa en la tabla 20 del anexo b, se puede observar que a medida que aumenta el  $\text{MgCO}_3$  la conversión de caliza disminuye, ya sea utilizando 10 % de carbón vegetal o sin utilizar carbón vegetal, esto implica que al adicionar carbón vegetal no hace disminuir el efecto del  $\text{MgCO}_3$  sobre la conversión. El carbón vegetal utilizado fue de alto poder calorífico ( 7350.66 Kcal/Kg. en base seca) y su composición química se presenta en la tabla No. 4. del anexo b..

El efecto de la variación de las repeticiones en la conversión tiene una desviación estándar máxima en el tratamiento M1T1C2 de 2.85. Este efecto de variación de las repeticiones se debe a tres factores principalmente (1) Distintas condiciones atmosféricas durante la realización del experimento (2) Ventilación de la mufla que provoca variaciones de presión y temperatura en la cámara de la mufla, la temperatura durante cada ventilación varía en  $\pm 5$  C. El gradiente de presión y gradiente de temperatura no son analizados aquí, pues no afectan la reacción (May, 34). (3) Calibración del termopar.

## **CONCLUSIONES**

- 1.- La variación del período de calcinación, es el parámetro que tienen un mayor efecto significativo, sobre la conversión de calizas dolomíticas con diferente grado de dolomitización.
- 2.- El comportamiento matemático de la conversión de calizas dolomíticas en cal viva, en función del período de calcinación es posible describirlo mediante una ecuación cuadrática para períodos de calcinación entre 3 y 7 horas, con un alto grado de correlación.
- 3.- La cantidad de carbonato de magnesio afecta significativamente a la conversión, se establece además, que cuanto mayor cantidad de carbonato de magnesio y aumento del tamaño de partícula, menor será la conversión de caliza dolomítica a cal viva.
- 4.- El carbón vegetal, no compensa el efecto negativo del carbonato de magnesio, sobre la conversión de cal viva.
- 5.- La conversión máxima de caliza dolomítica a cal viva se obtuvo en un período de calcinación de 7 horas de calcinación, con una cantidad de 13.449 % de carbonato de magnesio e incorporando 10 % de carbón vegetal.

## **RECOMENDACIONES**

- 1.- Realizar un estudio que determine la influencia del diseño del horno, en la reacción de calcinación de calizas.
- 2.- Realizar un estudio en el que se determine como influye en la calcinación, el tiempo de precalentamiento antes de alcanzar la temperatura de calcinación de calizas dolomíticas en un sistema de calentamiento estable.
- 3.- Efectuar una investigación sobre la hidratación de calizas dolomíticas, para determinar el efecto del Magnesio en la cinética de la hidratación.
4. Realizar un estudio en el que se determine la variación en los porcentajes de conversión de rocas calizas dolomíticas en función de tamaños de roca caliza mayores de 10 mm.

## BIBLIOGRAFÍA

1. AGUILAR, Byron. Evaluación del efecto del tamaño de la caliza sobre el proceso de calcinación de periodo variable a 700 °C y 640 mm de Hg. de presión barométrica cuando se utiliza carbón vegetal como coadyuvante energético (tesis Facultad de Ingeniería, USAC), Guatemala, 1996.
2. AUSTÍN, George. Manual de procesos químicos en la Industria. Tomo 1 5 ed. en español. México: Editorial McGraw-Hill 1,990
3. BOYTON, Robert. Chemistry and technology of lime and limestone. 2 ed. U.S.A : Editorial Jhon Wiley & Sons. 1,980
4. De León, Manuel . Estudio del grado de conversión de caliza dolomítica a cal viva a diferentes temperaturas y tiempos de procesamiento para una presión atmosférica de 640 mm Hg. (tesis Facultad de Ingeniería, USAC), Guatemala, 1,990
5. KIRK, Raymond & Othmer, Donald. Enciclopedia de tecnología química. TOMO III en español. México: Unión Tipográfica Editorial Hispano Americana 1,961.
6. LOPEZ, Verónica. Estudio del grado de conversión de caliza dolomítica con diferentes contenidos de  $MgCO_3$  a cal viva mediante el procesamiento a diferentes temperaturas y tiempos de calcinación. (Tesis Facultad de Ingeniería, USAC), Guatemala ,1,996
7. MAY, José. 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 temperaturas, tiempos de calcinación y porcentajes de carbón agregados para una presión de 640 mm de Hg. (Tesis: Facultad de Ingeniería, USAC), Guatemala, 1,997
8. MONTGOMERY, DOUGLAS. Diseño y análisis de experimentos. . tr. Deigado, Jaime. México: Grupo Editorial Iberoamericana, 1991.
9. 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

10. 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 diferentes poderes caloríficos realizada a diferentes temperaturas y tiempos de calcinación para una presión atmosférica de 640 mm Hg. . (Tesis: Facultad de Ingeniería, USAC), Guatemala, 1,991

11. REYES CASTAÑEDA, Pedro. Diseño de experimentos aplicados. 2. ed. México: Editorial Trillas 1,981.

# ANEXO

a. Guía de cálculo

El peso de CO<sub>2</sub> liberado debido a la calcinación se calcula así:

La reacción se llevo a cabo en dos partes:

Primera calcinación a T1

T1 = temperatura del experimento = 700 °C

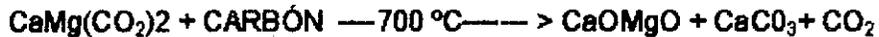
Segunda calcinación a T2

T2 = temperatura de calcinación del residuo = 1000 °C  
(calcinación del CaCO<sub>3</sub> residual)

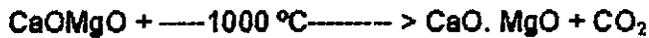
En la primera calcinación se considero que todo el MgCO<sub>3</sub> tiene una conversión total y el CaCO<sub>3</sub> una conversión parcial.

