



TOGETHER
for a sustainable future

OCCASION

This publication has been made available to the public on the occasion of the 50th anniversary of the United Nations Industrial Development Organisation.



TOGETHER
for a sustainable future

DISCLAIMER

This document has been produced without formal United Nations editing. The designations employed and the presentation of the material in this document do not imply the expression of any opinion whatsoever on the part of the Secretariat of the United Nations Industrial Development Organization (UNIDO) concerning the legal status of any country, territory, city or area or of its authorities, or concerning the delimitation of its frontiers or boundaries, or its economic system or degree of development. Designations such as “developed”, “industrialized” and “developing” are intended for statistical convenience and do not necessarily express a judgment about the stage reached by a particular country or area in the development process. Mention of firm names or commercial products does not constitute an endorsement by UNIDO.

FAIR USE POLICY

Any part of this publication may be quoted and referenced for educational and research purposes without additional permission from UNIDO. However, those who make use of quoting and referencing this publication are requested to follow the Fair Use Policy of giving due credit to UNIDO.

CONTACT

Please contact publications@unido.org for further information concerning UNIDO publications.

For more information about UNIDO, please visit us at www.unido.org

18178-S

Distr. LIMITADA

PPD.123(SPEC.)
10 julio 1989

ORGANIZACION DE LAS NACIONES UNIDAS
PARA EL DESARROLLO INDUSTRIAL

ESPAÑOL
Original: INGLES

PROGRAMA DE APOYO DIRECTO A LA INDUSTRIA DE LOS PAISES EN DESARROLLO:
MISIONES INVESTIGADORAS Y DE IDENTIFICACION DE PROYECTOS

TF/GLO/88/018

Informe técnico: La caliza como materia prima para la
industria del cemento*

Preparado para el Gobierno de Nicaragua —
por la Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial —

* El presente documento es traducción de un texto que no ha pasado por los servicios de edición.

Introducción

Los carbonatos están considerados como las principales materia primas utilizadas en la fabricación de "clinker" de cemento. Son carbonatos las materias primas constituidas principalmente por carbonato cálcico, como, por ejemplo, la caliza, la tiza, el mármol, los caparzones o conchas, la caliza margosa y los lodos de carbonato de las industrias papelera, azucarera y de los fertilizantes.

Además de los carbonatos (materiales calcáreos), como principales componentes necesarios para la mezcla del crudo de cemento, han de añadirse a ésta alúmina y silicatos de caliza "arcilla, tierra, esquisto, pizarra, rocas volcánicas, cenizas volantes, rocas de wollastonite y escorias", y en algunos casos otros aditivos, para obtener un "clinker" que cumpla con las especificaciones estándares una vez efectuada la homogenización previa y la calcinación o coadura de la harina cruda en los hornos de cemento rotatorios.

El material calcáreo (carbonatos) suministra óxido cálcico (CaO) al "clinker" de cemento. Los cuatro minerales principales que constituyen el "clinker" contienen, todos ellos, CaO. Los materiales calcáreos necesarios para la fabricación de "clinker" de cemento han de tener ciertas propiedades químicas y físicas concretas. Desde luego, es preciso que la composición química de la caliza se encuentre dentro de los valores adecuados. Además, es necesario que la caliza posea una gran molturabilidad y buena coadura.

Conviene tener en cuenta algunos datos relativos a la composición química de todo material calcáreo y que se indican a continuación:

1. Composición química del material calcáreo.

La caliza que consiste principalmente en CaCO_3 contiene cierta cantidad de impurezas, tales como SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 y MgO . Cuantas menos impurezas tenga la caliza, mejor será ésta. El primer requisito que ha de satisfacer la caliza destinada a la fabricación de cemento es que su composición química sea estable, pues, cuantas más impurezas tenga, más fluctuará su composición química.

Asimismo, parece ser que una gran cantidad de impurezas impide la buena coadura del "clinker".

El componente químico de la piedra caliza afecta a la producción de cemento de la siguiente manera:

A. MgO

El MgO es un componente perjudicial que sólo está permitido en cantidades mínimas en la caliza utilizada para la producción de cemento. Si el MgO está presente en el "clinker" en las debidas proporciones, reviste la forma de solución sólida con C_3S o C_4AF y mejora la coadura del "clinker". En otras palabras, el MgO se combina en hasta un 2% en peso con las principales fases del "clinker"; en cantidad superior, aparece en el "clinker" como mineral de MgO libre (periclasa). Sin embargo, cuando el contenido en MgO rebasa el límite de la solución sólida, aparecen cristales de

magnesia libre (periclasa). Los cristales de periclasa reaccionan con agua lentamente y el volumen de dichos cristales aumenta con la hidratación debida a la formación de mineral de brucita ($Mg(OH)_2$) : $MgO + H_2O = Mg(OH)_2$. Esta reacción sigue produciéndose lentamente cuando ya han concluido las otras reacciones de endurecimiento que tienen lugar en el hormigón. Como el $Mg(OH)_2$ (brucita) ocupa un mayor volumen que el MgO (periclasa), y se forma en el mismo lugar en que se encuentra la partícula de periclasa, puede separar el ligante de la pasta de cemento endurecida (hormigón). De esta forma, se produce en el hormigón endurecido una grieta debida a la dilatación (dilatación de la magnesia).

Por este motivo, la mayor parte de las especificaciones normalizadas estipulan que el contenido en MgO del cemento portland debe situarse entre un 4,0% y un 5,0%.

Teniendo en cuenta el consumo unitario de caliza y el contenido en MgO de otros materiales, es de temer que el cemento no cumpla con las especificaciones normalizadas en el caso de que el contenido en MgO de la caliza sea superior al 3,5%.

En el caso de que la caliza contenga poco MgO, a fin de mejorar la cochura y el color del cemento podrá añadirse caliza con un alto contenido en MgO, "en una cantidad no superior, como promedio, al 3,5%", pues es sabido que el MgO tiene un efecto de flujo.

