

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

ESTUDIO DEL GRADO DE CONVERSION DE CALIZA DOLOMITICA  
CON DIFERENTES CONTENIDOS DE  $MgCO_3$  A CAL VIVA MEDIANTE  
EL PROCESAMIENTO A DIFERENTES TEMPERATURAS Y  
TIEMPOS DE CALCINACION

TESIS

PRESENTADA A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERIA

POR

VERONICA YANETH LOPEZ DEL CID

AL CONFERIRSELE EL TITULO DE

INGENIERIO QUIMICO

Guatemala, noviembre de 1,996.

PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
Biblioteca Central

08  
T(3846)  
CA

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

ESTUDIO DEL GRADO DE CONVERSION DE CALIZA DOLOMITICA CON DIFERENTES CONTENIDOS DE  $MgCO_3$  A CAL VIVA MEDIANTE EL PROCESAMIENTO A DIFERENTES TEMPERATURAS Y TIEMPOS DE CALCINACION.

tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química.



VERONICA YANETH LOPEZ DEL CID

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

MIEMBROS DE LA JUNTA DIRECTIVA

DECANO: Ing. Herbert René Miranda Barrios.  
VOCAL PRIMERO: Ing. Miguel Ángel Sánchez Guerra.  
VOCAL SEGUNDO: Ing. Jack Douglas Ibarra Solórzano.  
VOCAL TERCERO: Ing. Juan Adolfo Echeverría Méndez.  
VOCAL CUARTO: Br. Fernando Waldemar de León C.  
VOCAL QUINTO: Br. Pedro Ignacio Escalante Pastor.  
SECRETARIO:

TRIBUNAL QUE PRACTICO EL EXAMEN  
GENERAL PRIVADO

DECANO: Ing. Jorge Mario Morales G.  
EXAMINADOR: Ing. Otto Raúl de León.  
EXAMINADOR: Ing. Williams G. Alvarez.  
EXAMINADOR: Ing. Luis Pedro Cruz.  
SECRETARIO: Ing. Edgar Bravatti Castro

PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
SECRETARÍA DE LA FACULTAD DE INGENIERIA



**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, 4 de noviembre de 1996.

Doctor.  
Adolfo Gramajo,  
Director de la Escuela de Ingeniería Química,  
Facultad de Ingeniería,  
Presente.

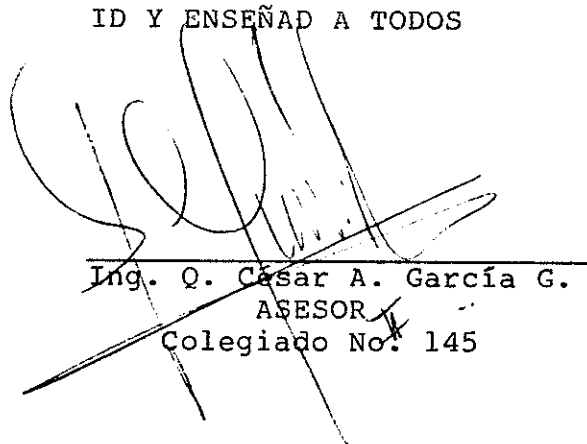
Dr. Gramajo.

Hago de su conocimiento que habiendo asesorado el trabajo de tesis de la estudiante VERONICA YANETH LOPEZ DEL CID, DENOMINADO ESTUDIO DEL GRADO DE CONVERSION DE CALIZA DOLOMITICA CON DIFERENTES CONTENIDOS DE  $MgCO_3$  A CAL VIVA MEDIANTE EL PROCESAMIENTO A DIFERENTES TEMPERATURAS Y TIEMPOS DE CALCINACION y de lo cual dejo constancia de mi aprobación al mismo, para proceder a la autorización del respectivo trabajo de investigación.

Sin otro motivo en particular, me suscribo de usted.

Atentamente

ID Y ENSEÑAD A TODOS



Ing. Q. César A. García G.  
ASESOR  
Colegiado No. 145



Guatemala, 6 de noviembre de 1996.

Doctor  
Adolfo Gramajo  
Director  
Escuela de Ingeniería Química  
Pte.

Doctor Gramajo.

Por este medio me permito informarle que he revisado el trabajo de tesis de la estudiante VERONICA YANETH LOPEZ DEL CID, denominado ESTUDIO DEL GRADO DE CONVERSION DE CALIZA DOLOMITICA CON DIFERENTES CONTENIDOS DE  $MgCO_3$  A CAL VIVA MEDIANTE EL PROCESAMIENTO A DIFERENTES TEMPERATURAS Y TIEMPOS DE CALCINACION, del cual dejo constancia de mi aprobación al mismo, para proceder a su autorización.

Sin otro particular, me suscribo de usted.

Atentamente,

Ing. Telma Maricela Cano Morales  
JEFATURA  
LABORATORIO QUIMICA INDUSTRIAL/CII





**FACULTAD DE INGENIERIA**

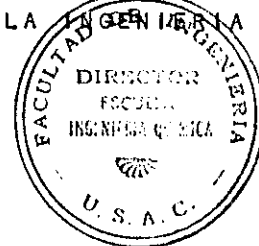
Escuelas de Ingeniería Civil, Ingeniería  
Mecánica Industrial, Ingeniería Química,  
Ingeniería Mecánica Eléctrica, Técnica  
y Regional de Post-grado de Ingeniería  
Sanitaria.

Ciudad Universitaria, zona 12  
Guatemala, Centroamérica

El Director de la Escuela de Ingeniería Química, después de  
conocer el dictamen del Asesor con el Visto Bueno del Jefe de  
Departamento, al trabajo de Tesis de la estudiante VERONICA YANETH  
LOPEZ DEL CID, titulado: ESTUDIO DEL GRADO DE CONVERSION DE CALIZA  
DOLOMITICA CON DIFERENTES CONTENIDOS DE  $MgCO_3$  A CAL VIVA MEDIANTE  
EL PROCESAMIENTO A DIFERENTES TEMPERATURAS Y TIEMPOS DE  
CALCINACION, procede a la autorización del mismo.

Dr. Adolfo Gramajo  
DIRECTOR

ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA



Guatemala, 7 de noviembre de 1,996.



**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 titulado: ESTUDIO DEL GRADO DE CONVERSION DE CALIZA DOLOMITICA CON DIFERENTES CONTENIDOS DE  $MgCO_3$  A CAL VIVA MEDIANTE EL PROCESAMIENTO A DIFERENTES TEMPERATURAS Y TIEMPOS DE CALCINACION, de la estudiante VERONICA YANETH LOPEZ DEL CID, procede a la autorización para la impresión de la misma.

IMPRIMASE:

Ing. Herbert René Miranda Barrios  
DECANO



Guatemala, 7 de noviembre de 1,996.

## AGRADECIMIENTO

a todas aquellas personas que colaboraron, de una u otra forma, en la realización del presente trabajo de investigación y muy, especialmente, a:

- Ing. César A. García, por su valiosa asesoría orientación y colaboración brindada en la realización del presente trabajo de investigación.
  
- Inga. Thelma M. Cano, por su ayuda incondicional en la revisión del presente trabajo.
  
- Ing. Agr. Víctor Álvarez Cajas, por su asesoría y entusiasmo en el análisis estadístico de los resultados.
  
- Al personal del Laboratorio de Química del Ministerio de Energía y Minas, por su colaboración en la realización experimental del presente trabajo.



## ACTO QUE DEDICO

A:

- DIOS, Todopoderoso, por brindarme todo lo necesario para alcanzar mi objetivo.
  
- MIS PADRES, Ramón Germán López Bautista y Raquel del Cid v. de López, con amor y agradecimiento por sus múltiples esfuerzos consejos y sacrificios.
  
- MI ESPOSO, Otto Rolando Ruiz Balcárcel, con amor y agradecimiento por su apoyo y entusiasmo.
  
- MIS HIJOS, Andrea Raquel y Otto René Ruiz López, con todo mi amor.
  
- MIS HERMANOS, Geovani y Estuardo López del Cid, por su apoyo y consejos.
  
- MIS AMIGOS Y  
COMPAÑEROS DE TRABAJO, con quienes hemos compartido los buenos y malos momentos.

## INDICE

CONTENIDO	PAGINA
Sumario	1
introducción	2
I. Objetivos	3
II. 11.1 Hipótesis	4
11.2 Hipótesis Estadística	5
III. Antecedentes	6
IV. Justificación	16
V. Método de investigación	17
VI. Analisis estadísticos de datos	20
VII. Resultados y discusión	21
Conclusiones	23
Recomendaciones	24
Bibliografía	25
Apéndice	26

## SUMARIO

El presente trabajo tiene como finalidad determinar si existe un efecto negativo en la eficiencia de conversión de caliza dolomítica con diferentes grados de dolomitización: 9.09, 22.15 y 35.93 % de  $MgCO_3$  a cal viva, mediante un proceso de calcinación a 3 diferentes temperaturas de calcinación 650, 750 y 850° C y, durante tres periodos de calcinación diferentes; 3, 5 y 7 horas.

La experimentación se realizó con rocas calizas dolomíticas procedentes de Huehuetenango, trituradas a un rango de -8 + 10 mallas. En dicha experimentación se combinaron las tres variables, correspondiendo como modelo estadístico un diseño experimental con un arreglo combinatorio con 27 tratamientos y 3 repeticiones.

La variable de respuesta fue el porcentaje de conversión de  $CaMg(CO_3)_2$  a  $CaO$ ; el cual se determinó con base en el promedio de repetición del porcentaje de conversión. Al porcentaje de conversión se le aplicó un análisis de varianza y al existir diferencias, altamente significativas, se le aplicó la prueba de Tuckey para determinar el mejor tratamiento, debido a que dicha prueba proporcionó 13 datos estadísticamente iguales y se seleccionó como el mejor de los tratamientos a 35.93 % de  $MgCO_3$ , 850° C y 7 horas, obteniéndose un 98.97 % de conversión.

Con base en dicha prueba también se concluyó que no existe un efecto negativo en la eficiencia de conversión de caliza dolomítica con estos grados de dolomitización a cal viva, bajo estas condiciones de calcinación y, sobre todo, con una granulometría constante de -8 +10 mallas.

## INTRODUCCION

La producción de cal viva ( $\text{CaO}$ ) es un proceso de gran importancia, ya que este producto es de mucha utilidad para una diversidad de industrias, tales como agricultura, construcción, fabricación de acero y alambre, en el tratamiento de minerales de oro y plata, en la refinación de cobre, el plomo y otros minerales, para la purificación del agua, etc.

Dicho proceso consiste en la eliminación de humedad y materia orgánica, volátiles de la caliza por efecto de la temperatura. En algunos casos, el material a usar contiene además de la caliza, otras rocas minerales tales como la dolomita, que es una roca que contiene, principalmente, carbonatos de calcio y de magnesio.

El Laboratorio de Química Industrial/CII-USAC con la colaboración del Laboratorio Químico del Ministerio de Energía y Minas, están realizando el proyecto denominado "Evaluación de las características básicas del proceso de calcinación de calizas y dolomitas".

