

CARACTERIZACIÓN BÁSICA DE LA LIMOLITA (FORMACIÓN LAS MASAS – GUAYAQUIL) COMO MATERIAL PUZOLÁNICO Y SU INFLUENCIA COMO ADITIVO EN LAS PROPIEDADES DEL CEMENTO TIPO I

Andrea Hermenejildo ⁽¹⁾, Joyce León ⁽²⁾, Gastón Proaño Cadena ⁽³⁾

Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra ^{(1) (2) (3)}

Escuela Superior Politécnica del Litoral ^{(1) (2) (3)}

Campus Gustavo Galindo, Km. 30.5 vía Perimetral, Apartado 09-01-5863, Guayaquil-Ecuador ^{(1) (2) (3)}

ahermene@espol.edu.ec ⁽¹⁾, jkleon_florencia@hotmail.com ⁽²⁾, gproano@espol.edu.ec ⁽³⁾

Resumen

En la Industria cementera, las materias primas son de suma importancia pues de ellas dependen las características, elaboración y el proceso de optimización para la fabricación del cemento. La caliza y arcilla son esencialmente estas materias primas, pero además se requiere de sustancias naturales o sintéticas que den al cemento las propiedades requeridas, estas sustancias se las denominan “aditivos”. Los aditivos se usan básicamente para mejorar las condiciones del concreto de tal manera que se haga más adecuado para las condiciones de trabajo o más económico. Algunas de las utilidades de los aditivos son las de, aumentar la trabajabilidad, reducir el contenido del agua, acelerar el desarrollo de resistencia, aumentar la resistencia, reducir o retardar el desarrollo del calor, aumentar la durabilidad, reducir la permeabilidad a los líquidos, aumentar la adherencia del concreto con el acero, etc. Dentro de los aditivos están las puzolanas, su estudio es el objetivo principal de este trabajo de investigación en el que se desarrollará el estudio de la Limolita como material puzolánico y su influencia como aditivo en las propiedades del cemento Tipo I.

Palabras Claves: *Puzolanas, materias primas, aditivos, limolita, cemento.*

Abstract

In the cement Industry, raw materials are of great importance since they depend on the characteristics, development and optimization process for the manufacture of cement. The limestone and clay are essentially raw materials, but also requires natural or synthetic substances that give the concrete the required properties; these substances are called "additives." Additives are used primarily to improve the conditions of the concrete so that it becomes more suitable for working conditions or cheaper. Some additives utilities are to increase the workability, reduce water content, accelerate the development of resistance, increase strength, reduce or delay the development of heat, increase durability, reduce permeability to liquids, increase the adhesion of concrete with steel, etc. Among the additives are the pozzolan, their study is the main objective of this research which will develop the study of siltstone as pozzolanic material and its influence as an additive in the properties of cement Type I.

Key Words: *Pozzolan, raw materials, additives, siltstone, cement.*

1. Introducción

Los aditivos o complementos cementantes son materiales distintos del agua, agregados o triturados y del cemento hidráulico, de origen natural o artificial, que en determinadas proporciones y adicionados a la materia prima o molidos conjuntamente con el clinker, no perjudican el normal comportamiento del cemento resultante, pudiendo aportar alguna cualidad positiva o mejorar cualquiera de las características existentes, de tal manera que se haga más adecuado para las condiciones de trabajo o más económico.

Existen un grupo entre los aditivos que tiene una importante actividad química entre los que se encuentran las PUZOLANAS. La utilización de puzolanas en el campo de la industria cementera ha incrementado, debido a las mejoras en la durabilidad y en las prestaciones mecánicas que genera su adición en morteros de cemento y hormigones. Esta mejora ocurre principalmente por la reacción entre la puzolana y el hidróxido cálcico liberado en la hidratación del cemento, que forma compuestos con propiedades cementantes. Varios son los métodos para evaluar la actividad de puzolanas entre los cuales se destacan el índice de actividad puzolánica, el análisis termogravimétrico y algunos métodos de medida resistividad en pastas.

