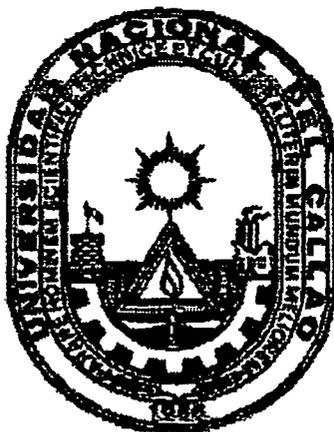


1/600.C/1527

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO  
FACULTAD DE INGENIERIA QUIMICA**



**“DETERMINACION DE LA CALIDAD DE CALIZAS DEL  
YACIMIENTO CERRO – PALO PARA SU EMPLEO EN LA  
PRODUCCION DEL CEMENTO PORTLAND TIPO I”**

**TESIS**

**PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE**

**INGENIERO QUIMICO**

**PRESENTADO POR**

**BAYON ALBERCA PATRICIA**

**ASESOR**

**ING° CARLOS ANGELES QUEIROLO**

**CALLAO – PERU**

**2006**



**Dedico este trabajo de investigación a MIS PADRES Y HERMANAS quienes me apoyaron y fortificaron en todo momento haciendo de mí una mujer profesional llena de valores y virtudes.**

**Un agradecimiento profundo a CEMENTO ANDINO S.A. por haberme brindado la oportunidad de realizar el presente trabajo de investigación y ser el gestor de mi realización profesional.**

**Y finalmente un agradecimiento especial por el apoyo desinteresado para concretar la investigación a mi asesor Ing. CARLOS ÁNGELES QUEIROLO y al Ing. ALVARO GUERRERO MORALES.**

**PATRICIA.**

**“DETERMINACIÓN DE LA CALIDAD DE CALIZAS DEL YACIMIENTO CERRO  
PALO PARA SU EMPLEO EN LA PRODUCCIÓN DE CEMENTO PORTLAND TIPO**

**I”.**

I.	INTRODUCCIÓN	1
II.	RESUMEN	3
III.	OBJETIVOS	5
IV.	PARTE TEORICA	6
4.1	Aspectos Generales de la Caliza	6
4.1.1	Origen de las Calizas	6
4.1.2	Composición de las Calizas	8
4.1.3	Clasificación de las Calizas	13
4.1.3.1	Por su Edad	13
4.1.3.2	Por el Área de Formación	13
4.1.3.3	Por el Contenido de Carbonato de Calcio	16
4.1.3.4	Por el Contenido de Carbonato de Magnesio	17
4.1.4	Propiedades Físicas	17
4.1.4.1	Color	17
4.1.4.2	Textura	18
4.1.4.3	Densidad	19
4.1.4.4	Dureza	19
4.1.5	Variedades de Calizas	20
4.1.6	Calizas en el Perú	23
4.1.7	Definición Geológica e Industrial de la Caliza	25
4.2	Características del Yacimiento de Caliza	25
4.2.1	Ubicación del Yacimiento	25

4.2.2	Características Geológicas	26
4.2.3	Características Climatológicas	29
4.2.4	Recursos	29
4.3	Muestreo del Yacimiento de Caliza	30
4.3.1	Métodos de Muestreo	31
4.4	Espectrometría por Fluorescencia de Rayos X para el Análisis de Calizas	35
4.5	Influencia de los Compuestos Químicos de la Caliza en el Cemento Portland Tipo I	38
4.6	Aspectos Generales del Cemento Portland Tipo I	38
4.6.1	Definición de Cemento Portland Tipo I	38
4.6.2	Características del Cemento Portland Tipo I	40
4.6.2.1	Finura	40
4.6.2.2	Fraguado	40
4.6.2.3	Resistencia	40
4.6.2.4	Composición	41
4.6.3	Clinker Portland Tipo I, Composición y Módulos de Control	41
4.6.3.1	Clinker Portland Tipo I	41
4.6.3.2	Composición del Clinker Tipo I	42
4.6.3.3	Módulos de Control	42
4.6.4	Materias Primas	43
4.6.4.1	Componentes Calcáreos	43
4.6.4.2	Componentes Arcillosos	44
4.6.4.3	Componentes Correctores	44
4.6.5	Selección de la Caliza para la Producción de Cemento	45
4.6.6	Proceso de Producción del Cemento Portland Tipo I	46

V.	PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	51
5.1	Materiales y Equipos	51
5.2	Muestreo del Yacimiento de Calizas mediante el Método de Perforaciones Diamantinas (Perforaciones con Taladros Huecos)	53
5.3	Análisis Químico de las Muestras de Caliza	55
5.3.1	Preparación de Muestras	55
5.3.2	Determinación de Carbonato Total	56
5.3.3	Análisis de Espectrometría por Fluorescencia de Rayos X (FRX)	57
VI.	RESULTADOS	58
6.1	Determinación de la Longitud de las Muestras para Análisis Químico	58
6.2	Determinación de Muestras Compósito de Caliza	61
6.3	Determinación de la Ley de Carbonato y Composición Química del Yacimiento de Calizas	69
6.4	Determinación de la Vida Operacional del Yacimiento de Caliza para la Producción de Clinker Portland Tipo I	86
VII.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	101
7.1	Determinación de la Longitud de las Muestras para Análisis Químico	101
7.2	Determinación de Muestras Compósito de Caliza	102
7.3	Determinación de la Ley de Carbonato y Composición Química del Yacimiento de Calizas	104
7.4	Determinación de la Vida Operacional del Yacimiento de Caliza para la Producción de Clinker Portland Tipo I	106

VIII.	CONCLUSIONES	108
IX.	RECOMENDACIONES	110
X.	FUENTE DE INFORMACIÓN	111
XI.	APÉNDICE	113
XII.	ANEXOS	128

## I INTRODUCCIÓN

El presente estudio “Determinación de la Calidad de Calizas del Yacimiento Cerro Palo para su empleo en la Producción de Cemento Portland Tipo I”, proporciona información sobre la composición química del yacimiento de caliza que será útil para la explotación del yacimiento y para el control de calidad de dicha materia prima que tiene influencia directa en la calidad del cemento y también proporcionará información útil para estudios geológicos del yacimiento.

La caliza es la materia prima principal utilizada para la producción de cemento que por descarbonatación del carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) entre 800 y 900 °C proporciona el óxido de calcio necesario que interviene en la formación de los cuatro compuestos principales del cemento: aluminato tricálcico ( $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ ), silicato dicálcico ( $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ), silicato tricálcico ( $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ) y aluminato ferrítico tetracálcico ( $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). Por tal motivo es necesario efectuar un estudio sobre la realidad actual del yacimiento de calizas que nos lleve a conocer con anticipación si será adecuada la calidad de la caliza del yacimiento en los contenidos de óxido de calcio ( $\text{CaO}$ ), óxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ), óxido de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), óxido de hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), óxido de magnesio ( $\text{MgO}$ ), sulfatos ( $\text{SO}_3$ ) y otros para la elaboración del Cemento Portland Tipo I, pues el desconocimiento de su composición química ocasionará una serie de dificultades, que se notarán con mayor intensidad en el diseño de mezclas crudas, en el proceso de clinkerización y en la conformidad de las especificaciones de calidad para el cemento Portland Tipo I estipuladas en las normas técnicas utilizadas en el país ASTM C 150 o NTP 334.009.

Es importante seleccionar la caliza que se va a utilizar para la producción de cemento. Esta selección debería hacerse de acuerdo a su composición química y mineralógica, pero por razones económicas y tecnológicas aún se clasifica la caliza en base a la composición química

que es la más factible de determinar por los laboratorios de la industria de cemento en el Perú, basados en métodos gravimétricos, volumétricos, fluorescencia de rayos X y otros.

## II RESUMEN

El estudio de la “Determinación de la Calidad de Calizas del Yacimiento Cerro Palo para su empleo en la Producción de Cemento Portland Tipo I”, se inicia con el muestreo del yacimiento de caliza ubicado en el departamento de Junín, provincia de Tarma cerca al poblado de Condorcocha; dicho muestreo se realiza utilizando el método de perforaciones diamantinas, a través del cual se obtienen las muestras de caliza de los puntos de muestreo (sondajes) y dichas muestras son clasificadas de acuerdo a ciertos criterios a partir de los cuales se obtuvieron 1213 muestras para el análisis químico; las que son codificadas, preparadas y luego analizadas por el método de identificación del carbonato total.

Después de obtener los resultados de los análisis de carbonato practicados a las muestras de caliza se formaron 747 muestras compósito las que son analizadas por el método de espectrometría por fluorescencia de rayos X para determinar la composición química del yacimiento de caliza.

Obtenidos los resultados de los análisis de porcentaje carbonato total y de los análisis de espectrometría por fluorescencia de rayos X de las muestras de caliza de cada punto de muestreo se determinó la composición química del yacimiento de caliza en estudio empleando promedios ponderados, obteniéndose una ley de carbonato de 91,08% y una composición química constituida por 5,54% SiO<sub>2</sub>, 1,16% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 0,59% Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 50,47% CaO, 1,51% MgO, 0,24% SO<sub>3</sub>, 0,22% K<sub>2</sub>O, 0,06% Na<sub>2</sub>O.

En el yacimiento de estudio se puede diferenciar cuatro rangos de carbonato: **Calizas de carbonato alto** (%CaCO<sub>3</sub> ≥ 90%) con una proporción de 72.32% y un contenido de MgO de

1.49%, **Calizas de carbonato intermedio** ( $75\% \leq \%CaCO_3 < 90\%$ ) con una proporción de 19,23% y un contenido de MgO de 1,56%, **Calizas de carbonato bajo** ( $60\% \leq \%CaCO_3 < 75\%$ ) con una proporción de 6,53% y un contenido de MgO de 1,67% y **Desmante** ( $\%CaCO_3 < 60\%$ ) con una proporción de 1,92% y un contenido de MgO de 1,03%

La vida operacional del yacimiento de caliza es de 158 años con 169 días si se consume todo el material constituido por calizas de carbonato: alto, intermedio, bajo y desmante y de 157 años con 172 días si se consume solo las calizas de carbonato alto e intermedio; en ambos casos para un ritmo de producción de 1 050 000 TM de clinker portland Tipo I/año.

### **III OBJETIVOS**

#### **3.1 OBJETIVO GENERAL**

Determinar la calidad de calizas del yacimiento Cerro Palo para su empleo en la producción de cemento Portland Tipo I.

#### **3.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS**

- 1) Determinar la ley de carbonato del yacimiento Cerro Palo, utilizando el análisis de carbonato total.
- 2) Evaluar la posibilidad de formar muestras compósito para la determinación de la composición química del yacimiento Cerro Palo.
- 3) Determinar la composición química del yacimiento Cerro Palo, utilizando el método de análisis de espectrometría por fluorescencia de rayos X.
- 4) Determinar la vida operacional del yacimiento Cerro Palo para la producción del clinker Portland Tipo I.

## **IV PARTE TEORICA**

### **4.1 ASPECTOS GENERALES DE LA CALIZA**

#### **4.1.1 ORIGEN DE LAS CALIZAS**

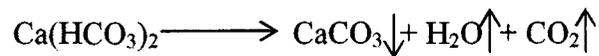
El término caliza se aplica a aquellas rocas en que la fracción carbonatada excede a los compuestos no carbonatados.

Las calizas son rocas sedimentarias que pueden ser originadas por procesos químicos, orgánicos o bioquímicos y pueden depositarse en los mares, lagos, ríos y sobre la tierra. Generalmente los depósitos de máxima extensión corresponden a los formados en el fondo del mar, aunque la condición de agua profunda no es esencial, pudiendo producirse la depositación a nivel del mar.

Las calizas pueden tener varios orígenes según se detalla a continuación:

- a) Calizas de Origen Orgánico.-** Se forman por la acumulación de esqueletos u otras partes duras de diversos grupos de animales: moluscos, corales, esponjas, equinodermos, etc.
- b) Calizas de Origen Bioquímico.-** Se forman por precipitación del carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ), debido a la actividad de algas y bacterias.
- c) Calizas de Origen Químico.-** Se forman por precipitación del carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) el que proviene del bicarbonato soluble de calcio ( $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ )

La formación de calizas de origen químico se explica mediante la siguiente reacción química:



Por ésta reacción se ve que las causas de la precipitación del carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) son producidas por la evaporación del  $\text{H}_2\text{O}$ , o la pérdida del gas  $\text{CO}_2$  no importando que la caliza en formación se encuentre en océanos, lagos o en cuencas sin acceso al mar.

Los factores que explican la precipitación química del carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) de las aguas de mar son:

**1) Eliminación del  $\text{CO}_2$  de las Aguas de Mar que Contienen Iones  $\text{Ca}^{++}$  y  $\text{HCO}_3^-$ .**- Las causas más prominentes de la eliminación del  $\text{CO}_2$  de las aguas de mar son las siguientes:

- Elevación de la temperatura del agua, disminuyendo la solubilidad del  $\text{CO}_2$ .
- Agitación del agua.
- Descenso de la presión total.

**2) Evaporación.**- Causante del aumento de la salinidad y de la pérdida de  $\text{CO}_2$  a causa de la disminución de la solubilidad del  $\text{CO}_2$ .

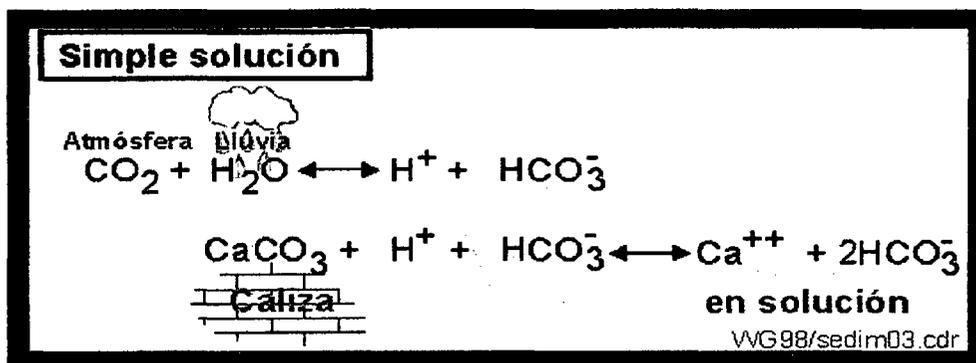
La evaporación del agua de las disoluciones de bicarbonato soluble de calcio ( $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ ) tiene lugar a gran escala en la superficie del océano y en otros cuerpos de agua y origina la precipitación de gran cantidad de carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ )

probablemente como lodo de cal. En grutas o cavernas, la evaporación del agua de las disoluciones de bicarbonato soluble de calcio ( $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ ) tiene lugar en pequeña escala, y origina los depósitos de rocas de filtro y estalagmitas.

Cada proceso que aumenta el contenido en  $\text{CO}_2$  apoya la disolución del carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ), la disminución de la cantidad de  $\text{CO}_2$  favorece la precipitación del carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) como se observa en la **Figura N° 1**.

**FIGURA N° 1**

**PRECIPITACIÓN DEL CARBONATO DE CALCIO ( $\text{CaCO}_3$ )**



Fuente : [http://plata.uda.cl/minas/apuntes/geologia general/ggcap05.htm](http://plata.uda.cl/minas/apuntes/geologia%20general/ggcap05.htm)

**4.1.2 COMPOSICION DE LAS CALIZAS**

El término composición de las calizas involucra el estudio de su composición química y mineralógica.

Desde el punto de vista químico la caliza está compuesta mayormente por óxido de calcio ( $\text{CaO}$ ) y  $\text{CO}_2$ , pudiendo tener inclusión de cantidades de óxido de magnesio ( $\text{MgO}$ ). De acuerdo a las impurezas (minerales no carbonatados y/o trazas de elementos) contenidas en la caliza, se

pueden presentar ciertos compuestos químicos como: óxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ), óxido de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), óxido de hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), óxido de sodio ( $\text{Na}_2\text{O}$ ), óxido de potasio ( $\text{K}_2\text{O}$ ), sulfatos ( $\text{SO}_3$ ) y otros (**Ver Tabla N° 1**)

Por tal motivo es muy común encontrar en la caliza una composición química que incluye  $\text{CaO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{SO}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  y otros, la cual es reportada bajo una lista de porcentajes de óxidos. El contenido de  $\text{CO}_2$  también puede ser reportado junto a la humedad propia de la caliza bajo el nombre de pérdida al fuego, pudiéndose también reportar estos datos en forma separada.

Las impurezas en las calizas varían considerablemente en tipo y cantidad, pero son importantes desde el punto de vista económico sólo si afectan la utilidad de la roca. Las impurezas (minerales no carbonatados y/o trazas de elementos) más comunes son las arcillas, cuarzo detrítico, feldespatos, material carbonaceo, restos orgánicos, los oxidados de hierro, pirita, limonita, fósforos, sulfuros y otros que pueden estar bien dispersadas a través de su formación o pueden estar reunidas sólo en las grietas o entre los estratos o como pedazos de sílice o módulos de arena, chert o pedernal libremente adentrados en la caliza, siendo esta la fuente de sílice y alúmina de mayores impurezas.

Existen también pequeñas impurezas las cuales podrían ser considerados como trazas de elementos en las piedras puras, eso posiblemente sea manganeso, cobre, titanio, sodio y potasio (como óxidos), arsénico, fluor, estroncio y otros.

**TABLA N° 1**  
**COMPOSICIÓN QUÍMICA DE CALIZAS**

<b>COMPONENTE (%)</b>	<b>CALIZA</b>	<b>CALIZA</b>
SiO <sub>2</sub>	3,76	6,75
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,10	0,71
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,66	1,47
CaO	52,46	49,80
MgO	1,23	1,48
K <sub>2</sub> O	0,18	Indicios
Na <sub>2</sub> O	0,22	Indicios
SO <sub>3</sub>	0,01	1,10
Pérdida al fuego	40,38	39,65

**Fuente :** Walter Duda. Manual Tecnológico del Cemento, pág. 2

Desde el punto de vista mineralógico la caliza está compuesta mayormente por el mineral Calcita (CaCO<sub>3</sub>) u ocasionalmente por el mineral Aragonita (CaCO<sub>3</sub>), el cual posee la misma composición química que el mineral calcita pero diferente estructura cristalina, y se encuentra solamente en los depósitos modernos o recientes. También se encuentran asociados a la caliza el mineral Dolomita (CaMg(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>) y el mineral Magnesita (MgCO<sub>3</sub>) pero en menores cantidades y otros minerales no carbonatados (impurezas que se encuentran en la caliza)

A continuación se muestra en la **Tabla N° 2** los principales minerales carbonatados que se pueden presentar en la caliza.

**TABLA N° 2**

**PRINCIPALES MINERALES QUE PUEDEN CONTENER LAS CALIZAS**

	<b>CALCITA</b>	<b>ARAGONITA</b>	<b>DOLOMITA</b>	<b>MAGNESITA</b>
<b>NOMENCLATURA</b>	CaCO <sub>3</sub>	CaCO <sub>3</sub>	CaMg(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	MgCO <sub>3</sub>
<b>DESCRIPCIÓN</b>	Mineral de alta pureza en carbonato de calcio.	La Aragonita es una forma inestable de la calcita y se encuentra por consiguiente, solo en materiales recientes.	Teóricamente está constituido por 54,2% de CaCO <sub>3</sub> y 45,8% de MgCO <sub>3</sub>	Si se encuentra el MgCO <sub>3</sub> en la caliza entre 5% á 35%, la caliza toma el nombre de Caliza Magnésiana
<b>ESTRUCTURA CRISTALINA</b>	Romboidal	Ortorrónica	Romboidal	Romboidal
<b>PESO MOLECULAR</b>	100,1	100,1	184,4	84,3
<b>GRAVEDAD ESPECIFICA</b>	2,72	2,94	2,83	3
<b>DUREZA MOHS</b>	3	2,9 - 3	3,5 - 4	3,5 - 4,5
<b>COLOR</b>	Puede ser de color transparente a blanco pero con frecuencia varia el matiz por las impurezas.	Usualmente de color blanco pero con frecuencia varía el color por las impurezas.	Usualmente de color transparente pero varía su color de rosado a bronce.	Su color varía de blanco-bronce a marrón.

**Fuente :** Elaboración propia basada en Chemistry and technology of Lime and Limestone, Robert S. Boston pág. 7, 8

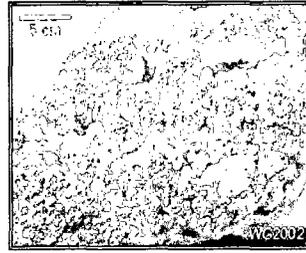
En la **Figura N° 2** se puede apreciar los minerales carbonatados: Calcita (CaCO<sub>3</sub>), Aragonita (CaCO<sub>3</sub>), Dolomita (CaMg(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>) y Magnesita (MgCO<sub>3</sub>)

## FIGURA N° 2

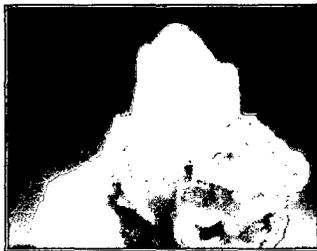
### MINERALES CARBONATADOS



(a) Calcita ( $\text{CaCO}_3$ )



(b) Aragonita ( $\text{CaCO}_3$ )



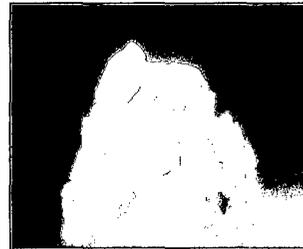
(c) Dolomita ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ )



(d) Dolomita ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ )



(e) Magnesita ( $\text{MgCO}_3$ )



(f) Magnesita ( $\text{MgCO}_3$ )

Fuente :

(a) [www.geovirtual.cl/mineral/501\\_min.htm](http://www.geovirtual.cl/mineral/501_min.htm)

(b) [www.geovirtual.cl/mineral/502\\_minaragonita.htm](http://www.geovirtual.cl/mineral/502_minaragonita.htm)

(c) [www.uned.es/cristamine/fichas/dolomita/dolomita\\_15.htm](http://www.uned.es/cristamine/fichas/dolomita/dolomita_15.htm)

(d) [www.uam.es/cultura/museos/mineralogía/especifica/mineralesAZ/dolomita/05\\_1.dolomita.htm](http://www.uam.es/cultura/museos/mineralogía/especifica/mineralesAZ/dolomita/05_1.dolomita.htm)

(e y f) [www.uned.es/cristamine/fichas/magnesita/magnesita.htm](http://www.uned.es/cristamine/fichas/magnesita/magnesita.htm)

### **4.1.3 CLASIFICACION DE LAS CALIZAS**

Las calizas se pueden clasificar por su edad, por el área de formación, por el contenido de carbonato de magnesio y por el contenido de carbonato de calcio según se detalla a continuación.

#### **4.1.3.1 POR SU EDAD**

La determinación de la edad de las calizas se hace normalmente mediante métodos paleontológicos (estudio de los restos fósiles) asignándoles las edades de los restos fósiles o mediante métodos físicos (radiocarbonos, desgaste radioactivo)

La **Tabla N° 3** contiene la terminología mundialmente aceptada en cuanto a la escala cronológica de las calizas. Cabe destacar que la caliza, la materia prima más importante para la industria del cemento, sólo se produjo, en cantidades más importantes, desde principios de la edad mesozoica. Las rocas de la misma edad, pero de lugares distintos, no tienen necesariamente características idénticas.

#### **4.1.3.2 POR EL AREA DE FORMACION**

Los ambientes sedimentarios donde se forman las calizas son: tierra firme, orilla y aguas costaneras.

En la **Tabla N° 4** se detalla cada una de las áreas de formación.

**TABLA N° 3**

**ESCALA CRONOLÓGICA DE LAS CALIZAS**

<b>ERA</b>	<b>SISTEMA Y EDAD</b>	<b>SERIE Y EPOCA</b>	<b>ETAPA Y DURACION</b>	<b>EDAD ABSOLUTA</b>
<b>CENOZOICO</b>	Cuaternario	Reciente		Últimos 10 mil años
		Pleistoceno	1 millón	Hace 1 millón de años
	Terciario	Plioceno Mioceno Oligoceno Eoceno Paleoceno	20 millones 10 millones 10 millones 15 millones 15 millones	21 – 70 millones de años
<b>MESOZOICO</b>	Cretáceo	Alto Bajo	65 millones	70 – 135 millones de años
	Jurásico	Alto Mediano Bajo	45 millones	135 – 180 millones de años
	Triásico	Alto Mediano Bajo	40 millones	180 – 220 millones de años
<b>PLEOZOICO</b>	Permiano Carbonífero Devoniano Silúrico Ordovícico Cámbrico		50 millones 80 millones 50 millones 40 millones 60 millones 100 millones	220 – 270 270 – 350 350 – 400 400 – 440 440 – 500 500 – 600 millones de años
<b>PRECAMBRICO</b>	Ultimo Precámbrico			600 – 1'100 millones de años
	Precámbrico			1'100 – 2'700 millones de años
	Rocas más antiguas			3'500 millones de años

**Fuente :** Holderbank. Seminario de cemento, Costa Rica 1990 Volumen 1.

**TABLA N° 4**

**AMBIENTES SEDIMENTARIOS DE DEPOSITOS DE MINERALES**

<b>AREA DE FORMACION</b>		<b>NOMENCLATURA</b>	<b>TIPO DE ROCA SEDIMENTARIA</b>
<b>TIERRA FIRME</b>	Lago	Lacustre	Greda Piedra caliza Marga Arcilla
	Ríos	Fluvial	Grava Arena
	Glacial	Glacial	Arcilla
	Transporte del viento	Eólico	Loess Arena de dunas
	Suelo	Residual	Bauxita Laterita
<b>ORILLA</b>	Costa Laguna	Litoral Evaporación	Arena Yeso, Anhidrita
	Banco intermedio	Nerítico	Caliza (escolla arrecifes) Arenisca Marga
<b>AGUAS COSTERAS</b>	Declive continental	Batial	Caliza Marga Arcilla
<b>MAR PROFUNDO</b>	Grieta Submarina	Abismal	Arcilla

**Fuente :** Holderbank. Seminario de cemento, Costa Rica 1990 Volumen 1.

### 4.1.3.3 POR EL CONTENIDO DE CARBONATO DE CALCIO<sup>1</sup>

La clasificación de las calizas por el contenido carbonato de calcio se presenta en la

**Tabla N° 5.**

**TABLA N° 5**

#### **CLASIFICACION DE LAS CALIZAS POR EL CONTENIDO DE CaCO<sub>3</sub>**

<b>CLASIFICACION</b>	<b>CONTENIDO DE CaCO<sub>3</sub></b>
Caliza de alto porcentaje	96 – 100%
Caliza margosa	90 – 96%
Marga calcárea	75 – 90%
Marga	40 – 75%
Marga arcillosa	10 – 40%
Arcilla margosa	4 – 10%
Arcilla	0 – 4%

**Fuente :** Walter Duda. Manual tecnológico del cemento, pág.1.

La **Tabla N° 5** contiene designaciones para las calizas que contienen arcilla y se explica a continuación : la caliza de alto porcentaje es aquella cuyo contenido de carbonato se encuentra entre <96 – 100%, a medida que la caliza va disminuyendo su porcentaje de carbonato va aumentando su contenido de arcilla y toma nombres diferentes como: caliza margosa cuyo contenido de carbonato se encuentra entre <90 – 96% y marga calcárea cuyo contenido de carbonato se encuentra entre <75 – 90%. La marga que forma el paso de transición a las arcillas, tiene un contenido de carbonato entre <40 – 75% va acompañada de sílice, productos arcillosos y óxido de fierro.

Las arcillas contienen carbonato en pequeñas proporciones y de acuerdo a su contenido toman diferentes nombres como: marga arcillosa cuyo contenido de carbonato oscila entre <10 –

---

<sup>1</sup> *Walter Duda. Manual Tecnológico del Cemento, pág.1.*

40%, arcilla margosa cuyo contenido de carbonato se encuentra entre <4 – 10% y arcilla entre [0 – 4%.

#### **4.1.3.4 POR EL CONTENIDO DE CARBONATO DE MAGNESIO<sup>2</sup>**

La caliza puede tener en su composición carbonato de magnesio y se puede clasificar como se aprecia a continuación :

- a) **Caliza de Alto Calcio.**- Es la caliza que contiene de 0% á 5% de carbonato de magnesio ( $MgCO_3$ ) como máximo.
- b) **Caliza Magnesiana.**- Es la caliza que contiene de 5% á 35% de carbonato de magnesio ( $MgCO_3$ ) como máximo.
- c) **Caliza Dolomítica.**- Es la caliza que contiene de 35% á 46% de carbonato de magnesio ( $MgCO_3$ )

#### **4.1.4 PROPIEDADES FISICAS**

Entre las propiedades de la caliza mas importantes para el presente estudio se tiene las siguientes :

##### **4.1.4.1 COLOR**

La coloración de las calizas varía de acuerdo a la presencia de impurezas.

---

<sup>2</sup> NTP. 334.11 2002 Cal y Piedra Caliza. Definiciones y Nomenclatura, pág. 8.

En la **Tabla N° 6** podemos observar algunos colores característicos de las calizas.

**TABLA N° 6**  
**COLORES CARACTERÍSTICOS DE LAS CALIZAS**

<b>COMPUESTOS Y/O MINERALES PRESENTES</b>	<b>COLOR EN CALIZAS</b>
– Calizas ricas en calcio y calizas dolomíticas (puras)	Blanco
– Impurezas carbonosas	Gris – negro
– Oxido férrico	Amarillento, rojo y pardo
– Pirita, marcasita y siderita	Rojizo
– Arcillas	Amarillo – gris oscuro

**Fuente:** Elaboración propia basada en rocas calizas, tema de ciencia y tecnología Vol.5 Cirilo Joaquín Guerrero Hernández, pág.8.

#### **4.1.4.2 TEXTURA**

La textura consiste en el tamaño, la forma y la disposición de los fragmentos rocosos que forman la caliza. La textura es una propiedad geométrica, y las expresiones: afanítica, granular, angular (brechado), redondeado, etc, son descriptivas de la textura de la caliza.

El análisis de difracción de rayos X ha revelado que todas las calizas son cristalinas. Sin embargo el tamaño, uniformidad y arreglo de la estructura cristalina o granos del mineral muy variados, forman piedras de diferente densidad y dureza.

#### **4.1.4.3 DENSIDAD**

Se define como la relación entre la masa del material y su volumen, siendo su valor usado como indicador general de la mayor o menor dificultad que pueda encontrarse para su voladura mediante explosivos.

La densidad de las calizas varía según la textura y porosidad de la roca, en condiciones de humedad la densidad puede ser  $2,242 \text{ Kg/dm}^3$  -  $2,5 \text{ Kg/dm}^3$ , la densidad real prescindiendo de los poros llenos de aire, oscila entre  $2,2$  y  $2,9 \text{ Kg/dm}^3$ .

La caliza rica en calcio tiene una densidad de  $2,65$  á  $2,75 \text{ Kg/dm}^3$  y las calizas dolomíticas de  $2,8$  á  $2,9 \text{ Kg/dm}^3$ .

#### **4.1.4.4 DUREZA**

La dureza de la caliza viene determinada por su edad geológica; cuanto más antigua es la formación tanto más dura suele ser la caliza.

La dureza de la caliza varía de  $2$  á  $3$  en la escala de dureza de Mohs, ésta es una propiedad importante en la roca de la cantera, las calizas se trabajan con bastante facilidad sino contienen minerales silicios.

La dureza y textura de los minerales que acompañan a la caliza afectan a la dureza de la roca.