Este trabajo es parte de dicho proyecto, el cual persigue comprobar que la presencia de carbonato de magnesio en forma cristalizada, afecta, negativamente, en el porcentaje de conversión de piedra caliza dolomítica a cal viva. El estudio se llevará a cabo con muestras procedentes del Departamento de Huehuetenango y del municipio San Rafael La Laguna, con distintos grados de dolomitización (9.09%, 22.15% y 35.93% de carbonato de magnesio). El proceso de calcinación se hará a tres diferentes tiempos: 3, 5 y 7 horas y a tres distintas temperaturas: 650, 750 y 850°C.

REPUBLICA DE GUATEMALA  
SECRETARÍA DE ENERGÍA Y MINAS

## 1. OBJETIVOS

### GENERAL

Estudiar la eficiencia de conversión a cal viva de distintas calizas dolomíticas con diferentes porcentajes de carbonato de magnesio por medio de un proceso de calcinación isobarico a diferentes temperaturas y tiempos de calcinación.

### ESPECIFICOS

1. Calcular el porcentaje de conversión de piedra caliza con diferentes grados de dolomitización a cal viva.
2. Evaluar el efecto que produce la presencia de carbonato de magnesio en forma cristalizada en la eficiencia de conversión de caliza dolomítica a cal viva.

## II. HIPOTESIS

La presencia de carbonato de magnesio ( $MgCO_3$ ) en forma cristalizada en la piedra caliza dolomítica ejerce un efecto negativo en la eficiencia de conversión de piedra caliza dolomítica a cal viva a diferentes temperaturas y tiempos de calcinación.

### HIPOTESIS ESTADISTICA

- $H_0$ : Si existe diferencia significativa en la conversión de caliza dolomítica a cal viva a diferentes temperaturas y tiempos de calcinación por efecto de la presencia de carbonato de magnesio en forma cristalizada.
- $H_1$ : No existe diferencia significativa.

### III. ANTECEDENTES

#### 3.1 Generalidades

Se llaman dolomias a las rocas que están formadas por el mineral dolomita  $(\text{CO}_3)_2\text{CaMg}$ .

Cuando la roca carbonatada tiene una proporción reducida de este mineral se llama caliza magnesiánica o caliza dolomítica. El aspecto externo de las rocas con dolomita es muy análogo al de las calizas y, en general, hay que recurrir a ensayos químicos para clasificarlas.

Se considera como caliza pura la que está constituida, completamente por carbonato de calcio, de este tipo de piedra se obtienen 56 partes, en peso, de óxido de calcio  $\text{CaO}$  o cal viva y 44 partes de bióxido de carbono  $\text{CO}_2$ . Es difícil encontrar una caliza completamente pura, por lo que las variedades que se conocen en la industria y el comercio se clasifican, según los elementos que la componen y el porcentaje en que se encuentren. La caliza se puede clasificar tomando en cuenta el contenido de carbonato de magnesio que posea, si este se halla en cantidad inferior al 5%, la caliza es rica en calcio y se llama calcita; en cantidades mayores la caliza es magnesiánica. Cuando el carbonato de magnesio se encuentra en porcentajes del 30 al 46%, la caliza se llama dolomita. Algunas dolomitas se pueden formar por precipitación simultánea del calcio y del magnesio, bien por mecanismos químicos, como consecuencia de la actividad de los seres vivos, de la misma forma que muchas calizas, pero en la mayor parte de los casos la formación de dolomias parece deberse a un enriquecimiento relativo en magnesio de calizas previamente formadas; se supone que en muchos casos este proceso tiene lugar inmediatamente después de la formación de las capas de carbonato cálcico y que consiste en la sustitución gradual de los átomos de calcio de la calcita por átomos de magnesio que estaban en disolución iónica en las aguas marinas o lacustres.(7)

La caliza y la dolomita contienen más de 50% de los minerales carbonatados. Se han reconocido diversas variedades, dependiendo de las diferencias de textura o de las condiciones en que se supone se han originado.

La mayor parte de la dolomita representa una alteración de la caliza posterior a la depositación, aunque algunas dolomitas cristalizadas asociadas con evaporitas parecen ser depósitos químicos primarios. La dolomitización es un proceso de una roca en la que se han perdido algunas de las estructuras y texturas originales de la caliza.

Cualquier caliza puede experimentar el proceso de la dolomitización, aun cuando algunos tipos son más susceptibles que otros a estos cambios. (5)



### 3.2 Formación de la caliza y caliza dolomítica

La caliza es una roca de origen sedimentario que se formó por una acción química y orgánica del material precipitado sobre las aguas de drenaje superficial, hace millones de años. El componente calcio en la piedra, ha venido de rocas ígneas. Por la acción de fuerzas corrosivas y erosivas de ácidos minerales, las rocas se desintegraron y el calcio quedó disuelto y separado de las aguas de drenaje que fueron a parar al mar. Al llegar al Océano, una parte del carbonato de calcio fue precipitado por su menor solubilidad en el agua de mar, por la evaporación superficial y los cambios de temperatura, se formó la caliza que se conoce como "Caliza de origen químico"; y, debido a la sedimentación del carbonato cálcico, se formó la "Caliza de origen Mecánico". Además de las calizas de origen químico y mecánico, existen calizas de origen orgánico, formadas por conchas de moluscos consolidados por cemento de tipo calcáreo. Debido a la forma en que se originó la caliza, los depósitos aparecen en capas horizontales o ligeramente oblicuas, el espesor de cada capa varía enormemente y puede ser entrecortado por otros materiales. Entre una capa y otra puede haber diferencias muy marcadas, según la época en que se formó cada una, algunas pueden ser de grano grueso y porosa, mientras que otras son muy densas. La solución, transporte y deposición de carbonato cálcico magnésico da origen a sedimentos comerciales de dolomitas y magnesitas. Las calizas son de origen marino o de agua dulce y el magnesio puede sustituir, en parte, al calcio dando calizas dolomíticas.

En forma general, los principales componentes de la caliza son:

- Calcio en forma de carbonato de calcio  $\text{CaCO}_3$ ,
- Magnesio en forma de carbonato de magnesio  $\text{MgCO}_3$ ,

Además de estos componentes principales, existe un porcentaje ocupado por impurezas, las cuales influyen en la composición química y las propiedades de la caliza y, especialmente, en las de la cal.

Entre las impurezas que más se encuentran como componentes de la caliza se pueden mencionar:

- Silice en forma de óxido de silice  $\text{SiO}_2$ ,
- Aluminio en forma de óxido de aluminio  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,
- Hierro en forma de óxido férrico  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,
- Sodio en forma de óxido de sodio  $\text{Na}_2\text{O}$ ,
- Potasio en forma de óxido de potasio  $\text{K}_2\text{O}$ ,
- Azufre en forma de sulfato ( $\text{SO}_4$ )
- Fósforo en forma de fosfato ( $\text{PO}_4$ )
- Materia carbonácea.

El calcio se libera por meteorización de las rocas y es transportado a las cuencas sedimentarias, principalmente, como bicarbonato, en parte como carbonato y abundantemente como sulfato. El carbonato de calcio es depositado por medios orgánicos y mecánicos. El

anhidrido carbonico desempeña un papel predominante en los procesos inorgánicos, porque la solución del carbonato cálcico en el agua depende de él. Si se pierde, el carbonato precipita.

La deposición orgánica se produce por algas, bacterias, corales, etc. El carbonato cálcico es depositado también por la fotosíntesis de las plantas. La caliza puede formarse, mecánicamente, mediante la deposición de materia desmenuzada de conchas y arena de coral, que se cementan formando una caliza compacta. La mayor parte de las calizas se depositan en aguas poco profundas o de profundidad moderada en el mar, libre de sedimentos terrígenos.

La dolomita consiste en el doble carbonato de calcio y magnesio 54.35%  $\text{CaCO}_3$  y 45.65% de  $\text{MgCO}_3$ , pero en las calizas dolomíticas la proporción de  $\text{MgCO}_3$  es inferior que en la dolomita. La mayor parte de lo que se llaman dolomitas son en realidad calizas dolomíticas; una parte de magnesio puede ser sustituido por hierro o manganeso. (1)

La formación de la piedra caliza es debido a un cambio en el equilibrio  $\text{CaCO}_3\text{-H}_2\text{CO}_3$  en la naturaleza. La caliza se forma en muchos ambientes cuando el equilibrio se altera por pérdida de  $\text{H}_2\text{CO}_3$ , bien sea porque se neutralice el ácido o porque se escape  $\text{CO}_2$ .

Los manantiales que brotan a la superficie y pierden su  $\text{CO}_2$  al disminuir la presión, a menudo depositan mucho  $\text{CaCO}_3$  alrededor del orificio de salida. El aumento de temperatura determina desprendimiento de  $\text{CO}_2$  de la solución y, por lo tanto, puede haber precipitación de  $\text{CaCO}_3$ .

El origen de las cavernas en calizas se explica por los cambios en el equilibrio  $\text{CaCO}_3\text{-H}_2\text{CO}_3$ , a medida que el agua se filtra a través de la roca.

Las cavernas son comunes en regiones donde se presenta caliza, precisamente porque el  $\text{CaCO}_3$  es soluble en soluciones diluidas de ácido carbónico.

El agua de lluvia contiene  $\text{CO}_2$  disuelto y, por lo tanto, arrastra la superficie y ensancha las grietas que se presentan en la caliza.

Las capas más extensas de caliza muestran, por los fósiles marinos que contienen, que el sedimento calcáreo original fue depositado en agua del mar. El agua de mar actúa como una gigante solución de equilibrio de  $\text{CaCO}_3$  y, cada vez que ese equilibrio se perturba por disminución de  $\text{H}_2\text{CO}_3$ , el carbonato sólido puede precipitarse. Recientemente precipitado el  $\text{CaCO}_3$  se presenta, generalmente, en forma de granos diminutos.

Si estos granos permanecen en contacto con una solución en equilibrio, se forman granos grandes a expensas de los pequeños. Dado que los cristales diminutos de  $\text{CaCO}_3$  son ligeramente más solubles que

los cristales grandes, aquellos tienden a disolverse y los grandes a crecer, si unos y otros están en contacto con una solución en equilibrio.

A medida que los cristales grandes crecen, van formando una red de granos entrelazados. En esta forma, lo que originalmente es un limo calcáreo se va convirtiendo lentamente en una roca, caliza, de cierta dureza. En la caliza ordinaria los granos en su mayoría son demasiado pequeños. Si la roca se encuentra enterrada bajo otros sedimentos y se calienta, la conversión de los pequeños cristales en cristales más grandes (recristalización) se acelera y la caliza se transforma en la roca cristalina de grano grueso llamada mármol. (3)

### 3.3 Propiedades importantes del carbonato cálcico.

El carbonato cálcico se presenta en la naturaleza en dos formas cristalinas, calcita y aragonito. Ambos son minerales blandos, muy levemente solubles en agua y efervescentes en contacto con ácido diluido. La diferencia entre cada una de las formas de la caliza se establece por sus propiedades ópticas y cristalográficas.

El aragonito cristaliza en formas prismáticas del sistema rómbico, la calcita cristaliza en forma hexagonal y romboédrica al igual que la dolomita.