B. CaO

En la mayoría de las fábricas de cemento, el consumo unitario de caliza para la producción de cemento es del orden de 1.000 a 1.350 kg, lo que depende en primer lugar de la pureza del CaO de la caliza, y en segundo lugar de la clase de cemento y de la composición química de las arcillas.

La caliza de gran calidad contiene impurezas en tan pequeñas cantidades que éstas hacen variar poco su composición química.

Como quiera que un alto grado de impureza da lugar a una importante variación de su composición química, es necesario por tanto controlar la calidad de la caliza.

El SiO_2 y el Al_2O_3 , considerados impurezas en la caliza, no plantean problemas especiales, pues estos elementos son también constituyentes necesarios del "clínker". La caliza rica en SiO_2 y pobre en Al_2O_3 puede requerir a veces un material corrector de alto contenido en alúmina, como la costosa bauxita, según el tipo de material arcilloso.

2. Molturabilidad y reactividad del material calcáreo

En general, la proporción de caliza en la harina cruda de cemento varía entre el 75% y el 80%. Por ello, su molturabilidad parece afectar considerablemente a la molturabilidad de la materia prima en el molino de crudo. No está claro, tecnológicamente, qué

caliza es la que posee mejores propiedades de molturabilidad. Suele decirse que la caliza de grandes partículas cristalinas se moltura mejor; es decir, que la caliza gruesocristalina puede moldurarse mejor que la finocristalina. Además, la molturabilidad de la caliza con un alto grado de impureza se ve afectada, hasta cierto punto, por los minerales coexistentes.

El tamaño del cristal de la caliza, y la clase y cantidad de las impurezas, afectan a la cochura del "clínker". Se dice que la caliza microcristalina tiene una temperatura de descarbonatación más baja y una mejor reactividad con la arcilla que la caliza macrocristalina.

**NORMAS Y REQUISITOS PREVIOS PARA EL ESTABLECIMIENTO DE
UNA NUEVA PLANTA DE CEMENTO O PARA LA AMPLIACION
DE LINEAS DE PRODUCCION YA EXISTENTES**

La industria del cemento depende de recursos naturales como las calizas y las arcillas; las calizas son la materia prima básica utilizada en la fabricación del cemento. Por tanto, antes de establecer una nueva planta de cemento, es esencial investigar los depósitos de materias primas existentes desde el punto de vista de la calidad y de la cantidad y asegurar su debida exploración. Son muchos los ejemplos de plantas de cemento de diferentes países que, después de establecidas, se han visto envueltas en dificultades por no haber prestado la debida atención a esos criterios.

El desarrollo de la industria del cemento entraña grandes inversiones de capital y mano de obra y materias primas considerables. Los materiales de alimentación (cargas), como minerales y rocas, que constituyen la "harina" de las mezclas de crudos de una determinada planta de cemento, exigen una eficaz labor de prospección y de exploración de los depósitos de materias primas necesarias para la industria del cemento.

En definitiva, la viabilidad económica de dicha industria, que es de gran intensidad de capital, depende de la calidad y de la cantidad de las materias primas utilizables. En consecuencia, es muy necesaria una óptima labor de exploración para poder evaluar los parámetros involucrados con cierto grado de fiabilidad y minimizar así el riesgo de la inversión. Los principales factores determinantes de la viabilidad económica de toda planta de cemento son la calidad, la cantidad y la explotabilidad de las materias primas naturales pertinentes; la debida evaluación de esos factores constituirá la base tecnoeconómica que permita decidir establecer o no una planta de cemento.

Es indudable que la investigación, la prospección y la exploración de materias primas son actividades bastante costosas. Por ello, esas actividades han de optimizarse de modo que la exploración de los depósitos sea muy viable y muy rentable durante la vida útil de la planta. Los importantes aspectos de la prospección, exploración, ensayos y estimación de las reservas de caliza dependen de la calidad de ésta.

Las necesidades de cemento para algunos decenios y, por tanto, el tamaño mínimo necesario de los depósitos de materias primas, deberán determinarse a base de las investigaciones geológicas previamente realizadas, es decir de las existencias de mineral conocidas. Los Departamentos Estatales de Geología y Minería se han "basado en las propiedades químicas y físicas, necesarias y aceptables, de las materias primas". Las exploraciones deberán concluirse tan pronto como se haya obtenido la información que se precise sobre los depósitos, o parte de ellos, necesarios para fines industriales.

Teniendo en cuenta la forma y la extensión de los depósitos, las condiciones de deposición, la variación litológica y de composición, la edad geológica, la disposición estructural, el emplazamiento topográfico, las características tectónicas, etc., los depósitos de caliza pueden clasificarse generalmente como: sencillos, complejos e intrincados.

Mientras que los "depósitos sencillos" son grandes, continuos, estratificados, horizontales o con una suave inclinación, no perturbados y de calidad uniforme, los "depósitos complejos" tienen una pendiente entre

moderada y fuerte, están suavemente plegados, son consistentes, más o menos sencillos pero con frecuentes intercalaciones, de espesor variable, despegados y lenticulares, plegados o estructuralmente perturbados. Los "depósitos intrincados" son complicados, muy plegados, dislocados, de forma irregular o intensamente interestratificados con arcilla o esquisto arcilloso, o son extremadamente variables en cuanto a forma, espesor o valores de ensayo.

Un requisito previo para el establecimiento de una nueva línea de producción o planta de cemento será asegurar que las reservas medidas, teniendo en cuenta pérdidas de mineral del 15% y un déficit del 15% por error en la estimación de las reservas, ascendiendo todo ello aproximadamente a un 30% de las necesidades reales de caliza, sean suficientes para un periodo de por lo menos 30 años, y que la cantidad recuperable de las reservas indicadas sea suficiente para por lo menos 20 años.