#### 4.1.5 VARIEDADES DE CALIZAS<sup>3</sup>

A continuación se presenta una lista de variedades de caliza que se tiene en la naturaleza :

- a) **Caliza Bituminosa.**- Es sinónima de la caliza carbonosa y contiene material orgánico como: asfalto natural y petróleo. Esta piedra es frecuentemente negra y puede exudar un olor fétido debido a las presencia de materia orgánica.
- b) **Caliza Carbonacea.**- Es similar a la caliza bituminosa.
- c) **Caliza Calcítica.**- Es un término generalmente usado por agrónomos para expresar una piedra de alto calcio, pero esto podría traer conclusiones erróneas pues de esta connotación se puede inferir calcita pura, lo cual no es usual.
- d) **Caliza Coral.**- Es en términos generales designado a la piedra en la cual el dominante es el fósil coral.
- e) **Caliza Ferruginosa.**- Contiene hierro como una impureza y su color es amarillo rojizo.
- f) **Caliza de Alto Calcio.**- Es la caliza que contiene de 0% á 5 % de carbonato de magnesio ( $MgCO_3$ ) como máximo.
- g) **Caliza Dolomítica.**- Es la caliza que contiene de 35% a 46% de carbonato de magnesio ( $MgCO_3$ )

---

<sup>3</sup> Robert S. Boyton. *Chemestry and technology of lime and limestome*, pág. 8-12.

- h) Caliza Magnésiana.-** Es la caliza que contiene de 5% á 35% de carbonato de magnesio ( $MgCO_3$ ) como máximo.
- i) Calizas de Grado Químico.-** Es un tipo puro de calizas de alto calcio o calizas dolomíticas que son usadas por muchos en la industria de procesos químicos o donde son necesarios requerimientos químicos exactos. El contenido mínimo de carbonato total es de 95%.
- j) Coquina.-** Es un tipo de carbonato de calcio de conchas fosilíferas, encontrándose en áreas tropicales de alta pureza pero son usualmente blandas.
- k) Piedra Cemento.-** Es una caliza impura tiene un balance ideal de sílice, alúmina y carbonato de calcio, la ideal para la fabricación de cemento portland. Son rocas sedimentarias originadas por deposición simultánea de carbonato de calcio y de material arcilloso. Cuanto mas elevada su concentración en material arcilloso, tanto menos dura se presenta.
- l) Creta.-** Es una forma de carbonato de calcio fosilífero de granos finos y blandos, varia mucho en color, dureza y pureza. La creta blanca puede ser extremadamente pura de 98 á 99 % de carbonato de calcio mientras que la creta gris puede contener tanto como 20% de impurezas.
- m) Mármol.-** Es una roca de alto carbonato cristalino el cual podría ser de alto calcio o dolomítico. La pureza se nota en la variación de color y en la forma que se presenta el carbonato porque su textura permite cortarla con precisión y alisar o pulir la superficie, es usualmente muy duro y algunos tipos se aproximan a la dureza del granito.

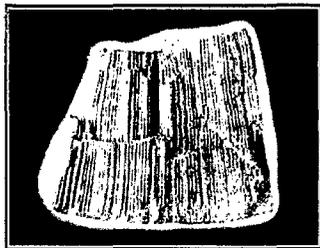


n) **Travertino.**- Es un carbonato de calcio que se originó a través de la precipitación química de fuentes naturales de agua caliente.

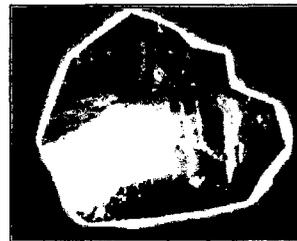
En la **Figura N° 3** podemos observar algunas de las variedades de calizas.

### FIGURA N° 3

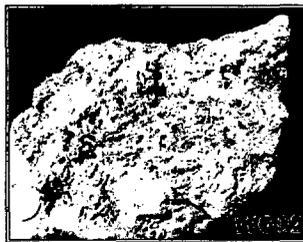
#### VARIEDADES DE CALIZAS



(a) caliza coral



(b) mármol



(c) travertino



(d) caliza ferruginosa

#### Fuente :

(a) [http://redescolar.ilce.ed.mx/redescolar/publicaciones/publi\\_rocas/calizacoralina.htm](http://redescolar.ilce.ed.mx/redescolar/publicaciones/publi_rocas/calizacoralina.htm)

(b) [http://redescolar.ilce.ed.mx/redescolar/publicaciones/publi\\_rocas/marmol.htm](http://redescolar.ilce.ed.mx/redescolar/publicaciones/publi_rocas/marmol.htm)

(c) [www.geovirtual.cl/museovirtual/031\\_2bgeo.htm](http://www.geovirtual.cl/museovirtual/031_2bgeo.htm)

(d) <http://www.montes.upm.es/Dptos/DptoSilvopascicultura/Edafologia/guia/Galeria/RocasGR/calferruginosa0.JPG>

#### 4.1.6 CALIZAS EN EL PERU<sup>4</sup>

Las calizas son los carbonatos que mas abundan en el Perú, cerca de Lima se explotan las calizas cretáceas de las formaciones de Atocongo y Chilca para la fabricación de cemento y otros usos.

En el norte, las calizas cretáceas de la formación Cajamarca se utilizan para la fabricación de cemento y cal. Piura explota la coquina para extraer carbonato de calcio y la costa de Ancash explota yacimientos de caliza santa del cretáceo inferior.

El centro del Perú tiene las calizas jurasicas condorsinga que se utilizan para elaborar cemento y las calizas cretáceas que se emplean para producir cal.

El sur del Perú es más pobre en calizas que el norte y el centro. En el departamento de Puno el cemento se elabora de las calizas cretáceas que son las más abundantes y mejores de la región.

Aunque el uso principal de la caliza es en la producción de cal y cemento, éstas también son ampliamente utilizadas en la industria siderúrgica, en la agricultura, como alimento para animales y otros usos específicos tal como se describe a continuación:

**a) Industria Siderúrgica.-** La caliza es utilizada en la industria siderúrgica como fundente y sus especificaciones varían entre los siguientes rangos: carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) 86 – 90%, óxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ) aproximadamente 5%, óxido de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )

---

<sup>4</sup> *Revista Minerales Industriales 1996. Ingemet.*

aproximadamente 5%, óxido de magnesio (MgO) aproximadamente 1%, óxido de hierro (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) aproximadamente 1,5%, azufre (S) máximo 0,05%, fósforo (P) máximo 0,05%, humedad aproximada 1%.

**b) Agricultura.-** La caliza en la agricultura se utiliza en el tratamiento de tierras para neutralizar los ácidos del suelo y añadir los nutrientes calcio y magnesio, esenciales para las plantas; la pureza de la caliza agrícola es poco importante, ya que pueden usarse con éxito cualquier material calcáreo, incluso las impuras, para enmendar los suelos, siempre que se utilice cantidad suficiente que se compra tomando como base su equivalente en óxido de calcio, ya que el contenido de óxido de calcio (CaO) y óxido de magnesio (MgO), determinan la potencia neutralizante de la caliza.

**c) Alimento Seco para Animales.-** La caliza rica en carbonato de calcio (CaCO<sub>3</sub>) pulverizada es utilizada como alimento para las aves de corral, proporciona calcio fácilmente asimilable de una manera muy económica y es el portador ideal para los otros elementos, entre ellos los oligoelementos, que constituyen un suplemento mineral. En las industrias las especificaciones exigen caliza finamente molida que pase de 100 mallas en porción de por lo menos 95 por ciento y tiene que ser lo bastante pura además de contener poca sílice y poca alúmina.

**d) Otros Usos.-** La caliza es utilizada como agregados para concreto (balastro y filler calizo), como balastro para ferrocarriles con el fin de mantener las vías en buen estado (tamaño entre ¾ y 2 ½ pulgadas de diámetro) y como piedra de relleno utilizada en la construcción de los vertederos de las presas, muelles y para rellenar los puntos bajos en terrenos o carreteras.

#### **4.1.7 DEFINICION GEOLÓGICA E INDUSTRIAL DE LA CALIZA**

- a) **Definición Geológica.**- La caliza es una roca sedimentaria que principalmente consiste del mineral calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) y se puede presentar bajo las siguientes formas: mármol, creta, travertino, coral, marga, cada uno de los cuales poseen propiedades físicas distintas.
- b) **Definición Industrial.**- Para el presente estudio la caliza es la materia prima principal utilizada en la producción de cemento que por descarbonatación del carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) entre  $800^\circ\text{C}$  y  $900^\circ\text{C}$  proporciona el óxido de calcio ( $\text{CaO}$ ) necesario que interviene en la formación de los cuatro compuestos principales del cemento: aluminato tricálcico ( $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ ), silicato dicálcico ( $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ), silicato tricálcico ( $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ) y aluminoferrito tetracálcico ( $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ )

#### **4.2 CARACTERISTICAS DEL YACIMIENTO DE CALIZA**

Para iniciar la determinación de la calidad de calizas del yacimiento Cerro Palo a continuación se estudian los siguientes puntos :

##### **4.2.1 UBICACIÓN DEL YACIMIENTO**

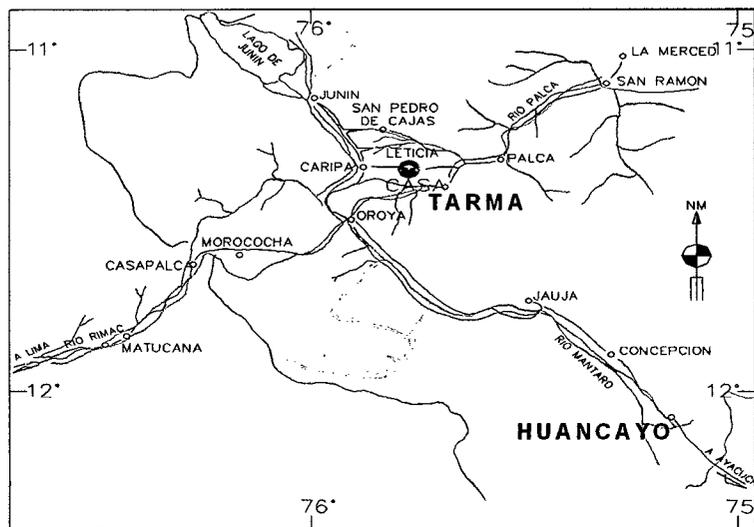
El yacimiento de caliza Cerro Palo se ubica en el departamento de Junín, provincia de Tarma, cerca al poblado de Condorcocha, a una altura de 3980 m.s.n.m con coordenadas geográficas de Latitud  $11^\circ 22' 23''$  sur y Longitud  $75^\circ 17' 40''$  Oeste (**Ver Figura N° 4**)

El acceso al yacimiento es por vía carretera central y se describe a continuación :

- Lima – Oroya 188 Km de carretera asfaltada.
- Oroya – Cruce Caripa 26 Km de carretera asfaltada.
- Caripa – yacimiento 12 Km de carretera afirmada.

**FIGURA N° 4**

**UBICACIÓN DEL YACIMIENTO DE CALIZA CERRO PALO**



**Fuente : Cemento Andino S.A.**

**4.2.2 CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS**

Las características geológicas que presentan las reservas anteriormente probadas del yacimiento de caliza Cerro Palo son las siguientes :

- a) **Geología Regional y Local.-** Regionalmente en el área afloran rocas que datan desde las edades del Pre-cambriico, Paleozoico, Mesozoico y Cenozoico. El área de exploración local está constituida principalmente por una serie de rocas carbonatadas del Grupo Pucará de la edad del Mesozoico, estas rocas pertenecen a la Formación Chambará que están en el Grupo Pucará.

Las rocas del Grupo Pucará del Mesozoico están constituidas por las formaciones Chambará, Aramachay y Condorsinga.

Las rocas del grupo Pucara son las que más abundan en la zona se componen de una secuencia de calizas, calizas dolomíticas y dolomitas, con intercalaciones de lutitas, margas, limonitas, areniscas. Estas calizas tienen una coloración especial que van del gris claro, gris oscuro hasta el color negro, presentan estratificación delgada a mediana y característicamente contienen nódulos de “Chert”, en forma de nódulos, lentes y bandas. Se le asigna una edad entre el Triásico Superior – Jurásico Inferior.

**b) Geología Estructural.-** Dentro del yacimiento Cerro Palo se pueden encontrar fallas y crestas estructurales causantes de la perturbación de las estructuras del yacimiento, las fallas principales son longitudinales de origen tectónico estas se han hallado en todos los tajos de Cerro Palo y afloran en la superficie.

Falla es una estructura en la cual se ha realizado una ruptura y habido un desplazamiento entre dos bloques que en un inicio formaban una unidad.

**c) Litología.-** Es el estudio de las rocas de acuerdo a su textura y color.

En el área de estudio se han determinado cuatro unidades litológicas :

– **Cuaternalio Coluvial.-** Esta unidad está compuesta de material inconsolidado de fragmento de caliza y arcilla calcárea, hacia el sector oeste es más silíceo por encontrarse en éste sector las calizas silíceas.

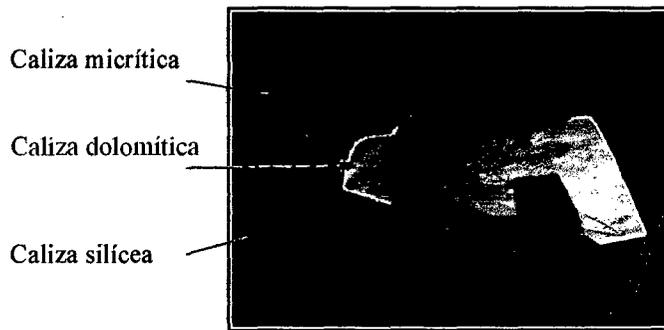
Hacia el sector NE el material coluvial está cubierto por una vegetación de tipo “cactus”, posiblemente debido al contenido dolomítico, lo que no ocurre en otros sectores. En cuanto al espesor coluvial es variable desde pocos centímetros hasta más o menos 3 metros.

- **Caliza Silícea.**- Esta unidad se encuentra en la parte superior del paquete sedimentario de la zona con una potencia de 0,40 m a 1,00 m de caliza silícea de color gris claro de grano fino a medio con moderadas a esporádicas venillas de calcita con núcleos de sílice. Una de las características principales de estas calizas son las protuberancias en su superficie resultado de la erosión diferencial.
  
- **Caliza Micrítica.**- Esta unidad está conformada por calizas de color gris oscuro de grano fino a medio, con moderada a abundante venillas de calcita, en algunas capas encontramos esporádicos núcleos de sílice; también presentan formación de geodas de calcita y la existencia de algunas cavernas productos de la disolución de la roca por la filtración de agua por las fracturas.
  
- **Caliza Dolomítica.**- Esta unidad de caliza dolomítica es de color gris parduzco de grano fino a medio con presencia de venillas de calcita, también presentan intercalaciones de calizas silíceas y algunas capas de 0,50 m de arcillas calcáreas.

En la **Figura N° 5** se puede observar tres unidades litológicas del yacimiento Cerro Palo.

## FIGURA N° 5

### UNIDADES LITOLÓGICAS DEL YACIMIENTO CERRO PALO



**Fuente :** Cemento Andino S.A.

#### 4.2.3 CARACTERÍSTICAS CLIMATOLÓGICAS

El clima de ésta zona es generalmente frígido, presenta 2 etapas definidas, el invierno que va entre los meses de diciembre a marzo y parte de abril y el verano entre los meses de abril a octubre con la presencia de sequías y fuertes heladas.

La temperatura promedio es de 8°C á 12°C durante el día y de 2°C á 5°C por las noches.

#### 4.2.4 RECURSOS

El yacimiento presenta una vegetación característica de las zonas andinas de climas fríos, podemos encontrar: el ichu, musgo, líquenes, pasto silvestre y otras plantas características de la zona andina.

Para el desarrollo del presente estudio básicamente se utilizaron los recursos agua y energía eléctrica proporcionados por Cemento Andino S.A.

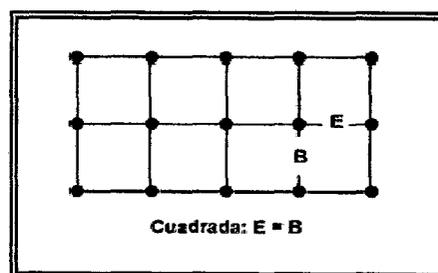
### 4.3 MUESTREO DEL YACIMIENTO DE CALIZA

Es importante conocer algunos términos que involucran el muestreo del yacimiento de caliza como :

- a) **Muestreo.**- Es el proceso de obtención de una fracción de un material con objeto de que represente o proporcione información de una cantidad mayor del mismo para ello es necesario la identificación del método de muestreo adecuado que cumpla con el objetivo de estudio.
- b) **Muestra Representativa.**- Muestra colectada de tal manera que cada partícula muestreada del lote es igualmente representada en la muestra bruta o en la muestra dividida.
- c) **Malla Cuadrática.**- Es la forma en que se distribuyen los puntos de muestreo cuya característica principal es tener igual longitud de separación entre puntos de muestreo (Ver Figura N° 6)

FIGURA N° 6

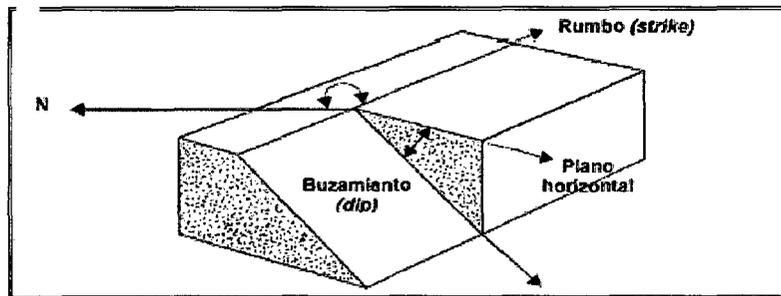
#### MALLA CUADRÁTICA DE PERFORACIÓN



Fuente : Elaboración propia.

d) **Buzamiento y Rumbo.**- El término buzamiento se refiere al grado de inclinación de la capa rocosa con respecto a la horizontal en un lugar determinado. La línea recta perpendicular al buzamiento determina la dirección que también se llama rumbo (Ver Figura N° 7)

**FIGURA N° 7**  
**IDENTIFICACIÓN DE RUMBO Y BUZAMIENTO**



**Fuente :** Manual práctico de voladura. Exsa S.A. capítulo 5, Pág. 66

Conocidos los términos anteriormente mencionados pasamos al estudio de los métodos de muestreo.

#### **4.3.1 MÉTODOS DE MUESTREO**

Los métodos de muestreo usados para la toma de muestras varían de acuerdo con las características propias del yacimiento, los métodos más comunes son: el método manual, el método auger y el método de perforaciones diamantinas.

a) **Método Manual.**- Este método consiste en hacer pozos de un metro cuadrado por una longitud H de profundidad. Económicamente para huecos poco profundos es factible (profundidad no mayor a 10m)

**b) Método Auger.-** Este método consiste en obtener muestras trituradas por medio de un gusano helicoidal que es accionado por un sistema hidráulico. El sistema muestreador está compuesto por una cabeza de perforación y por el gusano helicoidal.

A medida que la cabeza de perforación penetra en el interior del suelo todo el material arrancado va siendo arrastrado hasta la superficie del gusano helicoidal, la muestra obtenida se recoge y luego se clasifica.

**c) Método de Perforaciones Diamantinas.-** Es también llamado método de perforaciones con taladros huecos según la norma técnica peruana NTP 334.112 2002 (apartado 8.3.2)

Es un método mecánico aplicable para el muestreo de grandes cantidades de material de dureza determinada y es preferible con respecto al muestreo manual ya que no presenta dificultades para obtener una muestra representativa para el análisis químico, eliminando el sesgo en el muestreo.

En estudios geológicos emplean este método de muestreo para obtener información geológica de mucho valor como estructuras y rasgos geológicos de la mineralización: plegamientos fallas, diseminaciones, inclinación de las capas y sus longitudes, textura de la mineralización, tipos de roca (litología), etc.

El método consiste en obtener muestras o testigos de forma cilíndrica por medio de perforación rotativa con un sacatestigo y con una broca de acero o diamante.

El sistema está constituido principalmente por un accionamiento hidráulico que es el generador del movimiento rotativo de la cabeza de perforación siendo esta una especie de

mordaza, ajustable por unos pernos que tiene en su interior un hueco cilíndrico donde se coloca los tubos portatestigos.

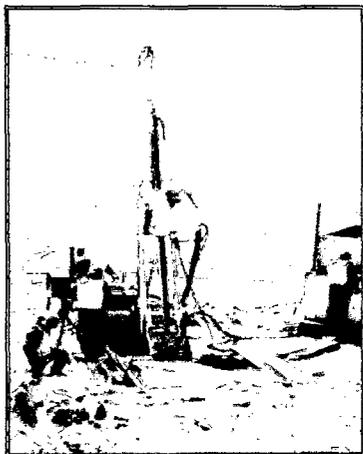
Los tubos portatestigos son dos tubos concéntricos. El tubo interior es el que recoge la muestra y el exterior es el que realiza el accionamiento de la roca de perforación.

La broca de perforación puede ser de un material de acero o de diamante y está conectada al tubo exterior de perforación. En este método a medida que la broca se introduce en el suelo la muestra arrancada va ascendiendo por el núcleo del tubo interior.

En la **Figura N° 8** se observa la perforadora de diamantinas en operación y en la **Figura N° 9** el yacimiento Cerro Palo.

**FIGURA N° 8**

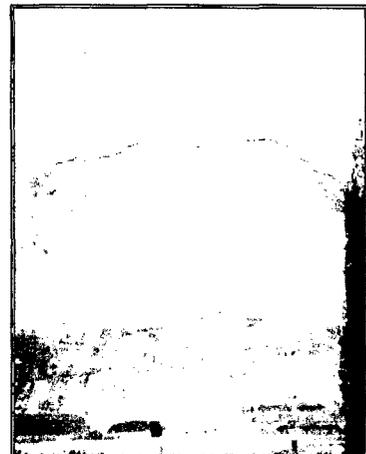
**PERFORADORA DE DIAMANTINAS**



**Fuente :** Elaboración propia.

**FIGURA N° 9**

**YACIMIENTO CERRO PALO**



**Fuente :** Elaboración propia.

En la **Tabla N° 7** podemos encontrar las características influyentes en la elección del método de muestreo.

**TABLA N° 7**

**CARACTERÍSTICAS INFLUYENTES EN LA ELECCIÓN DEL METODO DE MUESTREO**

<b>METODO DE PREFORACIONES DIAMANTINAS</b>	<b>METODO AUGER</b>	<b>METODO MANUAL</b>
<p>Este método de muestreo tiene un costo elevado de obtención de muestras con respecto a los otros dos métodos pero tiene las siguientes características que lo hacen ideal:</p> <p>Se puede controlar el avance de la perforación cada 50 cm de profundidad y se puede lograr longitudes profundas de perforación sin riesgo a producir derrumbes.</p> <p>La perforadora diamantina permite operar sobre el material calizo rocoso del yacimiento Cerro Palo sin dificultades permitiendo agilizar la ejecución de perforaciones.</p> <p>No se requiere de un excesivo esfuerzo humano para la ejecución de las perforaciones pero sí se necesita de personal calificado para el manejo del equipo de perforación.</p> <p>Se descarta la posibilidad de contaminación de la muestra.</p> <p>Se puede obtener una muestra 100% representativa.</p> <p>Se puede adaptar al sistema muchos modelos de brocas</p>	<p>Este método de muestreo tiene características favorables pero también inconvenientes que lo hacen inadecuado:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Se puede lograr longitudes profundas de perforación sin riesgo a producir derrumbes, pero cuando se requiere extraer el sistema de perforación del subsuelo, existe la tendencia a quedar atrancado.</li> <li>- Excesivo desgaste de las aletas helicoidales del gusano por operar en material calizo rocoso provocando un constante cambio de las mismas.</li> <li>- No se requiere de un excesivo esfuerzo humano para la ejecución de las perforaciones ya que el equipo de perforación es bastante simplificado y de fácil manejo pero sí se necesita personal calificado para el manejo del equipo.</li> <li>- Posibilidad de contaminación de la muestra con desprendimientos laterales ya que en algunas zonas de la cantera existen filtraciones y en otras material deslizable y prácticamente lo vuelven inadecuado.</li> <li>- Total recuperación de muestras.</li> </ul>	<p>Este método de muestreo presenta los siguientes inconvenientes que lo hacen inadecuado:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- El método consiste en hacer pozos, pero para profundidades mayores de 10 m es muy riesgoso e incómodo pudiéndose producir derrumbes.</li> <li>- El yacimiento de caliza a muestrear está constituido de material rocoso, la dureza de la caliza dificulta y provoca demasiada lentitud en la ejecución de pozos.</li> <li>- Se requiere de un excesivo esfuerzo humano para la ejecución de pozos.</li> <li>- Posibilidad de contaminación de muestras si no se tiene el debido cuidado en la obtención de ellas.</li> <li>- A diferencia de los otros dos métodos de muestreo cuando se termina la etapa de muestreo en este método se tiene necesidades de rellenar los huecos totalmente para evitar trampas y que se produzcan accidentes.</li> <li>- En algunas zonas del yacimiento existen filtraciones de agua que imposibilitan hacer huecos.</li> </ul>

**Fuente :** Elaboración propia.

Se escogió el uso del método de perforaciones diamantinas porque además de sus características favorables garantiza que se proporcione al final del estudio los siguientes resultados :

- Composición química de las materias que forman el yacimiento.
- Conocimiento de la estructura geológica actual del yacimiento.
- Localización de las zonas que contengan elementos que no son apropiados para la elaboración de cemento.
- Conocimiento del estéril que tenga que quitarse del yacimiento.
- Cálculo de las reservas.

#### **4.4 ESPECTROMETRIA POR FLUORESCENCIA DE RAYOS X PARA EL ANÁLISIS DE CALIZAS**

En la industria del cemento una alternativa de análisis para el control, es el método instrumental de espectrometría por fluorescencia de rayos X, que contribuye al control de calidad, control del proceso y a la investigación.

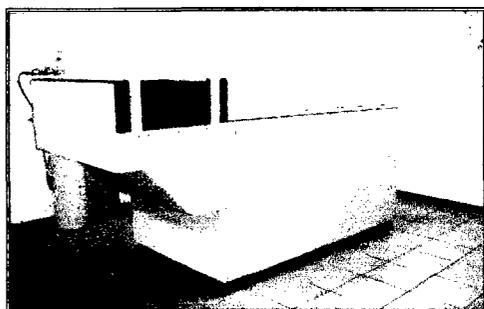
Como aplicación en la investigación nuestro estudio utiliza el método instrumental de espectrometría por fluorescencia de rayos X para determinar el contenido de óxido de calcio (CaO), óxido de silicio (SiO<sub>2</sub>), óxido de aluminio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), óxido de hierro (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), óxido de magnesio (MgO), sulfatos (SO<sub>3</sub>), óxido de sodio (Na<sub>2</sub>O) y óxido de potasio (K<sub>2</sub>O) en las muestras de caliza (materia prima utilizada para la producción de cemento), de manera rápida y precisa a diferencia de los métodos clásicos que requieren un tiempo largo para el análisis.

Los análisis de espectrometría por fluorescencia de rayos X cubren el siguiente rango de energía  $E = 0,11- 60 \text{ KeV}$  y longitud de onda de  $\lambda = 11,3 - 0,02 \text{ nm}$ . Los fotones de rayos X se caracterizan por la longitud de onda y una energía los cuales están relacionados por la siguiente ecuación:  $\lambda \text{ (nm)} = 12,4 / E \text{ (keV)}$

El equipo utilizado para el análisis es un espectrómetro XRF secuencial SRS 3000 (SIEMENS) (Ver Figura N° 10) calibrado con muestras estándar de calizas y cuenta con un sistema que puede portar 58 muestras para ser analizadas de acuerdo a como lo requiera el operador, de manera que cada muestra seleccionada ingresará al equipo, accionada por un brazo robot (Ver Figura N° 11)

**FIGURA N° 10**

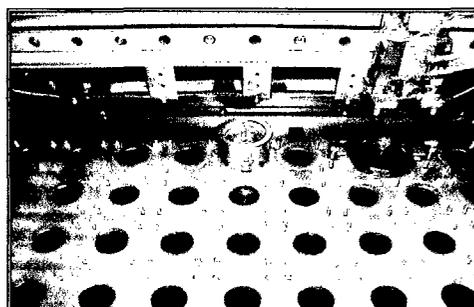
**VISTA EXTERNA DEL EQUIPO**



**Fuente :** Elaboración propia.

**FIGURA N° 11**

**PORTAMUESTRAS**



**Fuente :** Elaboración propia.

Toda orden para el análisis desde su inicio hasta obtener el resultado se da por intermedio de una computadora conectada con el equipo de análisis XRF SRS 3000 y por medio de un programa se puede realizar y controlar el análisis.

Para lograr resultados confiables la calibración del equipo (espectrómetro) es importante, consiste en establecer curvas de calibración con muestras estándar de caliza, en donde se corrige

el efecto matriz (efectos Inter-elementos y de absorción) por medio de modelos de corrección y se mide las intensidades netas permitiendo calcular de esta manera la concentración de los componentes de las muestras de caliza en estudio.

Es importante mencionar que para muestras estándares de caliza se mide intensidades, mientras que para muestras de caliza desconocidas se calcula las concentraciones basado en la curva de calibración hecha con los estándares.

A continuación en la **Tabla N° 8** se presentan las ventajas y desventajas del método de espectrometría por fluorescencia de rayos X.

**TABLA N° 8**  
**VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL METODO DE ESPECTROMETRIA POR FLUORESCENCIA DE RAYOS X**

<b>METODO DE ESPECTROMETRIA POR FLUORESCENCIA DE RAYOS X</b>	
<b>VENTAJAS</b>	<b>DESVENTAJAS</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Es un método no destructivo de la muestra, característica que no poseen la mayoría de otras técnicas de análisis elemental.</li> <li>- Tiene una precisión elevada comparable con la obtenida por los procedimientos rutinarios en análisis químicos.</li> <li>- Velocidad y comodidad del procedimiento que permite realizar un análisis multielemental en pocos minutos.</li> <li>- Este método permite ser operado con poco personal, el cual debe estar capacitado.</li> <li>- Usada para la identificación cualitativa y cuantitativa de elementos con <math>Z &gt; 8</math>.</li> <li>- El límite de determinación se extiende desde el orden de alguna parte por millón hasta el 100 % en la mayoría de los elementos químicos, teniendo como límite inferior el elemento boro.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Se necesita de patrones de calibrado también llamados muestras estándares de caliza para preparar curvas de calibración de los diferentes elementos de interés para eliminar el efecto matriz.</li> <li>- Como la precisión de este método depende en buen grado de los patrones de calibrado es necesario que estos y las muestras de caliza que serán analizadas se parezcan lo más posible en mineralogía.</li> <li>- Por este método sólo se pueden comparar calizas de mineralogía similar.</li> <li>- El tamaño de partícula de las muestras de caliza a analizar debe ser el adecuado para evitar que se produzca el efecto matriz.</li> </ul>

**Fuente :** Douglas A. Skoog. Principios de análisis instrumental, quinta edición, pág.314.

Para nuestro estudio las desventajas del método espectrometría por fluorescencia de rayos X son superadas ya que se cuenta con muestras estándar de caliza para la calibración del equipo y con un pulverizador de muestras que permite obtener el tamaño de partículas adecuado para el análisis.

#### **4.5 INFLUENCIA DE LOS COMPUESTOS QUÍMICOS DE LA CALIZA EN EL CEMENTO PÓRTLAND TIPO I**

Se presenta en la **Tabla N° 9** los compuestos químicos que se controlan en la caliza, por los efectos que pueden ocasionar en el producto principal “cemento”.

#### **4.6 ASPECTOS GENERALES DEL CEMENTO PÓRTLAND TIPO I**

##### **4.6.1 DEFINICIÓN DE CEMENTO PORTLAND TIPO I**

Es un producto obtenido por la pulverización del clinker portland Tipo I con la adición de yeso (sulfato de calcio) que al mezclarse con agua ya sea sólo o en combinación con arena, piedra u otros materiales similares, tiene la propiedad de reaccionar lentamente hasta formar una masa endurecida.

Las propiedades del cemento portland Tipo I se han normalizado y debe cumplir con los requisitos indicados en la Norma ASTM C 150 o NTP 334.009 para asegurar al consumidor una buena y constante calidad del producto. En el **Anexo N° 1** se aprecian los requisitos químicos necesarios que debe cumplir el cemento Portland Tipo I.