La segunda calcinación se trabajo con el fin de averiguar la cantidad de CaCO<sub>3</sub> que no reacciono a la T1 en la primera calcinación.

Primera calcinación



Segunda calcinación



La cantidad de CO<sub>2</sub> producido en la primera calcinación se determina como:

$$P2 = P_0 - P1 \quad (\text{Ecuac. I})$$

donde:

P2 = peso de CO<sub>2</sub> liberado de la primera calcinación

P1 = peso final de la muestra calcinada, en la primera calcinación

P0 = peso inicial de la muestra caliza + carbón vegetal

A continuación se calcula el porcentaje de pérdida de peso (Pp) con la siguiente fórmula:

$$\% Pp = \frac{P2}{\text{Peso de la muestra geológica}} * 100 \quad (\text{Ecuac. II})$$

El peso de CO<sub>2</sub> producido en la segunda calcinación (P4), por el CaCO<sub>3</sub> que no reaccionó en la primera calcinación se calcula así:

$$P4 = P1 - P3 \quad (\text{Ecuac. III})$$

sea: P3 = Peso final de la muestra en la segunda calcinación

Se calcula el peso de CaCO<sub>3</sub> que reaccionó en la segunda calcinación (P5), por estequiometría de la reacción:

$$P5 \left[ \frac{\text{g. CaCO}_3 \text{ reaccionaron}}{\text{g. muestra.}} \right] = P4 \frac{\text{g. CO}_2}{\text{g. muestra}} * \frac{1 \text{ mol de CO}_2}{44.01 \text{ g. CO}_2} * \frac{1 \text{ mol CaCO}_3}{1 \text{ mol CO}_2} * \frac{100 \text{ g. CaCO}_3}{1 \text{ mol CaCO}_3} \quad (\text{Ecuac. IV})$$

Se evalúa el peso de CaCO<sub>3</sub> que reacciono en la primera calcinación (P7), calculando antes el peso de CaCO<sub>3</sub> (P6), presente al inicio en la muestra caliza:

$$P6 = (\text{peso g. de caliza al inicio}) * \frac{\% \text{ CaCO}_3}{100} \quad (\text{Ecuac. V})$$

$$P7 \left[ \frac{\text{g. CaCO}_3 \text{ reaccionaron primera calcinación}}{\text{g. muestra.}} \right] = P6 - P5 \quad (\text{Ecuac. VI})$$

El porcentaje de conversión del CaCO<sub>3</sub>(P8) se determina así:

$$P8 \left[ \frac{\text{g. CaCO}_3 \text{ reaccionaron}}{\text{g. CaCO}_3 \text{ iniciales en la caliza dolomítica}} \right] = \frac{P7}{P6} * 100 \quad (\text{Ecuac. VII})$$

El peso de CaO producido en la primera calcinación (P9), se determina por estequiometría de la reacción de la manera siguiente:

$$P9 \left[ \frac{\text{g. CaO}}{\text{de muestra}} \right] = P7 * \frac{1 \text{ mol CaCO}_3}{100.09 \text{ g. CaCO}_3} * \frac{1 \text{ mol CaO}}{1 \text{ mol CaCO}_3} * \frac{56.08 \text{ g. CaO}}{1 \text{ mol CaO}}$$

(Ecuac. VII)

También se calcula el peso MgO producido (P11), por estequiometría de la reacción, asumiendo que todo el MgCO<sub>3</sub> presente en la muestra inicial de la caliza reaccionó, calculando antes el peso de MgCO<sub>3</sub> (P10) inicial:

$$P10 = (\text{peso g. de caliza al inicio}) * \frac{\% \text{ MgCO}_3}{100} \quad (\text{Ecuac. IX})$$

$$P11 \left[ \frac{\text{g. MgO}}{\text{g. de muestra}} \right] = P10 * \frac{1 \text{ mol MgCO}_3}{84.32 \text{ g. MgCO}_3} * \frac{1 \text{ mol MgO}}{1 \text{ mol MgCO}_3} * \frac{40.305 \text{ gr MgO}}{1 \text{ mol MgO}}$$

(Ecuac. X)

b. TABLAS

**TABLA 1**

**Descripción de los tratamientos.**

Factor	Dimensiones	Niveles		
		1	2	3
<b>MgCO<sub>3</sub></b>	<b>%</b>	<b>13.45</b>	<b>24.95</b>	<b>34.49</b>
<b>T</b>	<b>h.</b>	<b>3</b>	<b>5</b>	<b>7</b>
<b>Carbón</b>	<b>%</b>	<b>0</b>	<b>10</b>	

TABLA 2

Distribución de los tratamientos.