El carbonato de calcio aparece, generalmente, en forma de polvo blanco fino. El polvo está constituido por diminutos cristales. La calcita es el principal mineral de la caliza y del mármol; tanto la calcita como el aragonito se encuentran en depósitos de manantiales, en vetas y en las conchas de algunos animales.

El carbonato de calcio es sólo ligeramente soluble en agua pura, pero, la presencia de ácidos aumenta su solubilidad. (3)

### 3.4 Dolomitización.

El término dolomita se aplica, usualmente, a las rocas en las que el 50% o más del carbonato es el mineral dolomita y la cantidad total del carbonato está en gran exceso con relación a otros constituyentes.

Algunos geólogos limitan la denominación de dolomita a aquellas rocas en las que la proporción del mineral dolomita es del 90 al 100% y emplean la de dolomita calcica para las que contienen del 50 al 90% de  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ .

La dolomita maciza constituye extensos estratos en varias regiones. Las variedades cristalinas y compactas con frecuencia están asociadas con serpentinas y otras rocas magnesianas y, con calizas ordinarias. Las rocas dolomíticas se han formado bajo diferentes condiciones y diferentes maneras.

Se conviene, generalmente, en que la dolomita como roca, es de origen secundario, habiéndose transformado de caliza ordinaria por la acción de las soluciones que contienen magnesio. Este cambio se conoce comunmente como Dolomitización.

Las aguas que contienen magnesio son, probablemente, en la mayoría de los casos, aguas de mar; pero, también las aguas subterráneas o termales de origen profundo pudieron haber sido activas. Las condiciones más favorables para la dolomitización consistía en calor, presión alto contenido de magnesio de las aguas y largos periodos de tiempo. Consecuentemente, entre más antigua sea una caliza y entre más profundamente enterrada bajo la corteza terrestre esté, mayor es la probabilidad de que se convierta en dolomita.(6)

La mayoría de las dolomitas han sido formadas por sustitución de las calizas, pueden haberse conservado otros minerales presentes originalmente en aquellos, entre los que se incluye el cuarzo detrítico, sílex, feldespatos y arcilla. La dolomita presenta una tendencia muy marcada hacia el desarrollo idiomorfo, presentándose usualmente en cristales romboédricos idiomorfos en una matriz de calcita granuda aliotromorfa. La dolomitización supone la destrucción de la fábrica de la calcita primitiva y quedan enmascarados o desaparecen rasgos tales como los fósiles o los contornos de los granos de carbonatos; la dolomita sustituye a la calcita, cuarzo o sílex. Las cavidades romboides dejadas por la dolomita en el sílex forman un constituyente frecuente de los residuos insolubles. En algunas dolomitas, la dolomitización sólo afecta selectivamente a algunas capas, dando como resultado una alternancia de capas de calcita y de dolomita. La sustitución de la calcita por la dolomita, volumen a volumen no produce cambios en la porosidad; pero si la conversión tiene lugar a base molecular, puede aparecer una porosidad secundaria.

La mayor parte de las dolomitas son originadas por sustitución de la calcita, posterior a su depósito. La dolomitización puede tener lugar probablemente, en diversos ambientes:

- 1) en el ambiente de la sedimentación de la caliza marina, antes de su soterramiento;
- 2) en el ambiente marino después del soterramiento;
- 3) en el ambiente terrestre después de un alzamiento, bien por aguas freáticas o por soluciones hidrotermales(2)

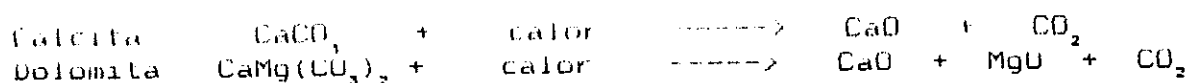
### 3.5 Yacimientos

La dolomita aparece, principalmente, en masas rocosas extensas, formando las calizas dolomíticas y su equivalente cristalino, el mármol dolomítico. Los yacimientos son del mismo tipo que los de las calizas, con frecuencia íntimamente mezcladas con la calcita.

La dolomita como roca, se cree que es de origen secundario por transformación de la caliza ordinaria por reemplazamiento del calcio por magnesio. (4)

### 3.6 Calcinación

El proceso de calcinación consiste en la eliminación de humedad y materias orgánicas volátiles de la caliza por efecto de la temperatura, produciéndose, con ello, dióxido de carbono y cal.



La reacción que se produce es fuertemente endotérmica, es decir, que se efectúa simultáneamente con una absorción de energía en forma calorífica teórica de 425Kcal/Kg de caliza.

Calentando la caliza en condiciones controladas, se descomponen los carbonatos en óxidos y gas carbónico, el cual se desprende con los productos de combustión, quedando los óxidos que se conocen como cal viva. Por otra parte, la reacción química que se produce al calcinar la piedra caliza es reversible, es decir, el óxido de calcio y el dióxido de carbono producidos al descomponerse el carbonato, pueden combinarse de nuevo y volver a formarlo. Esto ocurrirá si se deja que se acumule el gas, porque su presión puede hacer que se invierta el sentido de la reacción.

La pérdida de dióxido de carbono deja los óxidos de cal en un estado muy poroso y activo. Si se sigue calentando hay contracción del material con pérdida de actividad química.

A temperaturas elevadas, la densidad de la cal viva aumenta rápidamente y el material se acerca a lo que se conoce como estado inerte de la caliza quemada.

La influencia de la edad geológica en las propiedades de la piedra caliza es importante, porque repercute en la temperatura de calcinación y su composición química.

Una caliza de grano grueso y porosa, se calcina más rápido que una de grano fino muy compacta. Los fragmentos pequeños se crecen con mayor facilidad que los fragmentos grandes.

La caliza es más densa, cuando es más antigua; necesita más calor para calcinarla, pero, es más rica en calcio, por lo que se tiene una cal de mejor calidad. El efecto del calor sobre la caliza, en forma general es el siguiente:

150-450°C evapora agua higroscópica  
 450-800°C se disocian los carbonatos de calcio y magnesio  
 800-900°C se descompone la arcilla  
 > 900°C adecuada para dar punto.

Los carbonatos presentes se disocian, gradualmente, conforme aumenta la temperatura.

La temperatura óptima de calcinación para las calizas sólo puede ser determinada, experimentalmente, ya que esta depende de la composición existente de los carbonatos presentes en la caliza.

Análisis térmicos diferenciales de dolomita, revelan que la disociación del carbonato se produce en su mayor parte, entre 700-770°C y en algunos casos entre 500-700°C. En calizas ricas en calcio, la disociación se produce casi siempre entre 830-905°C.

Otros investigadores suponen que la temperatura de disociación de calizas ocurre en tres etapas a 402°C, 438°C y 480°C. Sin embargo, la proporción de  $MgCO_3$  a  $CaCO_3$  difiere en muchas especies de calizas dolomíticas y la temperatura de disociación, naturalmente, también varía y es mucho más difícil de calcular. Diferencias en la cristalinidad de la piedra también aparecen, lo que adiciona disparidad a los datos.

Algunos fundamentan que el comienzo de la disociación ocurre en un rango de 500 a 750°C para tres dolomitas (500°C, para tipos fino, denso cristalino; 650°C para bastante cristalino y 750°C para altamente cristalino), con una disociación completa cerca de 800°C. El componente  $CaCO_3$  de la dolomita adhiere un valor alto, presentándose una descomposición dual en etapas.

Como un resultado de estas diferencias en los puntos de disociación, el  $MgO$  es usualmente endurecido en varios grados después de que el  $CaO$  es formado, por la retención a una relativamente alta temperatura. Los grados de dureza pueden ser aliviados por enfriamiento de la cal viva inmediatamente después de que el  $CaCO_3$  es calcinado a temperaturas mínimas y constantes, pero, por una larga duración. Aún cuando el  $CaO$  es suave, la dureza del  $MgO$  influye en la densidad de la cal viva. (12)

Hasta ahora sólo se ha mencionado una disociación de los carbonatos que contienen caliza, pero, no se ha mencionado en qué consiste esta disociación, ni qué fenómeno produce.

Como ya se sabe, para fabricar cal se somete la caliza a calor, de donde resulta la cal más gas carbónico; entonces, la disociación ocurre en el momento en que la caliza pierde el 44% de su peso, liberándolo como dióxido de carbono ( $CO_2$ ), para, después, el 56% restante se convierta en cal. El desprendimiento de dióxido de carbono

provoca una presión que aumenta a medida que aumenta la temperatura de calcinación, la presión ejercida por el desprendimiento del gas carbónico, hace que la caliza aumente de tamaño al calcinarse, así, pues, la cal producida se compone de cristales muy finos cuyo diámetro va a depender de la temperatura y del tiempo de calcinación.

La descomposición de la caliza depende también de la forma y tamaño de la misma, por eso es necesario la regularidad en las dimensiones de la piedra, para evitar partes no cocidas o demasiado cocidas.

Al comienzo del punto de calcinación la piedra es más porosa y puede contener innumerables poros y fisuras interpuestas a través de cristales enrejados.

Hedin, experimentalmente, calcinó diferentes tipos de calizas y calcitas puras en el laboratorio y descubrió cambios físicos microscópicos en algunas calizas calcíticas a 800°C, abajo del punto de disociación. Generalmente este calor causó expansión en la matriz de los cristales de la caliza.

En la elevada cristalización de la caliza el calor produjo esfuerzo en los cristales individuales causando entonces fracturas; este científico encontró que los grados de decrepitación de estos cristales agrandados con cristales de dimensiones lineales largos y cristales más largos el calor los desintegró a cenizas. En contraste, pequeños cristales de 2.5mm o menos prevaecientes en granos finos en la piedra resistieron la temperatura de esfuerzo sin fracturarse.

Otro factor que Hedin reveló, el cual contribuyó a la resistencia de esta fuerza de expansión, fue la presencia de una red de trabajo de minúsculas fisuras, separando pequeños cristales. Estas fisuras proceden parecido a juntas de expansión, de tal manera, que el calor causó sólo dilatación de los cristales; de este modo, mantienen la integridad de la matriz. Los anteriores descubrimientos son generalidades, desde entonces ha habido resultados contradictorios inexplicables.

La investigación de Hedin demuestra que en cada experiencia en la producción de cal, el hombre conoce con seguridad las bondades de la caliza que produce por la calcinación de la masa la cal viva. Estos tipos de caliza pueden disociarse largamente hasta un óxido, pero, ellos pueden romperse en fracciones pequeñas hasta cenizas, rindiendo un producto invendible para muchos usos y complicando seriamente el proceso de calcinación. Cristales de formas largas y más inclinadas pueden ser más atractivos, esto es fácil de observar y la experimentación de la calcinación debe ser juiciosa antes de la inversión en planta. El análisis químico de la piedra no influye en estas características.

Foster, también observó que el cristal enrejado de  $\text{CaCO}_3$ , al ser sometido a un precalentamiento anterior a la calcinación beneficia en

un 5-10% en el largo de la dimensión lineal de la matriz. Un efecto residual de esta expansión es un incremento en la porosidad de la piedra.