El depósito deberá satisfacer determinadas necesidades de la industria del cemento. En esencia, los trabajos deberán realizarse con este fin específico y con arreglo a un plan concreto. Al plan se le denomina programa de exploración; este programa, que se inicia ante la necesidad de minerales o rocas, permitirá, si tiene éxito, descubrir nuevas fuentes de materias primas para la industria del cemento. El plan, realizado ahora como evaluación prospectiva, tiene por objeto encontrar depósitos reconocidos de materias primas económicas.

El programa de exploración de depósitos de materias primas consta de tres fases secuenciales: a) Reconocimiento; b) Prospección detallada; y c) Exploración detallada. Además de esas fases, habrá otra designada "minería exploratoria" que se desarrollará simultáneamente a las labores de beneficio del depósito.

A continuación se definen las diversas fases y se indica su relación con las clases de reservas:

Fase I: Reconocimiento y exploración regional

Esta fase se refiere a la exploración y entraña la recogida de publicaciones, estudios, informes, etc., geológicos disponibles, así como a la elección de una zona de considerable extensión en la que se encuentren las materias primas necesarias para la fabricación de cemento. La extensión de la zona de exploración varía entre 200 y varios miles de kilómetros cuadrados. La labor a realizar, que se concentrará principalmente en la geología económica o aplicada, y que comprende sencillos trabajos de exploración, lleva mucho tiempo. Los trabajos de campo se realizan normalmente en condiciones primitivas. En esta fase, está prevista la recogida de muestras superficiales y un rápido estudio de las instalaciones de infraestructura, así como un examen de las publicaciones existentes, todo lo cual debe proporcionar información suficiente para estimar las reservas inferidas que podrían convertirse, con una progresiva intensificación de las exploraciones, en las necesarias reservas indicadas (probables) y medidas (probadas). En esta fase, los trabajos exploratorios debieran permitir al empresario seleccionar una zona adecuada con objeto de solicitar una licencia de prospección. Se trata de una dura labor para el personal y para las máquinas, por lo que se requiere personal con experiencia y equipo especial.

Fase II: Prospección detallada

Esta clase de exploración se limita a una zona de unos 25 km² o a bloques en que se espera que exista un depósito, o en los que éste haya sido ya encontrado, cuyas reservas probables sean precisamente las necesarias. Han de definirse entonces las dimensiones y el contenido del depósito. Siempre que ello es posible, las investigaciones comienzan normalmente con la cartografía geológica (debiera prepararse un plan clave de la zona a escala de 1:4000), un muestreo de los afloramientos y trabajos de prospección sencillos (trincheras, galerías y pequeños pozos). Raras veces esas exploraciones son suficientes para evaluar un depósito.

En la mayoría de los casos, es necesario hacer perforaciones con objeto de explorar zonas profundas del depósito. La perforación debe efectuarse a intervalos adecuados, según que el depósito sea sencillo, complejo o intrincado. Los trabajos de perforación son costosos y deben planearse y realizarse cuidadosamente. Por lo común, es recomendable contratar para ello a una empresa especializada y que supervise regularmente los trabajos uno de los propios consultores del cliente. En general, los contactos frecuentes entre el cliente y el contratista son útiles para ambas partes. Normalmente, es necesario disponer sobre el terreno de un laboratorio para la preparación de muestras y para realizar diariamente análisis sencillos, así como de los servicios de un laboratorio principal debidamente equipado para esta clase de exploraciones de materias primas. Deben tomarse muestras con miras a preparar un ensayo y un plan geológico a escala de 1:2000. La perforación debe realizarse, a ser posible, en dos o tres subetapas, y, como ya se ha dicho, a intervalos adecuados según que el depósito sea sencillo, complejo o intrincado.

Este trabajo debe concluirse con la preparación de documentación completa sobre todas las labores preliminares, debe ir acompañado de estimaciones aproximadas de las reservas del depósito, de cálculos de la composición de la harina cruda, de las investigaciones y ensayos tecnológicos del cemento habituales y de sugerencias para la explotación de las materias primas. En esta fase, todo el programa de exploración, y la preparación del informe, deberán terminarse en un tiempo razonable, de modo que la solicitud de concesión minera del bloque más prometedor puede efectuarse también en esta etapa.

Fase III: Exploración detallada

Se refiere ésta a la fase final de exploración, que revelará las reservas medidas (probadas) económicamente explotables. Esta fase entrañará las siguientes labores: cartografía a escala de 1:2000 a 1:1000, perforación a intervalos muy próximos con arreglo a un sistema de cuadrícula o reticulado, dependiendo los intervalos del tipo de depósito. Las muestras representativas deberán recogerse para la realización de ensayos tecnológicos y de ensayos de materiales correctores.

Siempre que sea necesario, deberán efectuarse laboreos exploratorios. Esta fase debe culminar con la preparación de un informe del proyecto detallado que deberá permitir a las autoridades encargadas del mismo iniciar el laboreo de una parte adecuada del bloque más prometedor.

Minería exploratoria. Se refiere a las operaciones que se inician tras abrir el depósito con objeto de determinar otras variantes geológicas y económicas en partes, secciones o porciones específicas del mismo que hayan de explotarse inmediatamente, con objeto de ofrecer asistencia en el trazado de la mina y en el control de la ley del mineral.

El programa de prospección y exploración consistirá en las siguientes operaciones:

- a) Levantamiento topográfico
- b) Cartografía geológica
- c) Realización de trincheras
- d) Realización de pozos
- e) Perforación o sondeo
- f) Preparación de planos y perfiles a base de los datos obtenidos en las operaciones a) a d)
- g) Minería exploratoria
- h) Muestreo y análisis
- i) Preparación de mapas de control de la ley del mineral, de perfiles y de planos de la mina.

Según la información disponible, algunos puntos podrán omitirse parcial o totalmente. A veces, puede que sea necesario realizar parte de las tareas. El procedimiento de laboreo deberá ser flexible, de modo que en todo momento pueda adaptarse a las cambiantes condiciones. Por tanto, se recomienda que se haga un resumen después de cada subproyecto, a fin de determinar cuándo habrán de planearse y realizarse las fases siguientes del procedimiento de laboreo.