No. tratamiento	% MgCO <sub>3</sub>	Tiempo (h.)	% carbón vegetal
1	13.449	3	0
2	13.449	3	10
3	13.449	5	0
4	13.449	5	10
5	13.449	7	0
6	13.449	7	10
7	24.954	3	0
8	24.954	3	10
9	24.954	5	0
10	24.954	5	10
11	24.954	7	0
12	24.954	7	10
13	34.491	3	0
14	34.491	3	10
15	34.491	5	0
16	34.491	5	10
17	34.491	7	0
18	34.491	7	10

**TABLA 3**

**Composición química de las calizas dolomíticas utilizadas**

Compuesto	CALIZA		
	M1	M2	M3
% CaCO <sub>3</sub>	83.9740	74.8000	64.5190
% MgCO <sub>3</sub>	13.4490	24.9540	34.4910
% K <sub>2</sub> O	0.0700	0.0000	0.0100
%Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.1100	0.0100	0.0000
%SiO <sub>4</sub>	2.1100	0.0400	0.1400
% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.3000	0.0300	0.0100

TABLA 4

Composición química y poder calorífico del carbón vegetal utilizado como activador energético

Compuesto	% en peso
Carbono fijo	72.03
Humedad	7.92
Materiales volátiles	17.22
Cenizas	2.54
Azufre	0.19
Poder calorífico	7350.66 Kcal/Kg
	(Base Seca)

TABLA 5

DATOS ORIGINALES

No.	Tratamiento	Rep.	Peso total muestra	Peso del carbón vegetal	Po (gr.)	P1 (gr.)	P3 (gr.)
1	M1T1C1	1	18,0458	0	18,0458	12,6119	10,1323
		2	18,021	0	18,021	12,5914	10,115
		3	18,022	0	18,022	12,529	10,0982
2	M1T1C2	1	20,0457	2,0051	18,0406	12,6135	10,1086
		2	20,0942	2,002	18,0922	12,218	10,1378
		3	20,0767	2,0024	18,0743	12,5728	10,1275
3	M1T2C1	1	18,0976	0	18,0976	10,5207	10,1408
		2	18,0527	0	18,0527	10,5015	10,1153
		3	18,01	0	18,01	10,4618	10,0915
4	M1T2C2	1	20,0578	2,0058	18,052	10,4524	10,1181
		2	20,046	2,0046	18,0414	10,4549	10,1092
		3	20,1102	2,011	18,0992	10,4152	10,1418
5	M1T3C1	1	18,0764	0	18,0764	10,1944	10,1286
		2	18,0425	0	18,0425	10,2788	10,1097
		3	18,0112	0	18,0112	10,1283	10,0923
6	M1T3C2	1	20,0011	2,0001	18,001	10,1135	10,0866
		2	20,0498	2,005	18,0448	10,1296	10,1111
		3	20,0839	2,0084	18,0755	10,1482	10,1284
7	M2T1C1	1	18,0242	0	18,0242	11,965	9,668
		2	18,0007	0	18,0007	11,9632	9,655
		3	18,0885	0	18,0885	12,011	9,7021
8	M2T1C2	1	20,0247	2,0025	18,0222	11,9474	9,6665
		2	20,0149	2,0015	18,0134	11,9554	9,662
		3	20,0004	2	18,0004	11,9116	9,6549
9	M2T2C1	1	18,07	0	18,07	10,3455	9,7752
		2	18,029	0	18,029	10,2061	9,7528
		3	18,0124	0	18,0124	10,2376	9,7439
10	M2T2C2	1	20,0944	2,0094	18,085	10,2704	9,7836
		2	20,0648	2,0065	18,0583	10,1866	9,7691

No.	Tratamiento <i>caliza</i>	Rep.	Peso total muestra	Peso del car- bón vegetal	Po (gr.)	P1 (gr.)	P3 (gr.)
		3	20,0851	2,0085	18,0766	10,2082	9,7787
11	M2T3C1	1	18,0363	0	18,0363	9,9774	9,6743
		2	18,0707	0	18,0707	9,9527	9,6926
		3	18,0256	0	18,0256	9,8757	9,6689
12	M2T3C2	1	20,0338	2,0034	18,0304	9,9183	9,754
		2	20,0996	2,01	18,0896	9,9989	9,7856
		3	20,0151	2,0015	18,0136	9,9199	9,7445
13	M3T1C1	1	18,806	0	18,806	12,4125	10,1733
		2	18,0099	0	18,0099	11,9033	9,7425
		3	18,0885	0	18,0885	11,9166	9,785
14	M3T1C2	1	20,0356	18,032	18,032	11,902	9,7653
		2	20,0856	18,077	18,077	11,8333	9,7788
		3	20,0044	18,004	18,004	11,7795	9,7395
15	M3T2C1	1	18,0119	18,0119	18,0119	10,3588	9,6615
		2	18,003	18,003	18,003	10,2406	9,6574
		3	18	18	18	10,2902	9,6646
16	M3T2C2	1	20,058	18,0522	18,0522	10,3444	9,683
		2	20,0456	18,041	18,041	10,2671	9,677
		3	20,0151	18,0136	18,0136	10,2327	9,6619
17	M3T3C1	1	18,04	18,04	18,04	9,9885	9,6765
		2	18,0915	18,0915	18,0915	10,0213	9,7037
		3	18,098	18,098	18,098	9,9715	9,7073
18	M3T3C2	1	20,0646	18,0606	18,0606	9,9998	9,7704
		2	20,1028	18,0949	18,0949	9,9938	9,7086
		3	20,0925	18,0897	18,0897	9,9873	9,7856