1.1 Definición

El código ASTM (1992), en la definición 618-78, define las puzolanas como "materiales silíceos o aluminosilíceos quienes por sí solos poseen poco o ningún valor cementante, pero cuando se han dividido finamente y están en presencia de agua reaccionan químicamente con el hidróxido de calcio a temperatura ambiente para formar compuestos con propiedades cementantes".

2. Generalidades

2.1 Clasificación

Las puzolanas se clasifican en dos grandes grupos: naturales y artificiales, aunque existe un grupo intermedio constituido por puzolanas naturales que necesitan tratamientos térmicos de activación, con el objeto de aumentar su reactividad.

1. Puzolanas Naturales: Son productos minerales con características composicionales (silico-aluminosos), estructurales (estructura

imperfecta o amorfa) y texturales (grano fino) que los hacen aptos para su uso.

2. Puzolanas Artificiales: Son materiales que deben su condición puzolánica a un tratamiento térmico adecuado.

3. Puzolanas Mixtas o Intermedias: Son aquellas puzolanas que, naturales por su origen, se someten a un tratamiento térmico con el objeto de cambiar sus propiedades para aumentar su reactividad química.

2.2 Propiedades

Las propiedades de las puzolanas dependen de la composición química y la estructura interna. Se prefiere puzolanas con composición química tal que la presencia de los tres principales óxidos (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3) sea mayor del 70%.

2.3 Mecanismo de hidratación

Las puzolanas, incorporadas dentro del CPP (cemento pòrtland puzolánico) tienen la capacidad de formar productos de hidratación a través de una reacción secundaria donde se combinan con el $(\text{OH})_2\text{Ca}$ formado durante la hidratación de los compuestos silico-calcáreos (C_3S y C_2S) denominada primaria, resultando compuestos SCH (silico-calcáreos-hidratados).

El SiO_2 es aportado por la puzolana y el $(\text{OH})_2\text{Ca}$ -hidróxido de calcio- es el subproducto generado durante la hidratación primaria. Podrá observarse que durante la hidratación de las puzolanas no hay generación de $(\text{OH})_2\text{Ca}$. En el mismo sentido, la fig. 2-1 muestra que a medida que avanza el proceso de hidratación, la cal libre disminuye, lo que indica la formación de productos de hidratación (en su mayor parte SCH y aluminosilicatos de calcio en menor medida) a partir de la puzolana.

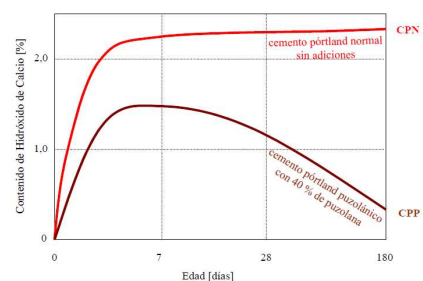


Fig. 2-1. Cambios en el contenido de $(\text{OH})_2\text{Ca}$ durante la hidratación del CPP.

Es evidente que el uso de una puzolana de buena calidad asegura, no solamente una menor cantidad de cal libre en la pasta de cemento sino que además se obtiene un mayor volumen de

productos SCH por lo cual se obtiene una mejor relación agua/cemento, una menor porosidad de la pasta debido a un refinamiento de poros y, consecuentemente, menor permeabilidad respecto del CPN (cemento pórtland normal) producido a partir del mismo clinker pórtland. Esto significa la obtención de una pasta de cemento más compacta, resistente y durable.

3. Determinación del área de estudio y marco geológico

Desde el año 1981, geólogos franceses de la ORSTOM (actual IRD) y geólogos ecuatorianos de la ESPOL, realizaron el levantamiento del sur oeste de la costa ecuatoriana, abarcando sectores de importancia económica, como la península de Santa Elena, cuenca del Guayas, cordillera de Chongón-Colonche, cuenca de Manabí y cuenca Progreso.

Observando de manera general los rasgos geológicos de la costa ecuatoriana, se concluye que se trata de una zona de margen activo, estructuralmente muy compleja, en la que prevalecen fenómenos de subducción especialmente oblicua, que dan origen a fallamientos de cizalla, inversos y gravitacionales.