No es necesario realizar en su totalidad la fase de exploración, pues ésta podrá darse por terminada tan pronto como se obtengan resultados satisfactorios. Las operaciones de excavación y de perforación o sondeo se efectuarán, en la medida de lo posible, con arreglo a sistemas de cuadrícula específicos. Entre los métodos de perforación exploratoria, tres son, con mucho, los más utilizados: perforación con corona de diamantes, perforación rotativa y perforación a percusión. El sistema de cuadrícula, así como la proporción y el intervalo de excavación y perforación, dependerán del tipo de depósito que se esté explorando y de la clase de reservas estimadas. Ya se ha indicado que la perforación puede llevarse a cabo en la primera etapa de exploración, como labor de reconocimiento, o como ensayo directo de una interpretación geológica favorable o de una fuerte anomalía geoquímica o geofísica. En los ensayos directos, se desarrolla una disposición o esquema, para las perforaciones adicionales, en torno a las primeras (pocas) perforaciones efectuadas.

Al principio, es probable que la disposición o esquema sean sencillos. Cierta orientación responde al control geológico o a la tendencia de la anomalía, y un macizo o criadero de mineral de ciertas proporciones responde al modelo de exploración. Una práctica común consiste en efectuar

perforaciones espaciándolas de modo que dos agujeros próximos puedan penetrar en la zona de mineral de tamaño mínimo. En esta etapa, el esquema es flexible y los lugares de perforación están a menudo ocupados teniendo en cuenta la accesibilidad o un espaciado uniforme. A medida que se efectúan las perforaciones, pueden desarrollarse nuevas tendencias y nuevos modelos, procediéndose entonces a un ajuste del esquema hasta que parezca que se haya logrado una cobertura satisfactoria. Este método de paso por paso concluye, en general, una vez efectuadas las 12 primeras perforaciones en la zona objetivo.

En algunos proyectos, el esquema preliminar se abandona antes de que éste cumpla su finalidad. Algunas de las primeras perforaciones pueden resultar tan interesantes que se proceda a efectuar inmediatamente perforaciones enfrentadas, dejándose abiertas las partes exploradas de la zona objetivo para una posterior investigación, o para llevarse después la sorpresa de que alguien, atraído por tanta actividad, encuentre un depósito mejor.

En un programa bien planeado y suficientemente financiado, la perforación se realiza después con arreglo a un esquema o sistema de cuadrícula más sistemático. El empleo de un sistema de cuadrícula apretada en la zona de mayor interés, y de una cuadrícula de perforaciones compatible pero más espaciada en el resto de la zona objetivo, permitirá una cobertura adecuada y evitará de ese modo que se malgaste dinero en perforaciones innecesarias. Los primeros sondeos y las labores mineras ya realizadas se incorporan al nuevo esquema en la medida de lo posible, pero la nueva cuadrícula es por lo demás muy específica en el sentido de que los emplazamientos deben ocuparse procurando que éstos estén tan próximos como lo permita un costo razonable de su preparación. Las técnicas de redes basadas en los métodos PERT (evaluación de programas y técnicas de revisión) y del camino crítico pueden utilizarse para un esquema de cuadrícula sistemático. El principal objetivo de la exploración es hallar criaderos de materias primas a un costo razonable. No será suficiente contar con "reservas condicionales", pues una planta de cemento ya establecida no puede funcionar a base de probabilidades. Un descubrimiento de poca importancia no merecerá la pena de que se le dediquen mayores esfuerzos. La cuestión económica depende mucho de las proporciones y de la clase de la zona objetivo, la que a su vez influye en el procedimiento de exploración. Si la exploración se efectúa en una zona apartada del país, para poder atender a las necesidades de la industria del cemento por un período de por lo menos 40 años el "depósito de materias primas" habrá de contener varios millones de toneladas de material de alta calidad para su mezcla con otros varios millones de toneladas de material de baja calidad con una composición química razonable que permita obtener la mezcla de crudo final ("harina de horno") que cumpla con las especificaciones normalizadas. Esto puede lograrse mediante formulaciones de mezclas de crudo.

MUESTREO

Definición. Se entiende por muestreo, en este contexto, la operación de extraer, de un depósito, una pequeña porción de caliza y de rocas asociadas, de modo que sus propiedades fisicoquímicas, sin ser sometida a tratamiento, sean representativas del conjunto.

El muestreo "representativo" constituye de por sí una especialidad, y sólo deberán efectuarlo personas experimentadas. El muestreo realizado por personal no profesional no sólo es inútil sino que además puede dar una idea del depósito totalmente equivocada.

Conviene subrayar aquí la necesidad de una recuperación lo más completa posible de los testigos de sondeo, lo que no planteará problemas en el caso de rocas duras y compactas aunque se utilicen trépanos o barrenas de pequeños diámetros (36, 46 o 56 mm). Las dificultades aumentan en el caso de rocas poco compactas, quebradizas o de textura fina. Existen muchos métodos para lograr una recuperación de testigos satisfactoria. Estos métodos son costosos, pero la inversión se ve recompensada.

Los testigos de sondeo constituyen la prueba más costosa de la labor de exploración y debieran tratarse debidamente. Tales testigos deben partirse longitudinalmente; una cuarta parte (o una mitad) se reservará para experimentos tecnicofísicos, y otra cuarta parte (o mitad) se almacenará en una sala cubierta como muestra geologicopetrográfica. Al cabo de algún tiempo, de esa última mitad o cuarta parte se conservará únicamente unos 5 cm de cada unidad petrográfica y química característica procedente de cada perforación.

Procedencia de las muestras. Según la fase de exploración, las muestras se obtendrán de:

- a) Afloramientos/secciones naturales
- b) Pozos realizados
- c) Trincheras excavadas
- d) Perforaciones efectuadas
- e) Labores mineras exploratorias.