## NOMENCLATURA

*caliza* Ver nomenclatura del código de tratamiento en la tabla 18 de este anexo

Po= Peso inicial de la muestra caliza

P1= Peso final de la muestra en la primera calcinación

P3= Peso final de la muestra en la segunda calcinación

TABLA 6

## DATOS CALCULADOS

No.	Tratamiento	Rep.	P2 (g.)	P4 (g.)	P5 (g.)	P6 (g.)	P7 (g.)	P8 % conversión
1	M1T1C1	1	5.4339	2.4796	5.6393	15.1539	9.5145	62.7864
		2	5.4296	2.4764	5.632	15.133	9.501	62.7833
		3	5.493	2.4308	5.5283	15.1338	9.6055	63.4707
2	M1T1C2	1	5.4271	2.5049	5.6968	15.1494	9.4526	62.3969
		2	5.8742	2.0802	4.7309	15.1927	10.4619	69.8607
		3	5.5015	2.4453	5.5613	15.1777	9.6165	63.3991
3	M1T2C1	1	7.6769	0.3799	0.864	15.1973	14.3333	94.3148
		2	7.5512	0.3862	0.8783	15.1596	14.2813	94.2062
		3	7.5482	0.3703	0.8422	15.1237	14.2816	94.4316
4	M1T2C2	1	7.6996	0.3343	0.7803	15.159	14.3987	94.9846
		2	7.5865	0.3457	0.7862	15.1501	14.3639	94.8105
		3	7.684	0.2734	0.8218	15.1986	14.5768	95.9089
5	M1T3C1	1	7.882	0.0668	0.1496	15.1795	15.0298	99.0142
		2	7.7637	0.1691	0.3846	15.151	14.7664	97.4617
		3	7.8829	0.036	0.0819	15.1225	15.0429	99.4587
6	M1T3C2	1	7.8875	0.0269	0.0812	15.1182	15.055	99.6953
		2	7.9152	0.0185	0.0421	15.1529	15.1109	99.7223
		3	7.9273	0.0198	0.045	15.1787	15.1337	99.7033
7	M2T1C1	1	6.0592	2.297	5.224	13.4821	8.2581	61.2525
		2	6.0375	2.3082	5.2495	13.4645	8.2151	61.0127
		3	6.0775	2.3089	5.251	13.5302	8.2792	61.1902
8	M2T1C2	1	6.0751	2.2806	5.1867	13.4806	8.2939	61.5249
		2	6.058	2.2934	5.2158	13.474	8.2582	61.29
		3	6.0888	2.2567	5.1323	13.4643	8.332	61.882
9	M2T2C1	1	7.7245	0.5703	1.297	13.6164	12.2193	90.4041
		2	7.8229	0.4533	1.0309	13.4857	12.4548	92.3594
		3	7.7748	0.4937	1.1228	13.4733	12.3505	91.6864
10	M2T2C2	1	7.8148	0.4868	1.1071	13.5276	12.4205	91.8159
		2	7.8717	0.4175	0.9495	13.5076	12.5581	92.9706
		3	7.8684	0.4295	0.9768	13.5213	12.5445	92.7759
11	M2T3C1	1	8.0689	0.3031	0.6893	13.4912	12.8018	94.8906
		2	8.118	0.2601	0.5915	13.5169	12.9253	95.6237
		3	8.1499	0.2068	0.4703	13.4831	13.0128	96.5118

No.	Tratamiento <small>***</small>	Rep.	P2 (g.)	P4 (g.)	P5 (g.)	P6 (g.)	P7 (g.)	P8 % conversión
12	M2T3C2	1	8.1121	0.1643	0.3737	13.4867	13.1131	97.2294
		2	8.0907	0.2134	0.4853	13.531	13.0457	96.4132
		3	8.0937	0.1754	0.3989	13.4742	13.0753	97.0395
13	M3T1C1	1	6.3935	2.2392	5.0925	12.1334	7.0409	58.029
		2	6.1066	2.1608	4.9142	11.6198	6.7056	57.7082
		3	6.1717	2.1318	4.8483	11.6705	6.8222	58.4571
14	M3T1C2	1	6.13	2.1367	4.8594	11.6341	6.7747	58.2311
		2	6.2437	2.0545	4.6725	11.6631	6.9906	59.938
		3	6.2245	2.04	4.6395	11.616	6.9765	60.0594
15	M3T2C1	1	7.6531	0.6973	1.5858	11.6211	10.0353	86.3538
		2	7.7825	0.6831	1.3261	11.6164	10.2892	88.583
		3	7.7098	0.6256	1.4228	11.6134	10.1906	87.7488
16	M3T2C2	1	7.7078	0.6614	1.5042	11.6471	10.1429	87.0852
		2	7.7839	0.6801	1.3193	11.6399	10.3206	88.6657
		3	7.7809	0.5708	1.2981	11.6222	10.324	88.8304
17	M3T3C1	1	8.0515	0.312	0.7096	11.6392	10.9297	93.9036
		2	8.0702	0.3176	0.7223	11.6725	10.9501	93.8119
		3	8.1265	0.2642	0.6009	11.6766	11.0758	94.8542
18	M3T3C2	1	8.0608	0.2294	0.5217	11.6525	11.1308	95.5227
		2	8.1011	0.2852	0.6486	11.6746	11.026	94.4442
		3	8.1024	0.2017	0.4687	11.6713	11.2126	96.0697

