

CARACTERIZACIÓN DE LA PIEDRA CALIZA DE LA ZONA EL PUENTE PARA EL USO EN LA CONSTRUCCIÓN

CAPÍTULO 1: GENERALIDADES

1.1.ANTECEDENTES

La cal es un compuesto químico utilizado en la elaboración de productos para el acabado de las paredes de morteros de albañilería. Los productos calcáreos comercialmente disponibles poseen diferente composición química y propiedades importantes que deben ser consideradas en aplicaciones prácticas. Siendo las destacadas: su valor neutralizante y su tamaño de partícula.

Respecto a las características físicas de la cal hidratada, es un material que puede ser granulado o molido a diferentes tamaños de partículas, su color puede ser blanco, crema, o gris; dependerá de las impurezas contenidas en la materia prima utilizada para obtener la cal, cuanto más alto es la temperatura de calcinación tanto mayor es la densidad.

1.2.ELEMENTOS DEL OBJETO DE LA PROPUESTA

1.2.1. PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.2.1.1.PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En el departamento de “Tarija de zona El Puente Cantera Huayco” tiene una topografía compleja y variedades de calizas es muy escasa la investigación y no cuenta con certificación de análisis de la calidad del producto o cal comercial.

No cabe duda que la cal viva es uno de los materiales más usados en la actualidad en el ámbito de la construcción y debido a que existe una gran demanda en la construcción, esto nos ha llevado a buscar nuevas alternativas en materiales, que tengan como objetivo, mejorar sus propiedades físicas, químicas y trabajo, tiempo y principalmente costos.

En el trabajo de investigación se propone la caracterización de la piedra caliza de “Cantera Huayco”, para mejorar las características del mortero, en cuanto a la plasticidad e impermeabilidad y así usarlo aplicarlos según los requerimientos técnicos de resistencias mecánicas, por ejemplo: Así adaptable a diversos usos en los distintos rubros como ser en solera, revestimientos exteriores/interiores, pintura, muros de carga, tabiques, elementos decorativos. (VER ANEXO A))

1.2.1.2.FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.2.1.2.1. PROBLEMA PRINCIPAL

La falta de estudios sobre las propiedades físicas, químicas de cal de la zona “El Puente Cantera Huayco”

1.2.1.2.2. PROBLEMAS SECUNDARIOS

- ✓ El Falta de investigación de sus características, físico, químico de la cal de Cantera Huayco.
- ✓ El consumo inadecuado de tipos de cal en la construcción
- ✓ La falta de conocimiento del correcto uso de la cal y su comportamiento para los elementos en la construcción.
- ✓ Gastar demasiados recursos, que estos generan bajos rendimientos en la construcción.

1.2.1.2.3. SISTEMATIZACIÓN

- 1.-Extracción de canteras.
- 2.- Trituración previa.
- 3.- Calcinación.
- 4.- Almacenaje.
- 5.- Transporte y distribución.
- 6.-Realizar ensayos químicas, físicas.
- 7.- Redactar en una ficha técnica para generar los tipos de obras en la utilización de la calidad de cal.

¿Qué ensayos de evaluación pueden utilizarse para el análisis físicas, químicas de piedra caliza?

¿Por qué es necesario conocer sus características físicas, químicas de piedra caliza?

¿Qué ensayos son necesarios para realizar un análisis del comportamiento de la piedra caliza?

¿Qué resistencia mecánica tendrá el mortero a determinados días?

¿Qué distribución granulométrica tendrá el mortero?

¿Qué color tendrán las nuevas proporciones?

¿Analizar las diferentes densidades?

1.3. JUSTIFICACIÓN

Hacer mejor uso de recursos económicos empleando la cal que sea más adecuada para tener mejor rendimiento según el uso que se le dé.

La información de este estudio brindara criterios para recomendar el destino final de uso.

El área de estudio se escogió debido a que la zona “El Puente Cantera Huayco” es la única proveedora de cal para la construcción, todo con el fin de tener información del producto por que será un factor determinante de esta investigación, de ahí el interés por realizar su estudio en nuestra región, principalmente en la zona “El Puente Cantera Huayco”.

1.4. DESARROLLO DE HIPÓTESIS DE TRABAJO

Mediante la definición de un método analítico y el análisis de muestras para caracterización de la piedra caliza de la “Zona El Puente Cantera Huayco” se obtendrán parámetros técnicos que optimicen el uso de este producto en la construcción.

1.5. OBJETIVOS

El proyecto de ingeniería civil tiene los siguientes objetivos:

1.5.1. OBJETIVO DEL ESTUDIO

Caracterizar la piedra caliza de la zona “El Puente Cantera Huayco” en base a un análisis de sus propiedades físicas y químicas para mejorar las características y rendimientos del mortero.

1.5.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Ubicar la Cantera Huayco de zona “El Puente” utilizadas en la extracción de la piedra caliza a partir de su carbonato calcio de análisis químico para la producción de cal.
- “Caracterizar la piedra caliza Cantera Huayco” a base de métodos analíticos, cualitativos para identificar la influencia en elementos que componen la muestra.
- Utilizar métodos y técnicas de caracterización de cal para la formulación de morteros compatibles, enfoscados, revocos, enlucidos, lechadas, pintura de cal.
- Identificar el proceso productivo en la Cantera Huayco de la zona El Puente y su influencia en sus propiedades de residuos insolubles de la cal.
- Identificar las variables que afectan las propiedades por titulación de óxido de calcio (%CaO) activo.
- Aplicar el analisis para definir recomendaciones y metodologías que optimicen el uso de la cal.

1.6.ALCANCE

- El área de estudio será desde la cantera de explotación de la Fábrica Cemento El Puente
- Ir hasta la cantera Huayco que contempla el camino antiguo a Tomayapo.
- Hacer un sondeo por lo menos de 2 a 5 metros de la extracción de la muestra
- Hacer análisis de laboratorio de cada muestra.
- Hacer la práctica de alcalinidad y residuo insoluble de óxido de calcio (Cal viva).

CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

En “Tarija” existe un desconocimiento sobre los tipos de cal que se producen en la Cantera Huayco de zona “El Puente”, y, por lo tanto, se ignoran las propiedades químicas del producto final. La ubicación geográfica, y la composición mineralógica de cada una de las formaciones geológicas donde se extraen materiales calizos para la producción de la cal influyen de manera significativa en el desempeño físicas, químicas de los materiales calizos. En este trabajo de investigación se pretende presentar los resultados de los análisis de las propiedades físico, químico de los materiales de origen calizo, para evaluar la influencia del proceso de producción de la cal con la finalidad de optimizarlo y proveer una alternativa económica y rentable para mejorar las características de morteros.

Cal es un producto que se compone de óxidos e hidróxidos de calcio y magnesio, que proceden de la calcinación de minerales calizos y dolomíticos. Algunos tipos de cal también suelen contener hidróxidos de silicio, hierro y aluminio en función de su materia básica de procedencia:

Es un proceso de calcinación de minerales compuestos por carbonatos de calcio y magnesio según la calidad y tipología del mineral base y bajo la aplicación de calor dan lugar a la formación de óxidos de calcio y/o magnesio con el desprendimiento de dióxidos de carbono. El mayor o menor contenido en carbonatos u óxidos magnésico condicionará la pureza o tipo de cal y, por ende, su capacidad para empleo en diversas aplicaciones.

Las calizas son rocas sedimentarias compuestas en su mayoría de carbonato cálcico y magnesio, calentando la caliza en condiciones controladas, se obtiene lo que se denomina como cal.

El termino cal tiene un significado muy amplio e incluso cal viva, cal hidratada y la cal hidráulica. Generalmente, la cal se obtiene al calcinar las rocas a una temperatura entre los

900 y 1.200°C (por debajo de la temperatura de descomposición de óxidos de calcio) durante 39 horas, dependiendo del tipo de piedra caliza, en un horno rudimentario o tradicional.

Durante este proceso se desprende dióxido de carbono y quedan los óxidos de calcio y magnesio, conocidos con el nombre de cal viva.

Es muy difícil encontrar en la naturaleza calces químicamente puras. Normalmente están acompañadas de otros materiales como el carbonato de magnesio, hierro, azufre, álcalis, etc. Esto da origen a una clasificación según el estado de pureza de la misma, y la proporción de los materiales que la conforman. Generalmente la cal es de color blanco en diferentes grados de intensidad, dependiendo de su pureza química. Los tipos más puros de cal son de color blanco; los menos puros o mal calcinados pueden tener leves trazas de color gris o un matiz amarillento.

La utilización de la cal como aglomerante de los revestimientos exteriores e interiores ha sido una constante a lo largo de la historia de las diferentes culturas y civilizaciones.

La cal es material utilizado como ningún otro mineral tiene tantos usos de aplicación que puedan servir como base al sector empresarial y utilizar conforme a sus necesidades específicas. Estas rocas de carbonato son utilizadas en la construcción ya que se utilizan en cementos.

Antes de comenzar la explotación de una cantera, hay que cerciorarse perfectamente de la calidad y cantidad de piedra caliza son adecuadas para una vida larga y próspera de la instalación. Se deberá hacer sondeos de 2 y 5 metros para caracterizar y analizar cuidadosamente, sólo así, se podrá tener la certeza de encontrar una cantera que va a permitir obtener un buen producto durante la vida de la explotación.

La explotación de la caliza hay que hacerlo mediante explosivos y maquinaria pesada. Las perforaciones para alojar las cargas pueden realizarse manualmente o mecánicamente. En explotaciones de alguna importancia se llevan a cabo por este último procedimiento. Como resultado de las voladuras se obtienen grandes bloques que hay que reducir de tamaño para que sean manejables. Esto es frecuente hacerlo, también con explosivos en la operación llamada taqueo o por medios mecánicos.

El producto obtenido en la Cantera Huayco hay que transportarlo a la calera. El medio de volqueta, bien porque sea el más barato, bien porque sea el más seguro o bien por cualquier otra causa.

2.1.1 IMPORTANCIA DE LOS CARBONATOS CÁLCICOS Y LA CAL EN LA INDUSTRIA

Tal vez ningún otro mineral de consumo tiene tantos usos como los carbonatos cálcicos. Estas rocas de carbonato son básicas en la industria de la construcción ya que se utilizan en cementos. Las piedras de carbonato cálcico son ampliamente utilizadas en materiales de vidrio, refractarios, abrasivos y en un sin número de procesos en la industria química. Aunque el uso de las piedras de carbonato se remonta en la historia, en la actualidad nuevos usos y productos están siendo encontrados. Las principales rocas de carbonato usadas en la industria son la calizas y dolomitas. Las calizas son rocas sedimentarias compuestas en su mayoría del mineral conocido como calcita CaCO_3 y la dolomita está compuesta por CaCO_3 y MgCO_3 . El término cal tiene un significado muy amplio e incluye cal viva, la cal hidratada y la cal hidráulica. Calentando la caliza en condiciones controladas, se desprende dióxido de carbono y quedan los óxidos de calcio y magnesio, conocidos con el nombre de cal viva. Este material reacciona con el agua; el proceso se llama apagado de la cal y es exotérmico; produce cantidad considerable de calor. La caliza dolomítica calcinada a temperatura más elevada y por largo tiempo, se convierte en un material que tiene poca actividad química y que se conoce comercialmente con el nombre de dolomita quemada o inerte. Tratando la cal viva con suficiente agua para satisfacer su afinidad química por el agua en las condiciones de hidratación, se obtiene un polvo seco llamado cal hidratada. Puesto que el óxido de magnesio no tiene mucha afinidad por el agua a la presión atmosférica, la cal hidratada, según el tipo de apagado en los hidratadores ordinarios de período de retención corto, es esencialmente hidróxido de calcio o una mezcla de hidróxido de calcio, óxido de magnesio y algo de hidróxido de magnesio.

Tanto la cal como la piedra caliza se usan mucho en la agricultura, en la construcción y en las industrias químicas. En el campo químico, la cal se emplea bastante en la fabricación de acero y alambres, en el tratamiento de minerales de oro y plata y en la refinación del cobre, el plomo y otros metales. Se usa mucho para la purificación del agua y para el tratamiento de las aguas residuales de poblaciones y de industrias. Otros usos son la refinación del azúcar y el petróleo y en la fabricación de papel, hidróxido de sodio, vidrio, insecticidas, carburo de calcio, polvos de blanqueo, artículos de piel, barnices, magnesio y otros productos. La

dolomita quemada e inerte se usa mucho como material refractario para revestimientos de hornos y hogares.

2.1.2 PROPIEDADES FÍSICAS DE LA CALIZA Y LA CAL

Por sus propiedades físicas los minerales de carbonato no son fácilmente distinguibles entre sí, específicamente: gravedad, color, forma del cristal, y otras propiedades físicas que son de gran ayuda para la identificación del mineral. Los rangos de solubilidad de los diferentes minerales en ácido clorhídrico es la técnica más utilizada en los laboratorios de campo, pero tiene aplicaciones limitadas; la caliza es mucho más soluble que la dolomita al diluirla en ácido clorhídrico. Algunas de las técnicas están basadas en la diferencia de solubilidad, que en orden decreciente de las antes mencionadas son: caliza y dolomita.

La dureza, la densidad, la porosidad y la textura, así como también las impurezas que consisten generalmente en óxido férrico, sílice y alúmina, varían bastante, incluso en un mismo yacimiento. En cuanto a las impurezas, las dos consideraciones importantes son: cuánto está presente y cómo está distribuida.

La densidad bruta de la caliza, el peso de un decímetro cúbico, varía según el contenido de humedad, la textura y la porosidad de la piedra. La caliza comercial secada al aire en las condiciones ordinarias tiene una densidad bruta 1.922 – 2.242 Kg/dm³. En condiciones de humedad, la densidad bruta puede ser de 2.242 – 2.883 Kg/dm³. La densidad real de la caliza, prescindiendo de los poros llenos de aire, oscila entre 2.2 y 2.9.

Se considera que la calcita pura tiene una gravedad específica de 2.7102 a 20°C y 2.7112 a 0°C. La gravedad específica de las calizas comerciales se encuentra en un rango de 2.65 a 2.75 para las altas en calcio y 2.75 a 2.90 para las dolomíticas. Los valores para las magnesianas son intermedios, pero cercanos a los de las calizas altas en calcio.

La calcita CO₃Ca se presenta en magníficos cristales implantados, muy ricos en facetas, llegando a formar más de mil combinaciones; generalmente de hábito claramente romboédrico, algunas veces escalenoédrico, aunque también se halla en forma de prismas y de cristales de aspecto lenticular.

Incoloro, comúnmente blanco, tiene brillo vítreo característico; opaco en las variedades de espato calizo, es perfectamente transparente en los cristales de espato de Islandia. Relativamente blando, se raya con la navaja, pero no con la uña. Se descompone hacia los 900°C, liberándose CO₂ y quedando CaO.

2.1.2.1 PROPIEDADES FÍSICAS DE LA CAL

Generalmente la cal es de color blanco en diferentes grados de intensidad, dependiendo de su pureza química. Los tipos más puros de cal son de color blanco; los menos puros o mal calcinados pueden tener leves trazas de color gris o un matiz amarillento.

La densidad de las cales, además de estar estrechamente relacionada con el origen, la estructura y la porosidad del material, depende de la temperatura de calcinación. Cuanto más alta es la temperatura de calcinación, tanto mayor es la densidad de la cal viva producida. En consecuencia, la densidad de la dolomita quemada es mayor que la de la cal viva dolomítica y varía entre 3.4 y 3.8.