Un axioma acerca de la manufactura de cal, descuidado, es el tipo o calidad de la caliza; es una temperatura de calcinación alta y largos periodos de calcinación los cuales producen una cal viva dura de alto encogimiento, alta densidad, baja porosidad y baja reactividad química; esto es lo inverso a temperaturas bajas y/o corta duración de calcinación, produciendo lo deseable, una cal suave, de alta reactividad, bajo encogimiento y alta densidad y porosidad. Esta teoría es concebida, empíricamente, y, autenticada por muchos investigadores.

Hay una temperatura de calcinación óptima y una razón de calentamiento para todas las calizas y ésta sólo puede ser determinada por experimentación.

Murray, supone que la razón de calentamiento tiene la gran influencia en la calidad de la cal, es decir, encogimiento, porosidad y reactividad, afectando más la temperatura máxima o tiempo de retención.

Murray defiende el grado más bien que el choque, el precalentamiento y, entonces, un incremento gradual en la temperatura de calcinación arriba del punto en el cual la disociación es completa, evitando entonces, en lo posible, un tiempo de retención más amplio. Esto es opuesto a la teoría de calcinación para un tiempo constante y a una temperatura constante. Basados en las experiencias de Murray la temperatura óptima para una máxima eficiencia de calcinación varía con los diferentes tipos de piedra y sólo puede determinarse por experimentación exhaustiva.(12)

Obtener una cal muy activa, calcinando dolomita, es más difícil que si se hace calcinando una caliza rica en calcio porque el carbonato de magnesio se disocia a una temperatura más baja que el carbonato de calcio y, esto, da como resultado que el carbonato de magnesio se descomponga o se calcine a una temperatura excesiva. Debido a la gran importancia que tiene la producción de cal, por los múltiples usos que se le da en diversas industrias, se han realizado, con anterioridad varios estudios con el objeto de evaluar las condiciones óptimas para obtenerla.

En la tesis del Ing. Manuel De León (8) se estudió el grado de conversión de caliza dolomítica a cal viva a diferentes temperaturas, tiempos de calcinación y grosor de partícula, concluyéndose que el porcentaje mayor de conversión se obtuvo para una caliza dolomítica con una granulometría de 100-150 mallas a una temperatura de 850°C y con un tiempo de calcinación de 3 horas.

Asimismo, la Inga. María Ana Morales, en su tesis, estudió el grado de conversión de caliza a cal viva a diferentes temperaturas y



tiempos de tratamiento adicionando carbón vegetal a 3 diferentes porcentajes. (10) Trabajo con una caliza al 97.5% en  $\text{CaCO}_3$ , el carbón vegetal fue incorporado en la caliza con el objeto de que sirviera como combustible debido a que al combustionarse libera gran cantidad de energía que puede compensar parte de la demanda energética que requiere el proceso de calcinación.

En este trabajo se concluyó que la adición del carbón vegetal incrementa de manera significativa el porcentaje de conversión de caliza a cal viva, obteniéndose que el porcentaje óptimo de carbón vegetal adicionado fue del 10% para una temperatura de calcinación de  $750^\circ\text{C}$  y tiempo de tratamiento de 5 horas.

Por último, el Ing. Edy Haroldo Pérez, en su trabajo de tesis titulado "Evaluación a nivel de laboratorio del efecto en el grado de conversión a piedra caliza ( $\text{CaCO}_3$ ), a cal viva ( $\text{CaO}$ ), por la adición de 3 tipos de carbón vegetal con diferente poder calorífico, realizada a diferentes temperaturas y tiempos de calcinación para una presión atmosférica de 640 mmHg", obteniéndose los siguientes resultados: no existe mejora en la conversión de piedra caliza a cal viva, ni en base a variaciones de tiempo, ni mejorando el poder calorífico del carbón vegetal; sin embargo, es posible calcinar y obtener un rendimiento, 99.39% de la conversión de piedra caliza a cal viva si se incorpora un carbón vegetal con alto poder calorífico a la temperatura de calcinación de  $750^\circ\text{C}$  y por un periodo de 5 horas.

#### IV JUSTIFICACION

Por ser la producción de cal uno de los medios de vida de gran cantidad de personas, tanto en la ciudad como en el interior del país, es de suma importancia contar con la tecnología adecuada para llevar a cabo de manera óptima el proceso para la producción de cal, de tal manera que se obtenga un producto de buena calidad y a bajo costo.

En vista de que el proceso de calcinación de calizas está influido por diversos factores como lo son: la temperatura, tiempo, tamaño de partícula, pureza de la caliza, etc.; y, debido también a que aún no se cuenta con un estudio que tome en cuenta el efecto que causa el porcentaje de carbonato de magnesio presente en la caliza en el grado de conversión de caliza a cal viva; se realizará este estudio, pretendiéndose, con ello, que los resultados obtenidos sirvan para que el industrial al encontrarse con una variedad de este tipo, pueda darle un tratamiento adecuado, para obtener, así cal viva de buena calidad.

Asimismo, este estudio servirá para completar la información que ya se tiene en el proyecto "Evaluación de las características básicas del proceso de calcinación de calizas y dolomitas" que está realizando el Laboratorio de Química Industrial /CII-USAC.

## V METODO DE INVESTIGACION

### 5.1 Localización

La parte experimental de este trabajo se realizará en:

-Departamento de Laboratorios del Ministerio de Energía Y Minas.

### 5.2 Materiales a utilizar

-Material geológico que consistió en piedra caliza dolomítica triturada a una rango de -8+10 mallas, procedente de Huehuetenango y San Rafael La Laguna, con tres diferentes grados dolomitización: 9.09%, 22.15% y 35.93% de carbonato de magnesio ( $MgCO_3$ ).

### 5.3 Equipo

9 crisoles de porcelana  
1 balanza de precisión 160 gramos, sensibilidad 1/1000gramos, modelo Mettler AE 200  
2 desecadoras  
1 mufla de 1200°C  
1 mufla de 1500°C  
1 quebrantadora de quijada modelo LIH SHAN MACHINERY FACTORY CO. LTD. 3"-1/4"  
1 molino de bolas  
serie de tamices de mallas 8-10 y 14 marca Taylor  
Vibrador para serie de tamices marca Taylor  
Espátula

### 5.4 Metodología experimental

#### 5.4.1 Diseño de tratamientos

El efecto que produce la presencia de carbonato de magnesio en la eficiencia de conversión de piedra caliza dolomítica a cal viva se evaluó seleccionando:

- diferentes tipos de piedra caliza dolomítica con tres distintos porcentajes de carbonato de magnesio que son 9.09%, 22.15% y 35.93%.
- tres diferentes temperaturas de calcinación 650°C, 750°C y 850°C.
- y tres periodos de calcinación 3, 5 y 7 horas.

Con lo cual se realizó un total de 27 tratamientos con tres repeticiones.

#### 4.2 Diseño experimental.

Se realizó un experimento factorial con un arreglo combinatorio y una distribución, completamente al azar, con 27 tratamientos y 3 repeticiones, empleándose la prueba de Tuckey como método para hacer todas las comparaciones múltiples que son posibles con los 27 tratamientos.

#### 4.3 Unidad experimental.

La unidad experimental que se utilizó fue de 10gr. de caliza dolomítica con una granulometría constante de -8+10 mallas y con tres diferentes porcentajes de carbonato de magnesio ( $MgCO_3$ ) en forma cristalizada. Las muestras fueron calcinadas a tres temperaturas diferentes y tres periodos de calcinación, realizándose tres repeticiones para cada uno de los 27 tratamientos.

#### 4.4 Manejo del experimento.

##### \* Caracterización de las muestras

La composición química de las muestras se determinó por las técnicas de vía húmeda para el Calcio y el Magnesio y por espectrofotometría de absorción atómica para el Silice, Aluminio y Hierro.

##### \* Preparación de las muestras.

Se preparó el material geológico, caliza dolomítica conteniendo tres diferentes porcentajes de carbonato de magnesio 9.09%, 22.15% y 35.93%, mediante el siguiente circuito de molienda:

-se trituró el material en una quebrantadora de quijadas de la cual el material salió en promedio a 1/2", luego, se pasó a un molino de rodos y se graduó la separación entre ellos, de tal forma, que el producto salió, aproximadamente, a 8 mallas, luego se realizó la separación granulométrica del producto, utilizando las mallas 8, 10 y 14, con lo cual se obtuvo la caliza dolomítica a una granulometría constante de -8+10 mallas.

Finalmente, se trasladó el producto, previamente identificado, a una desecadora.

##### \* Calcinación de las muestras:

-se utilizó una masa representativa constante (wo) de 10gr de caliza dolomítica para cada tratamiento y para cada repetición;

-se colocaron los 10 gr de muestra en cápsulas de porcelana, previamente taradas;

- se colocaron las capsulas en la mufla a temperatura y tiempo seleccionados;
- se pesaron las cápsulas ( $w_1$ ) después de enfriarlas en una desecadora con un tiempo de 20 minutos como máximo;
- el producto se sometió a una segunda calcinación, tomando una muestra representativa ( $w_0'$ ) de la primera calcinación, llevándola a una temperatura de  $1000^{\circ}\text{C}$  durante 1 hora y se realizó este paso hasta lograr un peso constante ( $w_4$ ) del producto, pesando la muestra después de enfriarla en una desecadora por 20 minutos;
- el peso perdido en la segunda calcinación ( $w_3$ ) corresponde al  $\text{CaCO}_3$ , que no habia reaccionado en la primera calcinación;
- pesando  $w_3$  se calculó un peso equivalente ( $w_3'$ ) para obtener peso que hubiese perdido el producto total de la primera calcinación;
- obteniendo  $w_3'$  y calculado  $w_2$  el peso perdido del residuo de la primera calcinación, que corresponde al  $\text{CO}_2$  liberado por el  $\text{CaCO}_3$ , entonces sumó  $w_2$  y  $w_3'$  y se obtiene el total de  $\text{CO}_2$  producido;
- conociendo el porcentaje de  $\text{CaCO}_3$ , presente, inicialmente, en la muestra, se calcula por diferencia el porcentaje de  $\text{CaCO}_3$  que si reaccionó;
- se calculó el porcentaje de conversión de  $\text{CaCO}_3$  y el porcentaje de  $\text{CaO}$  producido.

## VI. ANALISIS ESTADISTICO DE LOS DATOS

El porcentaje de conversión de caliza dolomítica a cal viva, obtenido en cada tratamiento fue sometido a un análisis de varianza para el diseño factorial con arreglo combinatorio completamente al azar con 27 tratamientos y 3 repeticiones. Dicho análisis fue efectuado por medio del Sistema SAS con el apoyo de la Facultad de Agronomía.

Debido a que resultaron diferencias altamente significativas entre tratamientos, se procedió a aplicar la prueba de Tuckey. Esta prueba consiste en calcular un valor teórico común o diferencia mínima significativa mediante la aplicación de la fórmula siguiente:

$$w = q\sqrt{S^2 / n}$$

donde:

q = valor tabular que se encuentra con el número de tratamientos y los G.L. del error.

S<sup>2</sup>=varianza del error experimental.

n =número de repeticiones.