## NOMENCLATURA

\*\*\* Ver nomenclatura del código de tratamiento en la tabla 18 de este anexo

- P2= Peso CO<sub>2</sub> producido de la primera calcinación
- P4= Peso CO<sub>2</sub> producido de la segunda calcinación
- P5= Peso CaCO<sub>3</sub> reacciona en la segunda calcinación
- P6= Peso CaCO<sub>3</sub> presente al inicio en la muestra
- P7= Peso CaCO<sub>3</sub> reacciona en la primera calcinación
- P8= Porcentaje de conversión

TABLA 7

DATOS CALCULADOS

No.	Tratamiento	Rep.	P9 (g.)	P10 (g.)	P11 (g.)
1	M1T1C1	1	5.3309	2.427	1.16
		2	5.3234	2.4238	1.1585
		3	5.3819	2.4238	1.1586
2	M1T1C2	1	5.2963	2.4263	1.1597
		2	5.6617	2.4332	1.1631
		3	5.3881	2.4308	1.1619
3	M1T2C1	1	8.0309	2.4339	1.1634
		2	8.0018	2.4279	1.1605
		3	8.0019	2.4222	1.1577
4	M1T2C2	1	8.0675	2.4278	1.1604
		2	8.048	2.4264	1.1598
		3	8.1673	2.4342	1.1635
5	M1T3C1	1	8.4211	2.4311	1.1621
		2	8.2736	2.4265	1.1598
		3	8.4285	2.4223	1.1578
6	M1T3C2	1	8.4353	2.4209	1.1572
		2	8.4666	2.4268	1.16
		3	8.4793	2.4309	1.162
7	M2T1C1	1	4.627	4.4978	2.1499
		2	4.6028	4.4919	2.1471
		3	4.6388	4.5138	2.1576
8	M2T1C2	1	4.647	4.4973	2.1498
		2	4.627	4.4951	2.1486
		3	4.6684	4.4918	2.1471
9	M2T2C1	1	6.8464	4.5092	2.1553
		2	6.9784	4.4989	2.1505
		3	6.9199	4.4948	2.1485
10	M2T2C2	1	6.9591	4.5129	2.1571
		2	7.0362	4.5062	2.1539
		3	7.0286	4.5108	2.1561
11	M2T3C1	1	7.1728	4.5007	2.1513
		2	7.242	4.5093	2.1554
		3	7.291	4.4981	2.15

No.	Tratamiento <del>alcal</del>	Rep.	P9 (g.)	P10 (g.)	P11 (g.)
12	M2T3C2	1	7.347	4.4993	2.1506
		2	7.309	4.5141	2.1577
		3	7.326	4.4951	2.1487
13	M3T1C1	1	3.945	6.4864	3.1
		2	3.757	6.2118	2.9692
		3	3.822	6.2389	2.9822
14	M3T1C2	1	3.795	6.2194	2.9728
		2	3.916	6.2349	2.9803
		3	3.909	6.2097	2.9882
15	M3T2C1	1	5.622	6.2124	2.9895
		2	5.764	6.2094	2.9881
		3	5.709	6.2083	2.9876
16	M3T2C2	1	5.683	6.2264	2.9762
		2	5.782	6.2225	2.9744
		3	5.784	6.2131	2.9698
17	M3T3C1	1	6.1238	6.2222	2.9742
		2	6.1353	6.2399	2.9826
		3	6.2057	6.2422	2.9837
18	M3T3C2	1	6.2365	6.2292	2.9775
		2	6.1778	6.2411	2.9832
		3	6.2824	6.2393	2.9823

#### NOMENCLATURA

~~alcal~~ Ver nomenclatura del código de tratamiento en la tabla 18 de este anexo

P9= Peso de CaO producido en la primera calcinación  
P10= Peso de MgCO<sub>3</sub> presente al inicio en la muestra  
P11= Peso de MgO producido en la primera calcinación

TABLA 8  
PRUEBA F DE FISCHER

Fuente de variación	Suma de Cuadrados	Grados libertad numerador	Media de Cuadrados	Fo	Ft (0.05, 7, 1., 36)
Trat. A	272.1	2	136.05	119.49	3.27
Trat. B	13150.42	2	6575.21	5774.91	3.27
Trat. C	15.41	1	15.41	13.53	4.12
inter. AB	13.46	4	3.36	2.95	2.64
inter. AC	0.32	2	0.16	0.14	3.27
inter. BC	0.29	2	0.16	0.13	3.27
inter. ABC	1.45	45	0.36	0.32	2.64
Error	40.99	36	1.14		
Total	13494.43	53			

Existen diferencias significativas en A,B,C y AB, donde  $F_o > F_t$ .