La verdadera gravedad específica del óxido de calcio puro es 3.34, pero esto supone cero porosidades, una condición que es imposible alcanzar en la fabricación comercial. Se han reportado valores de 3.40 y más bajos, pero 3.34 parece ser un valor promedio generalmente reconocido. Cales comerciales pueden tener valores de hasta 3.0, los óxidos de la dolomita pueden tener una gravedad específica tan alta como 3.5 a 3.6.

La gravedad específica aparente varía de forma similar, de 1.6 a 2.8. Para óxidos comerciales los valores promedio son de 2.0 a 2.2. Los valores para la cal dolomítica son 3 a 4 % mayores que los mencionados. La dolomita quemada tiene el mayor valor de todos, un promedio de 3.2.

2.1.3.1 COMPOSICIÓN Y PROPIEDADES QUÍMICAS DE LA CALIZA

La caliza es una roca compuesta por lo menos de 50% de carbonato cálcico, CaCO_3 , con porcentajes variables de impurezas. Sin embargo, generalmente se considera que la caliza es una roca calcárea estratificada compuesta principalmente del mineral calcita, que por calcinación da la cal viva del comercio. En esta forma, se encuentran en todo el mundo calizas de diversos grados de pureza. Las rocas clasificadas como calizas comerciales contienen cantidades variables de carbonato de magnesio; cuando éste se halla en cantidad inferior a 5%, se dice que la caliza es rica en calcio; si está en proporción mayor de 5%, se dice que la piedra es magnesiánica. Una caliza que contenga entre 30 y 45% de magnesio se clasifica como dolomítica. La verdadera caliza dolomítica se compone del mineral dolomita, carbonato doble de magnesio y calcio ($\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$), que contiene aproximadamente 46% de carbonato de magnesio. (6428). La dolomita pura es 54.3% CaCO_3 y 45.7% MgCO_3 , o,

descrito de otra manera, está compuesta de 30.4% de óxido de calcio (CaO), 21.8% de óxido de magnesio (MgO) y 47.8% de dióxido de carbono (CO₂). Para fines prácticos, las calizas ricas en calcio de alta calidad contienen 97 – 99 % CaCO₃ y las dolomíticas 40 – 43% MgCO₃ con un contenido de CaCO₃ levemente mayor al teórico y con 1 – 3% de impurezas. Se ha discutido mucho si CaCO₃.MgCO₃ es un compuesto químico, una solución sólida o una mezcla mecánica. Las investigaciones realizadas han reunido pruebas contradictorias y no ha sido posible explicar satisfactoriamente la naturaleza de esta sustancia cristalina.

Los carbonatos no son ni cercanamente tan reactivos como los óxidos e hidróxidos de calcio, por lo tanto, excepto por su papel como materia prima para la obtención de cal, sus propiedades físicas son mucho más significativas que sus características químicas.

Su propiedad química predominante es que se pueden descomponer térmicamente en cal.

Las calizas altas en calcio y dolomíticas se encuentran entre las sustancias más estables químicamente. La descomposición nunca ocurre a temperaturas ordinarias (de hecho, en un amplio rango de temperatura desde el cero absoluto hasta aproximadamente 600°C)

2.1.3.2 PROPIEDADES QUÍMICAS DE LA CAL

Tanto la cal viva como la cal hidratada son bastante estables, aunque no tanto como la caliza. La cal viva es completamente estable a cualquier temperatura, es vulnerable únicamente al agua, incluso la humedad del aire produce un efecto desestabilizante. Reacciona químicamente con ácidos, otros compuestos y elementos químicos para formar diferentes compuestos de calcio y magnesio.

Las cales dolomíticas son levemente más estables que las altas en calcio, por lo que no absorben humedad tan rápidamente. La dolomita quemada es completamente estable bajo la mayoría de las condiciones, excepto por reactividad lenta con ácidos fuertes y concentrados. La cal viva tiene una capacidad de absorción de humedad de al menos 24.3% de su peso. Este porcentaje de absorción varía grandemente dependiendo de su reactividad química y de la concentración de agua o vapor de agua. El porcentaje de la capacidad de absorción de agua para la cal dolomítica es mucho menor que el de la cal alta en calcio.

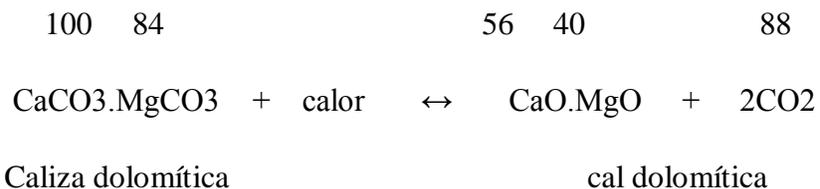
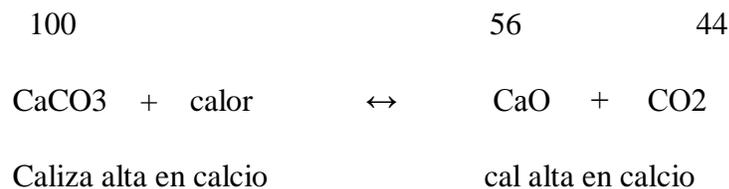
Para todos los fines prácticos, el CO₂ seco no reacciona con la cal viva a temperaturas atmosféricas ordinarias, pero si se incrementa la temperatura, la recarbonatación empieza lentamente a aproximadamente 290°C. No ocurre adsorción significativa de CO₂ hasta aproximadamente 400°C; empezando a aproximadamente 600°C la afinidad de la cal por el

CO₂ es bastante pronunciada y la reacción es rápida. En todo caso, la recarbonatación completa, incluso a temperaturas elevadas, no ocurre, porque la adsorción es un fenómeno superficial en el cual una costra de CaCO₃ se forma gradualmente alrededor de la partícula de CaO. Los porcentajes de recarbonatación dependen del tamaño de partícula, con mayor adsorción de CO₂ para las partículas pequeñas. En las cales dolomíticas, únicamente se recarbonata el CaO.

2.1.4 COMPORTAMIENTO DE LA CALIZA EN LA CALCINACIÓN

La reacción de calcinación es probablemente la más básica y aparentemente la más simple de todas las reacciones químicas. Pero, aun así, hay muchas complejidades concernientes a esta reacción. Existen numerosas variables que requieren métodos de prueba y error para lograr un comportamiento eficiente.

Planteada químicamente con pesos moleculares, esta reacción reversible tanto para la cal alta en calcio como para la dolomítica, se representa como sigue:



Fuente: Ing. Qco. César Alfonso García Guerra UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA Pág. 11

Existen tres factores esenciales en la cinética de la descomposición de la caliza:

- a) La piedra debe ser calentada hasta la temperatura de disociación de los carbonatos.
- b) Esta temperatura mínima debe tener cierto período de duración.
- c) El gas de dióxido de carbono (CO₂) que se desprende debe ser removido.

2.1.4.1 TEMPERATURA DE DISOCIACIÓN

Según varios investigadores, para la calcita la temperatura de disociación es de 898°C (1648°F) a 760 mm Hg de presión para una atmósfera con 100% de CO₂. La temperatura de la dolomita no es tan clara. El MgCO₃ se disocia a una temperatura mucho más baja, de 402 a 480°C (756 – 896°F).

Ya que la proporción de MgCO₃ a CaCO₃ difiere en las diferentes especies de calizas magnesianas y dolomíticas, la temperatura de disociación naturalmente varía también y es mucho más difícil de calcular. Diferencias en la estructura cristalina de la piedra también se suman a la disparidad de datos. El MgCO₃ de la dolomita se descompone a temperatura mayor que la magnesita natural. Se ha detectado disociación de la dolomita a aproximadamente 510°C, pero no se observa descomposición considerable hasta 590°C. También se ha encontrado que el principio de la disociación se encuentra de 500 a 750°C para tres dolomitas. Un buen valor promedio para la disociación completa a 760 mm Hg de presión es una atmósfera con 100% de CO₂ es 725°C, el CaCO₃ de la dolomita se podría adherir al mayor valor, representando una descomposición de dos etapas.

Como resultado de estos diferentes puntos de disociación, el MgO es usualmente y necesariamente quemado en gran proporción antes de que se forme el CaO. Aunque el CaO es quemado levemente, el MgO fuertemente quemado produce una cal viva más densa y con menor reactividad que una caliza alta en calcio calcinada a la misma temperatura.

Se ha descubierto que un incremento en la temperatura de tan solo 20°C ejerce mayor influencia en la calcinación que extendiendo el tiempo de quemado de 2 – 10 horas. La temperatura óptima para obtener la mayor eficiencia en la calcinación varía con los diferentes tipos de piedra y puede ser determinado con exactitud solamente por experimentación.

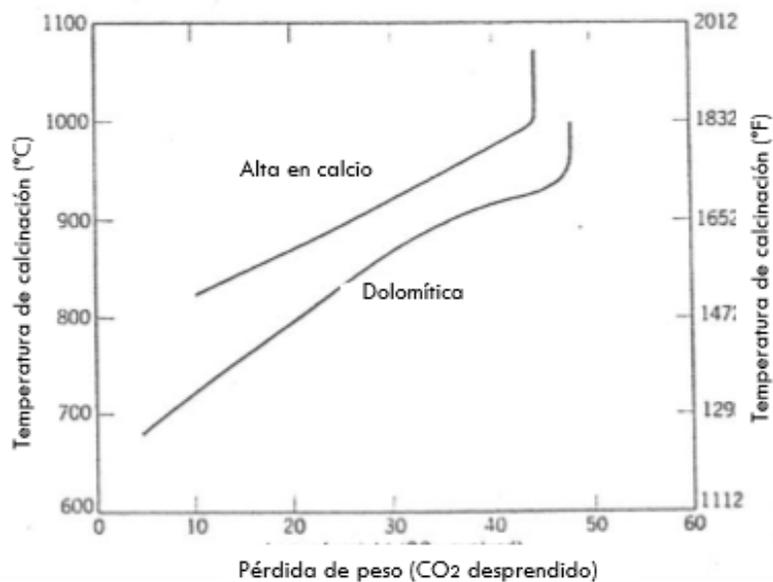
2.1.4.2 PÉRDIDA DE PESO

En la descomposición completa (100%) de la calcita pura, hay una pérdida de peso teórica del 44%, a medida que se desprende el CO₂. Esto se llama pérdida por ignición, y el comportamiento se presenta en la figura 1.

Con la dolomita se observa una pérdida mayor de peso, ya que el carbonato de magnesio puro libera 52.2 % de su peso como CO₂ gaseoso. De esta manera, entre mayor es la cantidad de MgCO₃ en calizas dolomíticas y magnesianas, mayor es la pérdida de peso.

La calcinación completa no implica cero CO₂ en la cal. Investigadores han confirmado que cero CO₂ es virtualmente imposible de obtener, incluso en el laboratorio. Incluso si la caliza se ha quemado completamente, de manera que no es posible que en el centro existan áreas carbonatadas, existirá al menos una ligera adsorción superficial de CO₂, debido a la recarbonatación por los gases de combustión cubriendo a la cal en el horno.¹

Figura: 1. Pérdida de peso con incremento de temperatura arriba del punto de disociación (piedra de ¼ de pulgada calcinada bajo presión parcial de CO₂ correspondiente a una concentración del 25% de CO₂)



Fuente: Robert Boynton. **Chemistry and technology of lime and limestone**. Pág.167

2.1.5 DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICO QUÍMICAS DE LA CALIZA Y LA CAL

Los procedimientos para la examinación física se pueden obtener de dos fuentes principales: **la Sociedad Americana para la Examinación de Materiales (ASTM) y la Asociación Americana de Oficiales de Autopistas del Estado**. Estas dos organizaciones describen los procedimientos explícitos para el análisis de caliza y dolomita.

¹ (Karen Elisa Ochaeta Paz, agosto 2004, P. (1-13))

Para la determinación del tipo de impurezas y de calcita en las calizas y dolomitas, se utilizan técnicas de difracción de rayos X, análisis térmicos diferenciales y por el uso de un microscopio electrónico.

Las pruebas físicas están diseñadas de acuerdo al uso que se le dará a la roca. Para la selección de la roca de carbono se deben tomar en cuenta las siguientes propiedades físicas : tipo de roca, gravedad específica aparente, porosidad aparente, módulo de ruptura, fuerza de impacto, constante dieléctrica, resistividad eléctrica, conductividad térmica.

El análisis de una cal rica en calcio, viva o hidratada, no es completo sin una determinación del índice de cal activa; esto es: la fracción de óxido de calcio disponible para la actividad química inmediata que se necesita en un proceso químico de neutralización. El ensayo A.S.T.M. C25-47 se vale de la formación de sacarato de calcio. A las temperaturas elevadas de la calcinación, las impurezas de sílice y alúmina están químicamente combinadas con parte del óxido de calcio formando silicatos y calcio y aluminio, sustancias no disponibles para la actividad química necesitada. De manera análoga, la cal que ha estado expuesta al aire se ha carbonatado en parte y su contenido de cal disponible o cal activa ha disminuido.²

2.2. LA MATERIA PRIMA PARA LA ELABORACIÓN

La materia prima utilizada en la elaboración de la cal es la piedra caliza, que es una roca sedimentaria compuesta mayoritariamente por carbonato de calcio (CaCO_3), generalmente calcita. También puede contener pequeñas cantidades de minerales como arcilla, hematita, siderita, cuarzo, etc., que modifican (a veces sensiblemente) el color y el grado de coherencia de la roca. El carácter prácticamente monomineral de las calizas permite reconocerlas fácilmente gracias a dos características físicas y químicas fundamentales de la calcita: es menos dura que el cobre (su dureza en la escala de Mohs es de 3) y reacciona con efervescencia en presencia de ácidos tales como el ácido clorhídrico.

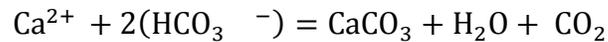
2.2.1. FORMACIÓN

Por su aspecto blanco son muy distinguibles. Las calizas se forman en los mares cálidos y poco profundos de las regiones tropicales, en aquellas zonas en las que los aportes detríticos son poco importantes. Dos procesos, que generalmente actúan conjuntamente, contribuyen a la formación de las calizas.

² (Robert Boynton, 2016, Pág.167)

2.2.2. ORIGEN QUÍMICO

El carbonato de calcio se disuelve con mucha facilidad en aguas que contienen gas carbónico disuelto (CO₂). En entornos en los que aguas cargadas de CO₂ liberan bruscamente este gas en la atmósfera, se produce generalmente la precipitación del carbonato de calcio en exceso según la siguiente reacción:



Esa liberación de CO₂ interviene, fundamentalmente, en dos tipos de entornos: en el litoral cuando llegan a la superficie aguas cargadas de CO₂ y, sobre los continentes, cuando las aguas subterráneas alcanzan la superficie.

2.2.3. UTILIDAD

Es una roca importante como reservorio de petróleo, dada su gran porosidad. Tiene una gran resistencia a la meteorización; esto ha permitido que muchas esculturas y edificios de la antigüedad tallados en caliza hayan llegado hasta la actualidad. Sin embargo, la acción del agua de lluvia y de los ríos (especialmente cuando se encuentra acidulada por el ácido carbónico) provoca su disolución, creando un tipo de meteorización característica denominada kárstica. No obstante, es utilizada en la construcción de enrocamientos para obras marítimas y portuarias como rompeolas, espigones, escolleras entre otras estructuras de estabilización y protección.

La roca caliza es un componente importante del cemento gris usado en las construcciones modernas y también puede ser usada como componente principal, junto con áridos, para fabricar el antiguo mortero de cal, pasta grasa para creación de estucos o lechadas para pintar superficies, así como otros muchos usos por ejemplo en industria farmacéutica o peletera. Se encuentra dentro de la clasificación de recursos naturales (RN) entre los recursos no renovables (minerales) y dentro de esta clasificación, en los no metálicos, como el salitre, el aljez y el azufre.