La fase I del programa de exploración entrañará principalmente el muestreo de afloramientos de pozos ya existentes, de excavaciones y de antiguos laboreos.

La fase II requerirá, además, el muestreo de perforaciones, trincheras y pozos de ensayo.

La fase III requerirá el muestreo de perforaciones adicionales, pozos de ensayo, trincheras y labores mineras exploratorias realizadas en esta fase de trabajo.

Tipos de muestreo. Según el tipo de depósito, el frente específico objeto de muestreo, y la finalidad de éste, la naturaleza y el modo de muestreo deberán ser los siguientes:

	<u>Fase de exploración</u>		<u>Tipo de muestreo recomendado</u>
I	Prospección de reconocimiento	a)	Muestreo al azar
		b)	Muestreo de lascas o fragmentos
		c)	Muestreo de fajas o bandas
		d)	Muestreo de mineral grueso
		e)	Muestreo por ranuras
II	Prospección detallada	a)	Muestreo por ranuras
		b)	Muestreo de testigos de sondeo/de lodos
III	Exploración detallada	a)	Muestreo de testigos de sondeo/de lodos
		b)	Muestreo extenso

IV Minería exploratoria

- a) Muestreo por ranuras
- b) Muestreo por barrenado de voladura

Intervalo del muestreo

En la fase inicial de exploración (fase I), en que se desconoce el espesor efectivo de la capa o estrato de caliza, el muestreo deberá ser detallado. El espesor de las capas, bandas e intercalaciones que muestren variaciones de su composición litológica y de su disposición estructural deberá ser muestreado individualmente a intervalos de 0,5 a 1 m. En esta fase, el muestreo superficial deberá hacerse cada 10 metros.

En la fase posterior de exploración, el espesor mínimo de una capa que pueda considerarse como intervalo de muestra deberá decidirse teniendo en cuenta que el muestreo de ese intervalo pueda efectuarse durante las operaciones de laboreo real. A título ilustrativo, se indican las cifras siguientes como intervalos de muestreo en diversas capas inclinadas de caliza, de partiendo del supuesto de que los depósitos se beneficiarán con alturas de banco de 10 metros:

<u>Pendiente</u>	<u>Intervalo (en m)</u>
10°	1,5 a 2,0
10° a 45°	2,0 a 3,5
45°	4,5 a 5,0

En el caso de capas litológicamente homogéneas de gran espesor, las muestras obtenidas por perforación deberán extraerse a intervalos no superiores a la altura de banco planeado o habitual, es decir, no mayores de 5 m.

En el banco superior deberá procederse a un mayor número de muestras, pues, en general, contiene una mayor cantidad de arcilla y otras intercalaciones. Las recomendaciones que se han hecho deberán modificarse en el caso de que los depósitos contengan intercalaciones o bandas de arcilla o de pizarra de gran espesor o intrusiones irregulares de otras rocas.

La longitud de las muestras por ranuras seccionales deberá guardar relación con sus muestras de sondeo, expresada mediante la siguiente ecuación:

$$l_c = l_b \cos \alpha + \frac{l_b \sin \alpha}{\tan \beta}$$

donde

$l_c =$	longitud de la muestra a lo largo de una ranura,
$l_b =$	longitud de la muestra a lo largo de las perforaciones o sondeos,
$\alpha =$	inclinación de la perforación, y
$\beta =$	pendiente de la capa.

Cuando las muestras seccionales o individuales extraídas a intervalos próximos hayan de combinarse en muestras compuestas, la mezcla se efectuará de modo que las muestras compuestas representen una altura de banco de unos 10 m.

Tamaño, cantidad y reducciones de las muestras

Las muestras de lascas o fragmentos, al azar o por ranuras, para análisis químico, pueden variar de 2 x 2 x 2 cm a 10 x 10 x 20 cm de tamaño y de 5 a 10 kg de peso.

Las dimensiones de las muestras de mineral grueso destinadas a ensayos mineralógicos y fisicomecánicos deberán consistir preferiblemente en testigos de 20 x 20 x 20 cm a 30 x 30 x 30 cm o de 0,5 a 1 m de largo, y pesar entre 20 y 50 kg.

En el caso de investigaciones realizadas para nuevas plantas de cemento, la muestra o muestras extensas destinadas a ensayos tecnológicos deberán ser representativas del depósito si éste es muy uniforme y homogéneo y presenta pocas variaciones de banco a banco. En el caso de depósitos en el que se den variaciones considerables en cuanto a calidad, la muestra o muestras extensas no sólo deberán ser representativas de las diversas partes del depósito, sino que también deberán serlo del material que normalmente haya de beneficiarse para la planta. Por ello, la muestra extensa deberá prepararse artificialmente mezclando piedras de diferentes partes de los depósitos en tal proporción que simule o se asemeje al máximo a la piedra del depósito de cantera. De esta operación deberán ocuparse conjuntamente el geólogo de minas, el ingeniero de minas, el ingeniero de beneficio de mineral y el ingeniero de procesos que participen en la extracción de la materia prima, en su beneficio o tratamiento y en su utilización. El peso de la muestra extensa destinada a ensayos en una planta semipiloto o piloto dependerá del tipo de ensayo tecnológico, de la calidad del depósito y de la demanda de la organización que efectúe los ensayos. En consecuencia, la cantidad exacta deberá decidirse, en cada caso específico, en consulta con dicha organización. No obstante, como norma general, para cada prueba será suficiente una cantidad de 2,5 a 4 toneladas; el número de esas pruebas se decidirá en consulta con el organismo de ensayos.

La reducción de todas las muestras distintas de las muestras extensas se efectuará mediante trituración, molienda, mezcla, cribado y cuarteo secuenciales. Deberá procurarse que, en cada fase, cada mitad de la muestra se conserve siempre como referencia para el futuro y que en cada etapa de reducción la cuarta parte final se haga pasar enteramente por la criba.