#### NOMENCLATURA

- A = Porcentaje de carbonato de magnesio
- B = Tiempo de calcinación (hrs.)
- C = Porcentaje de carbón vegetal
- F<sub>o</sub> = F observada
- F<sub>t</sub> = F crítica para una significancia del 5 %

PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
Biblioteca Central

## COMPARACIONES MÚLTIPLES DE DUNCAN

Parámetros de comparación

S ( $\langle Y_{ij} \rangle$ )	0.6161
r(0.5,2,36)	2.87
r(0.5,3,36)	3.02
R2	1.7681
R3	1.8605

TABLA 9

Nivel fijo : B Carbón 1 (0%)

Nivel de B (j) Tiempo (hrs.)	(I) % MgCO <sub>3</sub>	$\langle Y_{ij} \rangle$	X31	X32	X21
	13.449	63.0135	4.9487	3.087	1.8618
3	24.954	61.1518			
	34.491	58.0648			
	13.449	94.3175	6.7556	3.9135	2.8422
5	24.954	91.4753			
	34.491	87.5619			
	13.449	98.6448	4.4549	1.9586	2.9695
7	24.954	95.6754			
	34.491	94.1899			

Como  $R < X$ , existe diferencia significativa entre los tres niveles de A en el nivel j de B

TABLA 10

Nivel fijo : B Carbón 2 (10%)

Nivel de B (j) Tiempo (hrs.)	(I) % MgCO <sub>3</sub>	$\langle Y_{ij} \rangle$	X31	X32	X21
	13.449	64.8719	5.4624	2.1561	3.3063
3	24.954	61.5656			
	34.491	59.4095			
	13.449	95.2347	7.0409	4.327	2.7139
5	24.954	92.5208			
	34.491	88.1938			
	13.449	99.6737	4.3281	1.9965	2.7796
7	24.954	96.894			
	34.491	95.3455			

Como  $R < X$ , existe diferencia significativa entre los tres niveles de A en el nivel j de B

TABLA 11

Nivel fijo : A Carbón 1 (0%)

Nivel de A (i) MgCO <sub>3</sub> (%)	(J) Tiempo (hrs.)	<Yij>	X31	X32	X21
	3	63.0135	35.6314	4.3273	31.304
13.449	5	61.1518			
	7	58.0648			
	3	94.3175	34.5236	4.2	30.3235
24.954	5	91.4753			
	7	87.5619			
	3	98.6448	36.1251	6.628	29.4971
34.491	5	95.6754			
	7	94.1899			

Como  $R < X$ , existe diferencia significativa entre los tres niveles de B en el nivel j de A

TABLA 12

Nivel fijo : A Carbón 2 (10%)

Nivel de A (i) MgCO <sub>3</sub> (%)	(J) Tiempo (hrs.)	<Yij>	X31	X32	X21
	3	64.8719	34.8018	4.439	30.3628
13.449	5	95.2347			
	7	99.6737			
	3	61.5656	35.3284	4.3733	30.9552
24.954	5	92.5208			
	7	96.894			
	3	59.4095	35.936	7.1518	28.7843
34.491	5	88.1938			
	7	95.3455			

Como  $R < X$ , existe diferencia significativa entre los tres niveles de B en el nivel j de A

**TABLA 13**  
**Intervalos múltiples de Duncan**  
**Nivel fijo: C**

Media deced.	Trat.	<Yij>	x1-xi	x2-xi	x3-xi	x4-xi	x5-xi	x6-xi	x7-xi	x8-xi	x9-xi	x10-xi	x11-xi	x12-xi	x13-xi	x14-xi	x15-xi	x16-xi	x17-xi	x18-xi	r	Ri		
1	M1T1C1	99.67																				2.77	1.69	
2	M1T1C2	98.64	1.03																				2.87	1.77
3	M1T2C1	96.89	2.78	1.75																			3.02	1.86
4	M1T2C2	95.68	4.00	2.97	1.22																		3.11	1.92
5	M1T3C1	95.35	4.33	3.30	1.55	0.33																	3.18	1.96
6	M1T3C2	95.23	4.44	3.41	1.66	0.44	0.11																3.23	1.99
7	M2T1C1	94.32	5.36	4.33	2.58	1.36	1.03	0.92															3.28	2.02
8	M2T1C2	94.19	5.48	4.46	2.70	1.49	1.16	1.04	0.13														3.31	2.04
9	M2T2C1	92.52	7.15	6.12	4.37	3.15	2.82	2.71	1.80	1.67													3.34	2.06
10	M2T2C2	91.48	8.20	7.17	5.42	4.20	3.87	3.76	2.84	2.72	1.05												3.36	2.06
11	M2T3C1	88.19	11.48	10.45	8.70	7.46	7.15	7.04	6.12	6.00	4.33	3.28											3.37	2.08
12	M2T3C2	87.56	12.11	11.08	9.33	8.11	7.78	7.67	6.76	6.63	4.98	3.91	0.63										3.38	2.08
13	M3T1C1	64.87	34.80	33.77	32.02	30.80	30.47	30.36	29.45	29.32	27.65	26.60	23.32	22.69									3.39	2.09
14	M3T1C2	63.01	36.66	35.63	33.88	32.66	32.33	32.22	31.30	31.18	29.51	28.46	25.18	24.55	1.86								3.40	2.10
15	M3T2C1	61.57	38.11	37.08	35.33	34.11	33.78	33.67	32.75	32.62	30.96	29.91	26.63	26.00	3.31	1.45							3.41	2.10
16	M3T2C2	61.15	38.52	37.49	35.74	34.52	34.19	34.08	33.17	33.04	31.37	30.32	27.04	26.41	3.72	1.86	0.41						3.42	2.11
17	M3T3C1	59.41	40.26	39.24	37.49	36.27	35.94	35.83	34.91	34.78	33.11	32.07	28.78	28.15	5.46	3.80	2.16	1.74					3.43	2.11
18	M3T3C2	58.06	41.61	40.58	38.83	37.61	37.28	37.17	36.25	36.13	34.46	33.41	30.13	29.50	6.81	4.95	3.50	3.09	1.35				3.45	2.13