Mineralógicamente, los carbonatos útiles para la fabricación de los distintos tipos de cal son: la dolomita, la aragonita y la calcita. Siendo la aragonita, relativamente escasa, ya que es la obtenida por precipitación en caliente en un proceso químico.

Algunas características físico químicas de las calizas se muestran en la Tabla 1.³

Tabla 1. Características físico químicas de las calizas.

Nombre Mineralógico	Fórmula Química	Peso Molecular	Peso específico	Dureza	Forma de los cristales
		g/mol	g/cc	Escala de Mohs	
DOLOMITA	CaCO ₃ .MgCO ₃	184.4	2.84	3.5-4.0	Romboédrica
ARAGONITA	CaCO ₃	100.1	2.94	3.5-4.0	Ortorrómbica
CALCITA	CaCO ₃	100.1	2.72	3.0	Romboédrica
MAGNESITA	MgO ₃	84.3	3.00	3.5-4.5	Romboédrica

Fuente: LA CAL ES UN REACTIVO QUÍMICO! Coloma Álvarez Guillermo

2.3. ROCAS CARBONATICAS METAMORFICAS

La caliza o dolomía que ha recrystalizado durante el metamorfismo es conocida como MARMOL. El mármol es una importante fuente de rocas carbonáticas. Las impurezas minerales incluyen cuarzo, mica, clorita, tremolita, actinolita, grafito, hematita y limonita.

Tabla: N°2 Porcentaje de carbonato cálcico

Categoría	Porcentaje CaCO ₃
Muy alta pureza	> 98,5
Alta pureza	97,0 - 98,5
Media pureza	93,5 - 97,0
Baja pureza	85,0 - 93,5
Impura	< 85,0

Fuente: Ouro Preto, MG-Brasil Pág. 5

La clasificación de calizas de grado químico por el contenido de CaCO₃ no toma en cuenta todas las variaciones en la composición química. Los análisis químicos deberían llevarse a cabo por un espectrofotómetro de rayos X

³ (DAVID MARCELO HERRERA ROBALINO, 2012, P.30)

fluorescente (XRF) a pesar de que los métodos húmedos químicos pueden ser usados cuando son apropiados. Un análisis químico típico de calizas incluirá CaO, MgO, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, Na₂O, K₂O, P₂O₅, MnO y S, F, Cu, Pb y Zn. Para ciertos usos finales puede ser también necesario analizar As, Cr, Co u otros elementos. Investigaciones más detalladas pueden requerir la determinación de la composición individual de los componentes del carbonato y/o minerales asociados, usando instrumentos electrónicos como el microscopio.⁴

2.4.-IMPUREZAS

Cómo dijimos más arriba, las impurezas en la caliza, afectan la calidad de la Cal Viva final. Típicamente la Cal Viva está compuesta por los siguientes minerales

- Carbonato de Calcio
- Carbonato de Magnesio
- Sílice
- Alúmina
- Hierro
- Azufre y trazas de otros minerales

De los minerales enumerados más arriba, sólo el Carbonato de Calcio y el Carbonato de Magnesio son de interés. Estos dos minerales constituyen el 85 al 90 % del total de la composición de la piedra caliza. Dos tipos de cal se han producido de estas piedras calizas, Cal Cálcica y Cal Magnésica

La Piedra Caliza Cálcica, con alto contenido de Calcio, cuando se calcina, tiene entre un 90 y 95% de CaO y un 1 y 2% de MgO.

La Piedra Caliza Magnésica, cuando se calcina tiene entre un 60 y 65 % de CaO y un 35 a 40% de MgO. Este tipo de caliza es llamada piedra caliza dolomítica. Nosotros limitaremos nuestra discusión en este “paper” a la Piedra Caliza Cálcica⁵

⁴ (Adilson Curi, 2004, P.5)

⁵ **By: Mohamad Hassibi**

Chemco Systems L. P.Publicación, Septiembre 2002 – Revisión 1, 17 de Marzo de 2009

2.5. CICLO DE LA CAL

Para entender la elaboración de los morteros de cal es necesario entender antes el ciclo de la cal. La producción de la cal se logra a partir de la calcinación de piedras caliza a altas temperaturas (por encima de 900°C), lo que produce la siguiente reacción:



Las técnicas de producción artesanal sitúan los bloques de piedra caliza molida en grandes hornos hechos de muros de ladrillos de arcilla, para someterlos dentro de ellos a un proceso de calcinación constante por períodos de 8 a 12 días, usando como combustible trozos de madera. El resultado de la calcinación de la piedra caliza produce mayoritariamente óxido de calcio [CaO], también llamada cal viva (NTC-5163, 2003)

Cuando el proceso termina, la cal viva resultante es molida nuevamente y vaciada en pozos de piedra en donde se apaga con agua. Se produce entonces una segunda reacción química que convierte la cal viva en hidróxido cálcico o cal apagada (Bores, 1998):

Figura: 2 Horno para el cocido de la cal en Zona El Puente (Calera Valdez)



Fuente: elaboración propia



Posteriormente para obtener el mortero de cal, la cal hidratada se mezcla con arena y agua en diferentes proporciones de tal manera que el hidróxido de cal después de dispuesto en la construcción reacciona con el CO₂ de la atmósfera, se carbonata y adquiere endurecimiento. En este proceso la reacción se indica de la siguiente manera:

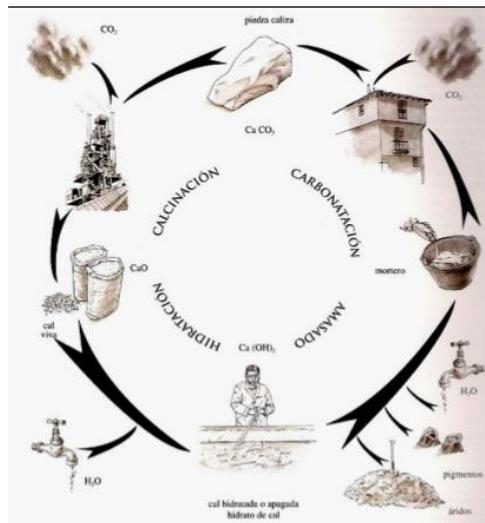


Con esta última mezcla de hidróxido de cal con arena y agua se obtiene el mortero de cal. El mortero fragua cuando el exceso de agua se seca, y se endurece debido a la acción del dióxido de carbono de la atmósfera, proceso conocido como carbonización (Brostow, 1981), que se muestra en la siguiente reacción:



De esta forma se completa el ciclo de la cal (Ilustración 3) el cual inicia y termina con el carbonato de calcio [CaCO₃].⁶

Figura: 3 Ciclo de la cal



Fuente: Ingeniero Físico, Juan David Cañón Bermúdez

⁶ Juan David Cañón Bermúdez, 2012 P.6

CAPITULO 3. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. DESCRIPCIÓN DE CANTERA DE ZONA EL PUENTE

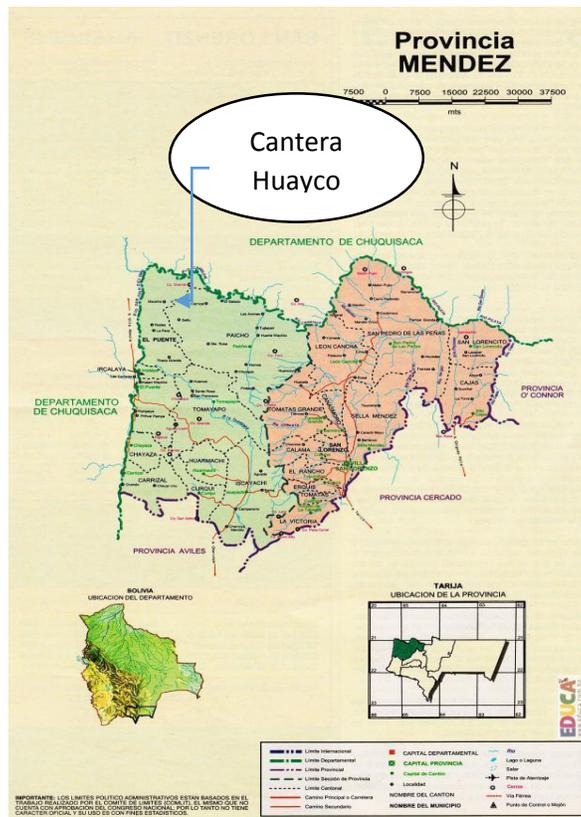
La investigación se llevó a cabo en la “Cantera Huayco” de Zona El Puente, Departamento Tarija.

El Puente, segunda sección municipal de la provincia Mendez limita al Norte y Oeste con la provincia Sud Cinti del departamento de Chuquisaca, al Este con San Lorenzo, al Sur con la Provincia Cercado y avilez. Su accesibilidad se da a través de una carretera que la vincula con la ciudad de Tarija a una distancia de 130 Kms.

Su territorio comprende de tres zonas ecológicas con climas y humedad distintas: Zona Andina cabeceras de Valle y Valles. Los ríos que surcan la región son el Paicho el Tomayapu el San Juan del Oro. Tiene una vegetación de pasturas nativas, forrageras y forestales y recursos minerales no metálicos, como yeso, cal, arcillas, y arenas.

Figura: 4 Ubicación de Canteras

(VER ANEXO) B)



Fuente: Elaboración Propia



Fuente: Elaboración Propia

3.2. TRATAMIENTO DE LAS MUESTRAS

A las muestras se realizaron los análisis químicos correspondientes, en el equipo fluorescencia de rayos X en la Fabrica Cemento El Puente.

(VER ANEXO C)

3.3. MÉTODOS Y TÉCNICAS

3.3.1. MÉTODOS ANALÍTICOS

En el análisis cualitativo, por lo general es deseable trabajar con el voltaje más alto posible en el tubo de rayos X, con el objeto de asegurar que el mayor número de elementos de la muestra produzcan una excitación fluorescente. Esto también garantizará la máxima intensidad de fluorescencia para cada elemento en el análisis cuantitativo.

Se trata de un método no destructivo en el sentido de que la muestra no sufre daños durante el análisis. Es además no destructivo en el sentido de que frecuentemente no es necesaria la toma de muestras, por lo que el equipo puede ser dispuesto para acomodar objetos de grandes dimensiones. Las muestras analizadas pueden volver a analizarse las veces que se desee sin que sufran daños (muestras patrones, piedras preciosas, pruebas judiciales, objetos de arte, antigüedades, etc). Existen ciertas limitaciones a este carácter no destructivo, ya que algunos materiales pueden deteriorarse cuando están sometidos durante largos periodos a una intensa irradiación con rayos X.

EQUIPOS

- ✓ Balanza
- ✓ Molino
- ✓ Prensa
- ✓ Pastillas
- ✓ Equipo Fluorescencia de rayos X

PREPARACIÓN DE LA MUESTRA

Toda operación analítica comienza por la toma de muestra del producto o material que se analiza, y sigue con la preparación de dicha muestra, hasta ponerla en condiciones de aplicar el método elegido.

Es sabido que la muestra debe ser representativa y homogénea. Lo primero depende de la toma, que debe atenerse a las condiciones generales establecidas para efectuarla en cada caso. Lo segundo depende de la preparación, y este es el aspecto que se trata en este trabajo, en lo que se refiere al análisis cuantitativo por rayos X, empleando la técnica de fluorescencia.

Balanza para pesar los 15 gramos de carbonato calcio

Figura: 5 balanza electrónica



Fuente: Elaboración Propia

La cámara del molino es un tubo cilíndrico con tres cámaras en la primera cámara van bolas de 60 hasta 90 mm en la segunda van bolas de 40 hasta 50 mm en la última cámara desde 20

a 30 mm a velocidad constante pre fijada de acero, cromado interiormente, cerrado por un extremo y provisto de una tapa desmontable que ajusta en el otro extremo mediante una junta de polietileno como se muestra en la fig.6

Molino para moler los 15 gramos

Figura: 6 molino con tres cámaras



Fuente: Elaboración Propia

La compactación del polvo para formar la pastilla dentro del porta muestras se lleva a cabo mediante un émbolo cilíndrico de acero, que se ajusta al diámetro interior del porta muestras (fig.) y una plancha de acero como se muestra (figura.).

Con el émbolo y la chapa circular se comunica al polvo la presión de trabajo, durante un tiempo estipulado, por medio de una prensa hidráulica (fig. 7). La prensa es capaz de dar presiones hasta 400 kg/cm²

Prensa para formar la pastilla

Figura: 7 Prensa



Fuente: Elaboración Propia

Figura: 8 pastillas formadas



Fuente: Elaboración Propia

Figura: 9 Equipo Fluorescencia de rayos X

De entre los diversos métodos instrumentales, el método de fluorescencia de rayos-X, se considera como más adecuado, debido a las ventajas que presenta, como son: rapidez en el análisis, fácil preparación de la muestra y no-destrucción de la misma, etc.



Fuente: Elaboración Propia

3.4. DETERMINACIÓN DE LAS PÉRDIDAS POR CALCINACIÓN.

- Balanza analítica
- Mufla
- Crisol
- Desecador
- Espátula
- Pincel
- Pinza de metal

PROCEDIMIENTO

- Pesar 15 g de muestra sobre el crisol tarado y pesado
- Calcinar por treinta minutos en la mufla a 900 a 1 000 °C

- Sacar, dejar enfriar el crisol en el desecador por 20 minutos
- Pesar el crisol
- Calcular el porcentaje de pérdida por calcinación

CÁLCULOS:

$$\%PPC = (\text{peso crisol más muestra} - \text{peso crisol más muestra calcinada}) * 100$$

3.5. MÉTODO PARA DETERMINACIÓN DE CARBONATOS DE CALCIO TOTALES A TRAVÉS DE LA TITULACIÓN DE LA PIEDRA CALIZA.

REACTIVOS

- Ácido clorhídrico 0,5 N
- Hidróxido de sodio 0,5 N
- Agua destilada
- Fenolftaleína

EQUIPOS

- Bureta
- Pinzas
- Erlenmeyer

TITULACIÓN

- a.- Pesar 1 gr de muestra
- b.- Añadir 20 ml de Ácido clorhídrico 0,5 N
- c.- Hacer hervir la solución
- d.- Enfriar con agua destilada
- e.- Enfriar con agua destilada
- f.- Añadir unas gotas de fenolftaleína y titular con hidróxido de sodio 0,5 N.

3.6. MÉTODO DE ENSAYO PARA DETERMINAR LAS PROPIEDADES DE PLASTICIDAD

EQUIPO

- Aparato de Vicat Modificado
- Molde
- Placa base

PROCEDIMIENTO DE MEZCLADO

- a.- Añadir 300 g de muestra a una cantidad medida de agua contenida dentro del tazón de mezclado.
- b.- Mezclar manualmente 10 s con una espátula rígida. Cubrir la pasta para evitar la evaporación del agua.
- c.- Insertar la paleta en el equipo y mezclar la pasta por 30 s con la mezcladora mecánica
- d.- Remezclar por 30 s y determinar la consistencia. Si la penetración es menor que 15 mm retornar toda la pasta al recipiente, añadir agua y mezclar por 15 s. Si la penetración es mayor que 25 mm, repetir el ensayo.

Para determinar la consistencia, colocar el molde con su base mayor descansando sobre la placa base y llenarlo con pasta de muestra. Luego enrazar la pasta nivelándola con la espátula. Centrar el molde con la pasta que descansa sobre la placa de vidrio, bajo la varilla del aparato modificado de Vicat. Colocar la varilla del aparato en contacto con la pasta y liberar la varilla. Registrar la lectura final 30 s después de que la varilla fue liberada.

$$CN = \frac{V}{m} * 100$$

Donde:

CN = Consistencia normal

V = volumen utilizado en la muestra

m = masa de la muestra

3.7. MÉTODO PARA LA DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD

EQUIPO

- Frasco de Le Chatelier
- REACTIVOS.
- Alcohol etílico.