**TABLA N° 9**

**INFLUENCIA DE LOS COMPUESTOS QUÍMICOS DE LA CALIZA EN EL CEMENTO**

COMPUESTO QUIMICO	INFLUENCIA
<b>CaO</b>	Responsable de la formación de los compuestos importantes en el cemento: aluminato tricálcico ( $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ ), silicato dicálcico ( $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ), silicato tricálcico ( $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ) y alumino-ferrito tetracálcico ( $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ ).
<b>SiO<sub>2</sub></b>	Responsable de la formación de los compuestos silicato tricálcico ( $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ) y silicato dicálcico ( $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ) que proporcionan las resistencias mecánicas del cemento endurecido.
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	Son los fundentes aportadores de la fase líquida en la formación del clinker y facilitan las reacciones entre la sílice y la cal. Responsables de la formación del aluminato tricálcico ( $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ ) (reacción entre el CaO y $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) y de la formación del alumino-ferrito tetracálcico ( $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) (reacción entre el CaO, $\text{Al}_2\text{O}_3$ y $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ).
<b>MgO</b>	Por lo general el óxido de magnesio se encuentra en la caliza como Dolomita ( $\text{CaCO}_3\cdot\text{MgCO}_3$ ). De acuerdo a la norma ASTM C 150 la cantidad de MgO en forma de periclasa máxima permitida en el clinker es 6 %. La periclasa se transforma con agua en $\text{Mg}(\text{OH})_2$ pero la reacción discurre lentamente, cuando las restantes reacciones de endurecimiento han concluido, como el $\text{Mg}(\text{OH})_2$ adquiere mayor volumen que el MgO en el punto en que esta situado la periclasa puede hacer saltar la estructura de cemento endurecido y originar grietas (expansión).
<b>SO<sub>3</sub></b>	La mayor cantidad de este elemento proviene del yeso que de la caliza. Si se añade demasiado se corre el peligro que se presente expansiones en el cemento endurecido. De acuerdo a la norma ASTM C 150 limita el contenido de $\text{SO}_3$ a un máximo el cual está en relación con el contenido de aluminato tricálcico. Si $\text{C}_3\text{A}$ es $\leq 8\%$ 2,5 % máx. $\text{SO}_3$ Si $\text{C}_3\text{A}$ es $\geq 8\%$ 3 % máx. $\text{SO}_3$
<b>Na<sub>2</sub>O y K<sub>2</sub>O</b>	Por la capacidad de reaccionar con determinados compuestos presentes en algunos agregados (piedra y arena) concentraciones por encima de los límites máximos de los elementos $\text{Na}_2\text{O}$ y $\text{K}_2\text{O}$ en el cemento, da origen a la expansión con destrucción del concreto. Razón por la cual en la norma ASTM C 150 referente a requisitos químicos del cemento el límite máximo de álcalis totales, expresados como $\text{Na}_2\text{O}$ es 0,60%.

**Fuente :** Elaboración propia, basada en Manual tecnológico del cemento, Walter Duda y Norma ASTM C 150.

## **4.6.2 CARACTERISTICAS DEL CEMENTO PÓRTLAND TIPO I**

### **4.6.2.1 FINURA**

La fineza de un cemento es función del grado de molienda del mismo y está expresado en términos de superficie específica contenida en un gramo de cemento.

### **4.6.2.2 FRAGUADO**

Es el periodo que necesita una mezcla en proporciones determinadas de agua y cemento para adquirir una dureza previamente fijada.

La fragua puede estar influida principalmente por cuatro variables: el contenido de sulfatos ( $\text{SO}_3$ ), el contenido de aluminato tricálcico ( $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ ), el grado de finura y la temperatura en la molienda.

### **4.6.2.3 RESISTENCIA**

Es la propiedad física que define la capacidad del cemento para soportar los esfuerzos a la tracción y compresión, está expresado en términos de  $\text{Kg-f/cm}^2$ .

Los principales compuestos productores de resistencia en el cemento portland son : aluminato tricálcico ( $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ ), silicato dicálcico ( $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ), silicato tricálcico ( $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ) y aluminato ferrítico tetracálcico ( $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ ).

#### 4.6.2.4 COMPOSICION

La composición química del cemento esta dada de la siguiente manera :

- a) Componentes principales:  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ .
- b) Componentes secundarios<sup>1</sup>:  $\text{MgO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{SO}_3$ ,  $\text{MgO}$ , cal libre y residuo insoluble.
- c) Componentes secundarios<sup>2</sup>:  $\text{Mn}_2\text{O}_3$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{TiO}_2$ .

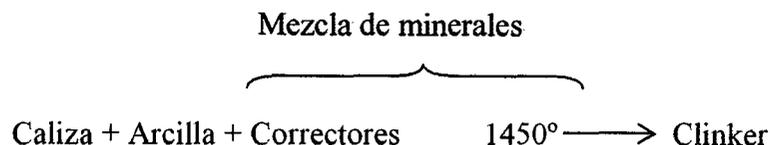
La composición mineralógica está constituida por :

- a) Silicato Tricálcico:  $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ , también llamado  $\text{C}_3\text{S}$ .
- b) Silicato Dicálcico:  $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ , también llamado  $\text{C}_2\text{S}$ .
- c) Alumino-ferrito Tetracálcico:  $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ , también llamado  $\text{C}_4\text{AF}$ .
- d) Aluminato Tricálcico:  $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ , también llamado  $\text{C}_3\text{A}$ .

#### 4.6.3 CLINKER PÓRTLAND TIPO I COMPOSICION Y MODULOS DE CONTROL

##### 4.6.3.1 CLINKER PORTLAND TIPO I

La fabricación del clinker involucra la conversión a altas temperaturas de una mezcla de minerales de origen natural en una nueva mezcla de minerales con propiedades hidráulicas.

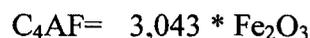
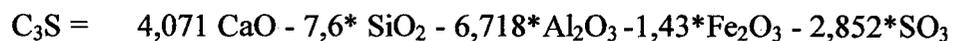


Porque la materia sólida reacciona con gran dificultad su preparación, antes del quemado, es de gran importancia.

#### 4.6.3.2 COMPOSICION DEL CLINKER TIPO I

R.H. Bogue desarrollo un proceso de cálculo según el cual, a partir del análisis químico, se calcula el contenido de minerales. Estas formulas se basan en las siguientes suposiciones :

- a) Equilibrio químico durante la clinkerización.
- b)  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$  se transforman completamente en silicato tricálcico ( $\text{C}_3\text{S}$ ), silicato dicálcico ( $\text{C}_2\text{S}$ ), aluminato tricálcico ( $\text{C}_3\text{A}$ ), alumino-ferrito tetracálcico ( $\text{C}_4\text{AF}$ )
- c) Minerales puros (no se incorporan componentes menores tales como álcalis. Tierras de alcali  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Mn}_2\text{O}_3$ ,  $\text{V}_2\text{O}_5$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ )
- d) Se deja de lado otros minerales como: cal libre ( $\text{CaO}$  libre) y periclasa ( $\text{MgO}_2$ )



#### 4.6.3.3 MODULOS DE CONTROL

Son valores obtenidos por cálculo a partir de datos de composición química, que determinan las proporciones de los constituyentes principales de porcentaje de  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , siendo estos el grado de saturación por la cal, módulo de silicatos y módulo de alúmina (módulo de fundentes)

$$L_{SF} = 100 * CaO / (2,85 * SiO_2 + 1,18 * Al_2O_3 + 0,65 * Fe_2O_3)$$

$$M.S. = SiO_2 / (Al_2O_3 + Fe_2O_3)$$

$$M.A. = Al_2O_3 / Fe_2O_3$$

Rangos validos combustible = Petróleo

$$L_{sf} = < 90 - 100 >$$

$$M.S = < 1,8 - 3,6 >$$

$$M.A = < 1 - 3,0 >$$

#### 4.6.4 MATERIAS PRIMAS

Para fabricar cemento portland Tipo I sirven sustancias minerales, que contienen los componentes principales del cemento: óxido de calcio (CaO), sílice (SiO<sub>2</sub>), alúmina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) y óxido de fierro (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Estos componentes se encuentran raramente en proporciones deseadas en una sola sustancia. Por lo tanto la mayoría de veces se ha de elegir la mezcla de un componente rico en cal (componente calcáreo) con otro pobre en cal pero que contiene más alúmina y óxidos de fierro (componente arcilloso) y posiblemente un corrector más que contenga la cantidad suficiente de uno de los componentes que hacen falta para la producción de clinker de cemento.

##### 4.6.4.1 COMPONENTES CALCAREOS

Son rocas que tienen un porcentaje mayor al 75% de carbonato de calcio (CaCO<sub>3</sub>) pudiendo proceder de cualquier formación geológica y se pueden tomar en consideración: caliza, caliza margosa, greda, caliza coralífera, mármol, caliza de concha.

#### 4.6.4.2 COMPONENTES ARCILLOSOS

Segunda materia prima de importancia para la producción de cemento. Consisten en minerales que contienen sílice ( $\text{SiO}_2$ ), aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) y óxido de hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). Los materiales arcillosos más comunes son: la marga, marga arcillosa, arcilla margosa, arcilla y esquisto.

En la **Tabla N° 10** podemos observar la composición química de algunos componentes arcillosos.

**TABLA N° 10**

#### ANÁLISIS QUÍMICO DE COMPONENTES ARCILLOSOS

	<b>ESQUISTOS</b>	<b>MARGA</b>	<b>ARCILLA</b>
Pérdida al fuego	5,3	32,2	12,5
$\text{SiO}_2$	64,1	22,7	45,9
$\text{Al}_2\text{O}_3$	13,6	3,9	23,9
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	6,1	2,4	15,5
$\text{CaO}$	1,8	32,9	0,72
$\text{MgO}$	2,9	3,3	0,33
$\text{SO}_3$	0,03	0,95	0,03
$\text{K}_2\text{O}$	2,7	0,59	0,01
$\text{Na}_2\text{O}$	1,9	0,19	0,11

**Fuente :** Holderbank. Seminario de cemento, Costa Rica 1990 Volumen I.

#### 4.6.4.3 COMPONENTES CORRECTORES

Los componentes correctores se añaden en los casos en que las materias primas disponibles no contienen la cantidad suficiente de uno de los químicos necesarios en el crudo. Así por ejemplo se aplica arena como material adicional para elevar el contenido de sílice ( $\text{SiO}_2$ ). Si carecen de los suficientes óxidos de hierro se utilizan como correctores minerales de hierro ó fierro.

Los materiales correctores más comunes son: caliza de alto grado (para CaO), cuarzo (para SiO<sub>2</sub>), bauxita (para Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) y los minerales de hierro o ceniza de pirita (para Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)

#### **4.6.5 SELECCIÓN DE LA CALIZA PARA LA PRODUCCIÓN DE CEMENTO**

Los factores determinantes para la selección del tipo de caliza son :

- a) Composición química y mineralógica (si es factible)
- b) Influencia sobre el proceso de quemado (clinkerización)
- c) Influencia sobre la calidad del cemento.
- d) Posibilidad económica de suministro.

La selección de esta materia prima teniendo en cuenta su composición química aparte de controlar el contenido de los óxidos principales (óxido de calcio, óxido de sílice, óxido de aluminio y óxido de fierro) nos ayudará a controlar el contenido de los componentes limitantes (óxido de magnesio, sulfatos, óxido de sodio y óxido de potasio) pues algunas calizas presentan altas concentraciones en uno de estos compuestos y por lo tanto deberán ser separadas ya que afectan el producto final (cemento); la selección de la caliza nos ayudará también a prevenir en cuanto al contenido de óxido de calcio (CaO) el que debe ser adecuado para que durante el proceso de clinkerización no se produzca una falta o exceso de óxido de calcio y también ayudará a prevenir si se requiere o no adicionar materiales correctores para proporcionar una adecuada mezcla cruda para la producción de clinker.

A continuación en la **Tabla N° 11** se presentan rangos para establecer la categoría de los componentes del material calcáreo para la elaboración de cemento.

**TABLA N° 11**

**RANGOS PARA ESTABLECER LA CATEGORÍA DE LOS COMPONENTES DEL MATERIAL CALCAREO**

COMPONENTE	CATEGORIA			
	MUY BAJO	BAJO	MEDIO	ALTO
% CaCO <sub>3</sub>	0 - 60	60 - 75	75 - 90	>90
% SiO <sub>2</sub>	0 - 3	3 - 7	7 - 15	>15
% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0 - 1,2	1,2 - 2,0	2,0 - 4,0	>4,0
% Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,0 - 0,5	0,5 - 1,0	1,0 - 2,0	>2,0
% CaO	0 - 30	30 - 40	40 - 50	>50
% MgO	0,0 - 1,0	1,0 - 3,0	3,0 - 7,0	>7,0
% SO <sub>3</sub>	0,00 - 0,04	0,04 - 0,15	0,15 - 0,20	>0,20
% K <sub>2</sub> O	0,00 - 0,25	0,25 - 0,50	0,50 - 0,75	>0,75
% Na <sub>2</sub> O	0,00 - 0,05	0,05 - 0,10	0,10 - 0,15	>0,15

**Fuente :** Cemento Andino S.A.

**4.6.6 PROCESO DE PRODUCCIÓN DEL CEMENTO PÓRTLAND TIPO I**

La caliza extraída de la cantera es llevada a la chancadora primaria donde es triturada por presión, reduciendo su tamaño desde un máximo de 1,2 metros hasta 17 - 18 cm. La caliza, material arcilloso y material correctivo (si fuera necesario) son triturados por medio de una chancadora secundaria hasta una granulometría de 5 - 6,5 cm, seguidamente son dosificados de acuerdo a su calidad, se mezclan y muelen hasta su reducción a polvo fino y se obtiene el producto llamado crudo o harina cruda.

Esta harina cruda es homogeneizada y luego alimentada por el extremo superior del precalentador, pasando a través de ciclones donde se calienta por acción de los gases generados en el quemador del Horno iniciándose de ésta manera el proceso de descarbonatación (entre 800°C y 900°C)

El crudo descarbonatado ingresa al Horno rotatorio y por efecto del calor generado por la combustión del carbón o del petróleo sufre transformaciones físicas y químicas. Entre 1200°C y 1450°C se producen las reacciones químicas entre los constituyentes de la mezcla cruda formándose nuevos compuestos como el aluminato tricálcico ( $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ ), silicato dicálcico ( $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ), silicato tricálcico ( $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ) y aluminato-ferrito tetracálcico ( $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ )

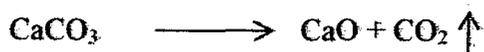
El producto resultante de las reacciones químicas llamado clinker es enfriado hasta una temperatura aproximada de 180°C.

El clinker que sale de los enfriadores es transportado a una cancha de almacenamiento donde termina su proceso de enfriamiento para ser posteriormente alimentado a los molinos de bolas de cemento y a las prensas de cemento. La molienda conjunta del clinker tipo I con el yeso hasta convertirlo en un polvo muy fino de color gris constituye el cemento Portland Tipo I.

Finalmente el cemento es trasladado a los silos de envase, por medio de unas fajas transportadoras y luego despachado tanto en bolsas de papel como a granel.

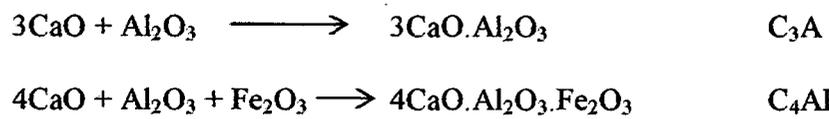
Reacciones originadas durante el proceso :

800°C – 900°C



1200°C – 1450°C

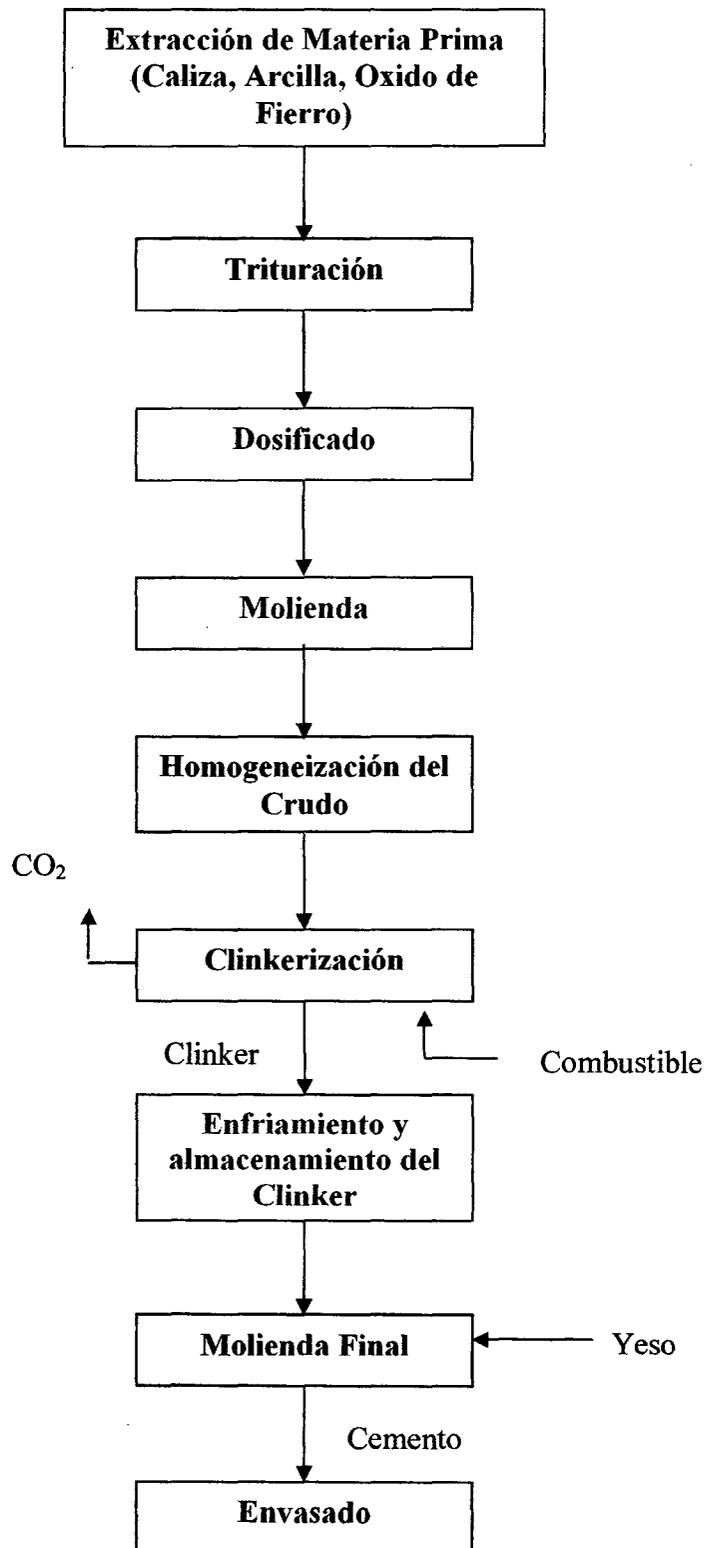




A continuación en el **Diagrama N° 1** se presenta el diagrama de bloques del proceso de producción de cemento Portland Tipo I y en el **Diagrama N° 2** se presenta el diagrama de flujo del proceso de producción de cemento Portland Tipo I.

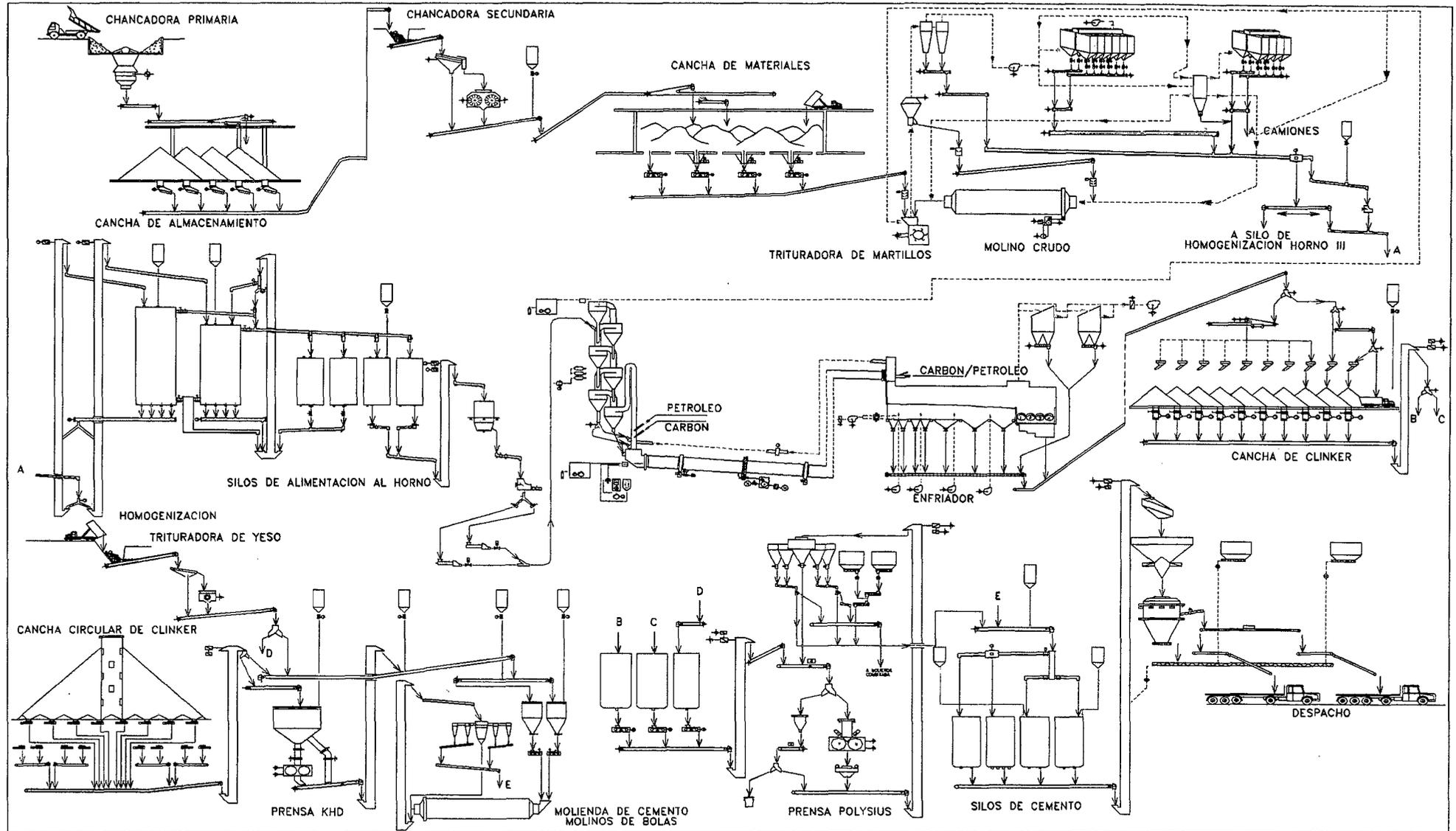
## DIAGRAMA Nº 1

### DIAGRAMA DEL PROCESOS DE PRODUCCIÓN DE CEMENTO PÓRTLAND TIPO I



Fuente : Elaboración propia.

## DIAGRAMA N° 2 PROCESO DE PRODUCCIÓN DE CEMENTO PÓRTLAND TIPO I



50

Fuente : Cemento Andino S.A.

## **V PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL**

Este capítulo se inicia con el muestreo del yacimiento de caliza empleando el método de perforaciones diamantinas, las muestras obtenidas de los puntos de muestreo (también llamados sondajes) son clasificadas de acuerdo a ciertos criterios a partir de los cuales se obtienen las muestras para el análisis químico; las que son codificadas, preparadas y luego analizadas por el método de identificación del carbonato total y por análisis de espectrometría por fluorescencia de rayos X.

### **5.1 MATERIALES Y EQUIPOS**

#### **a) Equipos**

- Equipo de Espectrometría por Fluorescencia de Rayos X SRS 3000 (SIEMENS) calibrado.
- Chancadora de quijada.
- Molino de discos.
- Secadores de  $100^{\circ}\text{C} \pm 5$  de operación.
- Prensa de 15 toneladas de fuerza de operación.
- Molino giratorio (pulverizador)
- Balanza de 0,1 mg de sensibilidad.

#### **b) Materiales**

- 1 Tamiz de 90 micrones.
- Recipientes o cacerolas resistentes al calor para el secado de muestras.

- Matraces de 250 ml.
- 2 Buretas de titulación cada una de 50 ml (para HCl y NaOH)
- Bolsas para el almacenamiento de muestras.
- Estantes de almacenamiento de muestras.
- Formato de registro de muestras.

**c) Reactivos**

- HCl 1 N.
- NaOH 0,5 N.
- Fenolftaleina.
- Cera en polvo para el análisis de FRX.
- Agua destilada.

**d) Equipo y Materiales de Muestreo**

- Perforadora de Diamantina DIAMEC.
- Bolsas plásticas para el almacenamiento de muestras.
- Cinta métrica de 20 a 30 metros.
- Talonario o tarjetas para identificación de muestras.
- Formato de registro de muestreo.
- Pintura blanca.
- Cajas portatestigos.

- Plumones.

**e) Equipos de Seguridad Personal**

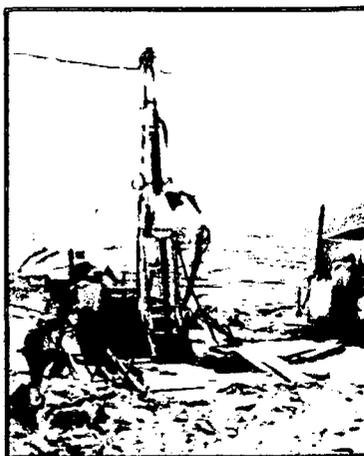
- Casco de seguridad.
- Botas de jebe de punta de acero.
- Guantes de jebe o cuero.
- Anteojos de seguridad.
- Respirador para polvo.
- Correa de seguridad en casos necesarios.

**5.2 MUESTREO DEL YACIMIENTO DE CALIZAS UTILIZANDO EL METODO DE PERFORACIONES DIAMANTINAS (PERFORACIONES CON TALADROS HUECOS)**

- a)** Determinar la ubicación de los puntos de muestreo y distribuirlos mediante una malla cuadrática. Cada punto de muestreo estará distanciado a intervalos de 100 m.
- b)** Obtener muestras de caliza utilizando el equipo de perforaciones diamantinas (DIAMEC), perforando perpendicularmente al rumbo de los estratos con una dirección S50°W y un grado de inclinación de 70° hasta una profundidad de (160 – 180 m)
- c)** Determinar la longitud de las muestras para el análisis químico.

**FIGURA N° 12**

**MUESTREO DEL YACIMIENTO DE CALIZA MEDIANTE  
PERFORACIONES DIAMANTINAS**



Fuente : Elaboración propia.

**FIGURA N° 13**

**RECUPERACIÓN DE MUESTRAS DE CALIZA**



Fuente : Elaboración propia.

**FIGURA N° 14**

**IDENTIFICACIÓN DE CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y LITOLÓGICAS DE  
LAS MUESTRAS DE CALIZAS**



Fuente : Elaboración propia.

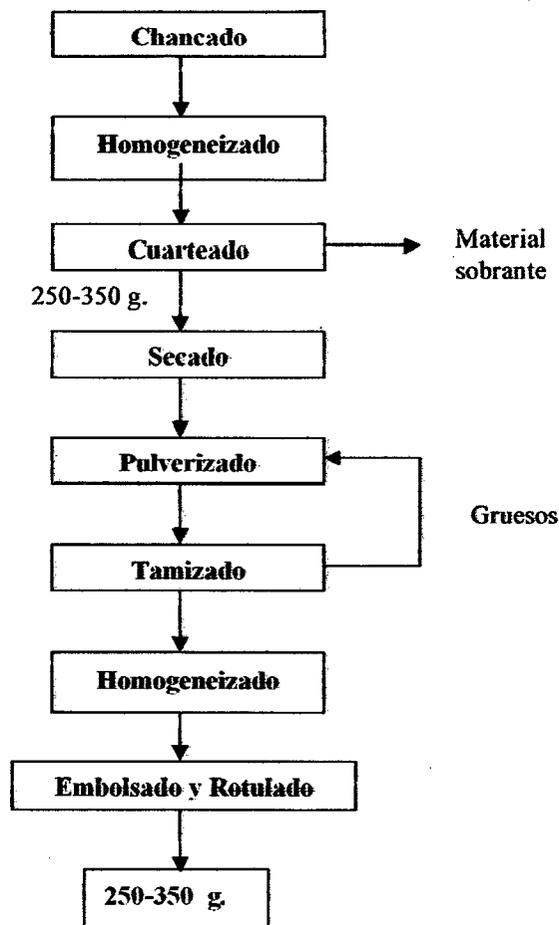
### 5.3 ANALISIS QUÍMICO DE LAS MUESTRAS DE CALIZA

Las muestras de caliza son sometidas a las siguientes etapas para determinar su composición química :

#### 5.3.1 Preparación de Muestras

La preparación de muestras de caliza se realiza de acuerdo al esquema presentado en la **Diagrama N° 3.**

**DIAGRAMA N° 3**  
**ESQUEMA DE LA PREPARACION DE MUESTRAS**



Fuente : Elaboración

Las muestras de calizas preparadas deberán cumplir con las siguientes especificaciones :

$W_{\text{muestra}}$  = 250 – 350 g.

Tamaño de partícula = menor á 90  $\mu\text{m}$ .

### 5.3.2 Determinación de Carbonato de Total

Aplicar la norma ASTM C 25 sección 33 para determinar el contenido de carbonato total (Anexo N° 2) en las muestras de caliza.

Las muestras ya preparadas se atacan con ácido clorhídrico de normalidad conocida, produciéndose la siguiente reacción:



El anión carbonato, reacciona con el ácido, generando ácido carbónico que es inestable y se disocia en  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$ .

El exceso de ácido es entonces determinado por medio de soluciones de hidróxido de sodio de normalidad conocida en presencia de indicador fenolftaleina según la siguiente reacción:



El valor de titulación muestra el contenido total de carbonato en relación al % de una materia prima como carbonato de calcio (%  $\text{CaCO}_3$ )

### **5.3.3 Análisis de Espectrometría por Fluorescencia de Rayos X (FRX)**

Aplicar la Norma ASTM C 1271 – 94 a, para determinar el contenido de óxido de calcio (CaO), óxido de silicio (SiO<sub>2</sub>), óxido de aluminio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), óxido de hierro (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), óxido de magnesio (MgO), sulfatos (SO<sub>3</sub>), óxido de sodio (Na<sub>2</sub>O) y óxido de potasio (K<sub>2</sub>O) en muestras de caliza (Ver Anexo N° 3)

## VI RESULTADOS

### 6.1 DETERMINACION DE LA LONGITUD DE LAS MUESTRAS PARA ANÁLISIS QUIMICO

Se muestrearon 18 puntos para realizar el muestreo del yacimiento y en cada una de las muestras de caliza extraídas se define la longitud de las muestras para análisis químico.