Por medio del valor de "w" que en este caso es de 6.77, se hacen todas las comparaciones múltiples:

Si la diferencia entre medias // w = \*

Si la diferencia entre medias / w = NS

donde:

\* = la diferencia se considera significativa

NS= la diferencia se considera no significativa

Se realizaron comparaciones múltiples de medias, según Tuckey, para la variable de respuesta, porcentaje de conversión con probabilidad de 0.0001. Los resultados se presentan en la tabla No. 8 del Apéndice.

## VII. RESULTADOS Y DISCUSION

Los resultados obtenidos en el presente estudio se encuentran en las tablas Nos. 4, 5 y 6 del Apéndice.

Mediante las gráficas Nos. 1, 2 y 3 del Apéndice se puede observar que no existe una diferencia significativa en el porcentaje de conversión de caliza dolomítica con contenidos de  $MgCO_3$ , de 9.09%, 22.15% y 35.93% a cal viva, a una temperatura de calcinación de  $850^\circ C$  y tiempos de calcinación de 3, 5 y 7 horas; ya que en estos rangos de temperatura y tiempo, para los tres tipos de caliza dolomítica se obtuvieron porcentajes de conversión que van desde 96.89 a 98.97 %  $CaO$ . También puede verse en la gráfica No. 6 del Apéndice.

Lo anterior se puede comprobar, estadísticamente, ya que mediante la prueba de Tuckey en donde se obtuvo el valor teórico o diferencia mínima "w" igual a 6.77, calculado con base en la fórmula que aparece en el análisis estadístico; y al compararlo con cada una de las medias de los porcentajes de conversión, se estableció el grupo de valores que eran no significativamente diferentes, ver tabla No. 8 del Apéndice.

Las medias clasificadas dentro del grupo A, se pueden considerar, estadísticamente, iguales, con base en lo antes expuesto, correspondiendo la mayoría de estos resultados al proceso de calcinación llevado a cabo a  $850^\circ C$ , tiempos de 3, 5 y 7 horas y contenidos de  $MgCO_3$ , en las calizas de 9.09, 22.15 y 35.93 %.

Dentro de este grupo también se encuentra que la calcinación de estos tipos de caliza a  $750^\circ C$  y durante un tiempo de calcinación de 7 horas se obtienen conversiones que también son consideradas, estadísticamente, iguales a las obtenidas a  $850^\circ C$ .

Para una temperatura de calcinación de  $750^\circ C$  y un periodo de calcinación de 5 horas, se puede observar que en los tres tipos de caliza dolomítica que se estudiaron en este trabajo, no existe un efecto significativo de dolomitización ya que como lo muestra la tabla No. 8 de Apéndice, estas combinaciones corresponden a un grupo de resultados que, estadísticamente, son considerados no diferentes, lo que coincide con lo que se puede observar en la gráfica No. 5 del Apéndice.

Por otro lado, los resultados obtenidos en la calcinación de estas calizas dolomíticas a  $650^\circ C$ , se pueden ver que tampoco existe un efecto significativo de dolomitización puesto que los porcentajes de conversión de estas calizas a cal viva, a dicha temperatura y durante 3, 5 y 7 horas, van desde 4.71 a 11.55 % de  $CaO$ , y con base en la tabla No. 8 del Apéndice, estos resultados son considerados estadísticamente iguales. Aunque a esta temperatura existe un efecto negativo causado por la temperatura ya que se obtuvieron bajas conversiones.

A esta misma temperatura existe un grupo que sí es, estadísticamente diferente, que corresponde a 7 horas de calcinación en donde se obtuvieron porcentajes de conversión de 20.67 y 18.82 % CaO; pero, esto no puede atribuirse a un efecto de dolomitización, puesto que estas conversiones corresponden a calizas con 3.93 y 9.09 % de contenido en MgCO<sub>3</sub>, respectivamente, esto puede verse en la gráfica No.4 del Apendice; estas conversiones son consideradas, estadísticamente, iguales.

Es importante hacer notar que los resultados obtenidos en donde la presencia de MgCO<sub>3</sub> en la caliza no incide en forma negativa en la eficiencia de conversión de CaO, fueron observados con un tamaño de partícula pequeño -8 +10 mallas, el cual es tamaño que facilita la descomposición de la caliza. A, este respecto no existe en la literatura consultada, información sobre como se ve afectada la conversión de calizas dolomíticas con diferentes tamaños de partícula.

Sin embargo, toda la literatura consultada concluye en que la eficiencia de calcinación variará con los diferentes tipos de piedra (grano fino, grueso, poroso, compacto, etc.) y que la temperatura óptima de calcinación sólo puede determinarse por experimentación.

Por todo lo expuesto en este estudio, puede notarse que la presencia de MgCO<sub>3</sub> en la caliza si puede afectar negativamente en la eficiencia de conversión a CaO, cuando el tamaño de partícula sea mayor.

PROYECTO DE LEY  
COMISIÓN DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



### CONCLUSIONES

1. Los diferentes contenidos de  $MgCO_3$  estudiados, no ejercen un efecto retardante en la conversión máxima de caliza dolomítica a cal viva; independientemente de las distintas condiciones de temperatura, tiempo y granulometría, especificadas, para la investigación.
2. La mejor conversión a cal viva se obtuvo en el presente estudio, es el tratamiento de calcinación de la caliza dolomítica a una temperatura de  $850^\circ C$ , independientemente del tiempo de calcinación y contenidos de  $MgCO_3$ .
3. La conversión máxima de caliza dolomítica a cal viva es independiente del contenido de  $MgCO_3$  a  $750^\circ C$ .
4. No existe diferencia significativa en el efecto retardante en la calcinación de caliza dolomítica por el efecto del incremento de  $MgCO_3$ , para el tamaño de partícula estudiada y las condiciones establecidas en el estudio.
5. El efecto negativo más incidente es la temperatura, puesto que a  $650^\circ C$  se observó baja conversión.

## RECOMENDACIONES

El presente estudio determinó que no existen variaciones significativas en el porcentaje de conversión de piedra caliza dolomítica con contenidos de  $MgCO_3$  de 9.09, 22.15 y 35.93 % y que para obtener un porcentaje alto de conversión de caliza dolomítica a cal viva, a esta granulometría se sugiere lo siguiente:

1. 1.1 efectuar la calcinación a temperaturas de  $850^{\circ} C$ ;
  - 1.2 efectuar la calcinación durante un periodo de 7 horas;
  - 1.3 si se requiere realizar un proceso con efectividad puede efectuarse la calcinación a  $750^{\circ} C$  y durante 7 horas u  $850^{\circ} C$  durante 5 horas.
2. Efectuar un estudio en el que se evalúen calizas dolomíticas con mayores tamaños de partículas, ya que estos resultados corresponden a calizas con un tamaño de partícula constante de -8 + 10 mallas.
  3. Realizar el proceso de calcinación con eliminaciones periódicas de  $CO_2$ , para que la acumulación de éste no tenga un efecto retardante en la conversión.
  4. Realizar un estudio para evaluar si este mismo comportamiento se obtiene para calizas que contienen mayor contenido de  $MgCO_3$ , al estudiado en este trabajo.

## BIBLIOGRAFIA

1. BATEMAN, Alan M. Yacimientos Minerales de Rendimiento Economico. 2a. edicion. España: edit. omega, 1,961.
2. HEINRICH, E. W. M. Petrografia Microscópica. 2a. edición España: edit. Omega, 1,972. 164-166 pp.
3. HELLER, Robert L. Geologia y Ciencias Afines. México: edit. UTEHA, 1,967. 527-537 pp.
4. HURLBUR, Lorneius S. Manual de Mineralogia de Dana. Barcelona: edit. Reverte S.A., 1,982. 564pp.
5. KRUMBEIN Y SLOSS. Estratigrafia y Sedimentación. México: edit. UTEHA, 1,969. 205 pp.
6. DALISBRY Dana, Edward. Tratado de Mineralogia. México: edit. Continental S.A., 1,982 564 pp.
7. EICLER, Denle. El Tiempo Geológico. España: edit. Paraninfo, 1,981. 291-292 pp.
8. DE LEON, Manuel. Estudio del Grado de Conversión de Caliza Dolomítica (CaCO<sub>3</sub>, MgCO<sub>3</sub>) comercial con alto grado de dolomitización a Cal Viva (CaO) a diferentes temperaturas y tiempos de procesamiento para una presión atmosférica de 640 mmHg. (tesis: Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos) Guatemala, 1,990. 34pp.
9. LOPEZ, Luis Roberto. Evaluación del Diseño de un Horno Mejorado para Cal. (tesis: Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos) Guatemala, 1,985, 90pp.
10. MORALLS, Maria Ana. Evaluación de la Eficiencia en el grado de Conversión de piedra caliza a cal viva por efecto de la incorporación de carbon vegetal, mediante el procesamiento a diferentes temperaturas y tiempos de calcinación. (tesis: Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos) Guatemala, 1,990. 39pp.
11. PEREZ, Edy Haroldo. Evaluación del grado de conversión de Piedra Caliza (CaCO<sub>3</sub>) a Cal Viva (CaO) por la adición de 3 tipos de Carbon Vegetal con diferente Poder Calorífico. Realizada a diferentes Temperaturas y Tiempos de Calcinación para una Presión Atmosférica de 640 mmHg. (tesis: Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos) Guatemala 1,991. 61pp.
12. BOYTUN, Robert S. Chemistry and Technology of Lime and Limestone. 2a. edicion. UNITED STATES OF AMERICA: edit. John Wiley & Sons Inc. 1,980. 159-172 pp.

## APENDICE

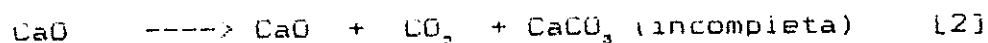
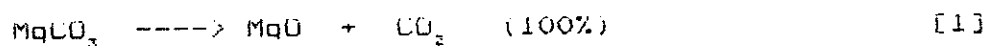
- \* Guia de cálculo
- \* Caracterización química de las calizas dolomíticas
- \* Descripción de los tratamientos
- \* Distribución de los tratamientos
- \* Resultados de las calcinaciones

### DATOS CALCULADOS

- \* Tabla N. Conversiones porcentuales obtenidas para  $MgCO_3 = 9.09\%$
- \* Tabla N. Conversiones porcentuales obtenidas para  $MgCO_3 = 22.15\%$
- \* Tabla N. Conversiones porcentuales obtenidas para  $MgCO_3 = 35.93\%$
  
- \* Resultados del Análisis de varianza
  - \*Resultados obtenidos del análisis de varianza sobre el modelo escogido.
  - \*Resultados obtenidos del análisis de varianza, evaluación de los factores de variación sobre la variable respuesta, el % de conversión de  $CaCO_3, MgCO_3$ , a  $CaO$ .
  
- \* Comparación de medias. Prueba de Tuckey.
  - \*Para el factor de variación CONCENTRACION
  - \*Para el factor de variación TEMPERATURA DE Calcinación
  - \*Para el factor de variación TIEMPO DE Calcinación.
  - \*Para los factores combinados CONCENTRACION-TEMPERATURA
  - \*Para los factores combinados CONCENTRACION-TIEMPO
  - \*Para los factores combinados TEMPERATURA-TIEMPO.
  