PROCEDIMIENTO.

- a.- Llenar el frasco con alcohol etílico hasta el punto en el cuello situado entre las marcas 0cm³ y 1cm³. Secar el interior del frasco por encima del nivel del líquido, si es necesario, después del vertido. Registrar la primera lectura después de haber sumergido el frasco en un baño de agua.
- b.- Introducir aproximadamente 50 g de muestra. Evitar salpicaduras y observar que la muestra no se adhiera al interior del frasco sobre el líquido. Se puede utilizar un aparato de

vibración para acelerar la introducción de la muestra en el frasco y para evitar que la muestra se pegue al frasco.

c.- Después de que se ha introducido toda la muestra, colocar el tapón en el frasco y rodar el frasco en una posición inclinada, o girar suavemente describiendo un círculo para liberar el aire de la muestra. Si se añade una cantidad adecuada de muestra, el nivel del líquido debe estar en su posición final en algún punto en la serie superior de graduaciones.

d.- Tomar la lectura final después de sumergir el frasco en el baño de agua.

e.- Calcular la densidad mediante:

$$\rho = \frac{V2 - V1}{m2 - m1}$$

Dónde: ρ = densidad en g/cm³

V2 = Volumen final

V1 = Volumen inicial

m1 = masa del frasco con el alcohol

m2 = masa del frasco con la muestra

3.8. MÉTODO DE ENSAYO PARA EL TAMIZADO

EQUIPOS.

Tamices que deben cumplir con la NTE INEN 154.

Análisis por tamizado de la muestra.

a.- Seleccionar los tamices deseados y acoplarlos colocando el de mayor tamaño de malla en la parte superior.

b.- Pesar una muestra de 100 g del material a ser ensayado y colocarla sobre el tamiz superior.

c.- Realizar la operación de tamizado por medio de un movimiento lateral y vertical del tamiz acompañado de agitación para mantener la muestra en movimiento continuo sobre la malla del tamiz.

d.- Continuar el tamizado hasta que la cantidad que pase durante un minuto cualquier tamiz, no sea mayor al 1 % de residuo. Si se emplea el tamizado mecánico, el equipo debe ser capaz de impartir el tipo de agitación descrito en el tamizado manual. Mantener la agitación por 15 minutos.

e.- Pesar el residuo retenido en cada tamiz.

3.9. DATOS DE FLUORESCENCIA DE RAYOS X

TABLA: N°3

ANALISIS QUIMICO CALIZA SM1		SiO2 (%)	Al2 O3 (%)	Fe2O3 (%)	CaO (%)	MgO (%)	K2O (%)	Na2O (%)	SO3 (%)	LOI (%)
FECHA	MATERIAL									
1/6/2018	SM4H	7,39	0,96	0,44	47,13	2,7	0,19	0,18	0,20	40,81
1/6/2018	SM1H	7,62	0,81	0,43	46,8	3,19	0,18	0,15	0,41	40,41
2/6/2018	SM1H	7,87	0,88	0,45	46,85	2,91	0,2	0,15	0,19	40,5
2/6/2018	SM1H	7,61	0,72	0,4	47	2,95	0,15	0,15	0,13	40,89
2/6/2018	SM1H	7,34	0,71	0,39	47,17	3,01	0,14	0,15	0,13	40,96
2/6/2018	SM1H	8,06	0,78	0,4	46,83	2,9	0,16	0,15	0,10	40,62
3/6/2018	SM1H	8,32	0,95	0,51	46,28	3,34	0,24	0,16	0,13	40,07
3/6/2018	SM1H	6,51	0,58	0,35	47,52	3,19	0,1	0,14	0,10	41,51
3/6/2018	SM1H	6,43	0,56	0,35	47,72	2,92	0,09	0,14	0,11	41,68
4/6/2018	SM1H	8,19	0,79	0,35	46,77	2,91	0,17	0,15	0,10	40,57
4/6/2018	SM1H	7,74	0,75	0,4	46,87	3,14	0,15	0,16	0,08	40,71
5/6/2018	SM1H	9,26	0,87	0,46	46	3,38	0,2	0,15	0,12	39,56
5/6/2018	SM4H	7,41	0,73	0,4	46,94	3,36	0,13	0,16	0,11	40,76
5/6/2018	SM4H	7,72	0,65	0,35	46,87	3,33	0,12	0,15	0,09	40,72
5/6/2018	SM4H	7,51	0,7	0,36	46,84	3,37	0,12	0,17	0,15	40,78
6/6/2018	SM4H	8,22	1,21	0,54	46,51	3,1	0,27	0,27	0,34	39,54
7/6/2018	SM4H	7,06	0,92	0,42	47,25	2,82	0,18	0,18	0,19	40,98
	SM4H	7,92	0,85	0,39	47,03	2,75	0,16	0,16	0,14	40,6
8/6/2018	SM4H	6,2	1,02	0,43	47,26	3,6	0,16	0,2	0,28	40,85
8/6/2018	SM4H	6,3	0,93	0,36	48,43	1,34	0,15	0,18	0,21	42,1
8/6/2018	SM1H	5,86	0,48	0,33	47,59	3,88	0,04	0,15	0,05	41,62
8/6/2018	SM1H	14,3	3,29	1,95	40,72	2,36	0,76	0,27	0,76	35,59
9/6/2018	SM1H	5,73	0,65	0,38	47,3	4,28	0,1	0,17	0,15	41,24
9/6/2018	SM1H	10,27	0,66	0,44	45,8	3,07	0,1	0,15	0,08	39,43
9/6/2018	SM1H	9,18	1,37	0,64	46,08	2,35	0,32	0,2	0,28	39,58
10/6/2018	SM1H	13,5	1,93	0,75	43,61	2,15	0,51	0,21	0,22	37,12
10/6/2018	SM1H	10,98	1,16	0,52	45,26	2,63	0,27	0,17	0,17	38,84
11/6/2018	SM4H	9,17	0,78	0,4	46,33	2,88	0,16	0,16	0,13	39,99
12/6/2018	SM4H	7,8	0,74	0,38	46,89	3,3	0,1	0,17	0,18	40,44
12/6/2018	SM4H	7,58	0,85	0,42	46,73	3,41	0,16	0,17	0,18	40,5
12/6/2018	SM4H	8,74	1,1	0,55	45,44	4,12	0,24	0,19	0,32	39,3
13/6/2018	SM4H	10,5	1,55	0,7	44,78	3,32	0,39	0,2	0,31	38,25
13/6/2018	SM4H	9,1	1,2	0,54	45,65	3,35	0,29	0,18	0,23	39,46
13/6/2018	SM4H	6,62	0,81	0,4	47,33	3,2	0,14	0,17	0,22	41,11

13/6/2018	SM4H	7,18	0,78	0,41	46,67	3,92	0,13	0,17	0,25	40,49
13/6/2018	SM4H	8,66	1,43	0,64	45,67	3,57	0,32	0,22	0,64	38,85
13/6/2018	SM4H	7,86	1,5	0,62	45,88	3,91	0,34	0,23	0,53	39,13
14/6/2018	SM4H	7,23	1,19	0,5	46,99	2,96	0,24	0,21	0,37	40,31
14/6/2018	SM4H	9,89	1,75	0,7	45,06	3,02	0,44	0,19	0,24	38,71
14/6/2018	SM1H	7,84	1,2	0,53	46,26	3,37	0,28	0,19	0,26	40,07
14/6/2018	SM1H	7,75	0,77	0,4	46,47	3,79	0,13	0,17	0,13	40,39
14/6/2018	SM1H	8,19	0,67	0,37	46,72	3,07	0,13	0,15	0,13	40,57
15/6/2018	SM1H	7,5	0,66	0,35	47,18	2,95	0,13	0,15	0,08	41
15/6/2018	SM1H	8,17	0,8	0,4	46,5	3,24	0,19	0,15	0,11	40,44
16/6/2018	SM4H	6,52	0,56	0,32	47,63	3,14	0,05	0,16	0,13	41,49
16/6/2018	SM4H	9,08	1,38	0,59	45,81	2,95	0,36	0,2	0,15	39,48
17/6/2018	SM4H	6,48	0,88	0,42	46,9	3,9	0,16	0,18	0,15	40,93
17/6/2018	SM4H	9,54	1,19	0,68	45,66	2,94	0,29	0,18	0,19	39,33
17/6/2018	SM1G	6,4	0,64	0,63	47,91	2,39	0,07	0,14	0,13	41,69
17/6/2018	SM1G	7,08	1,01	0,68	47,31	2,48	0,2	0,17	0,30	40,77
17/6/2018	SM1G	6,6	0,46	0,3	47,92	2,76	0	0,16	0,12	41,68
18/6/2018	SM1G	7,4	1,03	0,45	47,06	2,64	0,2	0,17	0,19	40,86

PROMEDIO		8,07	0,98	0,49	46,52	3,11	0,20	0,17	0,21	40,26
MAX		14,30	3,29	1,95	48,43	4,28	0,76	0,27	0,76	42,10
MIN		5,73	0,46	0,30	40,72	1,34	0,00	0,14	0,05	35,59

ANALISIS QUIMICO CALIZA SM 2										
FECHA	MATERIAL	SiO2 (%)	Al2 O3 (%)	Fe2O3 (%)	CaO (%)	MgO (%)	K2O (%)	Na2O (%)	SO3 (%)	LOI (%)
13/2/2018	SM2H	26,39	7,31	2,76	31,31	1,79	1,59	0,49	0,37	27,99
14/2/2018	SM2G	19,75	4,53	1,75	38,42	1,78	1,17	0,29	0,29	32,02
17/2/2018	SM2G	18,36	4,02	1,54	39,98	1,5	0,85	0,38	0,13	33,24
17/2/2018	SM2G	24,8	6,38	2,41	33,6	1,56	1,33	0,45	0,49	28,98
17/2/2018	SM2G	25,15	6,51	2,36	33,73	1,27	1,37	0,45	0,23	28,93
8/3/2018	SM2H	26,18	6,87	2,81	31,78	1,97	1,49	0,44	0,27	28,19
10/3/2018	SM2H	25,26	6,5	2,46	32,97	1,82	1,39	0,45	0,24	28,91
16/3/2018	SM2H	20,2	4,3	1,69	38,21	1,57	0,92	0,4	0,32	32,39
26/3/2018	SM2H	13,99	2,53	0,97	43,06	2,09	0,57	0,29	0,13	36,37
8/4/2018	SM2H	23,77	5,89	2,31	33,79	2,23	1,32	0,46	0,24	29,99
17/4/2018	SM2H	19,01	4,25	1,79	39,04	1,32	0,91	0,42	0,15	33,11
19/4/2018	SM2H	25,49	6,51	2,32	32,75	2,04	1,48	0,43	0,16	28,82
22/4/2018	SM2H	18,98	4,39	1,84	38,55	1,64	1,01	0,4	0,24	32,95

27/4/2018	SM2H	19,48	4,78	1,74	37,83	2,05	1,13	0,37	0,26	32,36
6/5/2018	SM2H	16,84	3,23	1,24	40,38	2,44	0,79	0,3	0,24	34,54
9/5/2018	SM2H	24,24	6,4	2,45	32,66	2,4	1,56	0,43	0,24	29,62
10/5/2018	SM2G	20,58	4,86	1,61	37,48	1,59	1,26	0,29	0,06	32,27
10/5/2018	SM2H	18,34	4,19	1,7	38,14	2,75	1,06	0,36	0,24	33,22
12/5/2018	SM2H	18,32	4,4	1,64	38,44	2,55	1,1	0,36	0,24	32,95
15/5/2018	SM2H	19,45	4,56	1,76	37,27	2,74	1,15	0,33	0,24	32,5
1/6/2018	SM2H	18,2	4,21	1,61	38,73	2,19	1,12	0,31	0,2	33,43
8/6/2018	SM2H	22,39	5,15	2,2	35,36	2,01	1,3	0,34	0,19	31,06
10/6/2018	SM2H	18,67	4,51	1,57	38,57	1,78	1,16	0,33	0,12	33,29
10/6/2018	SM2H	20,02	4,66	1,72	34,74	1,89	1,15	0,36	0,15	35,31
14/6/2018	SM2H	20,56	4,75	1,75	37,26	2,13	1,21	0,33	0,19	31,82
14/6/2018	SM2H	19,15	4,6	1,69	38,15	2,03	1,2	0,3	0,1	32,78
18/6/2018	SM2H	20,28	5	1,89	36,99	2,04	1,28	0,33	0,16	32,03
18/6/2018	SM2H	19,49	4,58	1,69	37,82	2,13	1,16	0,34	0,23	32,56

PROMEDIO		20,83	5,00	1,90	36,68	1,98	1,18	0,37	0,22	31,84
MAX		26,39	7,31	2,81	43,06	2,75	1,59	0,49	0,49	36,37
MIN		13,99	2,53	0,97	31,31	1,27	0,57	0,29	0,06	27,99

Fuente: Elaboración Propia

(VER ANEXO D))

3.10. DATOS DE DENSIDAD DE LA CALIZA Y LA CAL VIVA

Otra forma de clasificar los materiales calizos es según su densidad, es decir la masa por unidad de volumen, incluyendo el volumen de sus vacíos; la importancia de esta clasificación radica en el peso final del producto cuando se emplean estos agregados, por ejemplo.

La coloración de las calizas ricas en calcio y las calizas dolomíticas son blancas cuando son puras, pero cambia de color entre el gris y el negro a consecuencia de las impurezas carbonosas que contienen; el óxido férrico da a la caliza color amarillento, rojo, pardo; los sulfuros tales como la pirita, la marcasita y la siderita alteran el color superficial de la roca al oxidarse bajo la influencia de los agentes atmosféricos y orgánicos rastros de fósiles de miles de años. Para la construcción en revocos en edificación, el color de la caliza es una propiedad importante. Las cales comerciales tienen color blanco o débilmente gris.

La caliza rica en calcio tiene una densidad de 2.60 a 2.75 gr/cm³ es el peso de un centímetro cúbico, que varía según el contenido de humedad, textura y la porosidad de la roca.

TABLA: N°4

CALCULO DE LA DENSIDAD RELATIVA DE PIEDRA CALIZA			
	PESO (gr)	Volumen (cm ³)	densidad relativa Dr (gr/cm ³)
MUESTRA 1	300	115	2,61
MUESTRA 2	370	140	2,64
MUESTRA 3	315	115	2,74
MUESTRA 4	240	90	2,67
MUESTRA 5	590	225	2,62
MUESTRA 6	195	75	2,60
MUESTRA 7	65	25	2,60
MUESTRA 8	110	40	2,75

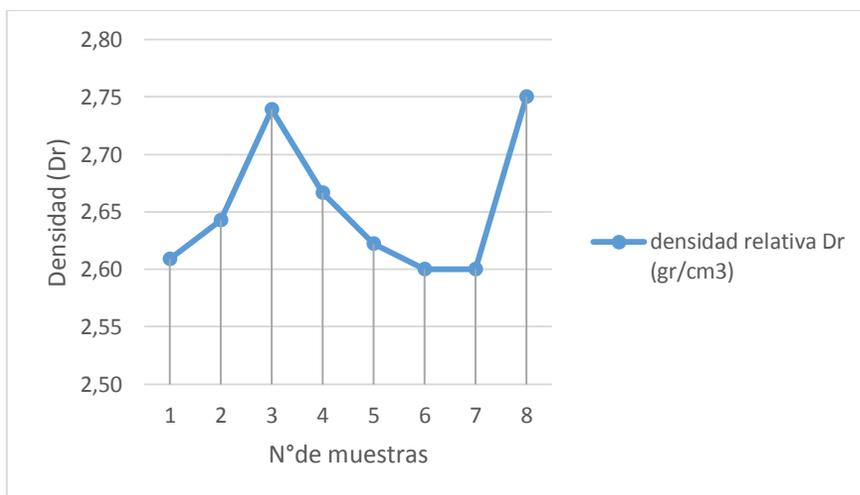
PROMEDIO
MAX
MIN

103,125	2,65
225	2,75
25	2,60

Fuente: Elaboración Propia

(VER ANEXO E))

Figura: 10 Densidad relativa de la piedra caliza



Fuente: Elaboración Propia

3.11. DATOS EXPERIMENTALES DEL HORNO DE LA CALERA EL PUENTE

La Empresa “Calera Valdez Cantera Huayco”, organización jurídica registrada en sustancias controladas tanto como productor y comercializador con más de 20 años de vida, nace en junio el año 1984 con la participación de 1 socio y ha crecido éstos últimos años hasta 2 productores de cal en la zona El Puente.