Para los diferentes ensayos y análisis tecnológicos, la cantidad mínima de las muestras extensas a ensayar dependerá del diámetro de la partícula mayor y del grado de heterogeneidad.

Los tipos de muestreo (afloramientos, pozos excavados, trincheras, sondeos, labores mineras exploratorias, etc.) dependerán del tipo de depósito y de la finalidad del muestreo.

Características físicas, químicas y mineralógicas deseables

A continuación se indican algunas de las propiedades físicas, químicas y mineralógicas deseables de la caliza de calidad adecuada para la fabricación de cemento:

i) El tamaño medio del grano de la calcita contenida en la caliza de calidad adecuada para la fabricación de cemento deberá ser preferiblemente inferior a 0,25 mm, pues el tamaño de grano guarda relación con la coadura de la caliza;

ii) La presencia de granos gruesos de cuarzo o de vetas silíceas (sílex córneo) no es conveniente porque afecta a la molturabilidad y a la coadura de la caliza;

iii) El contenido en cloruro no deberá exceder del 0,05%, pues de lo contrario puede dar lugar a corrosión y a otras dificultades, sobre todo en la fabricación de cemento por vía seca;

iv) La presencia de azufre, especialmente en estado de sulfato, no es conveniente porque la descomposición de la fase de sulfato resulta difícil;

v) La caliza debe tener un bajo contenido de humedad natural;

vi) El esfuerzo de compresión de la caliza debe ser bajo, preferiblemente inferior a 1.000 kg/cm³.

Para la evaluación técnica de la caliza se efectúan las siguientes operaciones:

- Análisis químico;
- Análisis mineralógico y petrográfico; y
- Ensayos fisicomecánicos.

Todas las muestras individuales recogidas sobre el terreno serán analizadas para determinar la presencia de algunos de los siguientes componentes: CaO, MgO o residuos insolubles en el HCl.

Las muestras compuestas se prepararán a base de muestras individuales caracterizando la altura del banco, y se analizarán para determinar la presencia de SiO₂, Al₂O₃, CaO, MgO, SO₃ y LOI, con objeto de facilitar el cálculo de la mezcla de crudo. Si el total de esos siete componentes en las muestras combinadas de rocas carbonatadas no es superior al 98,5%, se procederá a determinar los componentes P₂O₅ y Na₂O + K₂O (R₂O₃). En casos especiales, en que las condiciones geológicas de los depósitos o las necesidades técnicas lo exijan, también se determinarán los componentes FeO, Mn₂O₃ y C.

Análisis químico. El análisis químico completo de la caliza de calidad adecuada para la fabricación de cemento tendrá por objeto determinar los componentes SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, FeO, Mn₂O₃, MgO, CaO, Na₂O, K₂O, P₂O₅, SO₃, Cl y LOI. El número de muestras completas que hayan de someterse a un análisis químico completo en cada fase de exploración deberá decidirse en cada caso individual y con arreglo al tipo de reserva. El 10% de la muestra químicamente analizada deberá someterse a repetidos análisis con arreglo a un código secreto, debiendo adoptarse para algunos de ellos un método de tratamiento doble de alta frecuencia. La diferencia entre ambos resultados deberá situarse preferiblemente entre las tolerancias admisibles indicadas en el cuadro siguiente:

DIFERENCIAS ADMISIBLES EN EL ANALISIS QUIMICO DE COMPONENTES

MATERIAS PRIMAS	DIFERENCIA ADMISIBLE EN PESO (En porcentajes)						
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ C ₃	CaO	MgO	SO ₃	LOI
Caliza pura	0,20	0,10	0,10	0,50	0,20	0,04	0,50
Caliza impura	0,50	0,30	0,15	0,40	0,20	0,04	0,50

Análisis mineralógico y petrográfico. Este análisis constituye una parte importante de la evaluación tecnológica en todas las fases de exploración, y puede incluir lo siguiente:

i) Identificación y estimación cuantitativa de todos los minerales presentes, en especial fases de Mg-, S-, P (minerales) y materiales silíceos.

ii) Determinación del tamaño de grano de los cristales de calcita y cuarzo de estas secciones con ayuda de un micrómetro ocular.

iii) Determinación de las características de textura y microestructurales evidentes en los especímenes tomados a mano en estas secciones. También es aconsejable realizar ensayos microquímicos para distinguir la calcita y la dolomita en la roca, su textura e interrelación.

iv) Identificación mineralógica completa del residuo insoluble en la preparación por inmersión y posiblemente difracción por rayos X, espectroscopia infrarroja, etc.

Ensayos fisicomecánicos. En estos ensayos se determinará lo siguiente:

- Color y fractura de la caliza
- Densidad aparente -
- Peso volumétrico -
- Porosidad de la caliza
- Contenido de humedad natural
- Factor de desintegración o disgregación
- Dureza de la caliza
- Resistencia de la caliza
- Triturabilidad de la caliza, etc.

Los mapas, las muestras y los testigos de sondeo proporcionarán retroinformación y, a la vista de ésta, puede que haya que proceder a una revisión o a un cambio radical del programa. Pocos modelos de programa de exploración van más allá.

La labor de seguimiento se concreta en la repetición de exámenes, y al término de cada uno de ellos hay que decidir "continuar o abandonar", en base a los mapas, gráficos, fotografías y perfiles. Es preciso tener en cuenta, a este respecto, el grado de generalización (realidad frente a interpretación).

Estimación de reservas

Conviene señalar que hasta el presente no ha sido posible establecer un solo sistema de clasificación de reservas mundialmente aplicable, y se considera que la industria del cemento podría beneficiarse de un sistema basado en la geostática.

Para la estimación de los depósitos de caliza se utilizarán los métodos siguientes:

- Sección o perfil geológicos
- Bloque geológico o de mineral
- Area y factor medios
- Polígono, triángulo o rectángulo
- Isoipsa/isopleta/isopaca/isocora.