A continuación se estudian dos criterios para definir dicha longitud (Ver Tabla N° 12)

**TABLA N° 12**

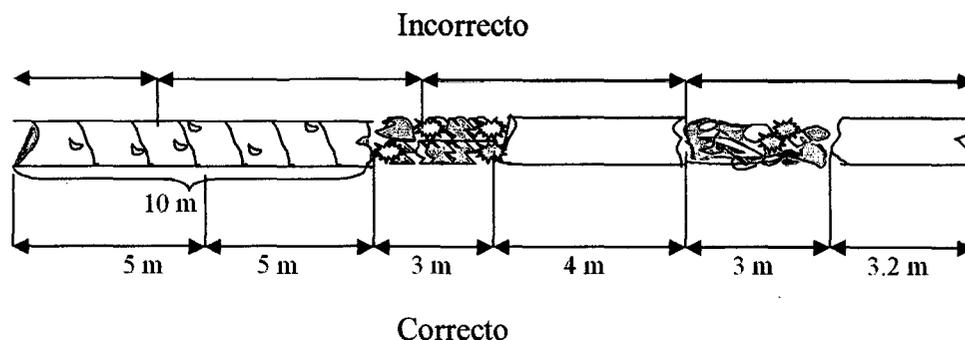
#### CRITERIOS PARA LA DETERMINACIÓN DE LA LONGITUD DE LAS MUESTRAS PARA ANÁLISIS QUÍMICO

	CRITERIOS	APLICACION
1	Longitud constante	Proporciona información química del yacimiento de caliza sin tener en cuenta la variación de las características físicas y litológicas en las muestras de caliza.
2	Medir las longitudes que alcanzan las características físicas y litológicas en las muestras de caliza y dividir las muestras de caliza que tengan longitudes superiores a los 5 m con la finalidad de obtener muestras representativas para el análisis químico.	Proporciona información química del yacimiento de caliza y de sus estratos teniendo en cuenta la presencia de las características físicas y litológicas en las muestras de caliza.

Para determinar la longitud de las muestras para análisis químico se trabajó con el segundo criterio (Ver Figura N° 15) y se obtuvieron un total de 1213 muestras para análisis químicos.

**FIGURA N° 15**

**LONGITUD DE LAS MUESTRAS PARA ANÁLISIS QUÍMICO**



En la **Tabla N° 13** se presenta el número de muestras de caliza para análisis químico obtenidas por cada punto de muestreo (sondaje) y también la longitud de perforación experimental alcanzada en cada punto de muestreo.

**TABLA N° 13**

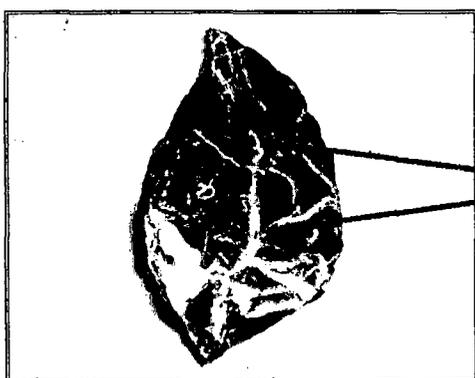
**NUMERO DE MUESTRAS DE CALIZAS PARA ANÁLISIS QUÍMICO Y LONGITUD DE PERFORACIÓN DE LOS 18 PUNTOS DE MUESTREO**

N°	PUNTOS DE MUESTREO O SONDAJES	N° MUESTRAS PARA ANÁLISIS QUÍMICOS	LONGITUD DE PERFORACIÓN (m)
1	SD - 30 - 03	79	160,70
2	SD - 31 - 03	54	111,85
3	SD - 32 - 03	62	160,80
4	SD - 33 - 03	63	160,80
5	SD - 34 - 03	61	160,95
6	SD - 35 - 03	63	140,80
7	SD - 36 - 03	66	125,92
8	SD - 37 - 03	73	160,50
9	SD - 38 - 03	78	160,35
10	SD - 39 - 03	57	137,90
11	SD - 40 - 03	77	151,30
12	SD - 41 - 03	70	160,70
13	SD - 42 - 03	64	139,80
14	SD - 43 - 03	74	180,05
15	SD - 44 - 03	69	140,80
16	SD - 45 - 03	86	180,30
17	SD - 46 - 03	89	164,33
18	SD - 47 - 03	28	62,30
Total muestras		<b>1213</b>	

En el **Apéndice Tabla N° 42** a manera de ejemplo se presenta el reporte de muestreo del **Sondaje 34** donde aprecian las longitudes de cada muestra para análisis químico y las características físicas y litológicas que se encuentran en las muestras de caliza.

Entre las características encontradas en las calizas del yacimiento Cerro Palo tenemos las siguientes :

**FIGURA N° 16**



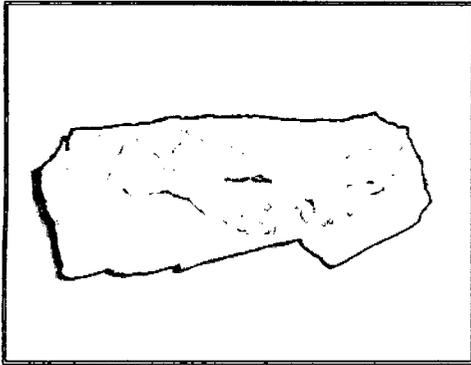
**Presencia de venas y venillas de calcita.**

**FIGURA N° 17**



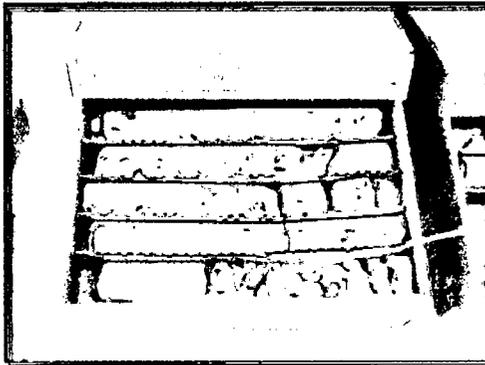
**Presencia de calcita.**

**FIGURA N° 18**



**Caliza Dolomítica de color parda con presencia de nódulos de calcita.**

**FIGURA N° 19**



**Caliza fracturada**

## **6.2 DETERMINACION DE MUESTRAS COMPOSITO DE CALIZA**

Después de analizadas las muestras de caliza por el método de carbonato total y los resultados representados en tablas nos indican uniformidad secuencial en el contenido de carbonato (**Ver Apéndice, Tabla N° 43**), es posible agrupar las muestras de calizas para formar muestras compósito.

Se estudiaron los siguientes criterios para establecer la manera de determinar y preparar muestras compósito :

a) **Primer criterio.**- Consiste en formar una muestra compósito representativa por rango de carbonato: alto, intermedio, bajo y desmonte, tal como se presenta a continuación :

1) Agrupar en cada punto de muestreo o sondaje, las muestras de caliza cuyos porcentajes carbonato se encuentran en los siguientes rangos :

- Carbonato alto :  $\%CaCO_3 \geq 90\%$
- Carbonato intermedio :  $75\% \leq \%CaCO_3 < 90\%$
- Carbonato bajo :  $60\% \leq \%CaCO_3 < 75\%$
- Desmonte :  $\%CaCO_3 < 60\%$

A manera de ejemplo se presenta en la **Tabla N° 14** las doce primeras muestras de caliza del punto de muestreo SD 34 clasificadas de acuerdo a los rangos de carbonato (los datos de longitud y porcentaje de carbonato son extraídos de la tabla 43 del Apéndice)

De las doce muestras de caliza se obtuvieron dos muestras compósito: la primera muestra compósito está constituida por once muestras de caliza cuyos porcentaje de carbonato se encuentran en el rango de carbonato alto ( $\%CaCO_3 \geq 90\%$ ) y la segunda muestra compósito está constituida por una sola muestra de caliza SD 34 – 03 (12) cuyo porcentaje de carbonato se encuentra en el rango de carbonato intermedio ( $75\% \leq \%CaCO_3 < 90\%$ )

**TABLA N° 14**

**EJEMPLO DE CLASIFICACION DE MUESTRAS DE CALIZA PARA FORMAR MUESTRAS COMPOSITO DEL SD 34**

<b>MUESTRA COMPOSITO</b>	<b>CODIGO DE MUESTRA</b>	<b>LONGITUD DE MUESTRA (m)</b>	<b>%CaCO<sub>3</sub></b>
C1	SD 34-03 (1)	4,20	97,20
	SD 34-03 (2)	2,80	94,90
	SD 34-03 (3)	2,80	96,52
	SD 34-03 (4)	4,20	98,80
	SD 34-03 (5)	2,78	95,80
	SD 34-03 (6)	2,72	90,36
	SD 34-03 (7)	2,70	90,42
	SD 34-03 (8)	2,78	94,22
	SD 34-03 (9)	2,78	93,50
	SD 34-03 (10)	4,16	93,82
	SD 34-03 (11)	3,83	97,80
C2	SD 34-03 (12)	3,50	75,82

2) Calcular el peso de cada muestra individual que conformara la muestra compósito con la siguiente ecuación :

$$W_{\text{muestra individual}} = \frac{E_i \times W_{\text{compósito}}}{E_{\text{total}}}$$

Donde :

- W<sub>composito</sub>** : Peso de la muestra compósito (200 g)
- E<sub>i</sub>** : Espesor individual de cada muestra (m)
- E<sub>total</sub>** : Sumatoria de los espesores individuales de las muestras que conforman el compósito (m).

Luego reemplazando valores se tienen los siguientes pesos individuales para la muestra compósito 1 del SD34 :

$$E_{\text{total}} = 35,75 \text{ m}$$

$$W_{\text{muestra individual 1}} = 4,2 * 200 / 35,75 = 23,4965 \text{ g.}$$

$$W_{\text{muestra individual 2}} = 2,8 * 200 / 35,75 = 15,6643 \text{ g.}$$

$$W_{\text{muestra individual 3}} = 2,8 * 200 / 35,75 = 15,6643 \text{ g.}$$

$$W_{\text{muestra individual 4}} = 4,2 * 200 / 35,75 = 23,4965 \text{ g.}$$

$$W_{\text{muestra individual 5}} = 2,78 * 200 / 35,75 = 15,5524 \text{ g.}$$

$$W_{\text{muestra individual 6}} = 2,72 * 200 / 35,75 = 15,2168 \text{ g.}$$

$$W_{\text{muestra individual 7}} = 2,7 * 200 / 35,75 = 15,1049 \text{ g.}$$

$$W_{\text{muestra individual 8}} = 2,78 * 200 / 35,75 = 15,5524 \text{ g.}$$

$$W_{\text{muestra individual 9}} = 2,78 * 200 / 35,75 = 15,5524 \text{ g.}$$

$$W_{\text{muestra individual 10}} = 4,16 * 200 / 35,75 = 23,2727 \text{ g.}$$

$$W_{\text{muestra individual 11}} = 3,83 * 200 / 35,75 = 21,4266 \text{ g.}$$

3) Calcular el % CaCO<sub>3</sub> de la muestra compósito de la siguiente manera :

$$\% C_{\text{Compósito}} = \frac{\sum (E_i \times \% C_{(\text{muestra } )i})}{E_{\text{total}}}$$

4) Luego reemplazando valores se tienen el % CaCO<sub>3</sub> para la muestra compósito 1 del

SD34:

$$E_1 * \% C_{(1)} = 4,20 * 97,20 = 408,2400$$

$$E_2 * \% C_{(2)} = 2,8 * 94,90 = 265,7200$$

$$E_3 * \% C_{(3)} = 2,8 * 96,52 = 270,2560$$

$$E_4 * \% C_{(4)} = 4,2 * 98,80 = 414,9600$$

$$E_5 * \% C_{(5)} = 2,78 * 95,80 = 266,3240$$

$$E_6 * \% C_{(6)} = 2,72 * 90,36 = 245,7792$$

$$E_7 * \% C_{(7)} = 2,7 * 90,42 = 244,1340$$

$$E_8 * \% C_{(8)} = 2,78 * 94,22 = 261,9316$$

$$E_9 * \% C_{(9)} = 2,78 * 93,50 = 259,9300$$

$$E_{10} * \% C_{(10)} = 4,16 * 93,82 = 390,2912$$

$$E_{11} * \% C_{(11)} = 3,83 * 97,8 = 374,5740$$

$$\Sigma = 3402,1400$$

$$\%CaCO_3 \text{ Composito} = 3402,1400 / 35,75 = 95,16$$

Se presenta en la **Tabla N° 15** las características de las dos muestras de compuesto del punto de muestreo SD34: espesor, pesos individuales de cada muestra de caliza y el %  $CaCO_3$  de las muestras compuesto.

**TABLA N° 15**

**EJEMPLO DE MUESTRAS COMPÓSITO DEL SD 34 FORMADAS UTILIZANDO EL PRIMER CRITERIO**

MUESTRA COMPOSITO	CODIGO DE MUESTRA	LONGITUD DE MUESTRA (m)	$\%CaCO_3$	ESPESOR TOTAL (m)	W Muestra (g)	$\%CaCO_3$ MUESTRA COMPOSITO
C1	SD 34-03 (1)	4,20	97,20	35,75	23,4965	95,16
	SD 34-03 (2)	2,80	94,90		15,6643	
	SD 34-03 (3)	2,80	96,52		15,6643	
	SD 34-03 (4)	4,20	98,80		23,4965	
	SD 34-03 (5)	2,78	95,80		15,5524	
	SD 34-03 (6)	2,72	90,36		15,2168	
	SD 34-03 (7)	2,70	90,42		15,1049	
	SD 34-03 (8)	2,78	94,22		15,5524	
	SD 34-03 (9)	2,78	93,50		15,5524	
	SD 34-03 (10)	4,16	93,82		23,2727	
	SD 34-03 (11)	3,83	97,80		21,4266	
C2	SD 34-03 (12)	3,50	75,82	3,50	200,0000	75,82

b) **Segundo criterio.**- Para preparar muestras compósito bajo éste criterio se agrupan muestras de caliza con las mismas características físicas y litológicas y con porcentaje de  $\text{CaCO}_3$  muy cercanos entre sí.

A manera de ejemplo se presenta en la **Tabla N° 16**, las doce primeras muestras de caliza del punto de muestreo SD 34 con sus respectivos porcentajes  $\text{CaCO}_3$  y características físicas y litológicas permitiendo determinar la formación de 5 muestras compósito.

Las características físicas y litológicas de éstas calizas las encontramos en el reporte de muestreo del SD 34 (**Ver Apéndice, Tabla N° 42**)

**TABLA N° 16**

**CARACTERÍSTICAS DE LAS MUESTRAS DE CALIZA DEL SD 34**

<b>MUESTRA COMPOSITO</b>	<b>CODIGO DE MUESTRA</b>	<b>LONGITUD DE MUESTRA (m)</b>	<b>%<math>\text{CaCO}_3</math></b>	<b>CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y LITOLÓGICAS DE LAS MUESTRAS DE CALIZA</b>
C1	SD 34-03 (1)	4,20	97,20	Caliza gris clara; con venas y venillas de calcita. De 7,22 m – 7,56 m y de 8,87 m – 9,75 m (fractura por posible falla)
	SD 34-03 (2)	2,80	94,90	
	SD 34-03 (3)	2,80	96,52	
	SD 34-03 (4)	4,20	98,80	
	SD 34-03 (5)	2,78	95,80	
C2	SD 34-03 (6)	2,72	90,36	Caliza gris clara; por zonas fragmentos oscuros, venas y venillas de calcita.
	SD 34-03 (7)	2,70	90,42	
C3	SD 34-03 (8)	2,78	94,22	Caliza gris clara; abundancia de venas de calcita; zona fracturada; desde los 26,10 m – 26,40 m y en los 27,20 m y presencia de material de relleno terroso.
	SD 34-03 (9)	2,78	93,50	
	SD 34-03 (10)	4,16	93,82	
C4	SD 34-03 (11)	3,83	97,80	Caliza con abundancia de venas de calcita, un poco más oscuro que el anterior.
C5	SD 34-03 (12)	3,50	75,82	Tramo de caliza brechada (fracturas rellenas con material) fallas en los 36,60 m y los 38,80 m.

1) El peso de cada muestra compósito se calcula con la siguiente ecuación :

$$W_{\text{muestra individual}} = \frac{E_i \times W_{\text{compósito}}}{E_{\text{total}}}$$

2) El porcentaje de CaCO<sub>3</sub> de la muestra compósito se calcula con la siguiente ecuación:

$$\% C_{\text{Compósito}} = \frac{\sum (E_i \times \% C_{(\text{muestra } i)})}{E_{\text{total}}}$$

Reemplazando valores se obtiene los resultados contenidos en la **Tabla N° 17**.

**TABLA N° 17**

**EJEMPLO DE MUESTRAS COMPOSITO DEL SD 34 FORMADAS UTILIZANDO EL SEGUNDO CRITERIO**

MUESTRAS COMPOSITO	CODIGO DE MUESTRA	LONGITUD DE MUESTRA (m)	%CaCO <sub>3</sub>	ESPESOR TOTAL (m)	W <sub>Muestra</sub> (g)	%CaCO <sub>3</sub> MUESTRA COMPOSITO
C1	SD 34-03 (1)	4,20	97,20	16,78	50,0596	96,87
	SD 34-03 (2)	2,80	94,90		33,3730	
	SD 34-03 (3)	2,80	96,52		33,3730	
	SD 34-03 (4)	4,20	98,80		50,0596	
	SD 34-03 (5)	2,78	95,80		33,1346	
C2	SD 34-03 (6)	2,72	90,36	5,42	100,3690	90,39
	SD 34-03 (7)	2,70	90,42		99,6310	
C3	SD 34-03 (8)	2,78	94,22	9,72	57,2016	93,84
	SD 34-03 (9)	2,78	93,50		57,2016	
	SD 34-03 (10)	4,16	93,82		85,5968	
C4	SD 34-03 (11)	3,83	97,80	3,83	200,0000	97,80
C5	SD 34-03 (12)	3,50	75,82	3,50	200,0000	75,82

En el presente estudio se trabaja con el segundo criterio para formar muestras compósito, obteniéndose 747 muestras compósito.

En el **Apéndice, Tabla N° 44** a manera de ejemplo se presenta el reporte de preparación de muestras compósito del punto de muestreo SD 34.

En la **Tabla N° 18** encontramos el número de muestras compósito obtenidas de los 18 puntos de muestreo o sondajes.

**TABLA N° 18**

**NUMERO DE MUESTRAS COMPOSITO OBTENIDAS DE LOS 18 SONDAJES**

<b>N°</b>	<b>PUNTOS DE MUESTREO O SONDAJES</b>	<b>NUMERO DE MUESTRAS COMPOSITO</b>
1	SD – 30 – 03	36
2	SD – 31 – 03	22
3	SD – 32 – 03	33
4	SD – 33 – 03	63
5	SD – 34 – 03	31
6	SD – 35 – 03	26
7	SD – 36 – 03	66
8	SD – 37 – 03	32
9	SD – 38 – 03	78
10	SD – 39 – 03	26
11	SD – 40 – 03	28
12	SD – 41 – 03	31
13	SD – 42 – 03	64
14	SD – 43 – 03	35
15	SD – 44 – 03	25
16	SD – 45 – 03	48
17	SD – 46 – 03	89
18	SD – 47 – 03	14
<b>TOTAL MUESTRAS</b>		<b>747</b>

### 6.3 DETERMINACION DE LA LEY DE CARBONATO Y COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL YACIMIENTO DE CALIZAS

Para calcular la ley de carbonato y la composición química del yacimiento de calizas se prosigue de la siguiente manera :

- a) Clasificar las muestras de caliza de cada sondaje de acuerdo a rangos de porcentaje de carbonato: alto, intermedio, bajo y desmonte (Ver Tabla N° 19)

**TABLA N° 19**  
**RANGOS DE %CaCO<sub>3</sub>**

	<b>RANGOS DE %CaCO<sub>3</sub></b>
Alto	$\geq 90$
Intermedio	75 – 90
Bajo	60 – 75
Desmonte	< 60

**Fuente :** Cemento Andino S.A.

En la **Tabla N° 20** encontramos la clasificación de las muestras de caliza del sondaje 34 de acuerdo a rangos de porcentaje de CaCO<sub>3</sub> (datos obtenidos del **Apéndice, Tabla N° 46**)

**TABLA N° 20**  
**CLASIFICACION DE LAS MUESTRAS DE CALIZA DEL SD34 DE ACUERDO A RANGOS DE %CaCO<sub>3</sub>**

CÓDIGO DE MUESTRA	LONGITUD DE MUESTRA (m)	% SiO <sub>2</sub>	% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	% Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	% CaO	% MgO	% SO <sub>3</sub>	% K <sub>2</sub> O	% Na <sub>2</sub> O	% Matrix (CO <sub>2</sub> )	% CaCO <sub>3</sub>	RANGOS DE CARBONATO
SD 34-03 (C1)	16,78	1,17	0,66	0,33	55,15	0,57	0,07	0,08	0,04	41,81	96,87	Alto
SD 34-03 (C2)	5,42	6,34	0,81	0,35	51,07	0,38	0,19	0,07	0,04	40,70	90,39	Alto
SD 34-03 (C3)	9,72	3,37	0,74	0,36	53,74	0,34	0,08	0,07	0,04	41,20	93,84	Alto
SD 34-03 (C4)	3,83	0,89	0,41	0,16	55,54	0,34	0,08	0,02	0,03	42,53	97,80	Alto
SD 34-03 (C5)	3,5	15,16	4,85	1,32	42,49	1,38	0,16	0,45	0,04	34,00	75,82	Intermedio
SD 34-03 (C6)	11,6	1,59	0,72	0,32	55,25	0,51	0,14	0,05	0,05	41,30	96,32	Alto
SD 34-03 (C7)	1,19	4,02	1,42	0,77	51,78	0,61	0,19	0,18	0,04	40,90	91,30	Alto
SD 34-03 (C8)	3,38	3,06	0,56	0,47	51,80	1,23	0,16	0,07	0,15	42,40	95,30	Alto
SD 34-03 (C9)	2,87	2,51	1,04	0,52	53,94	0,41	0,16	0,11	0,04	41,20	94,11	Alto
SD 34-03 (C10)	6,79	1,95	0,88	0,44	55,04	0,35	0,09	0,10	0,04	41,00	95,50	Alto
SD 34-03 (C11)	0,51	5,01	1,35	0,65	51,05	0,42	0,62	0,20	0,04	40,50	90,22	Alto
SD 34-03 (C12)	17,38	1,36	0,69	0,32	55,31	0,44	0,16	0,07	0,04	41,51	96,29	Alto
SD 34-03 (C13)	2,92	2,69	1,00	0,44	54,05	0,41	0,45	0,10	0,05	40,70	94,22	Alto
SD 34-03 (C14)	4,38	1,54	0,67	0,30	55,39	0,38	0,19	0,07	0,04	41,30	96,46	Alto
SD 34-03 (C15)	1,45	4,08	1,45	0,68	51,87	0,37	0,13	0,22	0,05	41,00	91,36	Alto
SD 34-03 (C16)	4,13	1,25	0,65	0,27	55,38	0,39	0,22	0,06	0,05	41,63	96,80	Alto
SD 34-03 (C17)	5,52	6,99	1,56	1,02	48,87	0,63	0,48	0,45	0,15	39,70	88,25	Intermedio
SD 34-03 (C18)	6,76	2,62	1,06	0,50	51,17	0,35	0,25	0,17	0,04	43,80	93,55	Alto
SD 34-03 (C19)	1,87	4,37	1,51	0,68	50,59	0,59	0,61	0,33	0,04	41,20	90,22	Alto
SD 34-03 (C20)	2,63	3,27	1,03	0,50	52,14	1,19	0,30	0,20	0,05	41,20	93,36	Alto
SD 34-03 (C21)	2,49	3,95	1,47	0,71	51,78	0,59	0,08	0,26	0,04	41,00	91,40	Alto
SD 34-03 (C22)	7,79	3,95	1,43	0,71	51,34	0,52	0,39	0,31	0,11	41,10	91,41	Alto
SD 34-03 (C23)	7,35	3,29	1,29	0,61	52,73	0,47	0,18	0,21	0,04	41,00	92,39	Alto
SD 34-03 (C24)	6,67	8,11	1,93	1,30	48,18	0,72	0,24	0,51	0,15	38,70	86,32	Intermedio
SD 34-03 (C25)	1,17	3,09	1,13	0,52	53,45	0,58	0,12	0,20	0,05	40,70	93,50	Alto
SD 34-03 (C26)	1,34	13,11	1,97	0,90	51,34	0,74	0,50	0,45	0,02	30,90	89,20	Intermedio
SD 34-03 (C27)	10,98	6,81	1,62	1,06	48,92	0,78	0,51	0,37	0,15	39,60	88,38	Intermedio
SD 34-03 (C28)	5,63	6,71	2,15	1,08	44,14	4,04	0,76	0,45	0,06	40,40	92,75	Alto
SD 34-03 (C29)	2,92	21,80	6,28	2,03	36,09	1,47	1,29	1,20	0,03	29,50	66,40	Bajo
SD 34-03 (C30)	0,94	1,54	0,65	0,40	43,21	10,80	0,33	0,08	0,09	43,01	99,00	Alto
SD 34-03 (C31)	1,04	16,50	4,83	1,42	40,29	1,28	0,85	0,89	0,04	33,60	72,58	Bajo

b) Hallar el porcentaje de  $\text{CaCO}_3$  ponderado y la composición química ponderada de los rangos de carbonato de cada punto de muestreo y del yacimiento.

Se utilizan las siguientes ecuaciones :

$$\% \text{ CaCO}_3 \text{ Ponderado} = \frac{\sum_1^n (E_i \times \% C_i)}{\sum_1^n E_i} \quad (1)$$

$$\% X \text{ Ponderado} = \frac{\sum_1^n (E_i \times \% X_i)}{\sum_1^n E_i} \quad (2)$$

Donde :

$\% C_i$  :  $\% \text{CaCO}_3$  individual de cada muestra.

$E_i$  : Espesor o longitud individual de cada muestra (m)

$\% X_i$  : Porcentaje de  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{SO}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  de la muestra de caliza individual.

A manera de ejemplo se presenta el cálculo del porcentaje de  $\text{CaCO}_3$  ponderado del rango de carbonato intermedio del SD 34.

En este punto de muestreo o sondaje se encontraron 5 muestras compósito que cuentan con las siguientes especificaciones  $75 \leq \% \text{ porcentaje de } \text{CaCO}_3 < 90$  pertenecientes al rango de carbonato intermedio (Ver Tabla N° 21)

**TABLA N° 21**

**MUESTRAS COMPOSITO PERTENECIENTES AL RANGO DE CARBONATO INTERMEDIO DEL SD 34**

<b>CODIGO DE MUESTRA</b>	<b>LONGITUD DE MUESTRA (m)</b>	<b>%CaCO<sub>3</sub></b>	<b>RANGO DE CARBONATO</b>	<b>%C<sub>i</sub> * E<sub>i</sub></b>
SD 34-03 (C5)	3,5	75,82	Intermedio	265,37
SD 34-03 (C17)	5,52	88,25	Intermedio	487,14
SD 34-03 (C24)	6,67	86,32	Intermedio	575,73
SD 34-03 (C26)	1,34	89,20	Intermedio	119,53
SD 34-03 (C27)	10,98	88,38	Intermedio	970,43
$\Sigma E_i = 28,01$				$\Sigma = 2418,20$

Aplicando la ecuación 1 se obtiene :

$$\%CaCO_3 = 2418,20/28,01 = 86,33\%$$

Para el cálculo del porcentaje ponderado de SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> del rangos de carbonato intermedio del SD 34 se presentan los porcentajes de SiO<sub>2</sub> en la **Tabla N° 22** y los porcentajes de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> en la **Tabla N° 23** de las muestras compósito correspondientes al rango de carbonato intermedio del SD 34

**TABLA N° 22**

**%SiO<sub>2</sub> DE LAS MUESTRAS COMPOSITO PERTENECIENTES AL RANGO DE CARBONATO INTERMEDIO**

<b>CODIGO DE MUESTRA</b>	<b>LONGITUD DE MUESTRA (m)</b>	<b>%CaCO<sub>3</sub></b>	<b>RANGOS DE CARBONATO</b>	<b>%SiO<sub>2</sub></b>	<b>%SiO<sub>2</sub>*E<sub>i</sub></b>
SD 34-03 (C5)	3,5	75,82	Intermedio	15,16	53,06
SD 34-03 (C17)	5,52	88,25	Intermedio	6,99	38,57
SD 34-03 (C24)	6,67	86,32	Intermedio	8,11	54,09
SD 34-03 (C26)	1,34	89,20	Intermedio	13,11	17,57
SD 34-03 (C27)	10,98	88,38	Intermedio	6,81	74,77
$\Sigma E_i = 28,01$				$\Sigma = 238,06$	

Donde aplicando la formula 2 se obtiene :

$$\% \text{SiO}_2 = 238,06 / 28,01 = 8,50\%$$

**TABLA N° 23**

**%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> DE LAS MUESTRAS COMPOSITO PERTENECIENTES AL RANGO DE CARBONATO INTERMEDIO**

<b>CODIGO DE MUESTRA</b>	<b>LONGITUD DE MUESTRA (m)</b>	<b>%CaCO<sub>3</sub></b>	<b>RANGOS DE CARBONATO</b>	<b>%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>*E<sub>i</sub></b>
SD 34-03 (C5)	3,5	75,82	Intermedio	4,85	16,98
SD 34-03 (C17)	5,52	88,25	Intermedio	1,56	8,61
SD 34-03 (C24)	6,67	86,32	Intermedio	1,93	12,87
SD 34-03 (C26)	1,34	89,20	Intermedio	1,97	2,64
SD 34-03 (C27)	10,98	88,38	Intermedio	1,62	17,79

$$\Sigma E_i = 28,01$$

$$\Sigma = 58,89$$

Donde aplicando la formula 2 se obtiene:

$$\% \text{Al}_2\text{O}_3 = 58,89 / 28,01 = 2,10\%$$

Se repite los mismos pasos para el cálculo de los demás componentes ponderados Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, MgO, SO<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O.

Los resultados del cálculo de los promedios ponderados de carbonato total y composición química de los rangos de carbonato: alto, intermedio, bajo y desmonte de los 18 puntos de muestreo o sondajes se pueden observar en la **Tabla N° 24**

TABLA N° 24

RESUMEN DE PROMEDIOS PONDERADOS DE %CaCO<sub>3</sub> Y COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LOS RANGOS DE CARBONATO :  
ALTO, INTERMEDIO, BAJO Y DESMONTE DE LOS 18 SONDAJES

	RANGOS DE CARBONATO	ESPESOR (m)	% SiO <sub>2</sub>	% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	% Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	% CaO	% MgO	% SO <sub>3</sub>	% K <sub>2</sub> O	% Na <sub>2</sub> O	% Matrix CO <sub>2</sub>	% CaCO <sub>3</sub>
SD 30	Alto	116,95	2,38	0,79	0,40	53,73	0,86	0,22	0,12	0,06	41,4	95,15
	Intermedio	35,12	9,25	2,19	1,42	46,72	1,04	0,36	0,61	0,12	38,28	83,61
	Bajo	3,33	21,18	5,30	2,89	37,11	3,93	0,92	1,11	0,11	27,44	63,53
	Desmante											
SD 31	Alto	71,81	3,31	0,69	0,61	40,69	12,02	0,09	0,15	0,09	42,37	96,61
	Intermedio	20,95	7,27	1,40	0,96	47,64	2,49	0,16	0,42	0,10	39,38	88,20
	Bajo	4,22	20,34	5,74	2,10	34,35	4,76	0,10	1,45	0,03	30,76	69,15
	Desmante	0,32	34,25	12,50	3,96	18,47	1,85	1,65	2,70	0,05	23,70	30,44
SD 32	Alto	114,58	2,46	0,94	0,44	52,50	1,74	0,23	0,17	0,05	41,26	94,97
	Intermedio	39,04	9,01	2,03	1,30	45,28	3,42	0,45	0,66	0,14	37,52	86,05
	Bajo	4,08	16,00	4,42	1,52	38,36	2,92	0,84	0,95	0,04	34,70	73,60
	Desmante											
SD 33	Alto	97,68	2,47	0,83	0,47	50,47	3,59	0,12	0,18	0,03	41,84	96,12
	Intermedio	51,63	9,80	2,15	1,39	45,08	3,39	0,65	0,70	0,12	36,67	85,14
	Bajo	9,66	16,86	4,72	1,55	35,70	4,59	1,05	1,30	0,05	33,85	72,37
	Desmante	1,83	32,87	9,60	2,60	27,24	1,09	0,93	2,51	0,03	22,53	46,85
SD 34	Alto	128,98	2,62	0,93	0,44	53,35	0,72	0,20	0,13	0,05	41,46	94,65
	Intermedio	28,01	8,50	2,10	1,13	48,05	0,81	0,40	0,43	0,13	38,29	86,33
	Bajo	3,96	20,41	5,90	1,87	37,19	1,42	1,17	1,12	0,03	30,58	68,02
	Desmante											
SD 35	Alto	86,87	2,95	0,41	0,20	52,04	2,25	0,09	0,05	0,06	41,95	95,91
	Intermedio	29,15	15,55	0,83	0,52	43,46	3,23	0,11	0,15	0,11	35,82	82,32
	Bajo	21,08	27,28	0,64	0,80	37,36	1,90	0,04	0,08	0,03	31,72	68,10
	Desmante											

Continúa Tabla N° 24.....