La situación actual de la empresa no cuenta con recursos de capacitación, técnicos y financieros para mejorar la producción, y calidad de sus productos, para obtener nuevos productos, mejorar las condiciones de comercialización, y acceder a nuevos mercados, obtención de certificados ambientales y otro tipo de beneficio que puedan acceder a recursos sean esto del estado y de otras fuentes de financiamiento.

Al ser una empresa unipersonal se propone la implementación de una planta procesadora de la piedra caliza que partirá desde el mejoramiento de los procesos de captación de materia prima con la implementación de maquinaria para la transportación de piedra caliza hacia los hornos de quema.

Se cuenta con **INSTALACIÓN INDUSTRIAL DE GAS NATURAL** para la producción de cal para optimizar y disminuir el impacto ambiental.

Debido a que la calera de Cantera Huayco, cuenta con la documentación en orden, hemos utilizado su producto para realizar los análisis químicos y ensayos para caracterizar la caliza y cal viva.

Figura: 11 Hornos de cal

Personal que labora en la calera Valdez consta de:

- ✓ 2 personas en el área administrativa.
- ✓ 5 personas en el área de producción.



Fuente: Elaboración Propia

El presente trabajo de investigación se requiere llegar a la obtención de calidad de materia prima, para realizar la caracterización de la piedra caliza, la cal viva, y de esta manera mejorar las características del mortero. Cumpliendo con las normas INEM correspondientes con las

pruebas o ensayos químicos, así mismo con la investigación se aspira llegar a emitir sugerencias, recomendaciones y opiniones acerca del producto, así como los equipos y métodos que deberían emplearse.

Los hornos de cal son construcciones cilíndricas que sobresalen del nivel del terreno y que están configuradas por una serie de elementos arquitectónicos permanentes y otros no permanentes, que se montan y desmontan en cada hornada.

El diámetro de la olla de los hornos de cal tiene unas dimensiones de 2 y 3 metros, aunque existe una gran variabilidad en esta medida, muy relacionada con el tamaño de los hornos. La profundidad es de 5m. La gran mayoría de las olles catalogadas se encuentran parcialmente colmatadas de tierra, piedras y materia vegetal, que normalmente son el resultado de derrumbes procedentes de la degradación del cintell y de la caixa.

Cuando el muro de la caixa llega a la superficie del terreno, pasa a tener doble cara y se hace mucho más grueso, dando lugar al cintell y está revestido por ladrillo refractario

El gas natural es el combustible utilizado y más limpio y es el más usado en los hornos de zona El Puente para calcinación de piedra caliza y obtener de esta manera óxido de calcio CaO (cal viva).

Figura:12 boca del horno

Cuando la Piedra Caliza ha sido calcinada y sale del horno, está al rojo vivo y con una temperatura de alrededor de $970\text{ }^{\circ}\text{C}$ se deja un día para que se enfríe CaO y baje la temperatura.



Fuente: Elaboración Propia

después de elaboración del producto es extraído del horno de forma manual (pala, carretilla), mediante una rampla dirigiéndose al remolque del camión una cantidad de óxido de calcio de 20000 quilos hasta la ciudad de Tarija y después comercializado

Figura: 13 material que utilizan para extraer la cal del horno



Fuente: Elaboración Propia

Método de sacado y transportado las muestras para ser analizadas.

Una vez calcinada la piedra caliza y convertida en cal viva, se deben tomar una serie de precauciones ya que la cal viva (CaO), es un producto químico muy susceptible a la humedad ambiente (higroscópico). La cal viva debe ser almacenada en Silos herméticos a prueba de aire, ya que en su presencia y contacto se produce lo que se llama “Apagado Aéreo”, proceso que deteriora la calidad de la cal viva.

La cal aérea, con un porcentaje en carbonato cálcico inferior al 85% y superior de un 6% en arcillas que se obtiene de piedra caliza. Cuando supera el 6% de óxido de magnesio, se denomina, dolomítica o gris (no tiene prácticamente uso en construcción)

3.12. RESULTADOS:

TABLA: N°5

ANALISIS QUIMICO CALIZA SM1				
FECHA	MATERIAL	CaO (%)	MgO (%)	CARBONATOS TOTALES (%)
1/6/2018	SM4H	47,13	2,7	89,8086051
1/6/2018	SM1H	46,8	3,19	90,24430698
2/6/2018	SM1H	46,85	2,91	89,7478855
2/6/2018	SM1H	47	2,95	90,0994151
2/6/2018	SM1H	47,17	3,01	90,52849521
2/6/2018	SM1H	46,83	2,9	89,6912531
3/6/2018	SM1H	46,28	3,34	89,62950727
3/6/2018	SM1H	47,52	3,19	91,53002127
3/6/2018	SM1H	47,72	2,92	91,32237504
4/6/2018	SM1H	46,77	2,91	89,60502836

4/6/2018	SM1H	46,87	3,14	90,26471641
5/6/2018	SM1H	46	3,38	89,21317972
5/6/2018	SM4H	46,94	3,36	90,84991492
5/6/2018	SM4H	46,87	3,33	90,66216058
5/6/2018	SM4H	46,84	3,37	90,69226161
6/6/2018	SM4H	46,51	3,1	89,53818681
7/6/2018	SM4H	47,25	2,82	90,27390819
	SM4H	47,03	2,75	89,73462425
8/6/2018	SM4H	47,26	3,6	91,92337823
8/6/2018	SM4H	48,43	1,34	89,28517015
8/6/2018	SM1H	47,59	3,88	93,09837114
8/6/2018	SM1H	40,72	2,36	77,65096065
9/6/2018	SM1H	47,3	4,28	93,41723857
9/6/2018	SM1H	45,8	3,07	88,20757533
9/6/2018	SM1H	46,08	2,35	87,20147111
10/6/2018	SM1H	43,61	2,15	82,37239454
10/6/2018	SM1H	45,26	2,63	86,32289259
11/6/2018	SM4H	46,33	2,88	88,75655973
12/6/2018	SM4H	46,89	3,3	90,63512052
12/6/2018	SM4H	46,73	3,41	90,57950549
12/6/2018	SM4H	45,44	4,12	89,76112017
13/6/2018	SM4H	44,78	3,32	86,90909961
13/6/2018	SM4H	45,65	3,35	88,52542538
13/6/2018	SM4H	47,33	3,2	91,21165367
13/6/2018	SM4H	46,67	3,92	91,53918646
13/6/2018	SM4H	45,67	3,57	89,02133818
13/6/2018	SM4H	45,88	3,91	90,10755406
14/6/2018	SM4H	46,99	2,96	90,10247607
14/6/2018	SM4H	45,06	3,02	86,78155619
14/6/2018	SM1H	46,26	3,37	89,65654732
14/6/2018	SM1H	46,47	3,79	90,91010812
14/6/2018	SM1H	46,72	3,07	89,85043247
15/6/2018	SM1H	47,18	2,95	90,42084367
15/6/2018	SM1H	46,5	3,24	89,81318327
16/6/2018	SM4H	47,63	3,14	91,62185927
16/6/2018	SM4H	45,81	2,95	87,9744151
17/6/2018	SM4H	46,9	3,9	91,90806452
17/6/2018	SM4H	45,66	2,94	87,68563984
17/6/2018	SM1G	47,91	2,39	90,55300071
17/6/2018	SM1G	47,31	2,48	89,66983516
17/6/2018	SM1G	47,92	2,76	91,34482808

18/6/2018	SM1G	47,06	2,64	89,55809642
-----------	------	-------	------	-------------

PROMEDIO	46,51	3,11	89,56870867
MAX	48,43	4,28	95,43509571
MIN	40,72	1,34	75,51731301

ANALISIS QUIMICO CALIZA SM 2				
FECHA	MATERIAL	CaO	MgO	CARBONATOS TOTALES (%)
13/2/2018	SM2H	31,31	1,79	59,65505672
14/2/2018	SM2G	38,42	1,78	72,33056717
17/2/2018	SM2G	39,98	1,5	74,53057426
17/2/2018	SM2G	33,6	1,56	63,26322581
17/2/2018	SM2G	33,73	1,27	62,88874335
8/3/2018	SM2H	31,78	1,97	60,87086849
10/3/2018	SM2H	32,97	1,82	62,68209677
16/3/2018	SM2H	38,21	1,57	71,51628678
26/3/2018	SM2H	43,06	2,09	81,264743
8/4/2018	SM2H	33,79	2,23	65,00402517
17/4/2018	SM2H	39,04	1,32	72,47547678
19/4/2018	SM2H	32,75	2,04	62,74943814
22/4/2018	SM2H	38,55	1,64	72,26985643
27/4/2018	SM2H	37,83	2,05	71,84178483
6/5/2018	SM2H	40,38	2,44	77,21116271
9/5/2018	SM2H	32,66	2,4	63,34177597
10/5/2018	SM2G	37,48	1,59	70,25455158
10/5/2018	SM2H	38,14	2,75	73,85962425
12/5/2018	SM2H	38,44	2,55	73,97697625
15/5/2018	SM2H	37,27	2,74	72,2851347
1/6/2018	SM2H	38,73	2,19	73,74178128
8/6/2018	SM2H	35,36	2,01	67,34739809
10/6/2018	SM2H	38,57	1,78	72,59842432
10/6/2018	SM2H	34,74	1,89	65,98923786
14/6/2018	SM2H	37,26	2,13	70,9912726
14/6/2018	SM2H	38,15	2,03	72,37137717
18/6/2018	SM2H	36,99	2,04	70,32086671
18/6/2018	SM2H	37,82	2,13	71,9912726

PROMEDIO
MAX
MIN

36,68	1,98	69,62941428
43,06	2,75	82,64533853
31,31	1,27	58,56731478

Fuente: Elaboración Propia

(VER ANEXO F)

CAPITULO 4. ANALISIS DE RESULTADOS Y VALIDACIÓN

4.1. CARACTERIZACIÓN DE LA PIEDRA CALIZA POR ENSAYOS QUÍMICOS

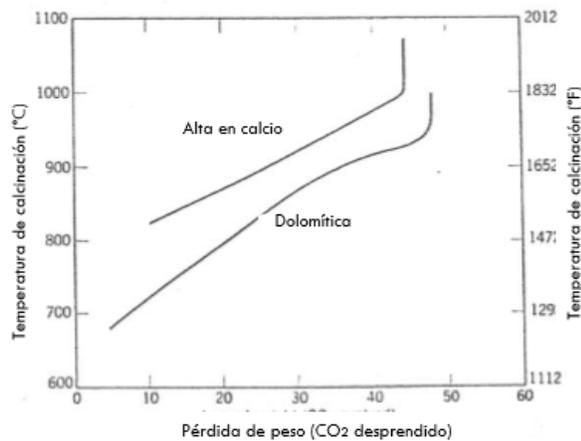
La caliza está compuesta de 85 a 92 % de carbonato cálcico, CaCO_3 , con porcentajes variables de impurezas y carbonato de magnesio inferior al 6% ricas en calcio.

4.1.1. ANÁLISIS QUÍMICO

La Cal hidráulica, con porcentaje de cal menor que el 50% y más de un 5.3% en arcillas. Se obtiene a partir de piedras menos puras o por adición de otros productos (arcillas, puzolanas, etc.)

El análisis químico utilizado en el estudio de la calcinación de piedras calizas con diferente contenido de magnesio (1.27 a 4.28 MgO (caliza alta en calcio), en el cual se evaluó el cambio de peso que sufre el material a medida que se aumenta gradualmente la temperatura o presión tanto como gas o aire con el fin de observar el efecto del contenido de calcio, magnesio, silicio, aluminio debido a que existe un cambio del material durante la reacción de calcinación.

En la descomposición completa (100%) de piedra caliza, hay una pérdida de peso teórico del 44%, a medida que se desprende el CO_2 . Esto se llama pérdida por ignición, y el comportamiento se presenta en la figura 1.



Fuente : Robert Boynton. **Chemistry and technology of lime and limestone.** Pág.167

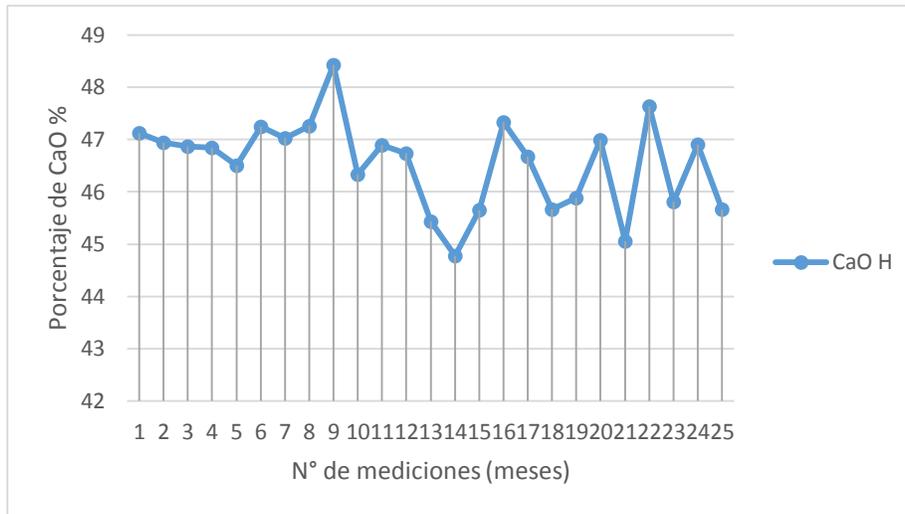
A las temperaturas elevadas de la calcinación, las impurezas de sílice y alúmina están químicamente combinadas con parte del óxido de calcio formando silicatos y calcio y aluminio, sustancia no disponible para actividad química necesitada.

Se denomina cal cálcica aquella cuyo contenido en carbonato de magnesio es inferior al 6%. La caliza calcinada a temperatura más elevada y por largo tiempo, se convierte en un material que tiene poca actividad química y que se conoce comercialmente con el nombre de dolomita quemada o inerte.

Es decir, la concentración de calcio en la muestra calcinada es de 46.52% para la magnesiana y 36.67% para la dolomítica, mientras que la concentración de magnesio es de 1.27%, 4.28% respectivamente.

La grafica de zona Huayco nos representa la cantidad de óxido de calcio que debería clasificarse en un rango no menor a 46.52% de óxido de calcio que se clasificaría una piedra caliza SM1 (sub miembro 1) de alto contenido de carbonato cálcico y como máximo y mínimo de (48.43 a 44 %) CaO y menor oxido de magnesio(MgO <6%) y una perdida por calcinación es de un 40.72% por la eliminación de material orgánico de restos de fósiles de miles de años.