También es posible una combinación de los citados métodos, según su aplicabilidad.

Es evidente que un depósito de caliza de baja calidad con un elevado contenido de componentes químicos o físicos perjudiciales, así como los depósitos de geología compleja o intrincada, requieren la determinación de "bloques" de límites de exploración más pequeños a un mayor nivel de confianza que los depósitos sencillos de gran calidad.

Estimación de reservas en diferentes fases

En la fase de reconocimiento y prospección, la reserva total explotable del depósito o propiedad puede expresarse mediante la fórmula siguiente:

$$Q + Vd + Smd \quad \dots(10)$$

donde

- Q = la reserva en toneladas,
- V = el volumen del depósito, en m³.
- d = el peso volumétrico medio del mineral, en toneladas por m³,
- s = el área de proyección del depósito o parte del mismo dentro de los límites del área para el cálculo de las reservas, y
- m = el espesor medio del depósito a lo largo de la línea normal al plano de proyección.

Durante las fases de prospección detallada, explotación y reconocimiento, las reservas deberán calcularse teniendo debidamente en cuenta el factor utilidad. En este caso, la reserva explotable real deberá calcularse y expresarse mediante la fórmula siguiente:

$$Q_m = Q_1 - (Q_2 + Q_3) \quad \dots(11)$$

donde

- Q_m = reserva explotable real,
- Q₁ = reserva total en toda la propiedad,
- Q₂ = reserva no explotable por diversas razones, y
- Q₃ = cantidad de vacíos y de bandas de rocas de ganga en la caliza.

Algunos parámetros básicos para la estimación de reservas

Durante la prospección detallada, las reservas deberán calcularse con arreglo a los horizontes o niveles de banco habituales en secciones y bloques mineros discretos, y se indicarán en unión de las calidades calculadas para cada uno de esos bloques o secciones de cada horizonte o banco.

Las reservas se agruparán con arreglo a diferentes intervalos de proporción entre la caliza y el recubrimiento, o entre la caliza y el desmante o escombros, lo que dará una idea de las limitaciones económicas de tales reservas calculadas en la fase real de exploración. Al estimar la reserva se tendrán en cuenta los factores de recuperación y la presencia de vacíos y cavidades mayores, si son comunes en el depósito. Si una parte de la reserva se encuentra bajo el nivel freático, su explotabilidad deberá determinarse con respecto al costo y a la disponibilidad de medios normales de bombeo. Asimismo, en el cálculo de las reservas se tendrán en cuenta las leyes y reglamentos de minas, los límites de explotación con respecto a las lindes de la concesión minera, la pérdida de reservas debido a la instalación de estructuras públicas, tales como ferrocarriles, carreteras, líneas de transporte de energía, etc., y a la distancia de seguridad mantenida con respecto a las viviendas. La pérdida de reservas en el laboreo de canteras por bancos o gradas también se tendrá en cuenta al calcular la reserva medida (probada).

En general, la profundidad de exploración y las reservas estimadas se limitarán a 30 ó 40 m de la superficie y hasta un cierto nivel, según los factores fisiográficos y de otra índole.

Registro y comunicación de datos

El registro de datos consistirá en lo siguiente:

- a) Mantenimiento del diario de campo por parte de los geólogos de exploración,
- b) Mantenimiento del registro de muestreos durante el período de exploración y
- c) Documentación de los resultados de análisis y de las características del depósito.

El diario de campo de los geólogos de exploración deberá contener datos exhaustivos de las observaciones sobre el terreno y bosquejos in situ de secciones naturales, variaciones litológicas, patrones de diaclasas y otras características geológicas y estructurales de importancia.

El registro de muestreos de todas las fases de exploración deberá mantenerse exactamente en formularios y cuadros adecuados.

Para documentar los resultados de los análisis, habrán de utilizarse un índice y un sistema adecuados.

Los datos de exploración se presentarán en dos tipos de informes:

- a) Informe de evaluación provisional; y
- b) Informe tecnoeconómico.

El informe de evaluación provisional corresponderá a las fases I y II. Será necesario para planear la fase posterior del programa de exploración, así como para tomar medidas provisionales en lo tocante a la licencia de prospección o a la concesión minera.

El informe tecnoeconómico se presentará por separado al término de la fase III.

El informe tecnoeconómico será el documento básico para evaluar la viabilidad de la explotación de una cantera en una determinada propiedad y el establecimiento de una planta que funcione a base de esa cantera.

El informe contendrá: a) una sinopsis; b) el cuerpo principal del informe lo constituirán la información básica y los detalles de exploración; c) secciones de recomendaciones y observaciones finales; y d) apéndices que contengan registros de muestras, registros de sondeo, resultados analíticos o de ensayos, detalles de mapas de cálculo de reservas, secciones, placas, fotografías, etc.

Parte de la información podrá mantenerse más o menos común o sin cambiar para la misma prospección en todos los informes sucesivos y durante diversas fases, y, aunque esa información se repita en todos ellos, no deberá excluirse de ninguno con objeto de que todos los informes estén completos en todas las fases.

Los informes deberán prepararse con arreglo a las siguientes líneas generales:

- a) Introducción: lugar y comunicaciones, clima, vegetación, topografía, sistema de drenaje, etc.; resumen de labores anteriores, objetivo y alcance de la presente investigación, período de investigación, etc.
- b) Características geológicas y estructurales: bajo los encabezamientos "Geología regional" y "Geología local" se describirán la estratigrafía, la litología, la geomorfología y la estructura.
- c) Detalles de exploración: geológicos, geofísicos si procede, cartografía superficial, excavaciones exploratorias, perforaciones, muestreo y, si procede (para el estudio de cualquier posible extensión subterránea del depósito), cuadro resumido de la magnitud de la exploración.
- d) Resultados de análisis de muestras: químicos, mineralógicos, petrográficos y fisicomecánicos.
- e) El examen de las observaciones sobre el terreno y de los resultados de análisis deberán referirse a lo siguiente: 1) tipo, extensión y esbozo del depósito; 2) hipótesis geológicamente fundadas o pruebas exploratorias con respecto a la profundidad del depósito; 3) composición litológica; 4) calidad de la caliza y su grado de consistencia; 5) índices mineros tales como espesor del recubrimiento, proporción entre éste y la caliza, etc.;

6) condiciones geohidrológicas; 7) medios de transporte; y
8) factores tecnoeconómicos como la disponibilidad de combustible, agua, terrenos para el emplazamiento de la planta, etc.