- \* GRAFICAS
  - \* % de Conversión vrs. Tiempo de Calcinación,  $MgCO_3 = 9.09\%$
  - \* % de Conversión vrs. Tiempo de Calcinación,  $MgCO_3 = 22.15\%$
  - \* % de Conversión vrs. Tiempo de Calcinación,  $MgCO_3 = 35.93\%$
  - \* % de Conversión vrs. Tiempo de Calcinación, Temp. =  $650^\circ C$
  - \* % de Conversión vrs. Tiempo de Calcinación, Temp. =  $750^\circ C$
  - \* % de Conversión vrs. Tiempo de Calcinación, Temp. =  $850^\circ C$

## GUIA DE CALCULO

\* Considerese las siguientes reacciones:



Corresponden a la primera calcinación a la que se somete la muestra; aquí se considera que todo el carbonato de magnesio reacciona para producir óxido de magnesio y que el carbonato de calcio a esta temperatura, reacciona, parcialmente, produciendo óxido de calcio, dióxido de carbono y que parte de dicho carbonato permanece inerte. Entonces sea:

$w_0$  = peso inicial de la muestra = 10 grs.

$w_1$  = peso después de la primera calcinación.

Por lo tanto, el peso perdido en la primera calcinación ( $w_2$ ), corresponde al  $\text{CO}_2$  producido por la disociación del  $\text{MgCO}_3$ , como de la descomposición parcial del  $\text{CaCO}_3$ . Y se calcula:

$$w_2 = w_0 - w_1 \quad \text{Ec. [1]}$$

\* Los productos se someten a una segunda calcinación, tomando una muestra representativa ( $w_0'$ ) de la primera calcinación y el peso perdido ( $w_3$ ) corresponde al  $\text{CaCO}_3$  que no había reaccionado en la primera calcinación, luego, se calcula un peso equivalente ( $w_3'$ ) para obtener el peso que hubiese perdido el producto total de la primera calcinación, de la siguiente forma:

$$w_3' = w_3 * (w_1/w_0') \quad \text{Ec. [2]}$$

\*  $\text{CO}_2$  total liberado ( $w_4$ ):

$$w_4 = w_2 + w_3' \quad \text{Ec. [3]}$$

\*  $\text{CO}_2$  producido por el  $\text{MgCO}_3$  ( $w_5$ ):

Conociendo la composición original de la dolomita, se parte del contenido de  $\text{MgCO}_3$  y por estequiometría se tiene:

$$\text{CO}_2 (\text{MgCO}_3) = (\text{MgCO}_3)_{\text{orig.}} * (44.009)/(84.32) \quad \text{Ec. [4]}$$

\*  $\text{CO}_2$  producido por el  $\text{CaCO}_3$  ( $w_6$ ):

$$w_6 = w_4 - w_5 \quad \text{Ec. [5]}$$

Tabla N. 1

Caracterización química de las calizas dolomíticas. Análisis por las técnicas de vía húmeda y por espectrofotometría de absorción atómica.

MUESTRA	% CaCO <sub>3</sub>	% MgCO <sub>3</sub>	% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	% SiO <sub>2</sub>	% Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
1	88.25	9.09	0.87	2.39	0.43
2	72.40	22.15	0.80	4.26	0.39
3	48.21	35.93	0.98	5.80	0.54

Tabla N. 2

Descripción de los tratamientos

FACTOR	DIMENSION	NIVEL 1	NIVEL 2	NIVEL 3
CONC. C	%	9.09	22.15	35.93
TEMP. T	°C	650	750	850
TIEMPO M	Hrs.	3	5	7

Donde:

C es la concentración de carbonato de magnesio en %,  
 T es la temperatura de calcinación, en grados centígrados  
 M es el periodo de calcinación, en horas.

TABLA N.3

## Distribución Aleatoria de los tratamientos

Codigo de Tratamiento	Concentracion, %	Temperatura, °C	Tiempo, hrs.
C3T2M2	35.93	750	5
C1T3M3	9.09	650	7
C3T1M2	35.93	650	5
C3T1M3	35.93	750	7
C3T1M1	35.93	650	3
C2T1M3	22.15	650	7
C2T1M2	22.15	650	5
C1T1M1	9.09	650	3
C2T2M1	22.15	750	3
C1T1M3	9.09	650	7
C2T2M2	22.15	750	5
C1T2M2	9.09	750	5
C2T3M2	22.15	850	5
C2T3M1	22.15	850	3
C1T2M1	9.09	750	3
C3T3M2	35.93	850	5
C1T3M2	9.09	850	5
C2T1M1	22.15	650	3
C1T1M2	9.09	650	5
C2T3M3	22.15	850	7
C3T2M1	35.93	750	3
C3T3M3	35.93	850	7
C2T2M3	22.15	750	7
C1T3M1	9.09	850	3
C3T3M1	35.93	850	3
C3T1M3	35.93	650	7
C1T2M3	9.09	750	7

TABLA N. 4

Conversiones porcentuales obtenidas en la evaluación de la calcinación del mineral caliza dolomítica ( $\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$ ) a cal viva ( $\text{CaO}$ ) para un grado de dolomitización constante de 9.09% (p/p) de  $\text{MgCO}_3$ .

Temperatura °C	Tiempo hrs	Repetición 1 %	Repetición 2 %	Repetición 3 %	Conversión promedio, %
650	3	6.42	6.62	8.58	7.21
650	5	9.60	9.53	10.59	9.91
650	7	19.99	19.91	16.55	18.82
750	3	52.94	56.80	41.99	50.58
750	5	74.49	76.84	76.93	76.09
750	7	97.09	96.65	97.14	96.96
850	3	96.83	97.19	96.65	96.89
850	5	97.99	98.41	98.57	98.32
850	7	98.64	98.58	98.43	98.55

TABLA N. 5

Conversiones porcentuales obtenidas en la evaluación de la calcinación del mineral caliza dolomítica ( $\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$ ) a cal viva ( $\text{CaO}$ ) para un grado de dolomitización constante de 22.15% (p/p) de  $\text{MgCO}_3$ .

Temp. °C	Tiempo hrs.	Repetición 1 %	Repetición 2 %	Repetición 3 %	Conversión Promedio %
650	3	5.53	5.83	5.08	5.48
650	5	11.57	11.59	10.18	11.11
650	7	9.58	9.55	10.09	9.74
750	3	46.30	56.12	59.20	53.47
750	5	78.31	78.16	78.14	78.20
750	7	95.42	96.03	95.12	95.52
850	3	97.16	97.33	97.21	97.23
850	5	98.62	98.48	98.18	98.43
850	7	98.80	98.55	98.58	98.64



TABLA N. 6

Conversiones porcentuales obtenidas en la evaluación de la calcinación del mineral caliza dolomítica ( $\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$ ) a cal viva ( $\text{CaO}$ ) para un grado de dolomitización constante de 35.93% (p/p) de  $\text{MgCO}_3$ .

Temp. °C	Tiempo hrs.	Repetición 1 %	Repetición 2 %	Repetición 3 %	Conversión promedio %
650	3	4.80	4.72	4.62	4.71
650	5	11.52	11.44	11.68	11.55
650	7	22.38	21.74	17.88	20.67
750	3	66.61	66.80	64.29	65.90
750	5	81.56	80.23	80.43	80.74
750	7	97.30	96.41	96.86	96.86
850	3	98.62	98.00	98.37	98.33
850	5	98.19	98.82	98.74	98.58
850	7	99.11	98.63	99.17	98.97

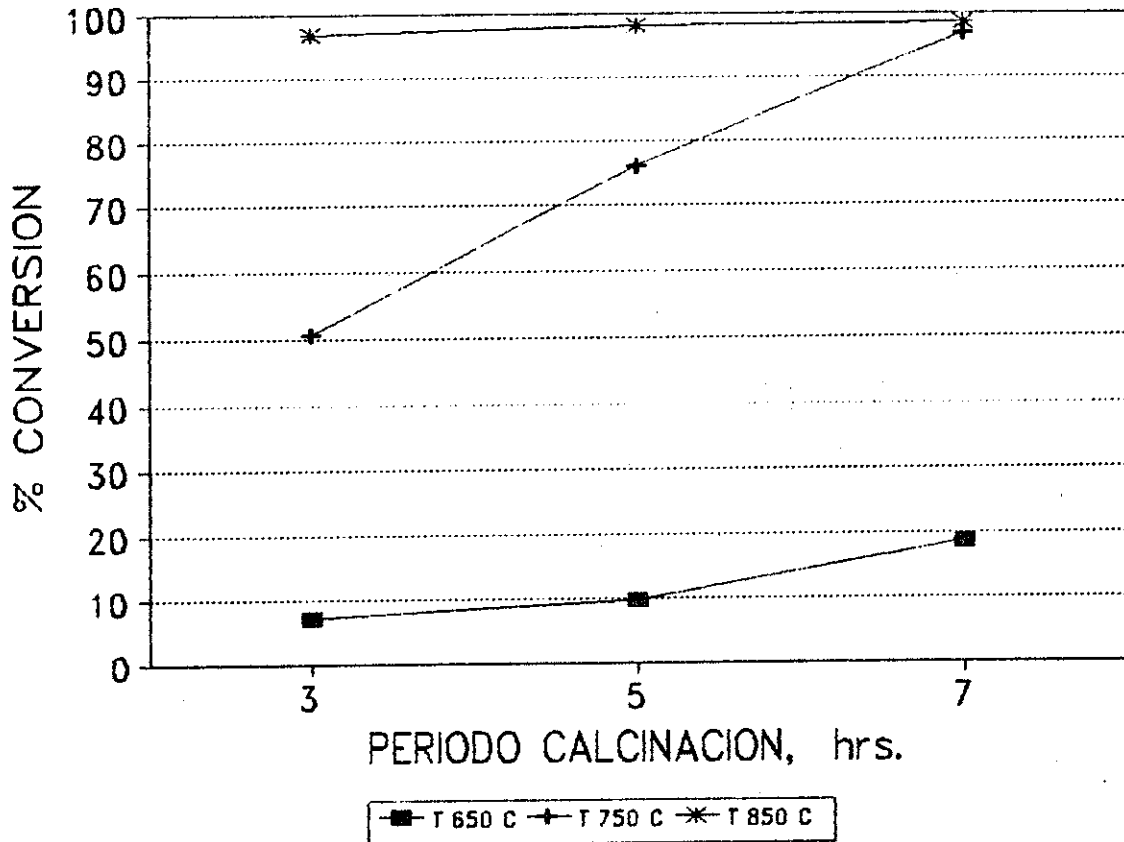
TABLA No. 8

Prueba de Tuckey para la variable Conversión,  $\alpha = 0.05$ ,  
 gl error > 54, CME = 3.408, Comparador = 6.77

Grupo Tuckey	Media	N	Grado de Dolomitización	Temperatura oC	Tiempo hrs
A	98.97	3	35.93	850	7
A	98.64	3	22.15	850	7
A	98.58	3	35.93	850	3
A	98.55	3	9.09	850	7
A	98.43	3	22.15	850	5
A	98.33	3	35.93	850	3
A	98.32	3	9.09	850	5
A	97.23	3	22.15	850	3
A	96.96	3	9.09	750	7
A	96.89	3	9.09	850	3
A	96.88	3	35.93	750	7
A	95.52	3	22.15	750	7
B	80.74	3	35.93	750	5
B	78.2	3	22.15	750	5
B	76.09	3	9.09	750	5
C	65.9	3	35.93	750	3
D	53.87	3	22.15	750	3
D	50.57	3	9.09	750	3
E	20.67	3	35.93	850	7
E	18.82	3	9.09	650	7
F	11.55	3	35.93	650	5
F	11.11	3	22.15	650	5
F	9.91	3	9.09	650	5
F	9.74	3	22.15	650	7
F	7.21	3	9.09	650	3
F	5.48	3	22.15	650	3
F	4.71	3	35.93	650	3

Nota: medias con la misma letra son No Significativamente diferentes.