	<b>RANGOS DE CARBONATO</b>	<b>ESPESOR (m)</b>	<b>% SiO<sub>2</sub></b>	<b>% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>% Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>% CaO</b>	<b>% MgO</b>	<b>% SO<sub>3</sub></b>	<b>% K<sub>2</sub>O</b>	<b>% Na<sub>2</sub>O</b>	<b>% Matrix CO<sub>2</sub></b>	<b>% CaCO<sub>3</sub></b>
<b>SD 36</b>	<b>Alto</b>	76,22	2,46	0,72	0,34	54,00	0,44	0,15	0,08	0,05	41,71	95,22
	<b>Intermedio</b>	33,44	11,89	1,87	1,07	46,79	0,69	0,46	0,28	0,12	36,61	83,38
	<b>Bajo</b>	13,36	26,63	2,31	1,04	36,87	1,27	0,37	0,37	0,03	31,01	67,11
	<b>Desmante</b>	2,90	32,06	6,45	1,98	28,86	0,97	1,14	0,90	0,02	27,39	52,35
<b>SD 37</b>	<b>Alto</b>	101,98	2,69	0,83	0,40	53,77	0,47	0,23	0,10	0,05	41,37	94,21
	<b>Intermedio</b>	32,93	8,52	1,99	1,15	48,14	0,56	0,49	0,36	0,09	38,51	85,59
	<b>Bajo</b>	23,32	27,29	1,29	1,01	38,19	0,58	0,25	0,13	0,02	31,14	67,11
	<b>Desmante</b>	2,27	37,69	1,02	1,03	29,84	0,34	0,04	0,07	0,02	29,90	52,20
<b>SD 38</b>	<b>Alto</b>	132,76	1,92	0,74	0,31	54,30	0,45	0,14	0,09	0,05	41,99	95,73
	<b>Intermedio</b>	21,84	9,15	2,00	1,04	47,46	0,74	0,47	0,46	0,13	38,39	85,62
	<b>Bajo</b>	4,9	17,87	5,45	1,56	38,87	1,25	1,00	1,09	0,03	32,58	71,40
	<b>Desmante</b>											
<b>SD 39</b>	<b>Alto</b>	110,05	2,62	0,85	0,40	53,99	0,51	0,28	0,12	0,08	41,08	94,79
	<b>Intermedio</b>	24,69	9,11	2,51	1,23	47,05	0,85	0,63	0,54	0,11	37,82	84,48
	<b>Bajo</b>	1,42	21,07	6,19	1,54	39,85	0,70	0,06	0,65	0,02	29,70	69,50
	<b>Desmante</b>	0,69	24,42	14,00	2,19	28,28	1,22	0,04	0,78	0,04	28,60	48,50
<b>SD 40</b>	<b>Alto</b>	106,54	2,32	0,62	0,28	54,16	0,82	0,17	0,11	0,05	41,43	95,66
	<b>Intermedio</b>	23,64	11,51	1,30	0,95	47,40	0,72	0,17	0,38	0,14	37,26	84,89
	<b>Bajo</b>	17,24	18,04	2,79	1,13	42,52	0,92	0,39	0,49	0,03	33,53	65,75
	<b>Desmante</b>	2,23	33,28	8,32	2,96	24,16	1,03	0,06	3,00	0,05	26,95	43,30
<b>SD 41</b>	<b>Alto</b>	140,36	1,87	0,63	0,29	54,58	0,51	0,11	0,07	0,05	41,92	95,99
	<b>Intermedio</b>	12,19	11,86	1,12	0,94	47,06	0,82	0,41	0,19	0,06	37,41	83,69
	<b>Bajo</b>	6,56	22,62	2,22	0,99	37,24	2,22	0,22	0,90	0,11	33,25	67,57
	<b>Desmante</b>											

Continúa Tabla N° 24.....



TABLA N° 25

LEY DE CARBONATO Y COMPOSICIÓN QUÍMICA DE CADA PUNTO DE MUESTREO

PUNTOS DE MUESTREO	% SiO <sub>2</sub>	% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	% Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	% CaO	% MgO	% SO <sub>3</sub>	% K <sub>2</sub> O	% Na <sub>2</sub> O	% CaCO <sub>3</sub>
SD30	4,34	1,20	0,68	51,79	0,97	0,27	0,25	0,07	91,86
SD31	5,00	1,10	0,76	41,84	9,62	0,11	0,27	0,09	93,39
SD32	4,43	1,30	0,68	50,35	2,19	0,30	0,31	0,07	92,21
SD33	6,03	1,59	0,85	47,59	3,56	0,36	0,44	0,06	90,61
SD34	4,08	1,26	0,60	52,03	0,75	0,26	0,21	0,06	92,55
SD35	9,37	0,53	0,36	47,96	2,40	0,09	0,08	0,07	88,74
SD36	8,21	1,33	0,65	49,69	0,61	0,28	0,18	0,07	88,11
SD37	7,96	1,14	0,65	50,01	0,50	0,28	0,16	0,05	87,91
SD38	3,40	1,06	0,45	52,89	0,51	0,21	0,17	0,06	93,60
SD39	4,09	1,27	0,57	52,46	0,58	0,34	0,20	0,08	92,43
SD40	5,65	0,99	0,49	51,02	0,81	0,19	0,20	0,06	89,22
SD41	3,49	0,73	0,37	53,29	0,60	0,14	0,11	0,05	93,88
SD42	3,45	1,05	0,47	52,85	0,56	0,21	0,15	0,05	93,43
SD43	3,94	1,27	0,59	51,62	1,17	0,32	0,26	0,07	92,25
SD44	5,06	0,96	0,34	52,25	0,56	0,15	0,12	0,04	91,85
SD45	6,04	1,05	0,57	51,11	0,81	0,17	0,14	0,07	90,91
SD46	9,69	1,80	0,94	47,13	1,02	0,36	0,46	0,03	84,78
SD47	5,11	0,77	0,43	47,23	4,69	0,08	0,18	0,07	93,14

En la **Tabla N° 25** se presenta la ley de carbonato y la composición química de cada punto de muestreo o sondaje, calculados con los datos contenidos en la **Tabla N° 24** y la aplicación de las ecuaciones 1 y 2 en cada punto de muestreo.

Utilizando los datos de la **Tabla N° 24**, agrupando los resultados de los rangos de carbonato : alto, intermedio, bajo y desmonte de los 18 puntos de muestreo y aplicando las ecuaciones 1 y 2 se halla el porcentaje de  $\text{CaCO}_3$  ponderado y composición química ponderada correspondientes a los cuatro rangos de carbonato: alto, intermedio, bajo y desmonte del yacimiento de caliza; obteniéndose los resultados contenidos en la **Tabla N° 26**.

**TABLA N° 26**

**% $\text{CaCO}_3$  Y COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LOS RANGOS DE CARBONATO : ALTO, INTERMEDIO, BAJO Y DESMONTE DEL YACIMIENTO DE CALIZA**

<b>RANGOS DE CARBONATO</b>	<b>ESPESOR (m)</b>	<b>% <math>\text{CaCO}_3</math></b>	<b>% <math>\text{SiO}_2</math></b>	<b>% <math>\text{Al}_2\text{O}_3</math></b>	<b>% <math>\text{Fe}_2\text{O}_3</math></b>	<b>% <math>\text{CaO}</math></b>	<b>% <math>\text{MgO}</math></b>	<b>% <math>\text{SO}_3</math></b>	<b>% <math>\text{K}_2\text{O}</math></b>	<b>% <math>\text{Na}_2\text{O}</math></b>
<b>Alto</b>	1922,99	95,32	2,45	0,77	0,37	52,93	1,49	0,17	0,11	0,05
<b>Intermedio</b>	511,25	84,95	10,16	1,77	1,08	46,63	1,56	0,38	0,43	0,12
<b>Bajo</b>	164,09	68,42	22,50	2,87	1,25	37,81	1,67	0,45	0,63	0,04
<b>Desmonte</b>	28,31	45,62	33,62	6,91	2,65	26,02	1,03	0,87	1,63	0,03

c) **Cálculo del espesor promedio, volumen y toneladas de los rangos de carbonato (alto, intermedio, bajo y desmonte) y el volumen y toneladas del yacimiento.**

1) Para calcular el espesor promedio M se utiliza la ecuación siguiente :

Espesor Promedio M

$$M = \frac{\sum_1^n m}{\sum_1^n n} \quad (3)$$

Donde :

**m** : Medición individual del espesor (m)

**n** : Número de puntos de medición.

De manera que reemplazando los valores correspondientes en la ecuación 3 se obtiene :

$$M_{\text{rango de carbonato alto}} = 1922,99 / 18 = 106,8327778 \text{ m}$$

$$M_{\text{rango de carbonato Intermedio}} = 511,25 / 18 = 28,40277778 \text{ m}$$

$$M_{\text{rango de carbonato bajo}} = 164,09 / 17 = 9,652352941 \text{ m}$$

$$M_{\text{rango desmonte}} = 28,31 / 10 = 2,831 \text{ m}$$

- 2) Para calcular el volumen de los rangos de carbonato: alto, intermedio, bajo y desmonte presentes en el yacimiento se emplea la ecuación siguiente :

Volumen (m<sup>3</sup>)

$$V = A * M \quad (4)$$

Donde :

**A** : Área (m<sup>2</sup>)

**M** : Espesor promedio (m)

De manera que reemplazando los valores correspondientes en la ecuación 4 se obtiene :

$$V_{\text{rango de carbonato alto}} = 397\,008,1583 \text{ m}^2 * 106,8327778 = 42\,413\,484,35 \text{ m}^3$$

$$V_{\text{rango de carbonato intermedio}} = 397\,008,1583 \text{ m}^2 * 28,40277778 = 11\,276\,134,50 \text{ m}^3$$

$$V_{\text{rango de carbonato bajo}} = 397\,008,1583 \text{ m}^2 * 9,652352941 = 3\,832\,062,86 \text{ m}^3$$

$$V_{\text{rango desmonte}} = 397\,008,1583 \text{ m}^2 * 2,831 = 1\,123\,930,10 \text{ m}^3$$

El volumen del material calcáreo del yacimiento se calcula con la siguiente expresión :

$$V = V_{\text{rango de carbonato alto}} + V_{\text{rango de carbonato intermedio}} + V_{\text{rango de carbonato bajo}} + V_{\text{rango desmonte}}$$

$$V = 58\,645\,611,8 \text{ m}^3$$

- 3) Para calcular las toneladas de cada rango de carbonato: alto, intermedio, bajo y desmonte se emplea la ecuación siguiente:

#### **Toneladas (Ton)**

$$T = V * d \quad (5)$$

Donde :

**V** : Volumen ( $\text{m}^3$ )

**d** : Peso específico aparente (caso de calizas húmedas sedimentarias)  
2.5 TM/  $\text{m}^3$

De manera que reemplazando los valores correspondientes en la ecuación 5 se obtiene :

$$\begin{aligned}
T_{\text{rango de carbonato alto}} &= 42\,413\,484,35 * 2.5 = 106\,033\,710,87 \text{ TMH} \\
T_{\text{rango de carbonato intermedio}} &= 11\,276\,134,50 * 2.5 = 28\,190\,336,24 \text{ TMH} \\
T_{\text{rango de carbonato bajo}} &= 3\,832\,062,86 * 2.5 = 9\,580\,157,16 \text{ TMH} \\
T_{\text{rango desmonte}} &= 1\,123\,930,10 * 2.5 = 2\,809\,825,24 \text{ TMH}
\end{aligned}$$

Las toneladas del material calcáreo del yacimiento se calculan con la siguiente expresión:

$$T = T_{\text{rango de carbonato alto}} + T_{\text{rango de carbonato intermedio}} + T_{\text{rango de carbonato bajo}} + T_{\text{rango desmonte}}$$

$$T = 146\,614\,029,5 \text{ TMH}$$

En la **Tabla N° 32** podemos apreciar el porcentaje de carbonato total, la composición química ponderada, volumen, espesor y toneladas de los rangos de carbonato : alto, intermedio, bajo y desmonte del yacimiento Cerro Palo.

**d) Calcular la ley de carbonato del yacimiento.**

Utilizando los datos contenidos en la **Tabla N° 27** se calcula la ley de carbonato del yacimiento :

**TABLA N° 27**

**%CaCO<sub>3</sub> DE LOS RANGOS DE CARBONATO : ALTO, INTERMEDIO, BAJO Y DESMONTE**

RANGO DE CARBONATO	ESPESOR (m)	%CaCO <sub>3</sub>	%C <sub>i</sub> * E <sub>Rango</sub>
Alto	1922,99	95,32	183292,20
Intermedio	511,25	84,95	43432,99
Bajo	164,09	68,42	11227,48
Desmonte	28,31	45,62	1291,50

$$\Sigma E_{\text{Rango}} = 2626,64$$

$$\Sigma = 239244,17$$

De manera que reemplazando los valores correspondientes en la ecuación 1 se obtiene :

$$\text{Ley de carbonato} : 239244,17/2626,64 = 91,08 \%$$

e) **Calcular la composición química del yacimiento.**

1) Para el cálculo del porcentaje de  $\text{SiO}_2$  y  $\text{Al}_2\text{O}_3$  del yacimiento de caliza se utilizan los datos contenidos en la **Tabla N° 28**

**TABLA N° 28**

**% $\text{SiO}_2$  y %  $\text{Al}_2\text{O}_3$  DE LOS RANGOS DE CARBONATO : ALTO, INTERMEDIO, BAJO Y DESMONTE**

<b>RANGOS DE CARBONATO</b>	<b>ESPESOR (m)</b>	<b>%<math>\text{SiO}_2</math></b>	<b>%<math>\text{SiO}_2</math> * <math>E_{\text{Rango}}</math></b>	<b>%<math>\text{Al}_2\text{O}_3</math></b>	<b>%<math>\text{Al}_2\text{O}_3</math> * <math>E_{\text{Rango}}</math></b>
<b>Alto</b>	1922,99	2,45	4708,22	0,77	1472,22
<b>Intermedio</b>	511,25	10,16	5192,86	1,76	905,26
<b>Bajo</b>	164,09	22,50	3692,68	2,87	470,30
<b>Desmante</b>	28,31	33,62	951,84	6,91	195,51
	$\Sigma E_{\text{Rango}} = 2626,64$		$\Sigma = 14545,60$		$\Sigma = 3043,29$

De manera que reemplazando los valores correspondientes en la ecuación 2 se obtiene :

$$\% \text{SiO}_2 = 14545,60 / 2626,64 = 5,54 \%$$

$$\% \text{Al}_2\text{O}_3 = 3043,29 / 2626,64 = 1,16 \%$$

2) Para el cálculo del porcentaje de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  y  $\text{CaO}$  del yacimiento de caliza se utilizan los datos contenidos en la **Tabla N° 29**

**TABLA N° 29**

**% Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y %CaO DE LOS RANGOS DE CARBONATO : ALTO, INTERMEDIO, BAJO Y DESMONTE**

RANGOS DE CARBONATO	ESPESOR (m)	%Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> * E <sub>Rango</sub>	%CaO	%CaO * E <sub>Rango</sub>
Alto	1922,99	0,37	716,98	52,93	101780,53
Intermedio	511,25	1,07	549,98	46,66	23838,33
Bajo	164,09	1,25	205,74	37,81	6204,97
Desmonte	28,31	2,65	75,14	26,02	736,76
$\Sigma E_{Rango} = 2626,64$			$\Sigma = 1547,85$		$\Sigma = 132560,59$

3) De manera que reemplazando los valores correspondientes en la ecuación 2 se obtiene :

$$\% \text{Fe}_2\text{O}_3 = 1547,85 / 2626,64 = 0,59 \%$$

$$\% \text{CaO} = 132560,59 / 2626,64 = 50,47 \%$$

4) Para el cálculo del porcentaje de MgO y SO<sub>3</sub> del yacimiento de caliza se utilizan los datos contenidos en la **Tabla N° 30**

**TABLA N° 30**

**%MgO y %SO<sub>3</sub> DE LOS RANGOS DE LOS RANGOS DE CARBONATO : ALTO, INTERMEDIO, BAJO Y DESMONTE**

RANGOS DE CARBONATO	ESPESOR (m)	%MgO	%MgO * E <sub>Rango</sub>	%SO <sub>3</sub>	%SO <sub>3</sub> * E <sub>Rango</sub>
Alto	1922,99	1,49	2865,08	0,17%	332,54
Intermedio	511,25	1,56	797,35	0,38%	194,61
Bajo	164,09	1,67	273,65	0,45%	73,12
Desmonte	28,31	1,03	29,22	0,87%	24,61
$\Sigma E_{Rango} = 2626,64$			$\Sigma = 3965,30$		$\Sigma = 624,88$

De manera que reemplazando los valores correspondientes en la ecuación 2 se obtiene :

$$\% \text{MgO} = 3965,30 / 2626,64 = 1,51 \%$$

$$\% \text{SO}_3 = 624,88 / 2626,64 = 0,24 \%$$

5) Para el cálculo del porcentaje de  $\text{Na}_2\text{O}$  y  $\text{K}_2\text{O}$  se utilizan los datos contenido sen la **Tabla N° 31**

**TABLA N° 31**

**%  $\text{Na}_2\text{O}$  y %  $\text{K}_2\text{O}$  DE LOS RANGOS DE CARBONATO : ALTO, INTERMEDIO, BAJO Y DESMONTE**

RANGOS DE CARBONATO	ESPESOR (m)	% $\text{K}_2\text{O}$	% $\text{K}_2\text{O}$ * $E_{\text{Rango}}$	% $\text{Na}_2\text{O}$	% $\text{Na}_2\text{O}$ * $E_{\text{Rango}}$
Alto	1922,99	0,11	213,81	0,05	95,08
Intermedio	511,25	0,43	220,93	0,12	59,59
Bajo	164,09	0,63	104,05	0,04	5,84
Desmante	28,31	1,63	46,19	0,03	0,94
	$\Sigma E_{\text{Rango}} = 2626,64$		$\Sigma = 584,99$		$\Sigma = 161,46$

De manera que reemplazando los valores correspondientes en la ecuación 2 se obtiene :

$$\% \text{K}_2\text{O} = 584,99 / 2626,64 = 0,22 \%$$

$$\% \text{Na}_2\text{O} = 161,46 / 2626,64 = 0,06 \%$$

El resumen de los resultados de la ley de carbonato y la composición química del yacimiento Cerro Palo se encuentra en la **Tabla N° 33**.

**TABLA N° 32**

**% CARBONATO TOTAL Y COMPOSICIÓN QUÍMICA PONDERADA DE LOS RANGOS DE CARBONATO : ALTO, INTERMEDIO, BAJO Y DESMONTE DEL YACIMIENTO CERRO PALO**

RANGO DE CARBONATO	TONELADAS HUMEDAS (TMH)	VOLUMEN (m <sup>3</sup> )	ESPESOR PONDERADO (m)	% MATERIAL POR RANGOS DE CARBONATO	% SiO <sub>2</sub>	% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	% Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	% CaO	% MgO	% SO <sub>3</sub>	% K <sub>2</sub> O	% Na <sub>2</sub> O	% Matrix CO <sub>2</sub>	% CARBONATO TOTAL
Alto	106033710,87	42413484,35	106,83	72,32	2,45	0,77	0,37	52,93	1,49	0,17	0,11	0,05	41,63	95,32
Intermedio	28190336,24	11276134,50	28,40	19,23	10,16	1,77	1,08	46,63	1,56	0,38	0,43	0,12	37,73	84,95
Bajo	9580157,16	3832062,86	9,65	6,53	22,50	2,87	1,25	37,81	1,67	0,45	0,63	0,04	32,61	68,42
Desmante	2809825,24	1123930,10	2,83	1,92	33,62	6,91	2,65	26,02	1,03	0,87	1,63	0,03	27,07	45,62

**TABLA N° 33**

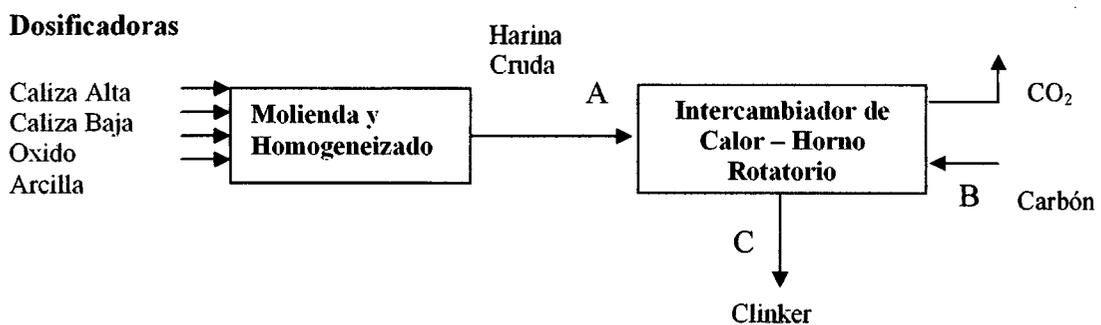
**LEY DE CARBONATO Y COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL YACIMIENTO CERRO PALO**

TONELADAS HUMEDAS (TMH)	VOLUMEN (m <sup>3</sup> )	% SiO <sub>2</sub>	% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	% Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	% CaO	% MgO	% SO <sub>3</sub>	% K <sub>2</sub> O	% Na <sub>2</sub> O	% MATRIX CO <sub>2</sub>	% CARBONATO TOTAL
146614995,4	58645998,16	5,54	1,16	0,59	50,47	1,51	0,24	0,22	0,06	40,15	91,08

**6.4 DETERMINACION DE LA VIDA OPERACIONAL DEL YACIMIENTO DE CALIZA PARA LA PRODUCCIÓN DE CLINKER PÓRTLAND TIPO I**

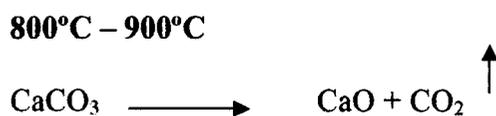
El cálculo de la vida operacional del yacimiento se inicia con el diseño de mezcla de las materias primas crudas para la producción de clinker Tipo I, teniendo en cuenta los requisitos químicos para la producción de cemento portland Tipo I (norma ASTM C 150 o NTP 334.009). A continuación se presenta el diseño de mezclas para la producción de clinker tipo I.

**FIGURA N° 20**  
**ESQUEMA DE LA PRODUCCIÓN DE CLINKER**

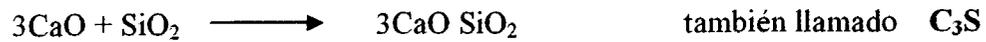
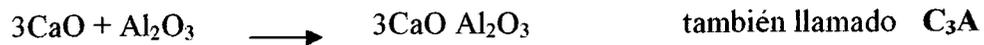


**a) Cálculo de la composición del clinker deseado**

**1) Reacciones que ocurren en el proceso :**



**1200°C – 1450°C**



## 2) Variables de diseño :

$$\text{L}_{\text{SF}} = 92,10$$

$$\text{M.S} = 2,61$$

$$\text{M.A.} = 1,36$$

$$\text{F}_2\text{O}_3 = 3,60$$

Donde :

$$\text{L}_{\text{SF}} = 100 * \text{CaO} / (2,85 * \text{SiO}_2 + 1,18 * \text{Al}_2\text{O}_3 + 0,65 * \text{Fe}_2\text{O}_3) \quad \text{ecuación (5)}$$

$$\text{M.S.} = \text{SiO}_2 / (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3) \quad \text{ecuación (6)}$$

$$\text{M.A.} = \text{Al}_2\text{O}_3 / \text{Fe}_2\text{O}_3 \quad \text{ecuación (7)}$$

**3) Composición del Clinker.-** Para el cálculo de la composición del clinker se reemplazan los valores asumidos de  $\text{L}_{\text{SF}}$ ,  $\text{M.S.}$ ,  $\text{M.A.}$  y el valor fijado de  $\text{F}_2\text{O}_3$  en las ecuaciones 5, 6 y 7 obteniéndose los siguientes valores:

$$\text{M.A.} = \text{Al}_2\text{O}_3 / \text{Fe}_2\text{O}_3$$

$$1,36 = \text{Al}_2\text{O}_3 / 3,60$$

$$\text{Al}_2\text{O}_3 = 4,90$$

$$\begin{aligned} \text{M.S.} &= \text{SiO}_2 / (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3) \\ 2,61 &= \text{SiO}_2 / (4,90 + 3,60) \end{aligned}$$

$$\text{SiO}_2 = 22,17$$

$$\begin{aligned} L_{\text{SF}} &= 100 * \text{CaO} / (2,85 * \text{SiO}_2 + 1,18 * \text{Al}_2\text{O}_3 + 0,65 * \text{Fe}_2\text{O}_3) \\ 91 &= 100 * \text{CaO} / (2,85 * 22,17 + 1,18 * 4,90 + 0,65 * 3,60) \end{aligned}$$

$$\text{CaO} = 65,68$$

**4) Cálculo de las Formulas de Bogue.-** Para el cálculo de las fórmulas de Bogue se reemplazan los valores hallados de CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> en las ecuaciones 8, 9,10 y 11.

$$\text{C}_3\text{S} = 4,071 \text{ CaO} - 7,6 * \text{SiO}_2 - 6,718 * \text{Al}_2\text{O}_3 - 1,43 * \text{Fe}_2\text{O}_3 - 2,852 * \text{SO}_3 \quad \text{ecuación (8)}$$

$$\text{C}_2\text{S} = 2,867 * \text{SiO}_2 - 0,7544 * \text{C}_3\text{S} \quad \text{ecuación (9)}$$

$$\text{C}_3\text{A} = 2,65 * \text{Al}_2\text{O}_3 - 1,692 * \text{Fe}_2\text{O}_3 \quad \text{ecuación (10)}$$

$$\text{C}_4\text{AF} = 3,043 * \text{Fe}_2\text{O}_3 \quad \text{ecuación (11)}$$

De manera que se obtienen los siguientes resultados :

$$\text{C}_3\text{S} = 59,11$$

$$\text{C}_2\text{S} = 19,01$$

$$\text{C}_3\text{A} = 6,88$$

$$\text{C}_4\text{AF} = 10,94$$

**b) Cálculo del Aporte de Ceniza.-** El carbón utilizado es una mezcla que contienen 30% de carbón nacional y 70% de carbón importado.

Las características de la mezcla de carbón son las siguientes :

**Porcentaje de cenizas : 23,906**

**Composición de las cenizas :**

%SiO<sub>2</sub> = 54,08

%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> = 26,73

%Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> = 4,07

%CaO = 7,54

%MgO = 0,93

%SO<sub>3</sub> = 3,91

Poder calorífico = 5825,30 Kcal. / Kg. carbón.

### **1) Cantidad de Carbón Requerido**

El consumo calórico para la producción de clinker = 830 Kcal / Kg clinker

El carbón requerido por Kg de clinker es :

$$\text{Carbón requerido} = \frac{830\text{Kcal/Kgclinker}}{5825\text{Kcal/KgCarbón}} = 0,142\text{KgCarbón/KgClin ker}$$

Para producir 1 TM de clinker se requiere 0,142 TM de carbón.

2) **Aporte de Ceniza.**- El aporte de ceniza se calcula de la siguiente manera :

Aporte de Ceniza =	Carbón requerido	*	% ceniza en el carbón	*	Composición química de las cenizas del óxido
--------------------	------------------	---	-----------------------	---	--

Aporte SiO <sub>2</sub>	=	0,142 * 0,23906 * 54,08 = 1,84
Aporte de Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	=	0,142 * 0,23906 * 26,73 = 0,91
Aporte de Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	=	0,142 * 0,23906 * 4,07 = 0,14
Aporte de CaO	=	0,142 * 0,23906 * 7,54 = 0,26
Aporte de MgO	=	0,142 * 0,23906 * 0,93 = 0,03
Aporte de SO <sub>3</sub>	=	0,142 * 0,23906 * 3,91 = 0,13

**c) Cálculo de la Composición del Crudo Requerido**

Se sabe que cuando el combustible es petróleo el cálculo de crudo requerido se realiza de la siguiente manera :

$$\text{Crudo requerido} = \text{Clinker sin ceniza} * \text{Factor (fpf)} \quad (12)$$

Para nuestro caso por la presencia de ceniza el crudo requerido está dado de la siguiente manera :

$$\text{Crudo requerido} = \underbrace{(\text{clinker deseado} - \text{aporte de ceniza})}_{\text{Clinker sin ceniza}} * \text{Factor (fpf)} \quad (13)$$

El Factor de conversión crudo quemado es :

Pérdida al fuego : 36,5

Factor (fpf):  $(100-36.5)/100 = 0,635$

La **Tabla N° 34** resume la composición química del crudo requerido. En la columna 1 se tiene la composición del clinker deseado, en la columna 2 se tiene el aporte de ceniza, en la columna 4 se tiene composición del crudo requerido cuando el combustible es carbón que es calculado mediante la ecuación 13.

**TABLA N° 34**

**COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL CRUDO REQUERIDO CON COMBUSTIBLE CARBON**

	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
<b>COMPONENTE</b>	<b>CLINKER DESEADO</b>	<b>APORTE DE CENIZA</b>	<b>CLINKER SIN CENIZA</b>	<b>CRUDO REQUERIDO</b>
<b>SiO<sub>2</sub></b>	22,17	1,84	20,34	12,91
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	4,90	0,91	3,99	2,53
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	3,60	0,14	3,46	2,20
<b>CaO</b>	65,68	0,26	65,42	41,54
<b>MgO</b>	2,00	0,03	1,97	1,25
<b>SO<sub>3</sub></b>	0,60	0,13	0,47	0,30
<b>Suma</b>	98,85	3,31	95,54	60,67
<b>LSF</b>	92,1		100,79	100,79
<b>M.S.</b>	2,61		2,73	2,73
<b>M.A.</b>	1,36		1,15	1,15

**d) Requerimientos de Materias Primas.**

La vida operacional del yacimiento de caliza se puede calcular considerando: los cuatro rangos de carbonato contenidos en el yacimiento (alto, intermedio, bajo y desmonte) y/o dos rangos de carbonato contenidos en el yacimiento (alto e intermedio). Por tener ambos casos una ley de carbonato alto nombraremos a ambas calizas Altas.

Con la idea de poder optimizar el uso del material calizo para la producción de cemento se mezclara la caliza estudiada (caliza alta para ambos casos) con otra caliza en stock cuyo contenido de carbonato puede ser bajo o intermedio a la que llamaremos caliza baja.