3.1 Localización del área de estudio

La zona de estudio está ubicada dentro del Área Minera CENACA perteneciente a HOLCIM S.A. Ecuador, que posee una extensión de 2450 hectáreas. La concesión se localiza al NW de la Ciudad de Guayaquil y está ubicada sobre el talud meridional de la cadena montañosa que es parte de la Cordillera Chongón-Colonches. La Planta Guayaquil se localiza dentro de la concesión, en el km 18 de la vía Guayaquil-Salinas.

El área está dividida en seis bloques que están delimitados por quebradas relativamente profundas. Se realizó un muestreo de mano de Limolita en los bloques 1, 2, 4 y 5 con sus respectivas ubicación espacial y haciendo una breve descripción del área, para luego ser entregadas al laboratorio para sus respectivos análisis.

3.2 Geología Regional

La Cordillera Chongón Colonche (Fig. 3-1) constituye la principal anomalía fisiográfica de la costa ecuatoriana, con una dirección NNO – SSE desde Guayaquil hasta el sector de Olón–Pedro Pablo Gómez. Es una estructura homoclinal con 90Km de largo, rumbo aproximado N 110°, y alturas mayores de 500 m. Se compone de una serie de colinas, cuya elevación media es de unos 700 metros y de orientación NW-SE. La cresta de

la cordillera forma la línea divisoria de las aguas que fluyen a la cuenca del Guayas y de las que desembocan al Océano Pacífico hacia el sur-oeste.

Se caracteriza por presentar un basamento de rocas ígneas básicas que constituye la Fm Piñón y una evolución estratigráfica estructural con edades del Coniaciano al Eoceno, representada por las formaciones: Calentura, Cayo ss, Guayaquil, San Eduardo y Caliza Javita.

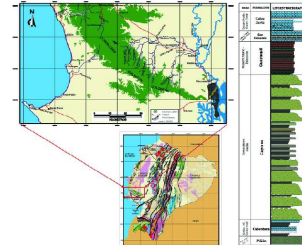


Fig. 3-1. Mapa de Cordillera Chongón-Colonche-Columna Estratigráfica de Chongón-Colonche

3.3 Geología Local

Formación Guayaquil (Maastrichtiense a Paleoceno Tardío): Representa la mayor parte de los sedimentos de Cretáceo Superior de la Costa. Consiste de estratificaciones delgadas a masivas, de color gris, habano, verdoso oscuro, gris y negro con interestratificaciones de lutitas silicosas, arcillita y tobas localmente deformadas, con estructuras sin-sedimentarias y rizaduras. Su espesor puede llegar a los 450 metros. El contacto inferior con la Formación Cayo es gradacional y el superior, con la Formación San Eduardo, es aparentemente concordante y transicional rápido.

Formación San Eduardo (Paleoceno Tardío a Eoceno Medio): Consiste en calcarenitas y calcilitas turbidíticas, depositadas en aguas profundas, sobre el flancosur de la cordillera de Chongón – Colonche y el flanco norte del horst Azúcar – Playas. La formación infrayace aparentemente concordantemente a las calcilitas y lutitas de la Formación Las Masas y tiene un espesor promedio de 80 metros.

Formación Las Masas (Eoceno Medio – Eoceno Tardío): En el área de estudio, esta formación está compuesta por una serie de limolitas decimétricas cálcico-montmorilloníticas con intercalaciones de lutitas calcáreas y láminas milimétricas de areniscas de grano grueso a medio y lodolitas. Esta formación representa el comienzo de un cambio de facies calcáreas a siliciclásticas la cual se va transformando en una serie turbidítica fina y ocasionalmente olistostrómica denominada Grupo Ancón. Aflora muy bien a todo lo largo del yacimiento de CENACA en contacto concordante suprayaciendo la Unidad U-1 de la Formación San Eduardo. El espesor de la Formación Las Masas tiene un promedio de 50 metros.