- f) Reservas y calidad: Tipo de reservas y su fiabilidad
- g) Conclusiones y recomendaciones: Esbozo del depósito; explotabilidad general del depósito según sus reservas, calidad y otros parámetros de interés; esquema y programa de futuras labores con indicación de la cantidad y otros detalles específicos; disposición o evacuación de desechos, recubrimiento, escombros, etc.

Sin embargo, tras la fase III, la parte dedicada en los informes tecnoeconómicos a las conclusiones y recomendaciones, deberá ser más específica con respecto al método de explotación, la recuperación de caliza prevista, el de avance para su beneficio, la inversión de capital aproximada en la explotación de la mina y costo estimado de dicha explotación.

El tipo y el número de diagramas que, como apéndices, han de acompañar a un informe variarán según la fase de exploración. No obstante, la siguiente lista, que se incluye aquí a modo de orientación, podría consultarse al decidir el contenido de un apéndice con tales diagramas:

- a) Mapa geológico a gran escala con toda clase de detalles geológicos y de la labor de exploración. En el caso de que los datos sean demasiado numerosos y de diversa naturaleza como para ser presentados en un solo mapa, podrán prepararse mapas separados que muestren las características geológicas, las perforaciones, los pozos, las trincheras, los puntos de muestra, la isoipsa de techos y suelos, etc.
- b) Secciones geológicas a base de hipótesis, interpretaciones y datos disponibles.
- c) Mapas o planes de ensayo con respecto al CaO, y al MgO; histogramas y gráficos de barras de isópacas que muestren la variación y la distribución de la calidad.
- d) Diagrama de bloques isométrico de los depósitos.
- e) Registro detallado de perforaciones y excavaciones.
- f) Registros de muestras.
- g) Fichas de datos analíticos o de ensayo.
- h) Planos de tramos, y otros planos de estimación de reservas, con los datos considerados y los métodos aplicados.
- i) Fotografías y placas de importancia.
- j) Equipo recomendado para su utilización en la explotación de los depósitos.
- k) Previsión, en base a la experiencia, de materiales fungibles y piezas de repuesto, y costos correspondientes previstos.

- 1) Realización del mejor proyecto de trabajo para la explotación de la cantera y ubicación de ésta en una zona óptima, asegurando el modo más eficiente de fragmentación de las rocas.

Conceptos de explotación

Tras cumplir todos los requisitos relativos a la exploración y a la investigación de las materias primas, la planificación de la explotación de la cantera debería explicarse en detalle con arreglo a algunos principios específicos.

La planificación de la cantera se considera uno de los principales factores que contribuyen a asegurar que la calidad de la materia prima obtenida cumpla con los requisitos del producto y del proceso de fabricación. La planificación de la cantera comprende todas las actividades, procedimientos y medidas encaminadas a asegurar un suministro continuo y económico de materias primas. El siguiente esquema muestra el lugar que ocupa la planificación de la cantera en la estrategia de seguridad de la calidad.

Selección del emplazamiento de la cantera	Planificación de la cantera	Economía Requisitos del producto Requisitos relacionados con el proceso de fabricación
---	-----------------------------	--

Selección del emplazamiento de la cantera

A base de las investigaciones, de las exploraciones y de las formulaciones de mezclas de crudo para las diferentes calidades de materias primas disponibles, deberá considerarse, tras la selección y evaluación del posible emplazamiento de la cantera, un plan específico para la explotación de ésta y la determinación de las diferentes calidades. A base de la formulación de la mezcla de crudo de los diferentes porcentajes de dosificación, se procede primero a seleccionar el emplazamiento y después a la elaboración de un plan de explotación. Sin embargo, en ciertos casos es posible que la planificación de la cantera, según su importancia dentro del plan de seguridad de la calidad, entrañe una reconsideración de su emplazamiento. Existen algunos factores específicos que afectan a la selección de los emplazamientos de las canteras, como, por ejemplo, los siguientes:

- Criterios geológicos: estratigrafía, litología, tectónica y recubrimiento
- Topografía y fisiografía
- Características de la materia prima: humedad, homogeneidad, características químicas y mineralógicas, y características físicas
- Formulaciones de mezclas de crudo: característica de los diferentes tipos de materias primas disponibles, y aspectos de dosificación
- Características de manipulación y manutención: fragmentación - adherencia - vaciamiento - transporte, acarreo
- Condiciones climáticas

- **Parámetros operacionales:** drenaje, agua subterránea - medidas de seguridad
- **Accesibilidad, infraestructura**
- **Consideraciones del mercado:** calidad del producto - tipos de productos - proximidad a la zona del mercado (es decir, proximidad a la fábrica de cemento)
- **Ecología, efectos en el medio ambiente:** ruido, polvo, vibraciones, contaminación - rehabilitación

En la práctica, los criterios arriba indicados no tienen todos la misma importancia, pues ésta depende de las condiciones locales reales.

Técnicas de explotación de canteras

Estas técnicas pueden ser:

- a) **Estratégicas (selectivas - no selectivas, recubrimiento, etc.),**
- b) **Operacionales (definición de bancos del sistema de explotación, altura, anchura y longitud del frente - fragmentación - método de extracción - voladura - rasgadura - efectos en el medio ambiente), o**
- c) **De ingeniería (selección del equipo para la explotación de la cantera - acceso, acarreo, drenaje, suministro de energía, etc. - edificios).**