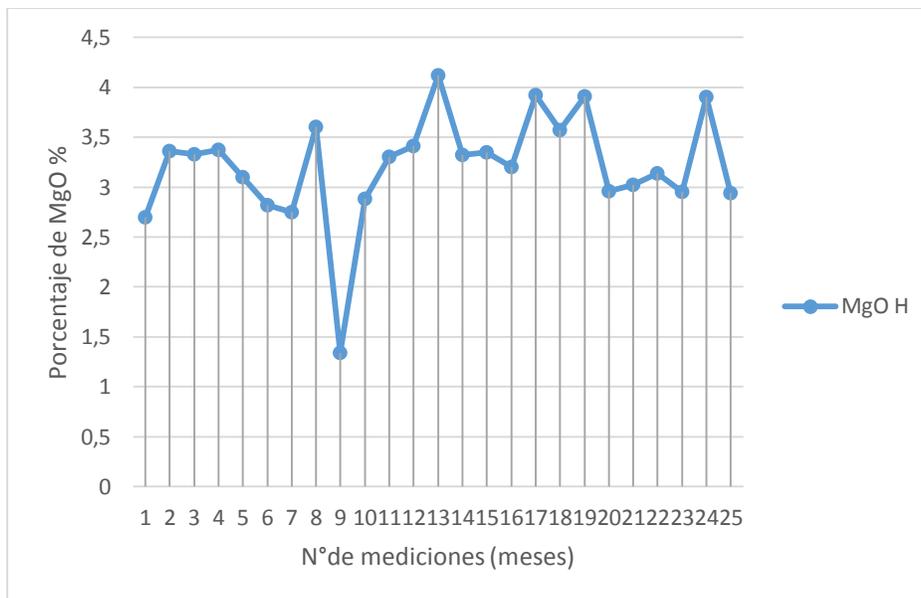
Figura: 14 Comportamiento del óxido de calcio (CaO)



Fuente: Elaboración Propia

El óxido de magnesio deberá cumplir menor a 4.12% y son cales menos contaminadas por ser inferiores es decir que su contenido de MgO no es de importancia para poder clasificarse en una piedra de primera SM1 de cantera Huayco

Figura: 15 Comportamiento del óxido de magnesio (MgO)

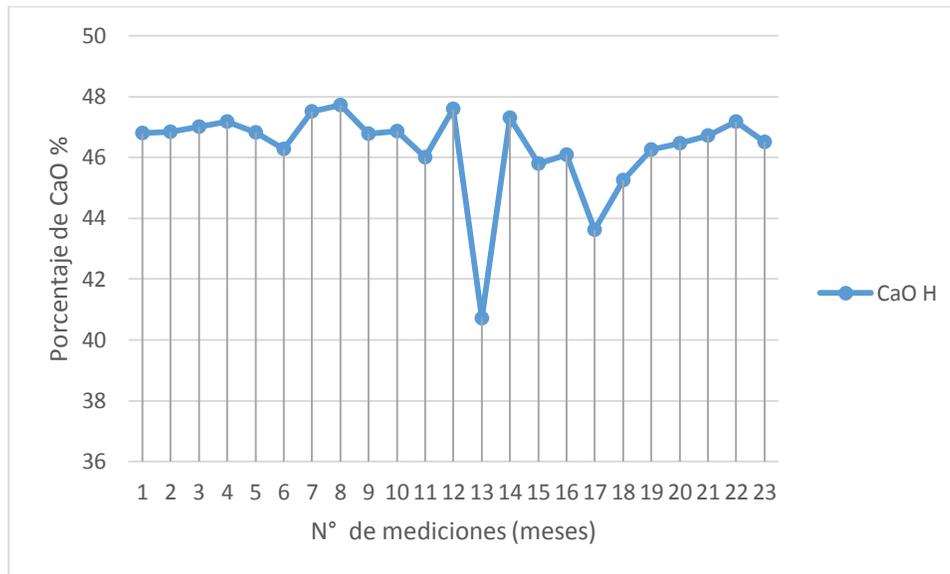


Fuente: Elaboración Propia

Figura: 16 Comportamiento del óxido de calcio cuando está fuera de norma (CaO)

Grafica representa un punto menor del 44% de óxido de calcio de 40.72% esto nos ha llevado a caracterizar que pertenece a una (SM2 sub miembro 2 piedra segunda) que cuando el calcio

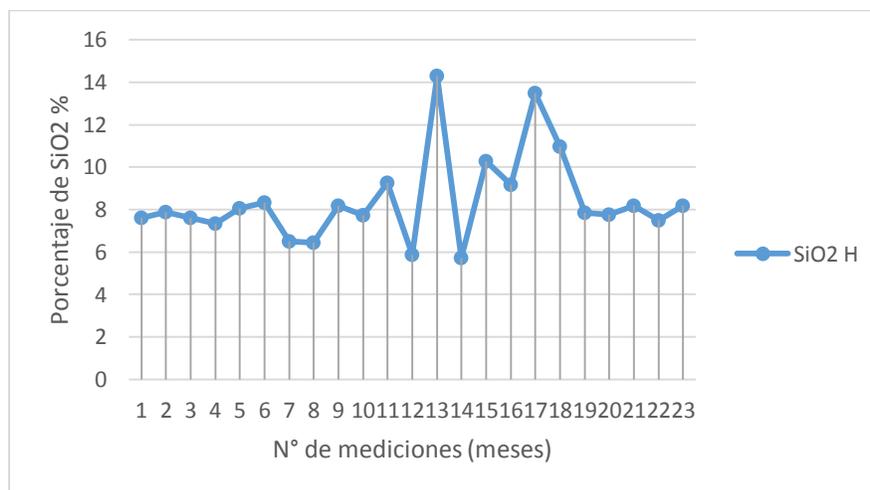
baja el óxido de silicio sube y tiene mayor presencia de arcilla y no sirve para la elaboración de cal viva (CaO)



Fuente: Elaboración Propia

Y por consiguiente vemos que el valor del silicio es de 14.30% y calcio de 40.72 % y existe una variación significativa llegando a ser una piedra de segunda SM2.

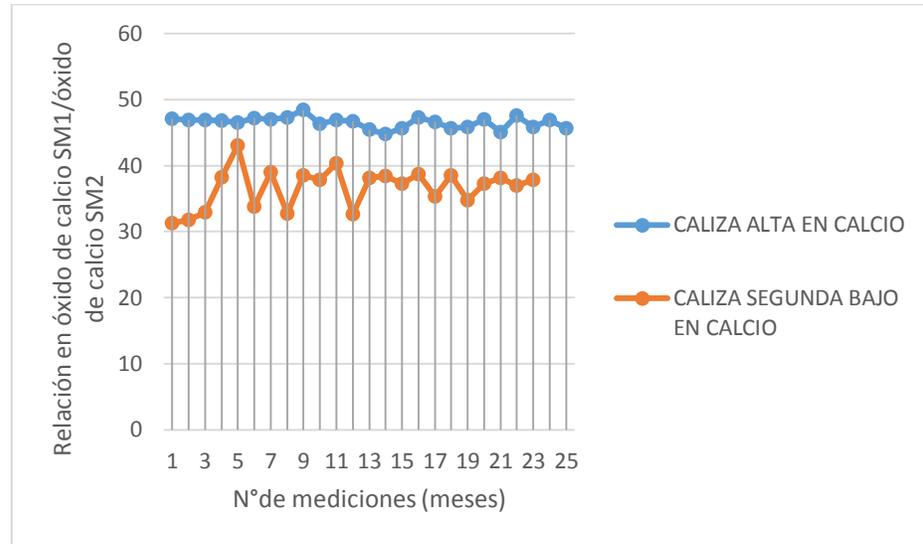
Figura: 17 Comportamiento del óxido de silicio cuando está fuera de norma presenta mayor arcilla(CaO)



Fuente: Elaboración Propia

Figura: 18 Comparación de dos calizas con diferente contenido de óxido de calcio

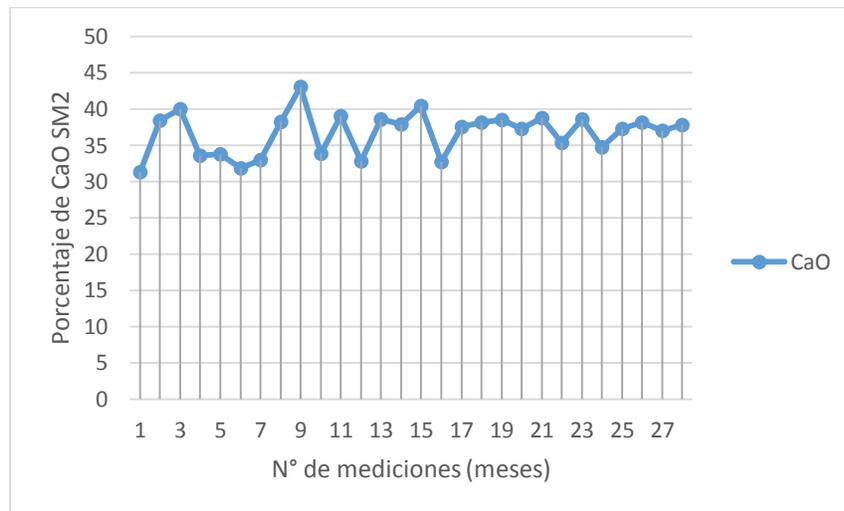
La gráfica comparativa de porcentaje de calcio de una primera SM1 y una segunda SM2 el porcentaje según la norma debe ser mayor al 44% de óxido de calcio (cal viva)



Fuente: Elaboración Propia

Figura: 19 Comportamiento de una piedra segunda SM2

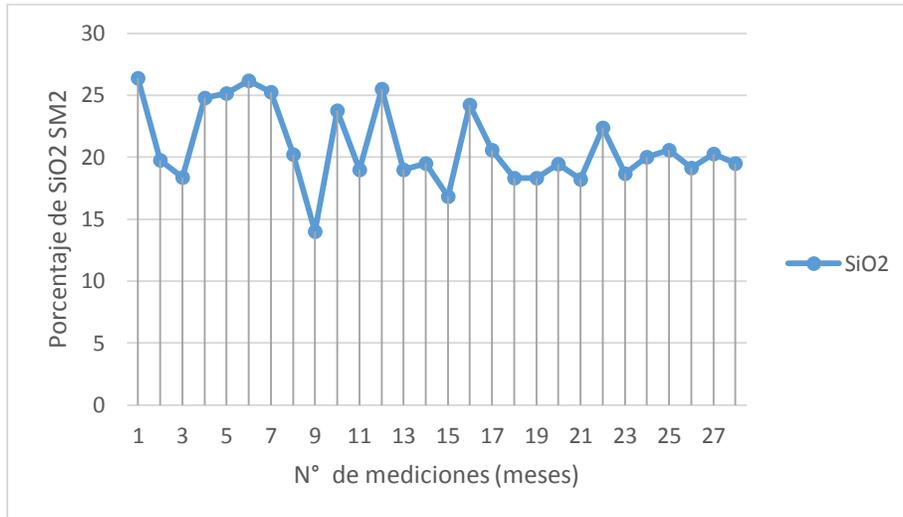
Cuando se presenta una piedra de segunda SM2 con porcentaje menor al 44% de óxido de calcio la gráfica demuestra como es el comportamiento de las impurezas que le afecta la cantidad de CaO (cal viva)



Fuente: Elaboración Propia

Figura:20 Porcentaje de SiO2 SM2

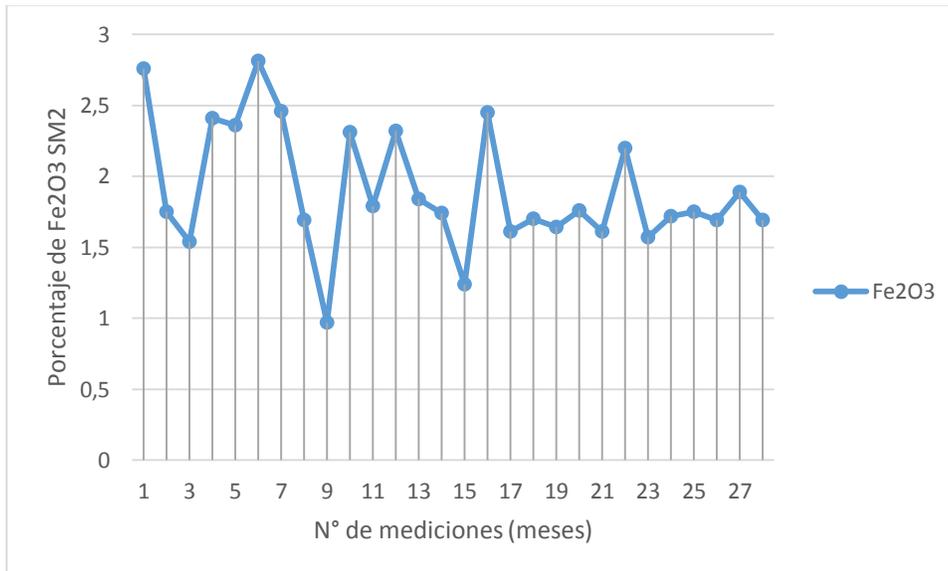
Grafica nos representa la cantidad de óxido del silicio, y menor porcentaje de CaO inferior al 44% y presencia de arcilla.



Fuente: Elaboración Propia

Figura: 21 Cantidad de arcilla

La grafica nos indica la cantidad de arcilla que contiene mayor al 1% de (Fe2O3)



Fuente: Elaboración Propia

4.1.2. COMPARACIÓN VISUAL

Las piedras calizas se clasificaron en función de su contenido de (CaO + MgO), densidad, textura, porosidad, impurezas, pureza y residuo insoluble, y normas.

Figura: 22 Cal viva de textura arenisca buena para construcción



Fuente: Elaboración Propia

SEGÚN NORMA UNE - NE 459 - 1:

Cal cálcica 90

CL90

Se clasificaron con la notación en cal viva (Q) por ejemplo;

La cal cálcica 90, en forma de cal viva, se identifica por:

EN 459 – 1 CL 90 – Q

En zona El Puente Cantera Huayco provincia Méndez departamento Tarija, prácticamente solo se fabrican cales aéreas.

La fabricación de las cales aéreas cálcicas de calidad exige la utilización como materia prima de caliza con riqueza en carbonato cálcico superior al 90% y un contenido de óxido de magnesio inferior al 6%. ya que estas presentan una variedad de impurezas de restos fósiles y material orgánico de color gris y las que tiene textura sólida son más blancas mayor contenido de carbonato cálcico

Se llama cal a todo producto, sea cual fuese su composición y aspecto físico, que proceda de la calcinación de piedras calizas como se muestra en la figura: 22

La primera está producida a partir de calizas más o menos puras por la textura que presenta es de color negro, porosa, mayor densidad, de las que, mediante la operación de cocción, se obtiene la cal viva, la cual está compuesta, fundamentalmente, por óxido de calcio. Cuando se presenta en forma de terrones, como es lo frecuente, recibe el nombre de cal viva.

Figura: 23 Cal viva mal calcinada



Fuente: Elaboración Propia

La piedra caliza se puede encontrar en casi cualquier color, dependiendo de qué elementos se combinan con el carbonato de calcio en la roca.

Figura: 24 Piedras calizas con diferente contenido de material orgánico o restos fósiles



Fuente: Elaboración Propia

Figura: 25 Cal viva de mayor contenido de (CaO)

La cal mejora la calidad de la obra y le da, al mortero, elasticidad, plasticidad y manejabilidad. Es también impermeable (al agua exterior), evita condensaciones y humedades.