Como  $R < X$ , existe diferencia significativa entre los tres niveles de B y los tres niveles de A en el nivel k de C

**TABLA 14**

**SUMATORIA DE CUADRADOS**

<b>SST</b>	<b>SSA</b>	<b>SSB</b>	<b>SSC</b>	<b>SSAB</b>	<b>SSAC</b>	<b>SSBC</b>	<b>SSABC</b>	<b>SSE</b>
13494.4	272.1	13150.4	15.41	13.46	0.32	0.29	1.45	40.99



No.	Tratamiento	PB % conversión	Media	Desv. Standard	Yijk	Yi...	Yj...	Yk...	Y...	Yi	Yj	Yk	Y...	Yi...2	Yj...2	Yk...2	Y...2	Yi.k.2	Yj.k.2	Yk.k.2	Y...			
						Yi...	Yj...	Yk...	Y...	Yi1	Yj1	Yk1	Y...1	Yi...2	Yj...2	Yk...2	Y...2	Yi.k.2	Yj.k.2	Yk.k.2	Y...			
12	M2T3C2	96.5118 97.2294 96.4132 97.0395	96.89	0.35	290.68																			
13	M3T1C1	58.029 57.7082 58.4571	58.06	0.31	174.19					Y31	Y31	Y31	Y31	352.42	719.45									
14	M3T1C2	58.2311 59.938 60.0594	58.41	0.83	178.23							Y32	Y32											
15	M3T2C1	88.3538 88.583 87.7488	87.56	0.92	262.69							Y32	Y32	527.27										
16	M3T2C2	87.0852 88.6657 88.8304	88.19	0.79	264.58																			
17	M3T3C1	93.9036 93.8119 94.8542	94.19	0.47	282.57																			
18	M3T3C2	95.5227 94.4442 96.0697	95.35	0.88	286.04																			

a=3  
b=3  
c=2  
r=3  
q=36

Significancia=0.05

**TABLA No. 16**

Limites de la densidad real de las calizas dolomíticas y cales comerciales (Boyton, 32)

Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	
Calizas	2.80 - 2.90
Cales:	
Cales vivas	3.2 - 3.4
Cales hidratadas	2.7 - 2.9

**TABLA No. 17**

En esta tabla se presentan los principales usos de la cal en la Industria, construcción y la agricultura.

<b>INDUSTRIA QUÍMICA</b>	<b>Metalúrgica</b>	
	<b>Manufactura de químicos</b>	alcalis, pesticidas, carbón, productos magnésicos, blanqueadores, etc.
	<b>Sanitarios</b>	
	<b>Pulpa de papel</b>	
	<b>Cerámica</b>	
	<b>Alimentos y bioproductos</b>	Clarificación en la producción de azúcar.
	<b>Petróleo</b>	
	<b>Misceláneos</b>	Hules, cuero, barnices y protectores como pigmentos y pinturas.
<b>CONSTRUCCIÓN</b>		
	<b>Morteros o revestimientos</b>	
<b>AGRICULTURA</b>		
	<b>Fertilización suelos</b>	reducción de acidez
<b>SANITARIOS</b>		
	<b>Tratamiento de agua</b>	Suavizamiento, purificación, coagulación, neutralización de agua, remoción de silicato y remoción fosfatos.

**TABLA No. 18 Tratamientos realizados para la determinación de la influencia del grado de dolomitización, tiempo de calcinación y porcentaje de carbón vegetal en la conversión de caliza a cal viva.**

Código de tratamiento	Porcentaje de Mg	Tiempo (h.)	Porcentaje carbón vegetal
M1T1C1	13.449	3	0
M1T1C2	13.449	3	10
M1T2C1	13.449	5	0
M1T2C2	13.449	5	10
M1T3C1	13.449	7	0
M1T3C2	13.449	7	10
M2T1C1	24.954	3	0
M2T1C2	24.954	3	10
M2T2C1	24.954	5	0
M2T2C2	24.954	5	10
M2T3C1	24.954	7	0
M2T3C2	24.954	7	10
M3T1C1	34.491	3	0
M3T1C2	34.491	3	10
M3T2C1	34.491	5	0
M3T2C2	34.491	5	10
M3T3C1	34.491	7	0
M3T3C2	34.491	7	10

**NOMENCLATURA:**

M1=Caliza con 13.449 % de MgCO<sub>3</sub>  
M2=Caliza con 24.954 % de MgCO<sub>3</sub>  
M3=34.491 con 34.494 % de MgCO<sub>3</sub>  
C1=0 % Carbón vegetal  
C2=10% Carbón vegetal

T1=periodo de calcinación 3 horas  
T2=periodo de calcinación 5 horas  
T3=periodo de calcinación 7 horas

**TABLA No. 19**

En esta tabla se observan las funciones matemáticas que describen el comportamiento del porcentaje de conversión, en función del tiempo.