Los valores de la composición química de la caliza baja, óxido y arcilla son tomados de datos de Cemento Andino S.A. (Ver Tabla N° 35)

**TABLA N° 35**

**COMPOSICIÓN QUÍMICA DE : CALIZA BAJA, ARCILLA Y OXIDO DE FIERRO**

	% SiO <sub>2</sub>	% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	% Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%CaO
Caliza Baja	22,10	2,40	1,48	39,65
Arcilla	49,38	27,67	5,53	1,67
Óxido de Fierro	24,10	6,30	46,48	6,60

**Fuente :** Cemento Andino S.A

**Caso A : Requerimiento y tiempo de vida del yacimiento de caliza cuando la caliza usada está constituida por los rangos de carbonato : alto, intermedio, bajo y desmonte.**

La composición química de la caliza de carbonato alto, intermedio, bajo y desmonte se muestra en la **Tabla N° 36**

**TABLA N° 36**

**COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA MEZCLA DE CALIZAS CONSTITUIDA POR LOS RANGOS DE CARBONATO : ALTO, INTERMEDIO, BAJO Y DESMONTE DEL YACIMIENTO**

<b>TONELADAS HUMEDAS (TMH)</b>	% SiO <sub>2</sub>	%Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%CaO	%MgO	<b>% CARBONATO TOTAL</b>
146614995,4	5,54	1,16	0,59	50,47	1,51	91,08

En la tabla 37 se tiene valores de composición de cada materia prima y también valores de composición del crudo requerido, las incógnitas a encontrar son las proporciones de caliza alta, caliza baja, óxido y arcilla a alimentar, se tiene las ecuaciones (1, 2, 3 y 4) y con cuatro incógnitas como se observa a continuación:

**TABLA N° 37**

**COMPOSICIÓN DE MATERIAS PRIMAS Y CRUDO REQUERIDO**

COMPONENTES	COMPOSICIÓN DE MATERIAS PRIMAS				CRUDO REQUERIDO
	ALTA	BAJA	OXIDO	ARCILLA	
% SiO <sub>2</sub>	5,54	22,10	24,1	49,38	12,91
% Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,59	1,48	46,48	5,53	2,20
% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,16	2,40	6,3	27,67	2,53
% CaO	50,47	39,65	6,6	1,67	41,54

$$5,54 A + 22,10 B + 24,1 O + 49,38 R = 12,91 \quad \text{ecuación (1)}$$

$$0,59 A + 1,48 B + 46,48 O + 5,53 R = 2,20 \quad \text{ecuación (2)}$$

$$1,16 A + 2,40 B + 6,3 O + 27,67 R = 2,53 \quad \text{ecuación (3)}$$

$$50,47 A + 39,65 B + 6,6 O + 1,67 R = 41,54 \quad \text{ecuación (4)}$$

Donde realizando el cálculo correspondiente para resolver el sistema de ecuaciones se obtienen los siguientes resultados.

$$\text{Caliza alta} = A = 0,546551$$

$$\text{Caliza baja} = B = 0,346351$$

$$\text{Óxido de Hierro} = O = 0,025478$$

$$\text{Arcilla} = R = 0,032680$$

$$A + B + O + R = 0,951060$$

Expresando los resultados en porcentajes se tiene las siguientes proporciones de material a alimentar :

Caliza alta	=	$0,546551 * 100 / 0,951060$	=	57,47 %
Caliza baja	=	$0,346351 * 100 / 0,951060$	=	36,42 %
Óxido	=	$0,025478 * 100 / 0,951060$	=	2,68 %
Arcilla	=	$0,032680 * 100 / 0,951060$	=	3,44 %

Obtenidas las proporciones de materiales necesarios se prosigue a determinar en toneladas el requerimiento de caliza alta a dosificar.

Se sabe que el Crudo es igual a la suma de caliza alta + caliza baja + óxido + arcilla, y que el consumo anual de crudo es 1 513 260 TM / año para una producción anual de clinker de 1 050 000 TM/año.

Entonces el requerimiento en TM de caliza es :

$$\text{Caliza Alta} = 0,5747 * 1\,513\,260 = 869\,633,72 \text{ TM}$$

El material antes de ingresar al proceso se encuentra con una humedad aproximada de 6%, entonces calculando las toneladas del material en base húmeda se tiene :

$$\text{Caliza Alta} = 869\,633,72 / (1 - 0,06) = 925\,142,25 \text{ TMH}$$

Siendo esta la cantidad de material calcáreo requerido es posible también calcular la vida operacional del yacimiento de caliza para un ritmo de producción de 1 050 000 TM de clinker, el cual se determina de la siguiente manera :

$$\text{Vida operacional} = \frac{\text{Toneladas de caliza en estudio del yacimiento}}{\text{Consumo por año de producción}}$$

$$\text{Vida Operacional} = 146\,614\,029,5 / 925\,142,25 = 158,47 \text{ años.}$$

Las toneladas secas de caliza baja, óxido y arcilla a dosificar son :

$$\begin{aligned} \text{Caliza baja} &= 0,3642 * 1\,513\,260 = 551\,089,96 \text{ TM} \\ \text{Óxido de fierro} &= 0,0268 * 1\,513\,260 = 40\,538,76 \text{ TM} \\ \text{Arcilla} &= 0,0344 * 1\,513\,260 = 51\,997,56 \text{ TM} \end{aligned}$$

Si la humedad de la caliza baja es 6%, la humedad del óxido 15% y la humedad de la arcilla 6% entonces las toneladas a dosificar para la producción de cemento Portland Tipo I son :

$$\begin{aligned} \text{Caliza baja} &= 586\,265,92 \text{ TMH} \\ \text{Óxido de fierro} &= 47\,692,66 \text{ TMH} \\ \text{Arcilla} &= 55\,316,56 \text{ TMH} \end{aligned}$$

**TABLA N° 38**

**REQUERIMIENTO DE MATERIAS PRIMAS PARA LA PRODUCCIÓN DE CEMENTO PÓRTLAND TIPO I Y TIEMPO DE VIDA DEL YACIMIENTO "CASO A"**

MATERIAS PRIMAS	REQUERIMIENTOS DE MATERIAS PRIMAS			TIEMPO DE VIDA DEL YACIMIENTO DE CALIZA
	% PESO	TMS	TMH	
Caliza Alta	57,47	869 633,72	925142,25	158,47 años
Caliza Baja	36,42	551089,96	586 265,92	
Óxido	2,68	40538,76	47 692,66	
Arcilla	3,44	51997,56	55 316,56	

**Caso B : Requerimiento y tiempo de vida del yacimiento de caliza cuando la caliza usada está constituida por los rangos de carbonato: alto e intermedio.**

La composición química de la caliza de carbonato alto e intermedio se muestra en la **Tabla N° 39**

**TABLA N° 39**

**COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA MEZCLA DE CALIZAS DE CARBONATO ALTO E INTERMEDIO DEL YACIMIENTO CERRO PALO**

<b>RANGOS DE CARBONATO</b>	<b>TONELADAS TMH</b>	<b>% SiO<sub>2</sub></b>	<b>% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>% Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>% CaO</b>	<b>% MgO</b>	<b>% CARBONATO TOTAL</b>
Alto + Intermedio	134224047,1	4,07	0,98	0,52	51,61	1,50	93,14

Calculando las proporciones de materiales requeridos para la producción de clinker :

$$4,07 A + 22,10 B + 24,1 O + 49,38 R = 12,91 \quad \text{ecuación (1)}$$

$$0,52 A + 1,48 B + 46,48 O + 5,53 R = 2,20 \quad \text{ecuación (2)}$$

$$0,98 A + 2,40 B + 6,3 O + 27,67 R = 2,53 \quad \text{ecuación (3)}$$

$$51,61 A + 39,65 B + 6,6 O + 1,67 R = 41,54 \quad \text{ecuación (4)}$$

Donde realizando el cálculo correspondiente para resolver el sistema de ecuaciones se obtienen los siguientes resultados.

$$\text{Caliza alta} = A = 0,502907$$

$$\text{Caliza baja} = B = 0,387410$$

$$\text{Óxido de Hierro} = O = 0,025294$$

$$\text{Arcilla} = R = 0,034262$$

$$A + B + O + R = 0,949872$$

Expresando los resultados en porcentajes se tiene las siguientes proporciones de material a alimentar :

Caliza alta	=	52,94%
Caliza baja	=	40,79%
Óxido	=	2,66%
Arcilla	=	3,61%

El requerimiento de caliza es :

<b>Caliza Alta</b>	=	0,5294 * 1 513 260	=	801191,61 TM secas
<b>Caliza Alta</b>	=	801191,61 / (1 - 0,06)	=	852331,50 TMH

La vida operacional del yacimiento de caliza para un ritmo de producción de 1 050 000 TM de clinker es :

$$\text{Vida Operacional} = 134\ 224\ 047,1 / 852331,50 = 157,48 \text{ años.}$$

Las toneladas secas de caliza baja, óxido y arcilla a dosificar son :

Caliza baja	=	0,4079 * 1 513 260	=	617 189,63 TM
Óxido de fierro	=	0,0266 * 1 513 260	=	40 296,03 TM
Arcilla	=	0,0361 * 1 513 260	=	54 582,72 TM

Si la humedad de la caliza baja es 6%, la humedad del óxido 15% y la humedad de la arcilla 6% entonces las toneladas a dosificar para la producción de cemento Portland Tipo I son :

**Caliza baja** = 656 584,71 TMH

**Óxido de fierro** = 47 407,09 TMH

**Arcilla** = 58 066,72 TMH

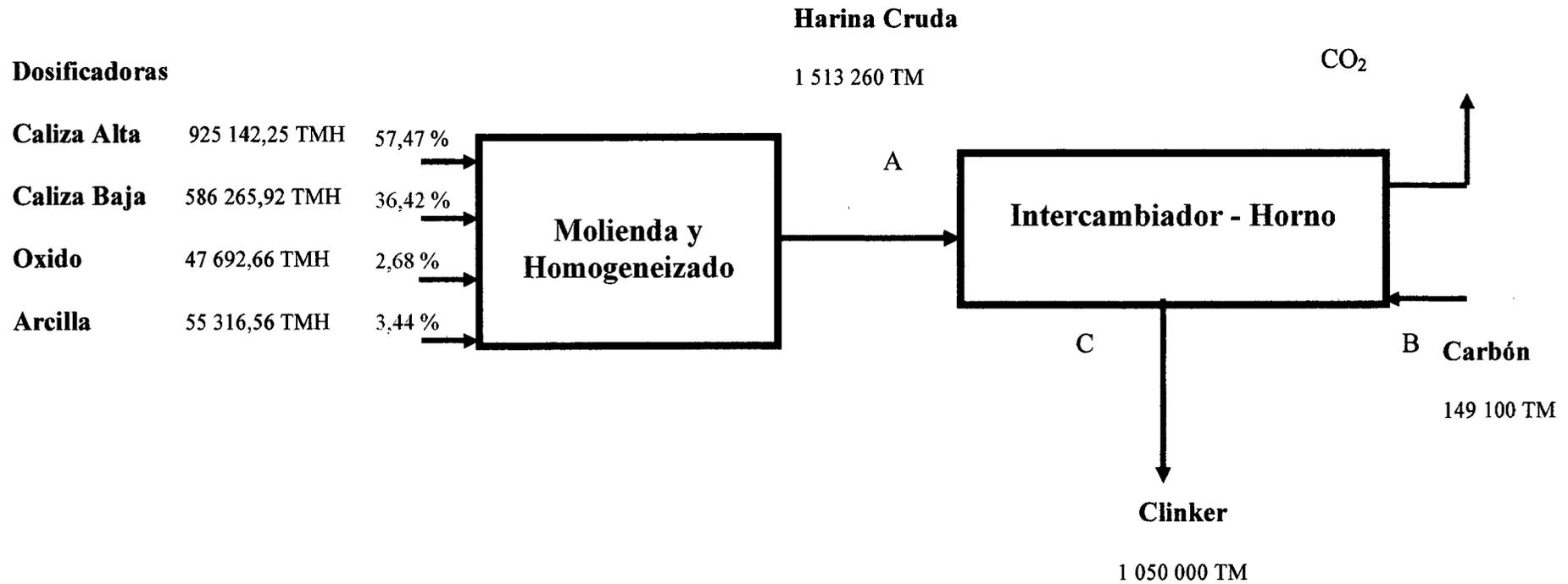
**TABLA N° 40**

**REQUERIMIENTOS DE MATERIAS PRIMAS PARA LA PRODUCCIÓN DE CEMENTO PÓRTLAND TIPO I Y TIEMPO DE VIDA DEL YACIMIENTO DE CALIZA "CASO B"**

<b>MATERIAS PRIMAS</b>	<b>REQUERIMIENTO DE MATERIA PRIMA</b>			<b>TIEMPO DE VIDA DEL YACIMIENTO DE CALIZA</b>
	<b>% PESO</b>	<b>TMS</b>	<b>TMH</b>	
<b>Caliza Alta</b>	52,94	801 191,61	852 331,50	157,48 años
<b>Caliza Baja</b>	40,79	617 189,63	656 584,71	
<b>Óxido</b>	2,66	40 296,03	47 407,09	
<b>Arcilla</b>	3,61	54 582,72	58 066,72	

FIGURA N° 21

REQUERIMIENTOS DE MATERIA PRIMA PARA LA PRODUCCIÓN DE CLINKER PÓRTLAND TIPO I  
CASO A

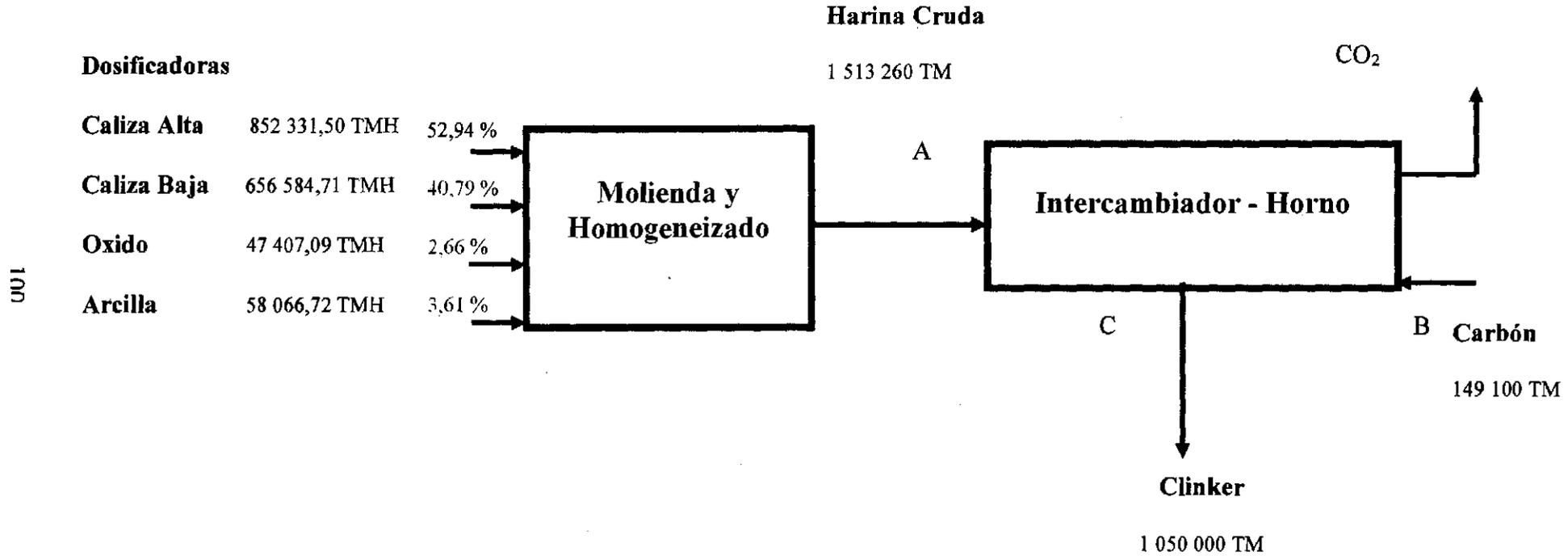


Factor: Crudo usado / Clinker prod. = 1,4412

Base de cálculo: 1 050 000 TM clinker producido.

FIGURA N° 22

REQUERIMIENTOS DE MATERIA PRIMA PARA LA PRODUCCION DE CLINKER PÓRTLAND TIPO I  
CASO B



Factor: Crudo usado / Clinker prod. = 1.4412

Base de cálculo: 1 050 000 TM clinker producido.

## VII DISCUSIÓN DE RESULTADOS

### 7.1 DETERMINACION DE LA LONGITUD DE LAS MUESTRAS PARA ANÁLISIS QUIMICO

En la etapa de muestreo, las muestras de caliza obtenidas mediante el método de perforaciones diamantinas son estudiadas obteniéndose a partir de ellas muestras para análisis químico.

Se presentan dos criterios para definir la longitud de las muestras de caliza para análisis químico :

- a) **El Primer Criterio.**- Está basado en establecer una longitud constante para las muestras, que involucra agrupar en la mayoría de los casos muestras de caliza de diferentes características físicas y litológicas ocasionando cierta distorsión en el contenido de carbonato de las muestras e impidiendo determinar con veracidad la existencia de uniformidad secuencial en el contenido de carbonato, dato útil para la formación de muestras compósito.
  
- b) **El Segundo Criterio.**- Está basado en identificar y medir las longitudes que alcanzan las características físicas y litológicas en las muestras de caliza, y dividir en longitudes menores aquellas muestras cuyas longitudes exceden los 5 metros, con la finalidad de ofrecer representatividad para el análisis químico. Las muestras que superan los 5 metros de longitud son divididas en tamaños menores teniendo en cuenta la presencia de fracturas y estado del material, si es suelto o compacto (**Ver Capítulo VI, Figura N° 15 y Apéndice, Tabla N° 42**)

Para obtener una mejor información de las muestras para análisis químico se trabajó con el segundo criterio porque permite obtener una mejor información química del yacimiento y de sus estratos teniendo en cuenta las características físicas y litológicas presentes en las muestras de caliza y porque permite determinar la existencia de uniformidad secuencial en el contenido de carbonato, dato útil para la formación de muestras compósito.

Aplicando éste criterio se obtuvieron 1213 muestras para análisis químico y entre las características físicas y litológicas encontradas en las muestras de caliza se encuentran: venas y venillas de calcita, calcita, calizas dolomíticas de color pardo, calizas fracturadas, calizas de color gris claro, gris oscuro, calizas brechadas etc (**Ver Figuras 16, 17, 18, 19 y el ejemplo en el Apéndice, Tabla N° 42**)

## **7.2 DETERMINACION DE MUESTRAS COMPOSITO DE CALIZA**

La presencia de uniformidad secuencial en el contenido de carbonato de las muestras de caliza nos permitió formar muestras compósito para determinar la composición química del yacimiento Cerro Palo.

Para la formación de muestras compósito se estudiaron dos criterios :

- a) **El Primer Criterio.-** Consiste en formar una muestra compósito representativa por rango de carbonato (alto, intermedio, bajo y desmonte). Este criterio es útil para brindar información química del yacimiento dejando de lado proporcionar información química útil para estudios geológicos del yacimiento, ya que no se toma en cuenta la variación de las características físicas y litológicas de los estratos del yacimiento (**Ver Capítulo VI, Tabla N° 14**)

**b) El Segundo Criterio.-** Consiste en agrupar sólo muestras de caliza con las mismas características físicas y litológicas y con porcentajes de  $\text{CaCO}_3$  muy cercanos entre si (**Ver Capítulo VI, Tabla N° 16**)

Este último criterio es utilizado en nuestro estudio, porque cada muestra compósito está preparada para proporcionar información química de la longitud que abarca sus correspondientes características físicas y litológicas. Se obtuvieron 747 muestras compósito que proporcionan información química del yacimiento y de sus estratos para nuestro estudio y para otros estudios del yacimiento.

Las muestras compósito obtenidas en base a éste criterio aparte de proporcionar información química para nuestro estudio, también proporcionan información química útil para :

- 1) Explotar el yacimiento de caliza y mejorar su control de calidad ya que éste criterio permite localizar en los estratos del yacimiento de caliza las zonas que tienen elementos de concentraciones apropiadas y no apropiadas para la producción de cemento (**Ver Apéndice, Tabla N° 46**)
  
- 2) Estudios geológicos del yacimiento, ya que éste criterio proporciona información sobre las características físicas y litológicas presentes en las muestras de caliza del yacimiento (**Ver Apéndice, Tabla N° 42**) con su correspondiente composición química (**Ver Apéndice, Tabla N° 46**)

### 7.3 DETERMINACION DE LA LEY DE CARBONATO Y COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL YACIMIENTO DE CALIZA

En la determinación de la ley de carbonato y la composición química del yacimiento de caliza se trabajó en base al parámetro químico “%CaCO<sub>3</sub>”, para agrupar las muestras de caliza de acuerdo a rangos de carbonato y determinar la presencia de calizas de carbonato: alto (%CaCO<sub>3</sub> ≥ 90%), intermedio (75% ≤ %CaCO<sub>3</sub> < 90%), bajo (60% ≤ %CaCO<sub>3</sub> < 75%), y desmonte (60% < %CaCO<sub>3</sub>) con sus respectivas composiciones químicas.

El contenido de MgO en las cuatro categorías de caliza se encuentra dentro del rango 1% - 3% (Ver, **Tabla N° 11 punto 3.6.5 y Contrastar con la Tabla N° 32 del Capítulo VI**) que indica que las calizas tienen un contenido de MgO bajo y son aptas para la producción de cemento portland Tipo I.

De las cuatro categorías de caliza encontradas, la caliza de alto contenido de carbonato cuya proporción es de 72,32% y la caliza de contenido de carbonato intermedio cuya proporción es de 19,23% son las que se encuentran en mayor proporción en el yacimiento.

Las calizas de bajo contenido de carbonato con 6.53% de proporción y el desmonte con 1.92% de proporción se encuentran en cantidades menores en el yacimiento.

El desmonte y la caliza de carbonato bajo por encontrarse en proporciones menores y por tener bajo contenido de MgO pueden mezclarse y ser utilizadas juntamente con las calizas de alto carbonato y las calizas de carbonato intermedio, con la finalidad de aprovechar su contenido de SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> en la producción de cemento.

Contrastando los resultados de la composición química ponderada y los resultados del porcentaje de Carbonato ponderado del yacimiento en estudio, con los límites químicos del material calcáreo para la elaboración de cemento (**Tabla N° 11 del punto 4.6.5**), la caliza del yacimiento Cerro Palo es apta para la producción de cemento portland Tipo I

La ley de carbonato ponderada indica que el yacimiento cuenta con una caliza de alto porcentaje de carbonato, cuya ley es 91,08% y la composición química ponderada indica que el yacimiento de caliza tiene muy bajo contenido de:  $K_2O$  (0,22%) y  $Al_2O_3$  (1,16%), bajo contenido de:  $Na_2O$  (0,06%),  $SiO_2$  (5,54%),  $Fe_2O_3$  (0,59%) y  $MgO$  (1,51%). El contenido de sulfato de 0,24% es ligeramente alto pero es muy inferior al límite máximo de sulfato permitido en el cemento (2,5% - 3%), este contenido de sulfato en la caliza no afectará al cemento porque la proporción de yeso (sulfato de calcio dihidratado) que será utilizado en la molienda del clinker tipo I, es calculada teniendo en cuenta que existe un contenido de sulfato que proviene de las materias primas (caliza, arcilla y óxido) y está contenido en el clinker que debe tomarse en cuenta para no superar el valor límite de sulfato en el cemento.

Existen zonas del yacimiento en donde las concentraciones de  $MgO$  son altas y superan el 7% (**Ver Capítulo VI, Tabla N° 25**), el punto de muestreo SD31 es el que presenta mayor concentración de  $MgO$  (9,62%), los puntos de muestreo SD33 y SD47 presentan concentraciones medias de  $MgO$  (3,56% y 4,69%), los puntos de muestreo SD32, SD36, SD43, y SD46 presentan concentraciones bajas de  $MgO$  (2,19%, 2,40%, 1,17%, 1,02%) y el resto de puntos de muestreo contienen concentraciones muy bajas de  $MgO$  (menores al 1%). Debido a que sólo son tres los puntos de muestreo que aportan contenidos medios y altos de  $MgO$ , el contenido de  $MgO$  ponderado en el yacimiento es bajo (1,51 %)

La composición química ponderada de cada punto de muestreo (**Ver Capítulo VI, Tabla N° 24**) y la composición química de cada muestra de caliza (**ejemplo Tabla N° 46 del Apéndice**) resultan útiles para el trabajo de explotación ya que es la etapa donde se estudiara la adecuada dosificación de las calizas para la producción de cemento portland tipo I, teniendo en cuenta no sobrepasar los límites de MgO según Normas ASTM C 150 o NTP 334.009

#### **7.4 DETERMINACION DE LA VIDA OPERACIONAL DEL YACIMIENTO DE CALIZAS PARA LA PRODUCCIÓN DE CLIKER PÓRTLAND TIPO I**

El cálculo del tiempo de vida del yacimiento requiere conocer las toneladas del material en estudio (dato hallado en el punto 5.3 c) y el consumo de caliza por año de producción de clinker (para el caso 1 050 000 TM clinker/año)

El consumo de caliza por año de producción de clinker es calculado desarrollando el diseño de mezclas crudas para la producción de clinker Tipo I. El clinker para cemento Portland Tipo I no cuenta con normas establecidas pero en la industria del cemento, éste debe poseer los componentes que permitan obtener un producto final (cemento) que se amolde a las especificaciones de calidad establecidas para el cemento Portland Tipo I contenidas en la norma americana ASTM C 150 o en la norma peruana NTP 334.009

El primer requisito importante en la caliza para la elaboración de cemento es un determinado contenido de CaO que pueda combinarse con el resto de elementos principales de manera que durante la calcinación no se produzca cal libre (exceso de CaO). Esto se logra generalmente por medio de la mezcla de un material base de alto contenido de CaO y otro con bajo contenido de CaO presentándose a veces el caso en que hay que añadir materiales

correctivos, razón por la cual en el diseño de mezclas la caliza estudiada se mezcla con una caliza baja, arcilla y óxido de hierro.

Realizando el diseño de mezcla para la clinker producción de clinker Portland Tipo I utilizando carbón como combustible (mezcla de 30% de carbón nacional y 70% de carbón importado) se determinó que para una saturación por cal de 92,1, módulo de sílice de 2,61 y módulo de alúmina de 1,36; el tiempo de vida del yacimiento es 157 años con 172 días considerando que la caliza a utilizar está constituida por calizas de carbonato alto e intermedio del yacimiento Cerro Palo y de 158 años con 169 días si caliza está constituida por las calizas de carbonato: alto, intermedio, bajo y desmonte del yacimiento Cerro Palo.

Las características que presentan las calizas de carbonato bajo y el desmonte (bajo contenido de MgO y contenido de SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> aprovechables para la producción de clinker Tipo I, (Ver Tabla N° 32) permiten utilizar dichas calizas conjuntamente con las calizas de carbonato alto e intermedio prolongando de ésta manera aproximadamente un año con tres días la vida operacional del yacimiento.

## VIII CONCLUSIONES

En base a la investigación realizada se concluye que :

- 1) La identificación y medición de las longitudes que alcanzan las características físicas y litológicas en las muestras de caliza permiten obtener información química del yacimiento y de sus estratos; y también proporcionan información química para la formación de muestras compósito.
- 2) Es factible formar muestras compósito para determinar la composición química del yacimiento Cerro Palo mediante la agrupación de muestras de caliza con porcentajes de carbonato muy cercanos entre sí y con las mismas características físicas y litológicas.
- 3) De acuerdo al contenido de carbonato, el yacimiento de caliza está constituido por cuatro categorías de calizas para la producción de cemento portland tipo I (clasificación propia de Cemento Andino S.A.) :
  - a) Calizas de carbonato alto ( $\%CaCO_3 \geq 90\%$ ) con una proporción de 72,32% y un contenido de MgO de 1,49%.
  - b) Calizas de carbonato intermedio ( $75\% \leq \%CaCO_3 < 90\%$ ) con una proporción de 19,23% y un contenido de MgO de 1,56%.
  - c) Calizas de carbonato bajo ( $60\% \leq \%CaCO_3 < 75\%$ ) con una proporción de 6,53% y un contenido de MgO de 1,67%.

d) Desmante ( $\%CaCO_3 < 60$ ) con una proporción de 1,92% y un contenido de MgO de 1,03%.

- 4) La ley de carbonato ponderada del yacimiento Cerro Palo es del 91,08% y su composición química ponderada está constituida por 5,54%  $SiO_2$ , 1,16%  $Al_2O_3$ , 0,59%  $Fe_2O_3$ , 50,47%  $CaO$ , 1,51%  $MgO$ , 0,24%  $SO_3$ , 0,22%  $K_2O$  y 0,06%  $Na_2O$ , indicando estos valores que la caliza del yacimiento es apta para la producción de cemento Portland Tipo I.
- 5) Para un ritmo de producción de 1 050 000 TM de clinker portland Tipo I/ año, la vida operacional del yacimiento de caliza es de 158 años con 169 días si la caliza a utilizar está constituida por calizas de carbonato: alto, intermedio, bajo y desmante y de 157 años con 172 días si la caliza a utilizar está constituida por calizas de carbonato alto e intermedio.

## **IX RECOMENDACIONES**

- 1) Se recomienda durante la explotación y dosificación de la caliza del yacimiento Cerro Palo para la producción de cemento tener presente :
  - a) La existencia de zonas cavernosas en los puntos de muestreo SD31, SD35, SD36, SD39, SD40, SD42, SD44 y SD47 que son huecos de grandes profundidades que pueden ocasionar accidentes durante la explotación del yacimiento.
  - b) La presencia de una concentración ligeramente alta de MgO (9,62%) en el punto de muestreo SD31 y concentraciones medias de MgO (3,56% y 4,69%) en los puntos de muestreo SD33 y SD47, por ser un compuesto controlado para el cemento.
  
- 2) Se recomienda tomar la opción de utilizar el desmonte y la caliza de bajo contenido de carbonato conjuntamente con las calizas de carbonato alto e intermedio siempre y cuando no afecte la calidad del cemento teniendo como base el bajo contenido de MgO y el contenido de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  y  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  aprovechables de éstas dos calizas para la producción de clinker Tipo I.

## X FUENTE DE INFORMACIÓN

- 1) Dr. Phil Fritz Keil “CEMENTO FABRICACIÓN – PROPIEDADES Y APLICACIONES”  
Editores Técnicos Asociados, S.A. Barcelona España, 1973
  
- 2) Robert S. Boyton “CHEMISTRY AND TECHNOLOGY OF LIMESTONE”  
Editorial Mc-Graw Hill Ltd., New York, London Sydney,  
1966
  
- 3) Archivos del Departamento de “ESTUDIO GEOLÓGICO DEL YACIMIENTO CERRO  
Cantera Cemento Andino S.A PALO 1997”
  
- 4) Ing. Santiago Estrada “EXPERIENCIAS EN LA ELABORACION DE  
CURVAS PARA LA FLUORESCENCIA DE RAYOS X”  
Tecnología Industrial ARPL. ASOCEM, V Coloquio de  
Química del Cemento, Lima Nov. 1994
  
- 5) H.FW. Taylor “LA QUÍMICA DE LOS CEMENTOS”  
Volumen I., Enciclopedia de la Química Industrial.  
Ediciones URMO- Bilbao España, 1967.
  
- 6) Walter Duda. “MANUAL TECNOLÓGICO DEL CEMENTO”  
Editores Técnicos Asociados, S.A. Barcelona España,  
1977.

- 7) Julio Cesar Alarcón Gonzáles “MANUAL DE NORMAS Y PROCEDIMIENTOS DE MUESTREO Y EVALUACIÓN EN MINAS”  
Perú 1990, Instituto de Ingenieros de Minas del Perú, 1990.
- 8) NTP 334.111 2002 “CAL Y PIEDRA CALIZA”  
Definiciones y Nomenclatura, Indecopi 2002
- 9) Pedro Tumialán,  
Pablo De la Cruz “PAUTAS PARA EL ESTUDIO DE LA GEOLOGÍA ECONOMICA DE CALIZAS PARA FUNDENTES CALCAREOS”  
XIII Convención de Ingenieros de Minas. Arequipa, Pág. 8-12. 1976
- 10) Henri Cambefort “PERFORACIONES Y SONDEOS”  
Ediciones Omega S.A.. España 1990
- 11) Douglas A. Skoog “PRINCIPIOS Y ANÁLISIS INSTRUMENTAL”  
Quinta Edición. Mc Graw Hill. 2001, Revista de Minerales Industriales 1996, Ingemet, Pág. 131-140.
- 12) Cirilo Joaquin Guerrero Hernández “ROCAS CALIZAS”  
Tema de Ciencia y Tecnología. Vol. 5 Mayo –Agosto 2001, Pág.3-14
- 13) Holderbank “SEMINARIO DE CEMENTO”  
Volumen 1, Costa Rica, 1980.