Fuente: Elaboración Propia

Durante la evaporación del agua de una pasta de cal, se produce una contracción elevada que fácilmente da lugar a grietas. Esta retracción puede reducirse mediante la adición de arena a la pasta, es decir, no utilizando pasta de cal sino morteros de cal. Si se añade poca arena la retracción será alta, por el contrario, si se añade mucha arena bajarán la plasticidad y la resistencia.

El mortero está destinado a unir una serie de elementos pequeños para constituir una unidad obra con características propias.

Para este fin, el mortero tendrá que reunir una serie de propiedades como son:

Es importante conocer la facultad del mortero para retener agua, pues así se evitará que ésta sea absorbida por los ladrillos. Esta propiedad tiene especial importancia cuando se trata de morteros bastardos de cal y cemento, puesto que disminuye el riesgo de que el mortero se quede sin el agua necesaria para su fraguado.

Por otra parte, el mortero debe tener suficiente resistencia para soportar las cargas que han de actuar sobre el muro, y esta resistencia debe desarrollarla relativamente deprisa para resistir pronto el peso propio y poder continuar la construcción. Los morteros de cal y arena endurecen por secado y carbonatación. Este proceso es lento y progresa desde la superficie hacia el núcleo. Si el ambiente es muy húmedo, se retrasa el secado y si es muy seco, la carbonatación es muy lenta.

El mortero, además, debe presentar una buena durabilidad, en concordancia siempre con las condiciones a que ha de estar expuesto.

Los morteros de cal más utilizados son los morteros 1 : 2 o 1 : 3.

4.2. RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN

TABLA: N°6

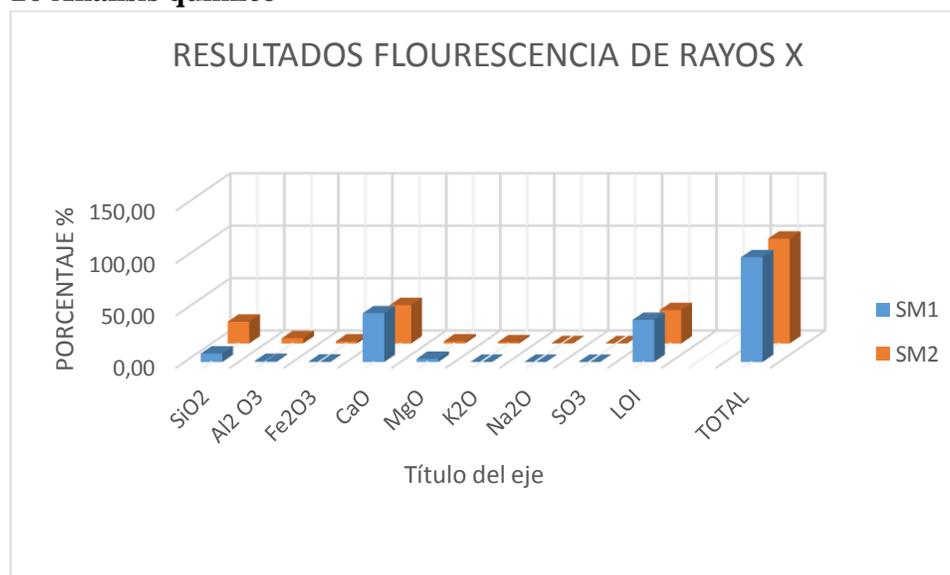
MUESTRA		
	SM1	SM2
CARBONATOS TOTALES (gCaO/100gCaliza) %	89,57	69,63
PERDIDA POR CALCINACIÓN (%)	40,26	31,84
SiO ₂ (%)	8,07	20,83
Al ₂ O ₃ (%)	0,98	5,00
Fe ₂ O ₃ (%)	0,49	1,9
CaO (%)	46,52	36,68
MgO (%)	3,11	1,98
K ₂ O (%)	0,20	1,18
Na ₂ O (%)	0,17	0,37
SO ₃ (%)	0,21	0,22
LOI (%)	40,26	31,84

TOTAL (%)	100	100
-----------	-----	-----

(VER ANEXO G)

Fuente: Elaboración Propia

Figura: 26 Análisis químico



Fuente: Elaboración Propia

En la figura N° 26 se encuentran un resumen de los datos fluorescencia de rayos X llevados a cabo en el laboratorio en el cual se puede observar los porcentajes correspondientes a los

distintos parámetros analizados, y en ciertos casos se puede evidenciar gracias a estos análisis caracterizar según la norma correspondiente por parte de las muestras analizadas. Con respecto a la cal viva existe una deficiencia con respecto a la Norma INEN 248 para el MgO y CaO, es así que se tiene que mejorar la calidad de la materia prima para la elaboración de los productos y evaluar el proceso de calcinación ya que es factor determinante.

4.3. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y VALIDACIÓN

En cuanto a los resultados de densidad, se observa en la tabla N° 4 que se obtuvieron valores de 2.60 g/cm³ a 2,75 g/cm³ para el producto producido que se puede caracterizar una caliza porosa de alto contenido de carbonato cálcico (92%), existiendo esta pequeña diferencia debido a la dureza.

Tabla N°7: Carbonatos de Calcio (CaCO₃)

MES: OCTUBRE

CALIZA DE PRIMERA									
Fecha	Origen	PPF (%)	SiO ₂ (%)	R ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO ₃ (%)	CO ₃ Tot. (%)
1									
2									
3									
4	HUAYCO	40,08	5,45	0,91	0,43	49,35	2,41	0,22	92,54
5									
6	HUAYCO	40,25	5,50	0,68	0,43	49,40	2,31	0,37	92,64
7									
8	HUAYCO	39,89	5,66	1,09	0,43	48,96	2,63	0,28	92,58
9	HUAYCO	40,58	5,33	0,73	0,45	49,85	2,10	0,19	91,84
10									
11	HUAYCO	40,21	6,31	0,90	0,45	48,51	2,55	0,44	91,64
12									
13									
14									
15	HUAYCO	41,05	4,10	0,62	0,53	48,40	3,79	0,17	94,72
16	HUAYCO	40,78	4,85	0,89	0,45	49,29	2,61	0,26	92,78
17	HUAYCO	40,17	5,23	0,85	0,37	49,10	2,97	0,20	93,42
18									
19									
20									
21									
22									
23									

24									
25									
26									
27									
28									
29	HUAYCO	40,69	4,60	0,66	0,40	49,01	3,05	0,22	93,50
30	HUAYCO	40,51	4,73	0,79	0,47	49,12	2,73	0,20	93,42
31									

GESTION 2018

CALIZA DE SEGUNDA									
Fecha	Origen	PPF	SiO2	R2O3	Fe2O3	CaO	MgO	SO3	CO3 Tot.
1	HUAYCO	34,16	15,56	4,21	1,17	41,85	1,43	0,31	75,58
2	HUAYCO	28,43	25,62	7,98	2,25	32,50	1,60	0,39	58,32
3	HUAYCO	33,75	16,60	4,20	1,42	39,63	2,55	0,30	74,40
4									
5									
6									
7									
8									
9									
10									
11									
12									
13									
14									
15									
16									
17									
18	HUAYCO	34,74	15,42	4,31	1,12	41,52	2,27	0,24	76,94
19									
20	HUAYCO	32,85	18,68	4,68	1,44	39,27	1,62	0,37	71,52
21	HUAYCO	31,93	20,13	5,66	1,73	36,72	2,09	0,29	68,34
22	HUAYCO	31,50	20,26	5,23	1,69	37,00	1,95	0,25	67,74
23	HUAYCO	34,53	16,25	4,20	0,99	41,30	2,03	0,23	77,54
24	HUAYCO	27,13	26,93	8,58	2,58	31,06	1,57	0,41	62,72
25	HUAYCO	26,36	27,77	9,17	2,70	29,92	1,44	0,60	54,00
26									
27									
28	HUAYCO	24,94	31,77	9,24	3,13	26,75	1,60	0,32	47,80
29									
30									
31									

CALIZA DE SM 4									
Fecha	Origen	PPF (%)	SiO2 (%)	R2O3 (%)	Fe2O3 (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO3 (%)	CO3 Tot.(%)
1									
2									
3									
4									
5									
6									
7	SM 4	39,26	6,83	1,80	0,62	46,32	3,27	0,16	89,06
8									
9									
10									
11									
12									
13									
14									
15									
16									
17									
18									
19									
20									
21									
22									
23									
24									
25									
26									
27									
28									
29									
30									
31									

Fuente: Elaboración Propia

Calculo del contenido de CO₃-2 en la piedra caliza. – SM1

Se calcula en función de los siguientes análisis que se practicaron:

(Ver Anexo D)

%Máximo CaO = 48.43

%Mínimo CaO = 40.72

%Máximo MgO = 4.28

%Mínimo MgO = 1.34

Factor de conversión para CaO \longrightarrow CaCO₃

PM CaO = 56g/mol

PM CaCO₃ =100g/mol

$$Fc1 = \frac{PM_{CaCO3}}{PM_{CaO}} = \frac{100g_{CaCO3}}{56CaO}$$

Factor de conversión para MgO \longrightarrow MgCO₃

PM MgO = 40.3 g/mol

PM MgCO₃ =84.3 g/mol

$$Fc2 = \frac{PMMgCO3}{PMMgO} = \frac{84.3gMgCO3}{40.3MgO}$$

Calculo de contenido de carbonatos:

a) De calcio (CaCO₃)

$$\%CaO = \frac{48.43gCaO}{100gCaliza} \longrightarrow \left(\frac{48.43gCaO}{100gCaliza}\right) * \left(\frac{100gCaCO3}{56CaO}\right) = 86.48\%$$

$$\%CaO = \frac{40.72gCaO}{100gCaliza} \longrightarrow \left(\frac{40.72gCaO}{100gCaliza}\right) * \left(\frac{100gCaCO3}{56CaO}\right) = 72.71\%$$

Calculo de contenido de carbonatos:

b) De calcio (MgCO₃)

$$\%MgO = \frac{4.28gMgO}{100gCaliza} \longrightarrow \left(\frac{4.28gMgO}{100gCaliza}\right) * \left(\frac{84.3gMgCO3}{40.3MgO}\right) = 8.95\%$$

$$\%MgO = \frac{1.34gMgO}{100gCaliza} \longrightarrow \left(\frac{1.34gMgO}{100gCaliza}\right) * \left(\frac{84.3gMgCO3}{40.3MgO}\right) = 2.80\%$$

Calculo del contenido de CO₃-2 en la piedra caliza. – SM2

Se calcula en función de los siguientes análisis que se practicaron:

(Ver Anexo D)

%Máximo CaO = 43.06

%Mínimo CaO = 31.31

%Máximo MgO = 2.75

%Mínimo MgO = 1.27

Factor de conversión para CaO \longrightarrow CaCO₃

PM CaO = 56g/mol

PM CaCO₃ = 100g/mol

$$Fc1 = \frac{PM_{CaCO3}}{PM_{CaO}} = \frac{100g_{CaCO3}}{56CaO}$$

Factor de conversión para MgO \longrightarrow MgCO₃

PM MgO = 40.3 g/mol

PM MgCO₃ = 84.3 g/mol

$$Fc2 = \frac{PMMgCO3}{PMMgO} = \frac{84.3gMgCO3}{40.3MgO}$$

Calculo de contenido de carbonatos:

c) De calcio (CaCO₃)

$$\%CaO = \frac{43.06gCaO}{100gCaliza} \longrightarrow \left(\frac{43.06gCaO}{100gCaliza}\right) * \left(\frac{100gCaCO3}{56CaO}\right) = 76.89\%$$

$$\%CaO = \frac{31.31gCaO}{100gCaliza} \longrightarrow \left(\frac{31.31gCaO}{100gCaliza}\right) * \left(\frac{100gCaCO3}{56CaO}\right) = 55.91\%$$

Calculo de contenido de carbonatos:

d) De calcio (MgCO₃)

$$\%MgO = \frac{2.75gMgO}{100gCaliza} \longrightarrow \left(\frac{2.75gMgO}{100gCaliza}\right) * \left(\frac{84.3gMgCO3}{40.3MgO}\right) = 5.75\%$$

$$\%MgO = \frac{1.27gMgO}{100gCaliza} \longrightarrow \left(\frac{1.27gMgO}{100gCaliza}\right) * \left(\frac{84.3gMgCO3}{40.3MgO}\right) = 2.66\%$$

4.4.-APLICACIÓN DEL ESTUDIO Y RESULTADOS DEL ANÁLISIS EN LA CONSTRUCCIÓN:

En este trabajo de investigación pretendo dar algunas pautas para la elección del tipo de cal más apropiado para cada obra, y en cada momento, ya que la gran variedad de tipos de cal que se comercializan puede llegar a confundir al consumidor. Por otra parte, es frecuente que en los comercios de materiales de construcción no sepan dar un asesoramiento adecuado sobre el tema, generalmente por desconocimiento sobre este material. Desgraciadamente, el uso de la cal está siendo abandonado y en pocos establecimientos disponen de varios tipos de cal o de cal con una calidad adecuada. Espero poder ordenar la información de un modo coherente para que sirva de ayuda a quien lea este proyecto de caracterización de la piedra caliza de la zona El Puente Cantera Huayco para el uso en la construcción.

Los factores que van a determinar la elección de un tipo de cal son muy variados. Por ejemplo, se pueden dividir en:

-Ubicación de la obra: interior o exterior.

-Tipo de obra: solera, revestimientos exteriores/interiores, pintura, muros de carga, tabiques, elementos decorativos.

-Materiales con los que se va a combinar la cal: ladrillos cerámicos, adobe/tapial, o bloques de hormigón.

-Disponibilidad: no en todas las zonas es posible encontrar el tipo de cal deseado.

-Volumen de la obra.

-Cantidad de dinero del que se dispone.

-Tiempo para la ejecución.

Analizando cada factor por separado:

- **Ubicación de la obra:**

Quizás sea el factor más importante. Las exigencias cuando se trata de una obra al exterior, sobre la que van a incidir directamente la lluvia, los rayos del sol, la humedad, el viento y los cambios de temperatura, son mayores. Así, si el clima es cálido y seco, se podrá emplear indistintamente cal en pasta o cal aérea en polvo. Incluso, si llueve poco, es posible emplear una lechada de cal (empleando cal viva) sobre un revoque de arcilla. En este último caso será necesario aplicar varias capas de lechada de cal, mezclando la última con un aditivo que confiera a la mezcla propiedades hidrorrepelentes, como el aceite de linaza. Se ha de tener

en cuenta que la lechada de cal necesitará un mantenimiento anual para que no pierda su eficacia. Si se trata de un lugar en el que las variaciones de temperatura son bruscas habrá que tener en cuenta que la obra se ha de realizar en temporadas en las que dichas variaciones sean lo más suaves posible. Normalmente, en el departamento de Tarija es mejor hacer la obra en primavera y principios de verano. En este tipo de climas no se han de llevar a cabo las obras en invierno, puesto que la cal en temperaturas inferiores a los 8° C no fragua del todo bien.

Si el clima es muy húmedo y llueve con frecuencia, aunque se pueden emplear la cal aérea en polvo.

Tipo de obra:

-Soleras: se pueden realizar soleras con cal aérea en polvo. La elección dependerá del aislamiento que se disponga debajo de la solera.

-Revestimientos exteriores: es posible realizarlo con cal aérea en polvo. También se pueden combinar ambos materiales, utilizando para el enfoscado cal aérea en polvo y para los enlucidos como en revestimiento exteriores.

-Revestimientos interiores: en este caso, las exigencias estéticas son las que normalmente priman. Para un acabado muy fino es mejor utilizar cal en pasta apagada durante un mínimo de 6 meses, ya que se trabaja mejor y se asegura la ausencia de caliches que puedan dañar con el tiempo los enlucidos.