GRAFICA N. 1  
CONVERSION vrs. TIEMPO CALCINACION



#### DESCRIPCION

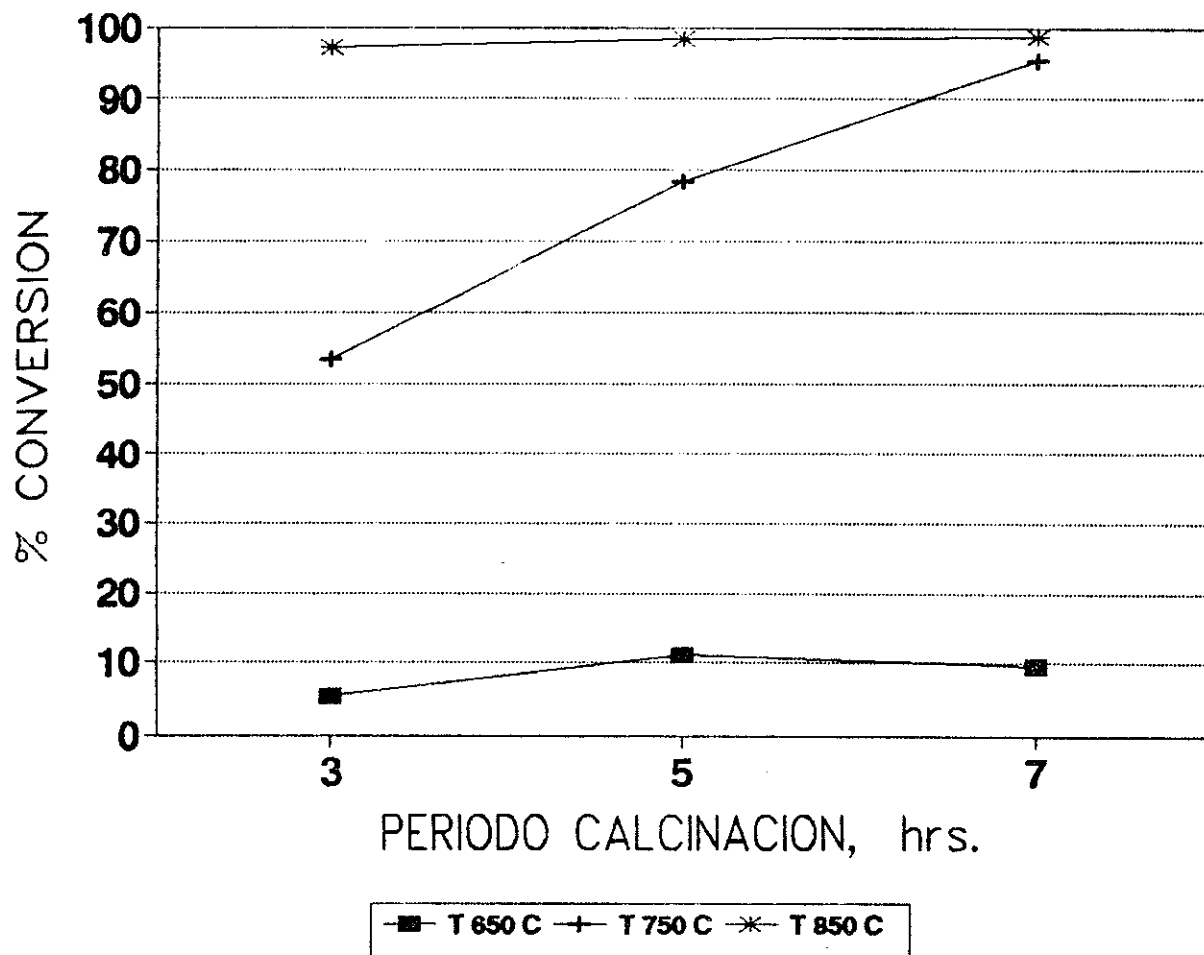
Esta gráfica describe el comportamiento del % de conversión de caliza dolomítica con un contenido de 9.09% MgCO<sub>3</sub> a tres tiempos de calcinación y a tres temperaturas, para las cuales se obtuvieron las siguientes ecuaciones, con su respectiva correlación:

$$\text{A } 650\text{C } Y = 3.32675 * \exp(0.23986X) \quad \text{con } r = 0.98159$$

$$\text{A } 750\text{C } Y = 21.78394 * X^{0.77058} \quad \text{con } r = 0.99961$$

$$\text{A } 850\text{C } Y = 94.77439 + 2.02769 * \ln(X) \quad \text{con } r = 0.96184$$

GRAFICA N. 2  
CONVERSION vrs. TIEMPO CALCINACION



DESCRIPCION

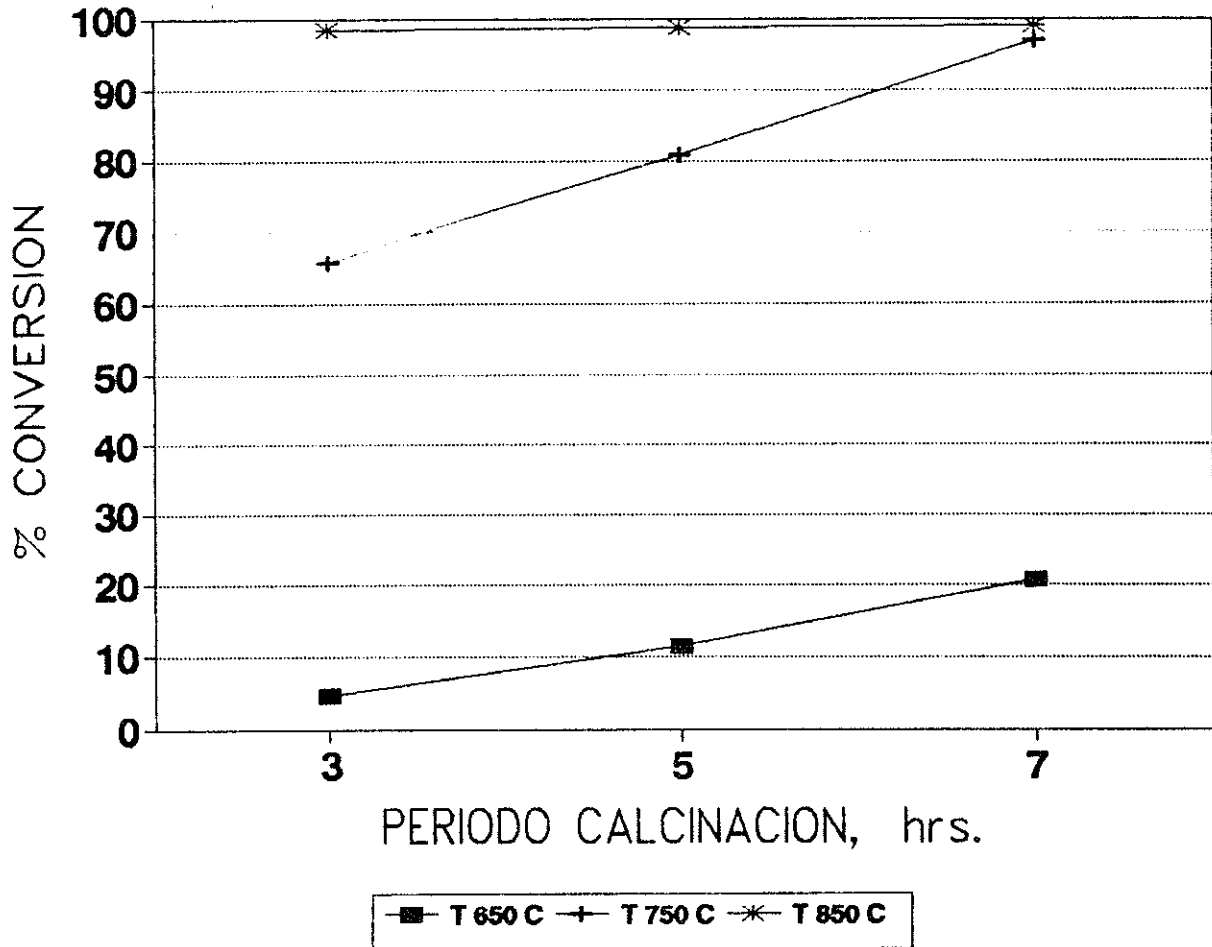
Esta gráfica describe el comportamiento del % de conversión de caliza dolomítica con un contenido de 22.15% MgCO<sub>3</sub> a tres tiempos de calcinación y a tres temperaturas, para las cuales se obtuvieron las siguientes ecuaciones, con su respectiva correlación.