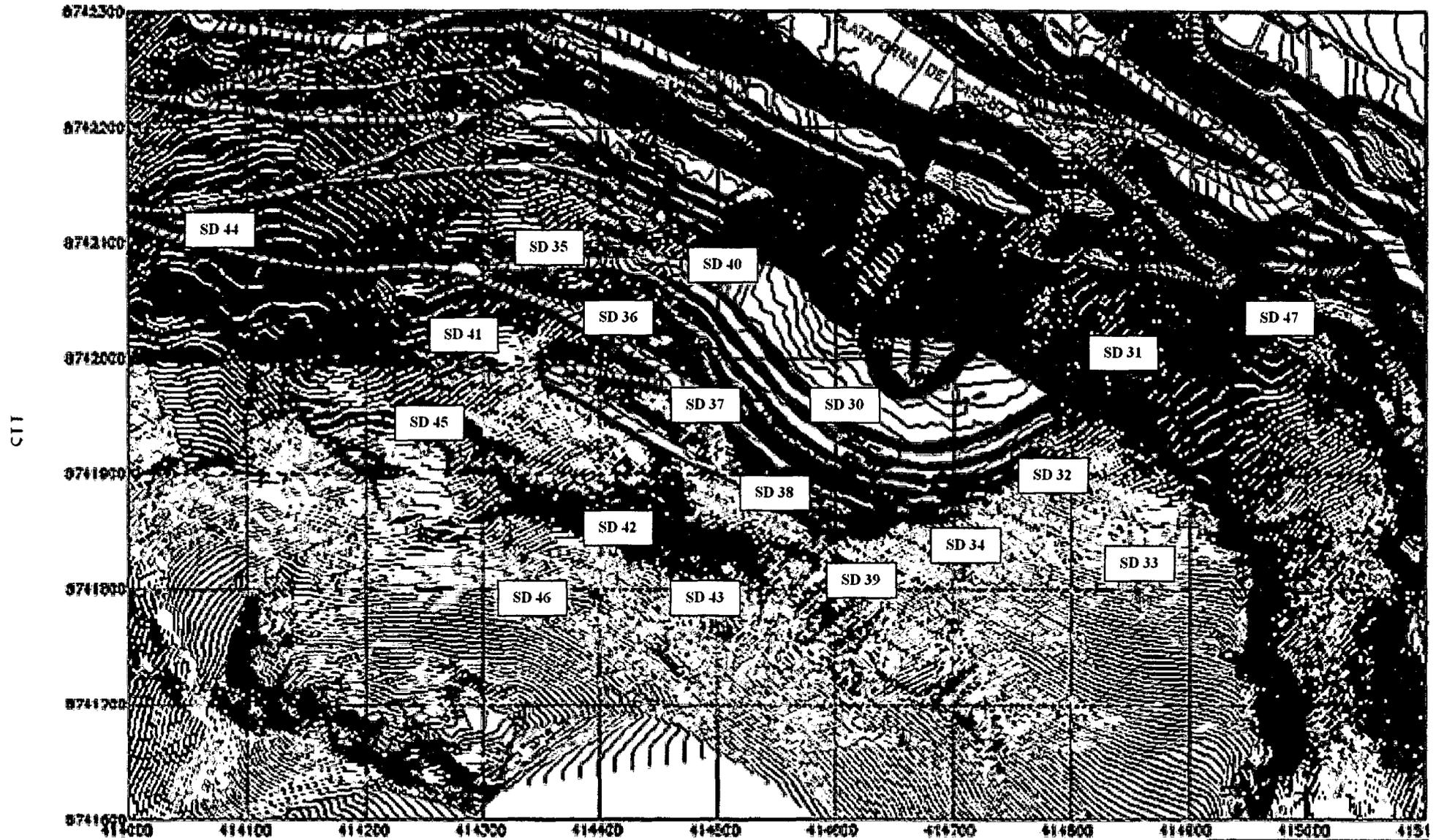
## XI APÉNDICE

Tabla N° 41	Ubicación espacial de los puntos de muestreo del yacimiento de caliza	114
Figura N° 23	Mapa de muestreo del yacimiento de caliza Cerro Palo.	115
Tabla N° 42	Reporte de muestreo correspondiente al punto de muestreo SD 34	116
Tabla N° 43	Reporte de carbonato total del punto de muestreo SD34	118
Tabla N° 44	Reporte de preparación de muestras compósito del punto de muestreo SD 34	119
Tabla N° 45	Reporte de análisis de Espectrometría por Fluorescencia de Rayos X del punto de muestreo SD 34	120
Tabla N° 46	Informe de análisis químico del punto de muestreo SD 34	122
Figura N° 24	Preparación de muestras	125
Figura N° 25	Análisis de carbonato total	126
Figura N° 26	Análisis de Espectrometría por Fluorescencia de Rayos X	127

**TABLA N° 41****UBICACIÓN ESPACIAL DE LOS PUNTOS DE MUESTREO  
DEL YACIMIENTO DE CALIZA**

<b>N° SONDAJES</b>	<b>PUNTOS DE MUESTREO O SONDAJES</b>	<b>COORDENADAS UTM</b>		
		<b>NORTE</b>	<b>ESTE</b>	<b>COTA</b>
1	SD – 30 – 03	8741936,017	414602,480	4104,416
2	SD – 31 – 03	8741984,686	414851,594	4030,490
3	SD – 32 – 03	8741878,510	414785,018	4132,066
4	SD – 33 – 03	8741790,078	414858,967	4149,961
5	SD – 34 – 03	8741813,232	414709,089	4161,842
6	SD – 35 – 03	8742078,433	414355,555	4116,753
7	SD – 36 – 03	8742011,649	414411,143	4141,146
8	SD – 37 – 03	8741933,826	414490,012	4157,121
9	SD – 38 – 03	8741858,408	414548,963	4175,232
10	SD – 39 – 03	8741786,742	414618,923	4184,551
11	SD – 40 – 03	8742065,511	414501,865	4093,144
12	SD – 41 – 03	8741998,379	414287,773	4160,577
13	SD – 42 – 03	8741820,832	414419,596	4225,471
14	SD – 43 – 03	8741760,067	414482,133	4227,845
15	SD – 44 – 03	8742095,375	414068,851	4102,292
16	SD – 45 – 03	8741920,639	414245,446	4203,258
17	SD – 46 – 03	8741771,688	414342,836	4250,672
18	SD – 47 – 03	8742009,940	414970,520	4010,493

# MAPA DE MUESTREO DEL YACIMIENTO DE CALIZA CERRO PALO



**TABLA N° 42**

**REPORTE DE MUESTREO CORRESPONDIENTE AL PUNTO DE MUESTREO SD 34**

<b>laboratorio</b>	<b>Lab-Reg-01</b>	<b>Reporte de Muestreo</b>	<b>Pág 1 de 2</b>
--------------------	-------------------	----------------------------	-------------------

Nombre del Sondaje : SD-34    Metros Perforados : 160,95 m  
 Fecha de inicio : 04-06-03    Dirección : S 50° W  
 Fecha de Finalización : 06-06-03    Inclinación : 70 °

Longitud de Muestra (m)			N° de Muestra	Código de Muestra	Características físicas y litológicas
Desde	Hasta	Ancho de Muestra			
0,00	4,20	4,20	1	SD 34-03 (1)	Caliza gris clara; con abundancia de venas y venillas de calcita, fractura por posible falla en los 7.22 m - 7.56 m y de 8.87m - 9.75m.
4,20	7,00	2,80	2	SD 34-03 (2)	
7,00	9,80	2,80	3	SD 34-03 (3)	
9,80	14,00	4,20	4	SD 34-03 (4)	
14,00	16,78	2,78	5	SD 34-03 (5)	
16,78	19,50	2,72	6	SD 34-03 (6)	Caliza gris clara; por zonas fragmentos oscuros, venas y venillas de calcita.
19,50	22,20	2,70	7	SD 34-03 (7)	Caliza gris clara; abundancia de venas de calcita; zona fracturada; desde los 26.10 m - 26.40 m y en los 27.20 m y presencia de material de relleno terroso.
22,20	24,98	2,78	8	SD 34-03 (8)	
24,98	27,76	2,78	9	SD 34-03 (9)	
27,76	31,92	4,16	10	SD 34-03 (10)	Caliza con abundancia de venas de calcita, un poco más oscuro que el anterior.
31,92	35,75	3,83	11	SD 34-03 (11)	Tramo de caliza brechada (fracturas rellenas con material) fallas en los 36.60 m y los 38.80 m.
35,75	39,25	3,50	12	SD 34-03 (12)	
39,25	42,15	2,90	13	SD 34-03 (13)	Caliza gris clara con abundancia de venas y venillas.
42,15	45,05	2,90	14	SD 34-03 (14)	
45,05	47,45	2,40	15	SD 34-03 (15)	
47,45	50,85	3,40	16	SD 34-03 (16)	
50,85	52,04	1,19	17	SD 34-03 (17)	Caliza brechada, zona de falla, pocas venas y venillas de calcita.
52,04	55,42	3,38	18	SD 34-03 (18)	Caliza gris clara abundancia de calcita.
55,42	57,59	2,17	19	SD 34-03 (19)	Caliza gris oscura presencia de venas y venillas de calcita.
57,59	58,29	0,70	20	SD 34-03 (20)	Caliza similar a la anterior de aparente estratificación cruzada.
58,29	59,67	1,38	21	SD 34-03 (21)	Caliza gris clara, abundancia de venas y venillas de calcita. En la parte intermedia se aprecia una caliza de textura granular.
59,67	60,60	0,93	22	SD 34-03 (22)	
60,60	65,08	4,48	23	SD 34-03 (23)	
65,08	65,59	0,51	24	SD 34-03 (24)	Caliza brechada de matriz oscura, aparente estratificación cruzada.
65,59	66,75	1,16	25	SD 34-03 (25)	Caliza gris clara, abundancia de venillas de calcita.
66,75	69,45	2,70	26	SD 34-03 (26)	Caliza un poco más oscura que la anterior brechada por tramos, venillas de calcita.
69,45	72,13	2,68	27	SD 34-03 (27)	Caliza gris clara, con abundancia de venillas de calcita.

continúa Tabla N° 42.....

Longitud de Muestra (m)			N° de Muestra	Código de Muestra	Características físicas y litológicas
Desde	Hasta	Ancho de Muestra			
72,13	74,57	2,44	28	SD 34-03 (28)	Caliza gris clara con un poco mas de venillas que el anterior.
74,57	77,00	2,43	29	SD 34-03 (29)	
77,00	79,91	2,91	30	SD 34-03 (30)	Caliza gris clara con abundancia de venillas de calcita.
79,91	82,97	3,06	31	SD 34-03 (31)	Caliza gris clara, un poco menos de venillas de calcita que la anterior.
82,97	85,89	2,92	32	SD 34-03 (32)	Caliza gris clara brechada por tramos con algunas venas de calcita.
85,89	87,35	1,46	33	SD 34-03 (33)	Caliza gris clara brechado por venillas y venas de calcita.
87,35	90,27	2,92	34	SD 34-03 (34)	
90,27	91,72	1,45	35	SD 34-03 (35)	Caliza gris clara, con fracturas rellenadas de material terroso.
91,72	95,85	4,13	36	SD 34-03 (36)	Caliza gris con tendencia a oscuro, abundancia de venas y venillas, brechado por calcita.
95,85	98,61	2,76	37	SD 34-03 (37)	Caliza gris oscuro, brechada por tramos, con ausencia de venillas al inicio.
98,61	101,37	2,76	38	SD 34-03 (38)	
101,37	105,48	4,11	39	SD 34-03 (39)	Caliza gris oscura brechada, algunas venillas de calcita, falla en los 107.70 m.
105,48	108,13	2,65	40	SD 34-03 (40)	
108,13	110,00	1,87	41	SD 34-03 (41)	Caliza gris oscura, con ausencia de venas de calcita.
110,00	110,85	0,85	42	SD 34-03 (42)	Falla en 110.45m., caliza gris clara brechada fracturas rellenadas.
110,85	112,63	1,78	43	SD 34-03 (43)	Caliza gris oscura brechada por tramos con presencia de venas y venillas de calcita.
112,63	115,12	2,49	44	SD 34-03 (44)	Caliza gris clara fracturas rellenas de material terroso, falla en los 114.55 m.
115,12	116,74	1,62	45	SD 34-03 (45)	Caliza gris clara brechada con presencia de venas y venillas de calcita, fracturas rellenas de material terroso, aparente estratificación cruzada.
116,74	118,53	1,79	46	SD 34-03 (46)	
118,53	122,91	4,38	47	SD 34-03 (47)	Caliza gris oscura, zona fracturada, fallas pequeñas y escalonadas.
122,91	126,24	3,33	48	SD 34-03 (48)	
126,24	130,26	4,02	49	SD 34-03 (49)	
130,26	132,94	2,68	50	SD 34-03 (50)	Caliza más oscura brechada, fracturas rellenadas de material terroso, por tramos aparente estratificación cruzada, ausencia de venillas en las dos últimas muestras.
132,94	136,93	3,99	51	SD 34-03 (51)	
136,93	138,10	1,17	52	SD 34-03 (52)	Caliza un poco más clara brechada, fracturas con relleno.
138,10	139,44	1,34	53	SD 34-03 (53)	Caliza gris oscura de aparente estratificación cruzada.
139,44	143,78	4,34	54	SD 34-03 (54)	Caliza gris oscura, brechada, fragmentos oscuros, por tramos de aparente estratificación cruzada y fracturas rellenadas.
143,78	146,04	2,26	55	SD 34-03 (55)	
146,04	150,42	4,38	56	SD 34-03 (56)	
150,42	153,33	2,91	57	SD 34-03 (57)	Caliza gris oscura, fragmentos pequeños claros y oscuros; ausencia de venillas, brechado.
153,33	156,05	2,72	58	SD 34-03 (58)	
156,05	158,97	2,92	59	SD 34-03 (59)	Caliza gris oscuro brechada fracturas rellenadas con material terroso y fallas desde 157.75 m – 158.50 m.
158,97	159,91	0,94	60	SD 34-03 (60)	Caliza gris oscura por tramos aparente caliza dolomítica, ausencia de venillas.
159,91	160,95	1,04	61	SD 34-03 (61)	Tramo brechado por falla en 160.50 m y presencia de material de relleno en fracturas.





Código de Muestra	Longitud de Muestra (m)	% CaCO <sub>3</sub>	Muestras Compósito	% CaCO <sub>3</sub> de la muestra compósito	Espesor Total (m)	W Muestra (g.)
SD 34-03 (36)	4,13	96,80	C16	96,80	4,13	200,0000
SD 34-03 (37)	2,76	88,90	C17	88,25	5,52	100,0000
SD 34-03 (38)	2,76	87,60				100,0000
SD 34-03 (39)	4,11	93,52	C18	93,55	6,76	121,5976
SD 34-03 (40)	2,65	93,60				78,4024
SD 34-03 (41)	1,87	90,22	C19	90,22	1,87	200,0000
SD 34-03 (42)	0,85	93,20	C20	93,36	2,63	64,6388
SD 34-03 (43)	1,78	93,44				135,3612
D 34-03 (44)	2,49	91,40	C21	91,40	2,49	200,0000
SD 34-03 (45)	1,62	90,00	C22	91,41	7,79	41,5918
SD 34-03 (46)	1,79	91,30				45,9564
SD 34-03 (47)	4,38	91,98				112,4518
SD 34-03 (48)	3,33	92,60	C23	92,39	7,35	90,6122
SD 34-03 (49)	4,02	92,22				109,3878
SD 34-03 (50)	2,68	85,30	C24	86,32	6,67	80,3598
SD 34-03 (51)	3,99	87,00				119,6402
SD 34-03 (52)	1,17	93,50	C25	93,50	1,17	200,0000
SD 34-03 (53)	1,34	89,20	C26	89,20	1,34	200,0000
SD 34-03 (54)	4,34	87,90	C27	88,38	10,98	79,0528
SD 34-03 (55)	2,26	90,82				41,1658
SD 34-03 (56)	4,38	87,60				79,7814
SD 34-03 (57)	2,91	93,80	C28	92,75	5,63	103,3748
SD 34-03 (58)	2,72	91,62				96,6252
SD 34-03 (59)	2,92	66,40	C29	66,40	2,92	200,0000
SD 34-03 (60)	0,94	99,00	C30	99,00	0,94	200,0000
SD 34-03 (61)	1,04	72,58	C31	72,58	1,04	200,0000



TABLA N° 46

INFORME DE ANÁLISIS QUÍMICO DEL PUNTO DE MUESTREO SD 34

<b>Laboratorio</b>	<b>Lab-Reg-05</b>	<b>Informe Análisis Químico</b>	<b>Pág 1 de 3</b>
--------------------	-------------------	---------------------------------	-------------------

Nombre del Sondaje	:	SD-34	N° Compositos	:	31
Fecha Ingreso de Muestras	:	25/06/2003	Metros Perforados	:	160,95
Fecha de Reporte del Informe	:	03/07/2003	Dirección	:	S 50° W
N° Muestras	:	61	Inclinación	:	70°

Código de Muestra	Longitud de Muestra (m)			% Carbonato Total	% Carbonato Total Composito	Análisis de Espectrometría por Fluorescencia de Rayos X								N° Muestras Composito
	Desde	Hasta	Ancho de Muestra			% SiO2	% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	% Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	% CaO	% MgO	% SO <sub>3</sub>	% K <sub>2</sub> O	% Na <sub>2</sub> O	
SD 34-03 (1)	0,00	4,20	4,20	97,20	96,87	1,17	0,66	0,33	55,15	0,57	0,07	0,08	0,04	SD 34-03 (1)
SD 34-03 (2)	4,20	7,00	2,80	94,90										
SD 34-03 (3)	7,00	9,80	2,80	96,52										
SD 34-03 (4)	9,80	14,00	4,20	98,80										
SD 34-03 (5)	14,00	16,78	2,78	95,80	90,39	6,34	0,81	0,35	51,07	0,38	0,19	0,07	0,04	SD 34-03 (2)
SD 34-03 (6)	16,78	19,50	2,72	90,36										
SD 34-03 (7)	19,50	22,20	2,70	90,42										
SD 34-03 (8)	22,20	24,98	2,78	94,22	93,84	3,37	0,74	0,36	53,74	0,34	0,08	0,07	0,04	SD 34-03 (3)
SD 34-03 (9)	24,98	27,76	2,78	93,50										
SD 34-03 (10)	27,76	31,92	4,16	93,82										
SD 34-03 (11)	31,92	35,75	3,83	97,80	97,80	0,89	0,41	0,16	55,54	0,34	0,08	0,02	0,03	SD 34-03 (4)
SD 34-03 (12)	35,75	39,25	3,50	75,82	75,82	15,16	4,85	1,32	42,49	1,38	0,16	0,45	0,04	SD 34-03 (5)
SD 34-03 (13)	39,25	42,15	2,90	97,10	96,32	1,59	0,72	0,32	55,25	0,51	0,14	0,05	0,05	SD 34-03 (6)
SD 34-03 (14)	42,15	45,05	2,90	97,30										
SD 34-03 (15)	45,05	47,45	2,40	95,22										
SD 34-03 (16)	47,45	50,85	3,40	95,60										

Continúa Tabla N° 46.....

Código de Muestra	Longitud de Muestra (m)			Vía Clásica		Análisis de Espectrometría por Fluorescencia de Rayos X								N° Muestras Composito
	Desde	Hasta	Ancho de Muestra	% Carbonato Total	% Carbonato Total Composito	% SiO <sub>2</sub>	% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	% Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	% CaO	% MgO	% SO <sub>3</sub>	% K <sub>2</sub> O	% Na <sub>2</sub> O	
SD 34-03 (17)	50.85	52.04	1,19	91.30	91.30	4.02	1.42	0.77	51.78	0.61	0.19	0.18	0.04	SD 34-03 (7)
SD 34-03 (18)	52.04	55.42	3,38	95.30	95.30	3.06	0.56	0.47	51.80	1.23	0.16	0.07	0.15	SD 34-03 (8)
SD 34-03 (19)	55.42	57.59	2.17	94.40	94.11	2.51	1.04	0.52	53.94	0.41	0.16	0.11	0.04	SD 34-03 (9)
SD 34-03 (20)	57.59	58.29	0.70	93.22										
SD 34-03 (21)	58.29	59.67	1.38	96.98	95.50	1.95	0.88	0.44	55.04	0.35	0.09	0.10	0.04	SD 34-03 (10)
SD 34-03 (22)	59.67	60.60	0.93	96.60										
SD 34-03 (23)	60.60	65.08	4.48	94.82										
SD 34-03 (24)	65.08	65.59	0.51	90.22	90.22	5.01	1.35	0.65	51.05	0.42	0.62	0.20	0.04	SD 34-03 (11)
SD 34-03 (25)	65.59	66.75	1.16	95.32	96.29	1.36	0.69	0.32	55.31	0.44	0.16	0.07	0.04	SD 34-03 (12)
SD 34-03 (26)	66.75	69.45	2.70	94.42										
SD 34-03 (27)	69.45	72.13	2.68	96.82										
SD 34-03 (28)	72.13	74.57	2.44	96.82										
SD 34-03 (29)	74.57	77.00	2.43	97.12										
SD 34-03 (30)	77.00	79.91	2.91	97.12										
SD 34-03 (31)	79.91	82.97	3.06	96.00										
SD 34-03 (32)	82.97	85.89	2.92	94.22	94.22	2.69	1.00	0.44	54.05	0.41	0.45	0.10	0.05	SD 34-03 (13)
SD 34-03 (33)	85.89	87.35	1.46	96.38	96.46	1.54	0.67	0.30	55.39	0.38	0.19	0.07	0.04	SD 34-03 (14)
SD 34-03 (34)	87.35	90.27	2.92	96.50										
SD 34-03 (35)	90.27	91.72	1.45	91.36	91.36	4.08	1.45	0.68	51.87	0.37	0.13	0.22	0.05	SD 34-03 (15)
SD 34-03 (36)	91.72	95.85	4.13	96.80	96.80	1.25	0.65	0.27	55.38	0.39	0.22	0.06	0.05	SD 34-03 (16)
SD 34-03 (37)	95.85	98.61	2.76	88.90	88.25	6.99	1.56	1.02	48.87	0.63	0.48	0.45	0.15	SD 34-03 (17)
SD 34-03 (38)	98.61	101.37	2.76	87.60										
SD 34-03 (39)	101.37	105.48	4.11	93.52	93.55	2.62	1.06	0.50	51.17	0.35	0.25	0.17	0.04	SD 34-03 (18)
SD 34-03 (40)	105.48	108.13	2.65	93.60										
SD 34-03 (41)	108.13	110.00	1.87	90.22	90.22	4.37	1.51	0.68	50.59	0.59	0.61	0.33	0.04	SD 34-03 (19)

Continúa Tabla N° 46.....

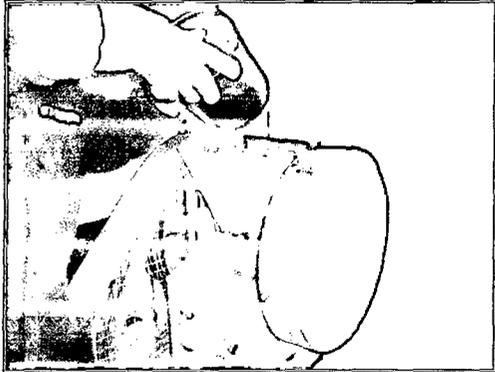
Vía Clásica

Análisis de Espectrometría por Fluorescencia de Rayos X

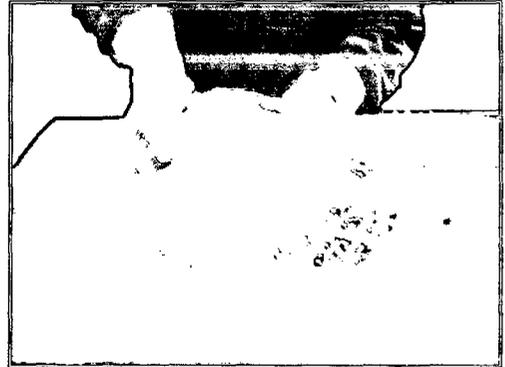
Código de Muestra	Longitud de Muestra (m)			% Carbonato Total	% Carbonato Total Composito	% SiO <sub>2</sub>	% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	% Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	% CaO	% MgO	% SO <sub>3</sub>	% K <sub>2</sub> O	% Na <sub>2</sub> O	N° Muestras Composito
	Desde	Hasta	Ancho de Muestra											
SD 34-03 (42)	110,00	110,85	0,85	93,20	93,36	3,27	1,03	0,50	52,14	1,19	0,30	0,20	0,05	SD 34-03 (20)
SD 34-03 (43)	110,85	112,63	1,78	93,44										
SD 34-03 (44)	112,63	115,12	2,49	91,40	91,40	3,95	1,47	0,71	51,78	0,59	0,08	0,26	0,04	SD 34-03 (21)
SD 34-03 (45)	115,12	116,74	1,62	90,00	91,41	3,95	1,43	0,71	51,34	0,52	0,39	0,31	0,11	SD 34-03 (22)
SD 34-03 (46)	116,74	118,53	1,79	91,30										
SD 34-03 (47)	118,53	122,91	4,38	91,98	92,39	3,29	1,29	0,61	52,73	0,47	0,18	0,21	0,04	SD 34-03 (23)
SD 34-03 (48)	122,91	126,24	3,33	92,60										
SD 34-03 (49)	126,24	130,26	4,02	92,22	86,32	8,11	1,93	1,30	48,18	0,72	0,24	0,51	0,15	SD 34-03 (24)
SD 34-03 (50)	130,26	132,94	2,68	85,30										
SD 34-03 (51)	132,94	136,93	3,99	87,00	93,50	3,09	1,13	0,52	53,45	0,58	0,12	0,20	0,05	SD 34-03 (25)
SD 34-03 (52)	136,93	138,10	1,17	93,50										
SD 34-03 (53)	138,10	139,44	1,34	89,20	89,20	13,11	1,97	0,90	51,34	0,74	0,50	0,45	0,02	SD 34-03 (26)
SD 34-03 (54)	139,44	143,78	4,34	87,90	88,38	6,81	1,62	1,06	48,92	0,78	0,51	0,37	0,15	SD 34-03 (27)
SD 34-03 (55)	143,78	146,04	2,26	90,82										
SD 34-03 (56)	146,04	150,42	4,38	87,60	92,75	6,71	2,15	1,08	44,14	4,04	0,76	0,45	0,06	SD 34-03 (28)
SD 34-03 (57)	150,42	153,33	2,91	93,80										
SD 34-03 (58)	153,33	156,05	2,72	91,62	66,40	21,80	6,28	2,03	36,09	1,47	1,29	1,20	0,03	SD 34-03 (29)
SD 34-03 (59)	156,05	158,97	2,92	66,40										
SD 34-03 (60)	158,97	159,91	0,94	99,00	99,00	1,54	0,65	0,40	43,50	9,76	0,33	0,08	0,09	SD 34-03 (30)
SD 34-03 (61)	159,91	160,95	1,04	72,58	72,58	16,50	4,83	1,42	40,29	1,28	0,85	0,89	0,04	SD 34-03 (31)

**FIGURA Nº 24**

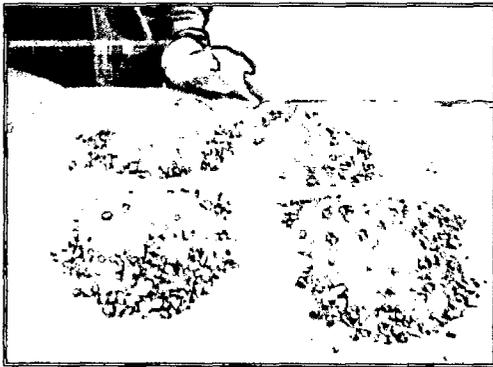
**PREPARACIÓN DE MUESTRAS.**



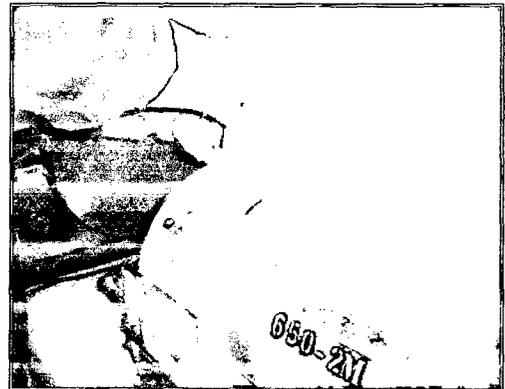
**(a) Chancado.**



**(b) Homogeneizado.**



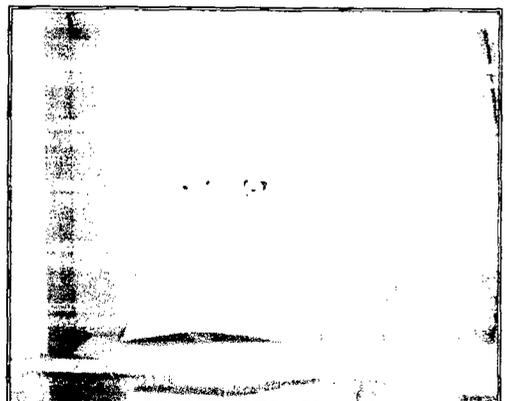
**(c) Cuarteo.**



**(d) Pulverizado.**



**(e) Muestra Pulverizada.**



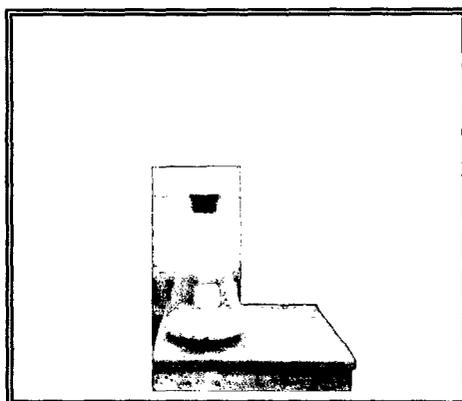
**(f) Muestra preparada para  
Análisis**

**FIGURA N° 25**

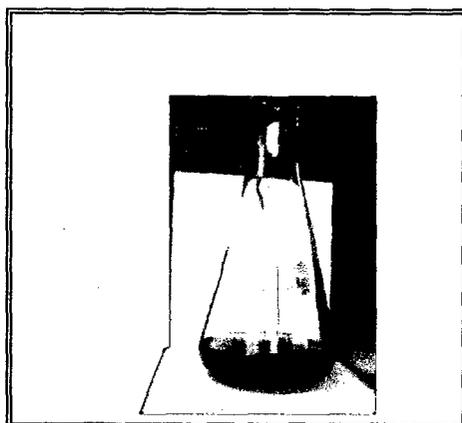
**ANÁLISIS DE CARBONATO TOTAL**



**(a) Pesado de Muestra**



**(b) Ebullición de la Solución de HCl con la muestra de caliza.**



**(c) Titulación con NaOH.**

**FIGURA N° 26**

**ANÁLISIS DE ESPECTROMETRÍA POR FLUORESCENCIA DE RAYOS X.**



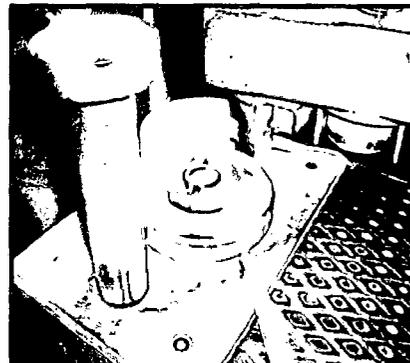
**(a) Pesado de muestra para  
Análisis de FRX**



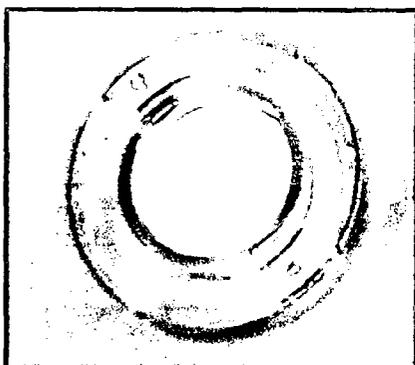
**(b) Pulverizador**



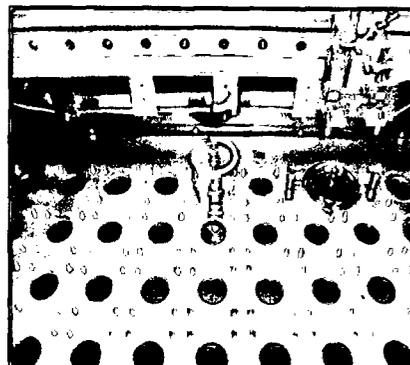
**(c) Muestra pulverizada para el  
Análisis de FRX**



**(d) Prensado**



**(e) Muestra preparada para el  
Análisis de FRX**



**(f) Ubicación de la Muestra para el  
Análisis de FRX**

**XII. ANEXOS.**

Anexo 1: Requisitos químicos del cemento Portland Tipo I.....129  
Anexo 2: Norma Técnica Americana ASTM C 25 1998 .....131  
Anexo 3: Norma Técnica Americana ASTM C 1271-94a 1998 .....133

ANEXO A  
(NORMATIVO)

LÍMITES DE CALIDAD ESPECIFICADAS

TABLA 1 - Requisitos químicos

COMPOSICION QUÍMICA	TIPO DE CEMENTO				
	I	II	III	IV	V
Dióxido de Silicio, (SiO <sub>2</sub> ), %, mín.	-	20,0 (C, D)	-	-	-
Oxido de Aluminio, (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ), %, máx.	-	6,0	-	-	-
Oxido Férrico, (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ), %, máx.	-	6,0 (C, D)	-	6,5	-
Oxido de Magnesio, (MgO), %, máx.	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
Trióxido de Azufre, (SO <sub>3</sub> ), %, máx. (A)					
Cuando (C <sub>3</sub> A) ≤ 8 % (véase Anexo C)	3,0	3,0	3,5	2,3	2,3
Cuando (C <sub>3</sub> A) > 8 % (véase Anexo C)	3,5	(B)	4,5	(B)	(B)
Pérdida por Ignición, %, máx.	3,0	3,0	3,0	2,5	3,0
Residuo Insoluble, %, máx.	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
Silicato Tricálcico, (C <sub>3</sub> S), %, máx.	-	-	-	35(C)	-
Silicato Dicálcico, (C <sub>2</sub> S), %, mín.	-	-	-	40(C)	-
Aluminato Tricálcico (C <sub>3</sub> A), %, máx.	-	8	15	7(C)	5(D)
Alumino-ferrito tetracálcico, más dos veces el aluminato tricálcico (C <sub>4</sub> AF+2(C <sub>3</sub> A)) o solución sólida, (C <sub>4</sub> AF + C <sub>2</sub> F), % máx.	-	-	-	-	25(D)

NOTAS:

(A) Hay casos en que el SO<sub>3</sub> óptimo (Determinado con el método de ensayo indicado en NTP 334.075) para un cemento particular está muy cerca o excede el límite de esta NTP. En estos casos cuando las propiedades de un cemento pueden mejorarse con un exceso en el límite de SO<sub>3</sub> dados en esta tabla, estos valores pueden permitirse con la condición que se haya demostrado mediante la NTP 334.093, que este cemento con exceso de SO<sub>3</sub> no desarrollará expansión en agua que sobrepase el 0,020 % a los 14 días. Cuando el fabricante suministra cemento bajo esta provisión, facilitará a solicitud del comprador datos sustentatorios.