-Pintura: para realizar una pintura a la cal se suele utilizar cal viva en terrones, recién apagada. No obstante, también se pueden obtener buenos resultados con cal en pasta a la que se añade agua.

-Muros de carga: es posible realizar dicha obra utilizando cal aérea. El peso que pueden recibir los muros estará determinado sobre todo por el material con el que se combine la cal. De este modo, encontramos miles de ejemplos de edificios cuyos muros de carga están hechos con piedra y cal. Se pueden hacer muros de carga moderados con piedra/ladrillo/bolques y cal en pasta o cal aérea en polvo.

-Tabiques: para levantar tabiques en el interior de un edificio se puede utilizar indistintamente cualquier tipo de cal. Es más, es posible levantar tabiques interiores con

piedra/ladrillo/bloques/mampuesto y una mezcla de arcilla, arena y paja. Este método ha sido empleado durante muchos siglos en las construcciones más modestas con buenos resultados.

-Elementos decorativos: en este caso nos referimos a esgrafiados, estucados y pinturas murales. Para este tipo de elementos la cal añeja (al menos 1 año de apagado) en pasta es el material idóneo. De hecho, la mayoría de los tratados escritos sobre este tipo de técnicas recomiendan el uso de cales apagadas durante mucho más tiempo.

Materiales con los que se va a combinar la cal

-Ladrillos cerámicos: con este tipo de material se puede utilizar cualquier tipo de cal (aérea en polvo, en pasta). Se deberá tener en cuenta el endurecimiento del mortero.

-Adobe/tapial: sobre muros hechos con mezclas arcillosas se puede aplicar cualquier tipo de cal. Lo que se ha de tener en cuenta es que las arcillas son muy absorbentes, por lo que el muro deberá estar bien humectado a la hora de aplicar cal. De lo contrario, el agua del mortero será absorbida por el muro, provocando posteriores grietas y desprendimientos de los enlucidos/enfoscados.

-Bloques de hormigón: Al igual que con los ladrillos cerámicos, en este caso también se puede utilizar, tanto la cal aérea en polvo o en pasta.

A continuación, presento unas fichas para completar este apartado donde se podrá observar las aplicaciones de los usos de la cal.

4.4.1. FICHA TÉCNICA CAL AÉREA (EN 459-1)

La cal aérea es uno de los primeros conglomerantes descubiertos por el hombre. Se han encontrado vestigios de su empleo en yacimientos con más de 10.000 años de antigüedad, y hasta los principios del siglo XX constituirá el principal conglomerante utilizado en la construcción. A disminuido drásticamente su empleo con el descubrimiento de la cal hidráulica natural y del Cemento Pórtland, al final de siglo XIX. Debido a su resistencia y rigidez estos han sustituido rápidamente la cal aérea a favor de una construcción moderna, cada vez más vertical. Es a principios del siglo XXI que la eficacia de las técnicas con cal vuelven a ganar de interés, cuando se ha visto que el cemento da muy malos resultados en la restauración. Paralelamente hay tendencias hacia un habitat más ecológico, saludable, y respetuoso con el medio ambiente, donde la cal, sin duda, puede jugar un papel muy importante.

Materias primas: Cales aéreas se obtienen de rocas calizas cuyo contenido en impurezas (materiales arcillosos) no alcanza el 5%. (A partir del 5% de impurezas, si estos son de magnesio, se trata de cal dolomítica con propiedades ligeramente hidráulicas). Contra más pura la roca madre, mejores calidades de plasticidad tendrá la cal aérea, llamándose CAL GRASA aquella, procedente de una caliza casi pura en carbonato cálcico. La cal aérea es un conglomerante que endurece por reacción química a diferencia del yeso que lo hace por cristalización o la tierra arcillosa que lo hace por pérdida de agua. La cal aérea procede de la descomposición por calor de las rocas calizas, a temperaturas por encima de 900°C a 1200°C, de la cual se desprende el anhídrido carbónico y se obtiene el ÓXIDO CÁLCICO (cal viva): $\text{CaCO}_3 + \text{calor} = \text{CO}_2 + \text{CaO}$. Cal viva u óxido de calcio (CaO), es el estado de la cal antes de comenzar el proceso de apagado. Obtenemos cal hidratada o HIDRÓXIDO CÁLCICO (Ca(OH)_2 , en polvo) cuando se le ha añadido el agua indispensable para hidratarla. El volumen de agua es aproximadamente un tercio al peso de la cal y difícil de estimar con exactitud, debido al calor que desprende esta reacción y las diferencias que puede haber en la materia prima ($\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} = \text{Ca(OH)}_2 + \text{calor}$). Si el agua utilizada en el proceso es excesiva obtendremos una cal en pasta (HIDRATO) de aspecto untuosa (el volumen de agua es aproximadamente de uno a uno y media el peso de la cal).

Con la CAL GRASA EN PASTA (procedente además de una cocción y apagado correcto) se obtiene una mayor plasticidad y mejores resultados de resistencia que con la cal aérea en polvo, como consecuencia de la diferencia de elaboración entre ambas: La primera se apaga con exceso de agua, que garantiza su completa transformación en hidróxido cálcico. Además, la calidad de la cal grasa en pasta no sufre en el almacenamiento, al contrario: El período mínimo para poder ser usada es de seis meses; cuantos más años pase en reposo, mejor comportamiento tendrá después, carbonatándose de forma óptima al utilizarse en revoques, estucos o morteros.

El ciclo de la cal se completa y cierra en obra. La argamasa, tras ser colocada en el paramento va adquiriendo, poco a poco, una progresiva viscosidad acompañada de un ligero aumento de temperatura y una pérdida de agua (absorción del soporte y evaporación) iniciándose a continuación la CARBONATACIÓN, un proceso de endurecimiento mediante absorción de anhídrido carbónico, para el cual se precisa agua o bien humedad ambiental. Este proceso

puede durar años e incluso siglos, mediante el cual la cal aérea vuelve a su estado de origen, el carbonato cálcico, transformándose lentamente en un bloque de consistencia pétreo.

TABLA: 8 Aplicaciones y dosis generalizadas:

aplicaciones de CAL GRASA EN PASTA (HIDRATO) en la restauración y bioconstrucción	dosis de CAL GRASA en pasta	dosis de árido (u otros componentes)	finura de árido	dosis de agua
morteros	1	3 - 3,5	0 - 6 mm	nada o muy poca, según humedad presente en la arena
enfoscados	1	3 - 3,5	0 - 6 mm	nada o muy poca, según humedad presente en la arena
revoques	1	2 - 2,5	0 - 3 mm	nada o muy poca, según humedad presente en la arena
enlucidos y estucos	1	1 - 2 (según finura de árido)	árido más fino que aquel de la capa anterior o polvo de mármol	nada o muy poca, según humedad presente en la arena y temperatura del ambiente
lechadas	1	(0,5 - 1)	(polvo de mármol)	1 - 1,5 (1,5 - 2)
pintura de cal	1	-	-	2

Fuente: Elaboración Propia

Propiedades especiales de morteros elaborados con cal aérea: Las ventajas de la cal sobre el cemento son claras en cuanto a las técnicas que se explican a continuación. Para el estuco, esgrafiado y la pintura al fresco el proceso de endurecimiento lento de la cal, su plasticidad y su gran retención de agua son primordiales a la hora de realizar una decoración, además los morteros de cemento, bastardos y de cales de alta hidráulica pueden dar eflorescencias debido a su contenido en sales. La mayor rigidez del cemento produce un revoque poco flexible a las contracciones y dilataciones del muro, favoreciendo el agrietamiento del mismo. La cal en cambio ofrece una bajísima retracción y se adapta a los movimientos del

soporte la falta de respiración es otra gran desventaja del cemento, además es incapaz de regular la humedad ambiental y térmicamente es desfavorable. La cal aérea, al carbonatar (proceso que precisa agua), tienen un efecto refrescante en verano (osmosis). En invierno este proceso es inverso por lo cual aprovechamos de su buen aislamiento térmico: los morteros de cal aérea son un 34% más aislantes que morteros altamente hidráulicos (cemento). Los revoques de cal son altamente transpirables y reguladores de humedad eliminando así condensaciones y problemas reumáticos. La cal es un material aséptico y apto para alérgicos. El proceso de carbonatación también es favorable a la hora de extraer agua de paramentos húmedos (secado de zócalos o sótanos húmedos y capacidad de mantenerlos secos y libres de sales destructivas). Aptitud de empleo tal en interiores como en exteriores (impermeabilidad a la lluvia), incluso en zonas cercanas al mar.

Precauciones:

- Buena selección de árido según aplicación y buena dosis cal-árido
- Buena dosificación en relación agua-conglomerante
- Evitar el secado rápido en tiempo caluroso (sombrear con telas húmedas), el tiempo ideal para acabados exteriores es la primavera y el otoño en zonas libres de hielo. En exteriores no aplicar antes de heladas.
- Humedecer muy bien la mampostería a enfoscar, no humedecer de forma irregular (manguera).
- Utilizar herramientas y técnicas adecuadas para favorecer la carbonatación.
- Evitar ambientes agresivos y aguas no potables.
- La cal aérea no tiene propiedades adherentes y por lo tanto su fijación es mecánica a los huecos de la piedra o del ladrillo. Si se va a aplicar a una pared lisa, previamente, hay que picarla para crear unos pequeños "hoyuelos" en toda la superficie donde se pueda "agarrar".

El agua:

El agua para conseguir lechadas de cal o amasar morteros puede ser cualquiera que produce la naturaleza, siempre que no esté sucia ni contenga sales. Serán las consideradas potables. La de río es preferible a la de fuentes y pozos siempre que no contenga vertidos contaminantes. El agua del mar produce eflorescencias, disminuye el entumecimiento de la cal, pero no tiene influencia sobre la solidez de los morteros, que incluso puede tomar una consistencia igual o mayor que con agua dulce. Las aguas muy puras, como las de lluvia, no

son convenientes porque dan reacciones ácidas. Las aguas a altas temperaturas aceleran la carbonatación del mortero, así que a 30°C se acelera y a 7°C se retarda.

La arena:

Los áridos proceden de la desintegración natural o artificial de las rocas, que mezclados con un conglomerante constituyen los morteros. Su función es la de disminuir la retracción de estos, favorecer la carbonatación (al aumentar la porosidad del conglomerante permite al aire, que a su vez contiene anhídrido carbónico, acceder al interior de la masa), estabilizar su volumen aparte de dotarlos de texturas y color. Las arenas pueden ser silíceas, calizas o arcillosas según el mineral dominante. Se deben evitar los áridos dolomíticos de machaqueo, y los que contengan impurezas o sean de procedencia marina. Se ha comprobado que una granulometría heterogénea aporta mejores resultados en las propiedades porosimétricas y en la durabilidad. Considerando la naturaleza química del árido podría distinguir los siguientes grupos:

Áridos silíceos:

Son los mejores por su dureza y estabilidad química, características propias del cuarzo que contienen.

Áridos silicatados:

Proviene de rocas feldespáticas. Áridos calizos: Son más blancos que los anteriores.

Áridos arcillosos:

Pueden ser los mismos áridos silíceos o silicatados contaminados por impurezas de arcillas muy peligrosas para los revocos.

Áridos margosos:

Son los áridos cargados con impurezas de arcilla.

CONCLUSIONES

- Es un componente calcáreo, que puede emplearse como testigo de referencia y que debe tener un contenido de carbonato de calcio (CaCO_3) ≥ 75 % de acuerdo con la Norma Boliviana NB 011
- Con base a los resultados obtenidos y presentados en las figuras y tablas, se puede observar que las deficiencias en el control de calidad en el proceso de horneado o calcinación que las rocas calizas pueden producir las variaciones durante el proceso de descomposición térmico, lo cual tendrá implicaciones directas en la calidad del producto final.
- Las dos calizas analizadas –alta en calcio SM1, y SM2 - presentan dos zonas de disociación cuando se someten a un calentamiento, de 970°C , siendo la primera la de mayor liberación de dióxido de carbono (CO_2) y la segunda no recomendable para la producción de cal viva.
- Se determinó a base a los residuos insolubles, que luego de 72 h, incrementa su peso en un promedio de 8.67% . Hecho que demuestra que estos residuos aún tienen actividad química sólido – gas (aire) que le permite absorber humedad y otros gases como el CO_2 que se incorporaron a la muestra formando hidratos o carbonatos. Actividad muy apropiada de las cales aéreas en su proceso de fraguado.
- Durante el desarrollo de la investigación se logró desarrollar los objetivos propuestos, logrando conocer las características químicas, físicas de óxido de calcio dando como consecuencia la variación de sus propiedades físico, químico y mecánico.
- La cal es una alternativa que ofrece beneficios ecológicos, como económicos para conservación de estructuras utilizando los morteros.
- Con la base de resultados obtenidos en la investigación, se recomienda el uso de piedra caliza SM1 por el contenido de carbonato cálcico de 75% así también mayor al 44% de óxido de calcio cal cálcica y menor carbonato de magnesio al 6%
- La piedra caliza que ingresa al horno de calcinación para transformarse en CaO es muy heterogénea teniendo medidas entre 30 cm y 60 cm siendo esto desfavorable al momento de obtener la cal viva.

- Con la implementación del trabajo de investigación se espera que el rendimiento de producción de la cal viva se incremente en un 20% para recomendar al productor y tener una información del producto.
- Con este trabajo de investigación quiero despertar dicho entusiasmo por este material que fue, es y será imprescindible en nuestras vidas. Intentando explicar de forma clara los tipos, utilidades y combinaciones posibles para poder entender con un poco más de claridad el complejo mundo de la Cal. Mediante la ficha técnica intento que alguien sin mucha experiencia en esta rama sea capaz de saber qué tipo de cal y como ha de utilizar en cada técnica constructiva.

RECOMENDACIONES

- Evaluar el efecto de la sílice en la piedra caliza con bajo contenido de magnesio por medio de un análisis termogravimétrico en función del peso y de la densidad absoluta, iniciando los análisis a temperaturas mayores de 900°C.
- Es necesario realizar un método de control de calidad en el proceso de producción en cuanto a horneado, hidratado de la cal (CaO) en las caleras, ya que, de este depende el resultado químico final de la producida para la comercialización.
- Evaluar el efecto que tiene la aplicación de temperaturas de calcinación dentro del rango de los 900 – 1000 °C con la finalidad de analizar la sensibilidad del producto térmico en función de variaciones de temperatura de calcinación.
- Ampliar el estudio de rocas calizas con la finalidad de continuar analizando el efecto que tiene el origen geológico de la cal sobre propiedades físicas y químicas para el mortero.
- La cal producida por piedra caliza segunda en cuestión de porcentajes de óxidos de Ca y Mg están por debajo de acuerdo a los porcentajes requeridos por la Norma INEN 248 en un 36,68% afectando obviamente en la calidad de producto obtenido produciendo SM2 ya que presenta mayor contenido de arcilla disminuyendo el óxido de calcio y no recomendable en la producción de cal con la sub miembro 2 ya que es fundente en la producción.

- Se recomienda instalar una trituradora para la piedra caliza antes de la entrada al horno debido a que la trituración se da de forma manual afectando esto a la calidad de la cal viva obtenida posteriormente ya que es recomendable que el tamaño de la piedra antes de entrar al horno esté entre uno 5cm a 10cm
- Colocar un sistema de pesaje antes de la entrada al horno y a la salida del mismo para tener conocimientos más exactos acerca de la cantidad de materia primas que ingresan al horno y así mismo la cantidad que salen, ya que esto se da de manera muy artesanal o manual.