A 650C  $Y = 2.68107 * X^{0.73626}$  con  $r = 0.83573$

A 750C  $Y = -1.10553 + 49.52914 * \ln(X)$  con  $r = 0.99986$

A 850C  $Y = 95.43176 + 1.71998 * \ln(X)$  con  $r = 0.96459$

GRAFICA N. 3  
CONVERSION vrs. TIEMPO CALCINACION



DESCRIPCION

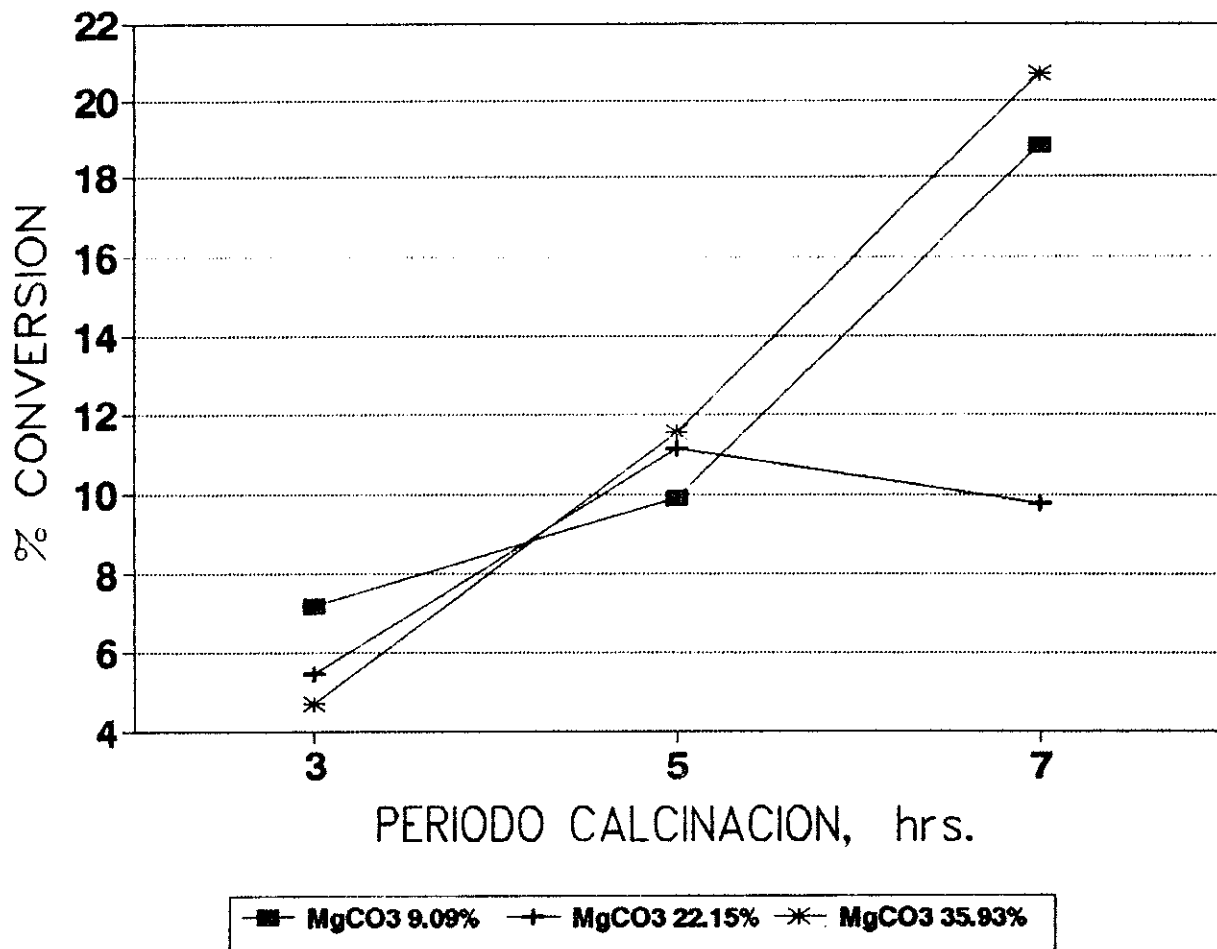
Esta gráfica describe el comportamiento del % de conversión de caliza dolomítica con un contenido de 35.93% MgCO<sub>3</sub> a tres tiempos de calcinación, tres temperaturas, y un tamaño de partícula de -8 +10 mallas; para las cuales se obtuvieron las siguientes ecuaciones con su respectiva correlación:

$$A\ 650C\ Y = 0.69244 * X^{1.74639} \quad \text{con } r = 0.9999916$$

$$A\ 750C\ Y = 42.46667 + 7.74 * X \quad \text{con } r = 0.999715$$

$$A\ 850C\ Y = 97.82974 * \exp(1.6219 * 10^{-3} X) \quad \text{con } r = 0.992228$$

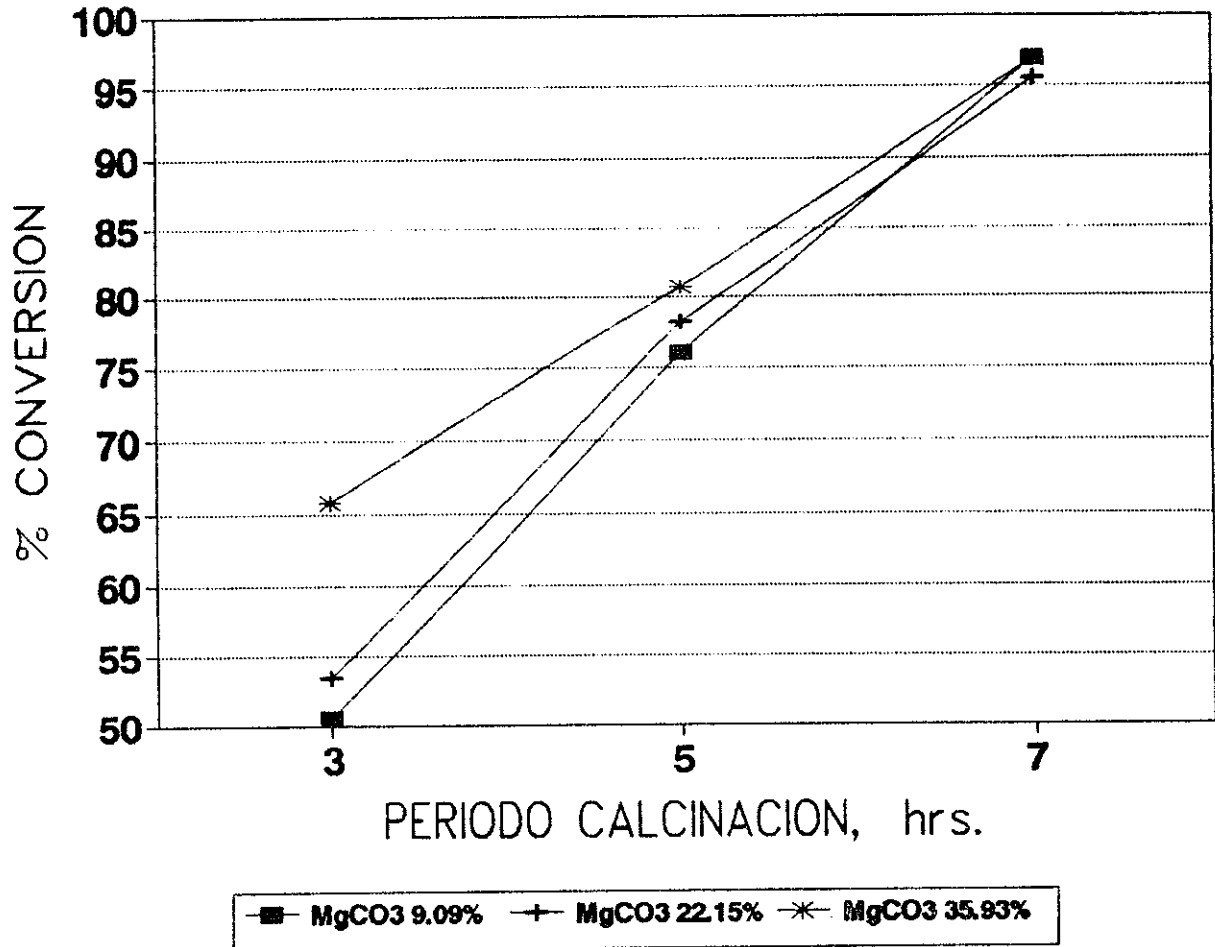
GRAFICA N. 4  
CONVERSION vrs. TIEMPO CALCINACION



DESCRIPCION

Comportamiento del % de conversión de calizas dolomíticas con 3 diferentes grados de dolomitización a una temperatura constante de 650°C y un tamaño de partícula de -8 +10 mallas

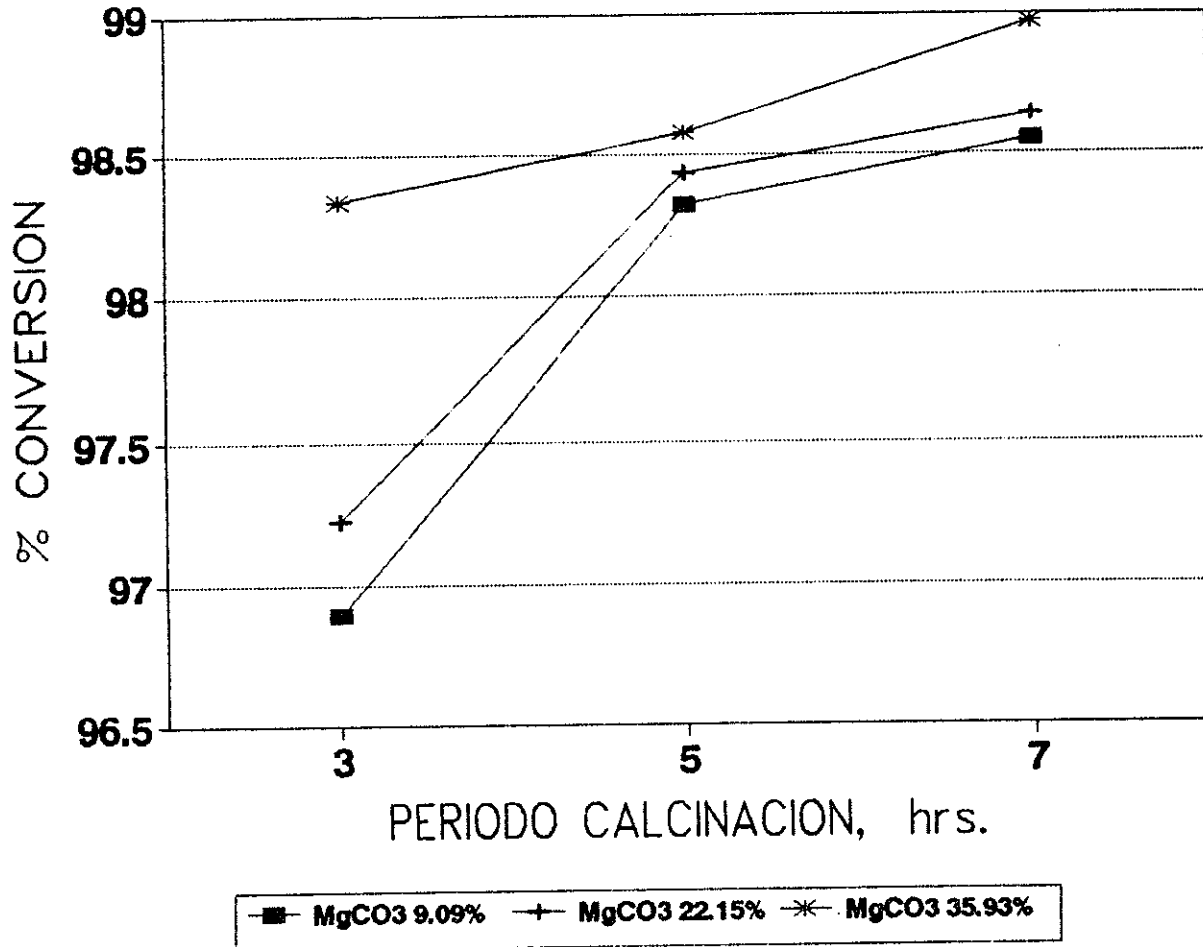
GRAFICA N. 5  
CONVERSION vrs. TIEMPO CALCINACION



DESCRIPCION

Comportamiento del % de conversion de calizas dolomiticas con 3 diferentes grados de dolomitizacion a una temperatura constante de 750oC y un tamano de particula de -8 +10 mallas.

GRAFICA N. 6  
% CONVERSION vrs. TIEMPO CALCINACION



DESCRIPCION

Comportamiento del % de conversión de caliza dolomítica con 3 diferentes grados de dolomitización a una temperatura constante de 850°C y un tamaño de partícula de -8 +10 mallas.