% MgCO <sub>3</sub>	% Carbón vegetal	Ecuación %C = conversión, T = tiempo (horas)	Coef. correlación	Límite confianza
13.449	0	$\% C = -11.88 + 31.84 \cdot T - 2.29 \cdot T^2$	1	$\pm 1.55 \cdot 10^{-8}$
	10	$\% C = -7.06 + 30.52 \cdot T - 2.18 \cdot T^2$	1	$\pm 1.28 \cdot 10^{-8}$
24.954	0	$\% C = -12.34 + 31.29 \cdot T - 2.26 \cdot T^2$	1	$\pm 6.71 \cdot 10^{-9}$
	10	$\% C = -10.96 + 30.75 \cdot T - 2.19 \cdot T^2$	1	$\pm 1.55 \cdot 10^{-8}$
34.491	0	$\% C = -5.13 + 26.22 \cdot T - 1.72 \cdot T^2$	1	$\pm 1.51 \cdot 10^{-8}$
	10	$\% C = -7.55 + 28.03 \cdot T - 1.9 \cdot T^2$	1	$\pm 5.78 \cdot 10^{-8}$

**TABLA No. 20**

En esta tabla se muestra como varia el porcentaje de conversión en función del carbonato de magnesio.

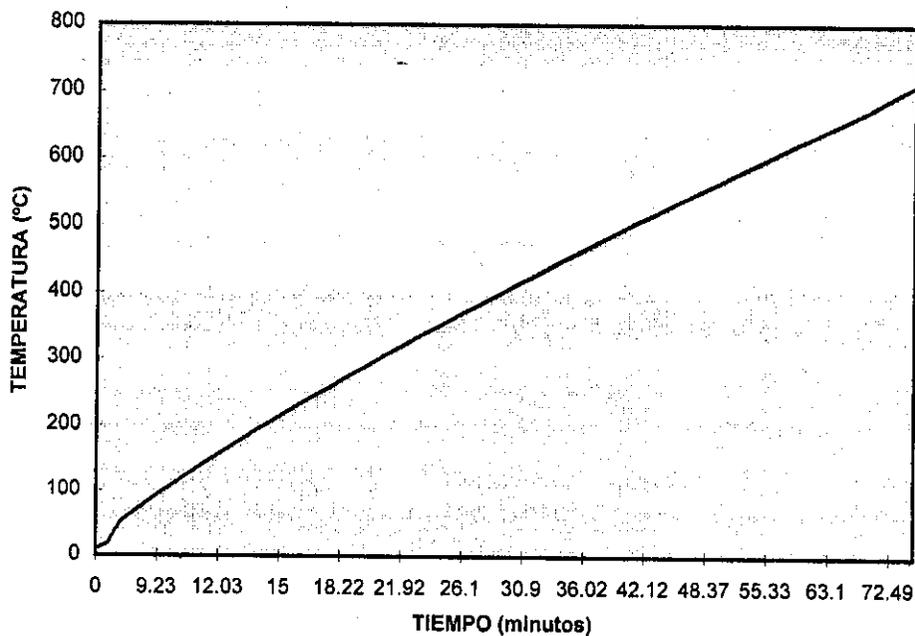
TIEMPO	Carbón Vegetal	% CONVERSIÓN		
		13,45 % MgCO <sub>3</sub>	24,95 % MgCO <sub>3</sub>	34,49 % MgCO <sub>3</sub>
3 h	0	63,01	61,15	58,06
3 h	10	64,87	61,57	59,41
5 h	0	94,32	91,48	87,56
5 h	10	95,23	92,52	88,19
7 h	0	98,64	95,68	94,19
7 h	10	99,67	96,89	95,35

**TABLA No. 21**

En esta tabla se observan las funciones matemáticas que describen el comportamiento del porcentaje de conversión, en función del porcentaje de carbonato de magnesio.

TIEMPO (h)	% Carbón vegetal	Ecuación  %C = conversión, CM = % MgCO3	Coef. correlación	Límite confianza
3	0	$\% C = 62.80 + 0.13 \cdot CM - 7.71 \cdot 10^{-3} \cdot CM^2$	1	$\pm 4.40 \cdot 10^{-9}$
	10	$\% C = 69.69 - 0.40 \cdot CM + 2.87 \cdot 10^{-3} \cdot CM^2$	1	$\pm 3.67 \cdot 10^{-9}$
5	0	$\% C = 95.02 + 5.28 \cdot 10^{-2} \cdot CM - 7.80 \cdot 10^{-3} \cdot CM^2$	1	$\pm 3.97 \cdot 10^{-9}$
	10	$\% C = 94.91 + 0.16 \cdot CM - 1.04 \cdot 10^{-2} \cdot CM^2$	1	$\pm 4.56 \cdot 10^{-9}$
7	0	$\% C = 103.73 - 0.44 \cdot CM + 4.84 \cdot 10^{-3} \cdot CM^2$	1	$\pm 1.42 \cdot 10^{-8}$
	10	$\% C = 104.20 - 0.38 \cdot CM + 3.81 \cdot 10^{-3} \cdot CM^2$	1	$\pm 5.05 \cdot 10^{-9}$

c. GRÁFICAS



GRAFICA No. 1 Calibración de la mufla, tiempo de calcinación vrs. temperatura de la camara de la mufla.