(B) No aplicable

(C) No aplicable cuando se especifique el límite de calor de hidratación de la Tabla 4.

(D) No aplicable cuando se especifique la resistencia a los sulfatos límite de la Tabla 4.

ANEXO B  
(NORMATIVO)

TABLA 3 - Requisitos químicos opcionales (A)

CONSTITUYENTES	TIPOS DE CEMENTO					OBSERVACIONES
	I	II	III	IV	V	
Aluminato Tricálcico,(C <sub>3</sub> A), % (Max)	-	-	8	-	-	Para moderada resistencia a los sulfatos
Aluminato Tricálcico,(C <sub>3</sub> A), % (Máx)	-	-	5	-	-	Para alta resistencia a los sulfatos
Suma (C <sub>3</sub> S+C <sub>3</sub> A), % (Max)	-	58 (B)	-	-	-	Para moderado calor de hidratación
Alcalis Equivalentes, (Na <sub>2</sub> O + 0,658K <sub>2</sub> O), máx., %	0,60 (C)	0,60 (C)	0,60 (C)	0,60 (C)	0,60(C)	Cemento de bajo álcali

NOTAS:

(A) Estos requisitos opcionales son aplicables sólo en caso sea solicitado específicamente.

(B) Cuando se solicite este límite, el límite opcional de calor de hidratación de la Tabla 4 no debe ser requerido.

(C) Este límite debe especificarse cuando el cemento va a ser usado en concretos con agregados reactivos perjudiciales. Deberá hacerse referencia a la NTP 400.037 para un criterio adecuado de reactividad nociva.

5.2 Test the furnace and the analyzer to ensure the absence of leaks and make the required electrical power connections. Prepare the induction furnace and analyzer for operation and sample analysis according to the manufacturer's manual of instructions.

5.3 After the instrument has been prepared for calibration, check the CO<sub>2</sub> collection time which should have an 80-s time duration. The collection time can be checked by timing without a sample. If it is outside of this range, make the necessary adjustment of the collect relay as directed for in the manual of instructions.

6 Calibration:

6.1 Select NIST steel calibration standards containing approximately 0.02 to 1 % carbon (Note 53).

NOTE 53—The accuracy of this test method is dependent to a large extent on the accuracy of the methods used to certify the carbon content in the calibration standards as well as upon their homogeneity. Tests made on NIST steel standards have shown that they are sufficiently homogeneous to permit the use of samples as small as 20 mg.

5.2 Condition the analyzer if more than 2 h have elapsed since the last sample was run and determine the reading as follows:

5.2.1 Load into a crucible 1.5 g of iron chip accelerator and 1 g of tin-coated copper.

5.2.2 Proceed as directed in 32.7.1 to 32.7.4.

5.2.3 Repeat 32.6.2.1 and 32.6.2.2 a sufficient number of times to establish that low and consistent blank readings are obtained.

5.2.4 The normal blank reading should be 0.007 to 0.010. If it is out of this range, determine the cause, correct it, and repeat the steps as directed in 32.6.2.1 through 5.2.3.

5.3 Calibration Curve:

5.3.1 The calibration of the analyzer should be done with carbon standards that bracket the percent carbon in the samples estimated from previous tests, using the following guidelines:

Carbon in Sample	High-Carbon Standard, %	Low-Carbon Standard, %
0.5-1	1.0	0.4
0.2-0.5	0.6	0.2
0.1-0.2	0.2	0.1
0.02-0.1	0.1	0.01

5.3.2 Treat each standard as directed in 32.7.1 to 32.7.4.

5.3.3 Select two standards, one slightly higher and the other slightly lower than the carbon concentration of the sample.

5.3.4 Run the high standard first and observe the reading. The carbon reading should be within ±1 % of the standard carbon value plus the blank (Note 54). If it is within this range, proceed to 32.6.3.7.

NOTE 54—For example, with a blank reading of 0.009, a carbon standard which has a standardized value of 0.428 % should read 0.433 to 0.447.

5.3.5 If the reading is out of this range, run a duplicate sample.

5.3.6 If the second sample has approximately the same reading as the first sample, adjust the slope control (Note 55) to bring the reading to within the tolerance of the standard.

NOTE 55—Not all manufacturers may have this particular feature in their instrument, in which case the manual of instructions supplied with each instrument should be adhered to very closely and the instructions followed.

32.6.3.7 Run a carbon standard that has a carbon value lower than the sample as directed in 32.6.3.1 to 32.6.3.3.

32.6.3.8 The reading should be within +1 % of the carbon value plus the blank (Note 55).

32.6.3.9 If the reading is within tolerance range, proceed to sample analysis, 32.7.1 to 32.7.4.

32.6.3.10 If the reading is out of the tolerance range, run a duplicate sample. If the second sample has the same out-of-tolerance value as the first sample, repeat 32.6.3.4 to 32.6.3.9, readjusting the slope control to bring the high standard within the tolerance of the standard.

32.6.3.11 If the standards are still out of line, refer to the manufacturer's manual for instruction, determine the cause, correct it, and repeat the standardization procedure, 32.6.3.2 to 32.6.3.8.

32.7 Procedure:

32.7.1 Stabilize the furnace and analyzer as directed in 32.5.1 to 32.5.3.

32.7.2 Weigh duplicate samples to the nearest 1 mg, using the following guidelines:

Carbon Content, %	Sample Weight, g
0 to 0.1	1.000
0.1 to 2	0.500
2 to 5	0.250

32.7.3 Transfer the sample to a combustion crucible, add 1.5 g of iron chip accelerator and 1 g of the tin-coated copper accelerator. Place the crucible on the furnace pedestal, raise the pedestal into position, and lock the system. Start the flow of oxygen at 1500 mL/min, and flush the system for 30 s.

32.7.4 Start the cycle timer which energizes the furnace and starts the programmer, after having set it to provide a combustion cycle of 1 min. Using the variable transformer, manually control the plate current within the range from 350 to 450 mA. When the cycle is complete, remove and discard the crucible. Record the reading.

32.8 Calculation—Subtract the value found for the blank in 32.6.2.3 from the reading found in 32.7.4 and record the net reading. Calculate the percentage of carbon as follows:

$$\text{Carbon, \%} = A/B \quad (43)$$

where:

A = net carbon content, %, and

B = sample mass, g.

32.9 Precision and Bias—The precision and bias of this test method have not yet been determined.

33. Calcium Carbonate Equivalent

33.1 Scope—The calcium carbonate equivalence (CCE) test is used to determine the neutralizing capability of a calcareous material and to report this value in terms of percent calcium carbonate equivalents (% CaCO<sub>3</sub>).

33.2 Significance and Use—Calcareous materials such as crushed limestone, hydrated lime and pulverized slags (from the production of steel) have been used extensively as soil modifiers or agricultural liming materials. A measure of their neutralizing capability can be determined through the use of this method of test. Not all neutralizing components of

alcalcareous material may be beneficial, therefore, the chemical analysis is suggested.

33.3 Apparatus:

33.3.1 pH Metre, conforming to Sections 4 and 5 of Test Method E 70.

33.3.2 Mechanical Stirrer.

33.3.3 Sieve, No. 60 (250- $\mu$ m).

33.4 Reagents:

33.4.1 Bromocresol Green Indicator Solution (0.1 g/100 mL)—Dissolve 0.1 g (3'3'5'5'' tetrabromo-m-cresol-sulphonphthalein sodium salt) in 100 mL water.

33.4.2 Hydrochloric Acid, Standard (1.0 N)—Prepare a 1.0 N solution of hydrochloric acid (HCl) and standardize. Refer to available lime index test method for procedure on standardization of hydrochloric acid. For further information on preparation and standardization of solutions see Practice E 200.

33.4.3 Hydrogen Peroxide (30 %)—Concentrated hydrogen peroxide (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>).

33.4.4 Phenolphthalein Indicator Solution (1 g/100 mL)—Dissolve 1.0 g phenolphthalein in 100 mL of alcohol.

33.4.5 Sodium Hydroxide Standard Solution (0.5 N)—Dissolve 20 g of sodium hydroxide (NaOH) in 150 mL of carbon dioxide-free water. Cool the solution to 25°C and dilute to 1 L. Prepare free from carbonates and store in a polyethylene bottle provided with a siphon tube and with guard tubes containing soda-lime, or other suitable device, to prevent absorption of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) from the air:

33.4.5.1 Standardize against 1.0 N hydrochloric acid with three 50 mL aliquots using phenolphthalein solution as indicator. Take the average of the three results as the normality of the Sodium Hydroxide Standard Solution.

$$\text{Normality (NaOH)} = \frac{V_2 N_2}{V_1} \quad (44)$$

where:

V<sub>1</sub> = volume of NaOH Standard Solution,  
V<sub>2</sub> = volume of HCl used to neutralize NaOH, and  
N<sub>2</sub> = normality of HCl Standard Solution.

33.5 Preparation of Sample:

33.5.1 Weigh and dry the limestone and slag samples to constant weight at a temperature of 110 ± 5°C. Record the as-received and dry weights in order to calculate moisture content. Use lime samples as received. Grind the sample to pass a No. 60 (250- $\mu$ m) sieve, mix thoroughly, and store in airtight containers.

33.6 Procedure:

33.6.1 Indicator Titration Method—Place 2.5 g of burnt or hydrated lime (5.0 g of ground limestone or ground marl), sampled as described in Methods C 50, in a 500-mL Erlenmeyer flask; add 100 mL of 1.0 N HCl and boil gently for 5 min. Cool, and titrate the excess acid with 0.5 N NaOH solution using phenolphthalein as indicator. Calculate CCE as described in 33.6.3.

33.6.2 Potentiometric Titration Method (applicable to agricultural liming materials containing large amounts of ferrous iron or coloring matter, but not to silicate materials)—Proceed as in 33.6.1 through "Cool . . .". Transfer to a 100-mL beaker and insert glass and calomel electrodes of a pH metre and a mechanical stirrer. Stir at a moderate speed to avoid splash. Deliver from a buret the 0.5 N NaOH

solution rapidly to pH 5, then dropwise until the solution attains pH 7 and remains constant for 1 min while stirring. Report as CaCO<sub>3</sub> equivalent as described in 33.6.3.

33.6.3 Calculation of Percent Calcium Carbonate Equivalence:

33.6.3.1 Dry Basis:

$$\% \text{CaCO}_{3(\text{dry})} = \frac{5.0045 (V_1 N_1 - V_2 N_2)}{W} \quad (45)$$

where:

V<sub>1</sub> = HCl solution used, mL,  
N<sub>1</sub> = normality of HCl solution,  
V<sub>2</sub> = NaOH solution required for titration of excess acid, mL,  
N<sub>2</sub> = normality of NaOH solution, and  
W = sample weight, g.

33.6.3.2 As-received basis (limestone only):

$$\% \text{CaCO}_{3(\text{as received})} = [1 - (A - B/A)] \times \% \text{CaCO}_{3(\text{dry})} \quad (46)$$

where:

A = as received sample weight from 33.5.1, and  
B = dry sample weight from 33.5.1.

34. pH of Alkaline Earth Solutions

34.1 Scope—This method covers the electrometric pH analysis of solutions made from a variety of lime, hydrate, and limestone-bearing materials.

34.2 Summary of Test Method—In this test method a sample of material is mixed with CO<sub>2</sub>-free deionized water so that the pH of the solution is determined electrometrically. To ensure that an accurate measurement of pH is obtained for samples with a pH greater than 11.5, it is critical that all samples and buffer solutions be at 25.0°C when measured.

34.3 Special Apparatus:

34.3.1 pH Metre—A commercially available pH metre capable of calibration with a minimum of two different buffers (Note 56).

NOTE 56—It is necessary that the pH metre be equipped with a combination pH electrode as well as a temperature compensation probe. It is strongly recommended that a combination pH and temperature compensation probe be used.

34.3.2 Constant Temperature Water Bath—The water bath should be large enough to hold all samples and buffer solutions necessary to perform this method.

34.4 Special Solutions:

34.4.1 Potassium Chloride Solution (0.2 M)—Dry reagent grade KCl crystals at 110°C for 1 h. Dissolve 14.91 g of the dry KCl in CO<sub>2</sub>-free deionized water and dilute to 1 L.

34.4.2 Sodium Hydroxide Solution (0.2 M)—Dissolve 8.00 g of NaOH in CO<sub>2</sub>-free deionized water and dilute to 1 L. Standardize this solution with potassium acid phthalate using phenolphthalein as the indicator.

34.4.3 Hydroxide-Chloride Buffer Solution (pH 13.0 at 25.0°C)—Dilute 25.0 mL of the KCl solution and 66.0 mL of the NaOH solution to 100 mL with CO<sub>2</sub>-free deionized water.

34.4.4 Phenolphthalein Indicator—Dissolve 4 g of dry phenolphthalein in 100 mL of 95 % alcohol.

34.4.5 Commercially available pH buffer solutions, pH 7 and pH 10.

34.5 Standardization of Sodium Hydroxide Solution:

34.5.1 Initial Standardization—Transfer 50.0 mL of the

## Standard Test Method for X-ray Spectrometric Analysis of Lime and Limestone<sup>1</sup>

This standard is issued under the fixed designation C 1271; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon ( $\epsilon$ ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

1e

This test method covers the X-ray emission spectroanalysis of limestone, quicklime, hydrated lime, and ic lime using wavelength dispersive instruments.

The values stated in SI units are to be regarded as the d.

*This standard does not purport to address all of the concerns, if any, associated with its use. It is the ability of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use. Specific precaution statements are given in Section 10.*

### Referenced Documents

#### ASTM Standards:

Test Methods for Chemical Analysis of Limestone, icklime, and Hydrated Lime<sup>2</sup>

Methods for Sampling, Inspection, Packing, and rking of Lime and Limestone Products<sup>2</sup>

Terminology Relating to Lime and Limestone (As ed by the Industry)<sup>2</sup>

Practices for Apparatus, Reagents, and Safety Pre- tions for Chemical Analysis of Metals<sup>3</sup>

Terminology Relating to Analytical Chemistry for tals, Ores, and Related Materials<sup>3</sup>

Practice for Establishing and Controlling Spectro- mical Analytical Curves<sup>3</sup>

Terminology Relating to Quality and Statistics<sup>4</sup>

Practice for Conducting an Interlaboratory Study to termine the Precision of a Test Method<sup>4</sup>

0 Practice for Interlaboratory Testing of Spectro- mical Methods of Analysis<sup>5</sup>

1 Guide for Correction of Interelement Effects in Ray Spectrometric Analysis<sup>5</sup>

#### NIST Documents:<sup>6</sup>

NIST Handbook 114

Standards Catalog

### Terminology

#### Definitions:

*emission spectroscopy*—unless otherwise specified,

for definitions of terms used in this test method pertaining to emission spectroscopy, refer to Terminology E 135.

3.1.2 *lime*—unless otherwise specified, for definitions of terms used in this test method pertaining to lime, refer to Terminology C 51.

3.1.3 *statistical*—unless otherwise specified, for defini- tions of terms used in this test method pertaining to statistics, refer to Terminology E 456.

### 4. Summary of Test Method

4.1 A briquetted powder specimen or a fused-glass disk specimen is irradiated by a high-energy X-ray beam. The secondary X rays produced are dispersed by means of crystals, and the intensities are measured by suitable detec- tors at selected wavelengths. Data are collected based on the time required to reach a fixed number of counts, total count for a fixed time, or integration of voltage for a fixed time. Concentrations of the elements are determined by relating the measured radiation of unknown specimens to analytical curves prepared from reference materials of known compo- sition.

### 5. Significance and Use

5.1 This procedure is suitable for manufacturing control and verifying that the product meets specifications. It provides rapid, multi-element determinations with sufficient accuracy to ensure product quality and minimize production delays. The analytical performance data included may be used as a benchmark to determine whether similar X-ray spectrometers provide equivalent precision and accuracy, or whether the performance of a particular X-ray spectrometer has changed.

### 6. Interferences

6.1 Interelement effects or matrix effects may exist for some of the elements listed. One way to compensate for these effects is to prepare a series of calibration curves to cover the designated concentration ranges. The composition of the specimen being analyzed must match closely the composi- tion of the reference materials used to prepare the calibration curve. Mathematical corrections, derived from empirical relationships or fundamental parameter calculations, may be used alternatively. Any of these are acceptable, providing that the analytical accuracy required by this test method is achieved.

6.2 Calcium is the primary component of the matrix analyzed by this test method. The analyst must be aware of all possible interferences and matrix effects of this element. Orders of all wavelengths may cause interference, for ex- ample, the effect of  $\text{CaK}\beta_1$  (2nd order) on  $\text{PK}\alpha_1$ .

6.3 Contamination from the grinding apparatus is an

<sup>1</sup> This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee C-7 on Lime and is the direct responsibility of Subcommittee C07.05 on Chemical Tests.

<sup>2</sup> This edition approved Sept. 15, 1994. Published November 1994. Originally as C 1271 - 94. Last previous edition C 1271 - 94.

<sup>3</sup> *Book of ASTM Standards*, Vol 04.01.

<sup>4</sup> *Book of ASTM Standards*, Vol 03.05.

<sup>5</sup> *Book of ASTM Standards*, Vol 14.02.

<sup>6</sup> *Book of ASTM Standards*, Vol 03.06.

<sup>7</sup> Available from National Institute for Standards and Technology (NIST), Gaithersburg, MD 20899.

ever-present source of interference of which the analyst must always be cognizant. For example, stainless steel will impart iron, chrome, and nickel to the prepared sample.

6.4 Spectral interferences from the X-ray tube may also occur, for example, line overlap from CrK $\beta$ 1 on MnK $\alpha$ 1 caused by a chrome target tube.

## 7. Apparatus

### 7.1 Specimen Preparation Equipment:

7.1.1 *Jaw Crusher*, for initial crushing of lumps.

7.1.2 *Plate Grinder or Pulverizer*, with one static and one rotating disk for further grinding.

7.1.3 *Rotary Disk Mill or Shatter Box*, with hardened grinding containers and timer control for final grinding.

### 7.2 Briquetting Equipment:

7.2.1 *Briquetting Press*, capable of providing pressures up to 550 MPa (80 000 psi). The press shall be equipped with a mold assembly that provides a briquet compatible with the X-ray specimen holder.

### 7.3 Fusion Equipment:

7.3.1 *Furnace or Gas Burners*, with a timer, capable of heating the sample and flux to at least 1000°C and homogenizing the melt.

#### 7.3.2 Fusion Crucibles:

7.3.2.1 *Vitreous Carbon or Graphite*, 20 to 30-mL capacity, with a flat bottom 30 to 35 mm in diameter.

7.3.2.2 *Platinum/Gold, 95 % platinum/5 % gold alloy*, 30 to 35-mL capacity.

7.3.2.3 *Platinum/Gold Casting Dish, 95 % platinum/5 % gold alloy*, 30 to 35-mL capacity, with a flat bottom 30 to 35 mm in diameter.

7.3.3 *Polishing Wheel*, suitable for polishing the fusion disk to obtain a uniform surface for irradiation. The analyst should be aware at all times of possible contamination from the polishing media used for surfacing the disk (6.3).

### 7.4 Excitation Source:

7.4.1 *X-Ray Tube Power Supply*, providing constant potential or rectified power of sufficient energy to produce secondary radiation of the specimen for the elements specified. The generator may be equipped with a line voltage regulator and current stabilizer.

7.4.2 *X-Ray Tubes*, with targets of various high-purity elements, capable of continuous operation at required potentials and currents, and that will excite the elements to be determined.

7.5 *Spectrometer*, designed for X-ray emission analysis and equipped with specimen holders and a specimen chamber. The chamber may contain a specimen spinner, and it must be equipped for vacuum operation.

7.5.1 *Analyzing Crystals*—Flat or curved crystals with optimized capability for diffraction of the wavelengths of interest.

7.5.2 *Collimator*, for limiting the characteristic X rays to a parallel bundle when flat crystals are used in the instrument. A collimator is not necessary for curved crystal optics.

7.5.3 *Detectors*, sealed or gas flow, proportional type, Geiger counters, scintillation counters or equivalent.

7.5.4 *Vacuum System*, providing for the determination of elements whose radiation is absorbed by air (atomic number below 20). The system shall consist of at least one vacuum pump, gage, and electrical controls to provide automatic

pumpdown of the optical path and maintain a controlled pressure, usually 13 Pa or less.

7.6 *Measuring System*, consisting of electronic circuits capable of counting or integrating pulses received from the detectors. The counts, count rate, or integrated voltages may be displayed on meters, recorders, digital counters, or voltmeters. The counts, count rates, or integrated voltages can also be presented to a computer or programmable calculator for conversion to percent concentration. Pulse height analyzers may be required to provide more accurate measurements for some measurements.

## 8. Reagents and Materials

8.1 *Purity and Concentration of Reagents*—The purity and concentration of chemical reagents shall conform to the requirements prescribed in Practices E 50.

8.2 *Binders*—Various binders have been used successfully to prepare briquettes suitable for presentation to the instrument. As a general rule, the binder should not contain an element that will be determined. In addition, the sample to binder ratio must be present in the analytical sample as in the reference materials that were used to establish the calibration.

8.3 *Fluxes*—Various fluxes have been used successfully to prepare fusion disks. The flux must be capable of dissolving or dispersing the analyzed elements in an homogeneous and reproducible fashion in the melt. The prepared disks must then be suitable for presentation to the instrument.

8.4 *Detector Gas (P-10)*, consisting of a mixture of 90 % argon and 10 % methane for use with gas flow proportional counters only.

## 9. Reference Materials

9.1 Certified reference materials are available from the National Institute for Standards and Technology (NIST) and other international certification agencies. Refer to Test Methods C 25 for a current listing.

9.2 Reference materials with matrixes similar to that of the test specimen and containing varying amounts of the elements to be determined may be used provided that they have been analyzed in accordance with ASTM standard test methods.

9.3 Standard additions method or spiked samples may also be used to create standards for which appropriate reference materials are not available for an element desired to be analyzed. The matrix material must match that of the test specimen.

## 10. Safety Precautions

10.1 Occupational health and safety standards for ionizing radiation shall be observed at all X-ray emission spectrometer installations. It is also recommended that operating and maintenance personnel follow the guidelines of safe operating procedures given in current handbooks and publications from the original equipment manufacturer, NIST, U.S. Government Printing Office, or similar handbooks on radiation safety. See NIST Standards Catalog and ANSI-NIST Handbook 114.

10.2 *Personnel*—X-ray equipment shall be used only under the guidance and supervision of a responsible, qualified person.

**Monitoring Devices**—Either film badges or dosimeters shall be worn by all operating and maintenance personnel. Periodic radiation surveys of the equipment for leaks and excessive scattered radiation shall be made by a qualified person using an ionization chamber detector to meet local, state, and federal radiation standards. The personal film badge survey record, the radiation survey record, and an equipment maintenance record shall be available upon request.

Special precautions for operators and maintenance personnel shall be posted at the equipment site.

Radiation caution signs shall be posted near the equipment and at all entrances to the radiation area. Fail-Safe "X-ray on" warning lights shall be used on equipment.

**Sampling**

Gross sample weight is to be taken in accordance with Practice C 50.

Sample preparation is to be performed in accordance with Methods C 50 and Test Methods C 25.

Special preparation may be required to grind the material sample finer than is required in 11.2.

**Preparation of Reference Materials and Test Specimens**

Treat reference materials and specimens exactly the same way throughout the procedure. Either briquetted or fused disk specimens may be used.

**Preparation of Apparatus**

Prepare and operate the spectrometer in accordance with the manufacturer's instructions, using the parameters in Table 1. Once established, control all instrument parameters closely to ensure repeatable analyses.

**Calibration and Standardization**

**Calibration (Preparation of Analytical Curves)**—Secure sufficient number of reference materials to cover the concentration ranges of the elements sought. Average duplicate intensity measurements of each reference material, and show a calibration curve for each element in accordance with Practice E 305. Establish the curve by a least squares or multiple regression fit of the X-ray intensity measurements to the corresponding weight percent concentrations of element in the reference materials.

TABLE 1 Analytical Lines and Crystals

Element	Wavelength, Å	Crystals
Barium	11.91	TLAP, multilayer
Bismuth	9.889	ADP, TLAP, RAP, multilayer
Cadmium	8.338	PET, ED $\alpha$ T, RAP
Cobalt	7.126	PET, ED $\alpha$ T, RAP, InSb
Chromium	6.155	Ge, PET
Copper	5.373	Ge, PET, NaCl
Fluorine	4.729	PET, Ge
Iron	3.742	LIF 200, PET
Lithium	3.359	LIF 200, PET
Nickel	2.750	LIF 200, LIF 220
Niobium	2.103	LIF 200, LIF 220
Vanadium	1.937	LIF 200, LIF 220
Antimony	0.8766	LIF 200, LIF 220
Uranium	2.775	LIF 200, LIF 220
Lead	1.175	LIF 200, LIF 220

**14.2 Standardization (Analytical Curve Adjustment)**—Verify that the calibration curve for each element has not drifted using a control reference material. Drift is indicated by a change in counts that exceeds the normal variation of counts for that element. A change of 1 % or greater usually signifies that the calibration curve for that element has drifted and should thus be adjusted. Re-measure the reference materials to verify that acceptable analyses are obtained after the adjustments are made.

**15. Procedure**

**15.1 Excitation**—Introduce the specimen into the specimen chamber, using care not to contaminate the surface to be excited. Produce the secondary fluorescence using the equipment used in 7.4.

**15.2 Radiation Measurements**—Obtain and record the counting rate measurement for each element. Either fixed count or fixed time modes may be used. A predetermined minimum count rate is obtainable only after unacceptable long counting times for lime materials, with the exception of the major oxides (Si, Fe, Al, Ca, and Mg). A minimum counting time of 60 s is acceptable.

**15.3 Spectral Interferences**—Some X-ray spectrometers will not resolve radiation completely from several line overlaps. Care must therefore be exercised in these cases. Alternate wavelengths without interference may be used. Otherwise, mathematical calculations must be used to correct for the interferences.

NOTE 1—If a goniometer is used, the setting for the 2  $\theta$  peak must be determined experimentally within each laboratory. Periodic checks to verify the setting are advisable.

**15.4 Replicate Measurements**—Make a minimum of two measurements on each test specimen. The performance of an X-ray spectrometer is not improved significantly by making multiple measurements on the same surface of the same specimen; however, for those elements not having sufficient counts in the predetermined time, the statistics near the detection limit will improve with multiple exposures. Confidence in the accuracy of analysis will also improve by analyzing more than one specimen.

**16. Calculation of Results**

**16.1** Determine the concentration of the various elements using the radiation measurements for the test specimen and the appropriate analytical curves.

**16.2** If mathematical corrections must be made to correct the concentrations for interelement effects, any one of a number of correction procedures may be used. Refer to the equipment manufacturer's manual for the instrument being used. Computers are normally interfaced to the X-ray spectrometers in laboratories using such correction systems. Refer to Guide E 1361 for a guide to interelement corrections.

NOTE 2—With computer-controlled X-ray spectrometers that convert output signals automatically to percent concentrations and make interelement corrections, calculated results are usually printed without operator involvement.

**17. Precision and Bias**

**17.1 Precision**—An acceptable number of laboratories tested this test method in accordance with Practice E 1060.

Precision data are provided in the annex.

17.1.1 *Repeatability (R1)*—Calculations for within-laboratory precision are listed in the annex.

17.1.2 *Reproducibility (R2)*—Calculations for between-laboratory precision are listed in the annex.

17.2 *Bias (Accuracy)*—Bias data calculated in accordance

with Practice E 1060 are included in the annex.

## 18. Keywords

18.1 chemical analysis; hydrated lime; hydraulic lime; limestone; quicklime; wavelength dispersive; X-ray spectrometric

## ANNEX

### (Mandatory Information)

#### A1. Annex of Test Methods

A1.1 *Intent*—It is the intent of ASTM Task Group C07.05.03 to produce test methods for insertion into the annex of this test method.

##### A1.2 *Requirements:*

A1.2.1 *Method*—Universal application to current models of X-ray spectrometers is to be strived for.

A1.2.2 *Provisions*—Only deviations, special provisions,

and interferences not referred to in the test method must be written into the specific test method.

A1.2.3 *Precision and Bias*—Test methods to be inserted in the annex will not be incorporated until a round robin study has been made generating acceptable precision and bias statements. Practice E 691 will be followed for the round robin guidelines.

*The American Society for Testing and Materials takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.*

*This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, 1916 Race St., Philadelphia, PA 19103.*