Mineralógicamente, las limolitas de la Formación Las Masas contienen esqueletos de diatomeas y esponjas. Igualmente, hay presencia de cuarzo (cerca de un 47% en promedio), montmorillonita (15%), calcita (27%), clinoptilolita [una zeolita](8%) y algo de cristobalita (3%).

Grupo Ancón (Eoceno Tardío): Este grupo se ha dividido de una manera general en dos unidades diferentes, una inferior en donde predominan facies arcillosas (Ean-1) y una superior en donde predominan facies arenosas (Ean-2).

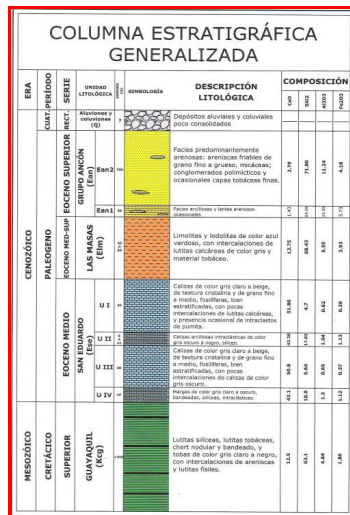


Fig. 3-2. Columna estratigráfica del Área Minera Ceneca.

4. Actividad puzolánica de los materiales

La combinación de la puzolana con caliza y el progresivo endurecimiento de mezclas con agua son dos fenómenos concomitantes, pero entre las dos variables no hay una correlación general.

En el contrario, una correlación existe dentro de cada puzolana. Esto significa que la resistencia mecánica, aunque se debe fundamentalmente a la combinación de cal, también depende de otros factores que tienen que ser detectados y cuantificados para evaluar la actividad puzolánica por completo.

4.1 Factores que influyen en la actividad puzolánica

La detección de los factores que rigen la actividad puzolánica se considera un problema todavía abierto, aunque muchos investigadores han tratado de resolverlo.

Entre los factores reconocidos para influir en la actividad puzolánica son:

- La composición química (principalmente sílice activa + contenido de alúmina).
- La superficie específica de puzolana.
- Mineralogía.
- Superficie específica de los productos de hidratación.
- La porosidad de la pasta hidratada.

Ni la sílice activa + contenido de alúmina, ni la cantidad de los productos hidratados presentes en la pasta puede estar correlacionado con la resistencia mecánica.

4.2 Composición química mineralógica

En la norma ASTM C 618, el contenido mínimo del 70% de (SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃), y un máximo de 4% para SO₃, 3% para la humedad, el 10% de la pérdida por ignición y opcional de 1,5% para Naeq son especificados.

4.3 Requisitos físicos y de rendimiento

La norma ASTM C 618 dice que la ley máxima de puzolana utilizada en las mezclas de concreto, es de un 34% de residuos que han pasado por un tamiz de 45um.

4.4 Variación de la puzolanidad

El hecho de que la puzolanidad pueda deberse a diferentes causas, además de que esta propiedad se manifiesta de diferentes maneras, hace verdaderamente difícil imaginar un único método que con carácter general permita llevar a cabo una estimación del valor puzolánico en condiciones equiparables en materiales distintos.

Además es importante resaltar que los ensayos que se practiquen en la determinación de la actividad puzolánica solo serán válidos en la medida que reflejen las condiciones reales de su posible uso.

4.5 Actividad puzolánica

Las propiedades técnicas de los materiales con adiciones puzolánicas, se derivan, principalmente de tres características de la reacción puzolánica.

1. Es una reacción lenta, al contrario que la reacción de hidratación del cemento que es rápida, por tanto, la velocidad de liberación del calor y el desarrollo de resistencias serán procesos más lentos.

2. Es una reacción que consume Hidróxido de Calcio en vez de generarlo, lo que es importante para la durabilidad de las pastas hidratadas en ambientes ácidos.

3. Al producirse en un tiempo posterior los productos de reacción rellenan, de forma muy

eficiente, los espacios capilares que quedan después de la hidratación de los componentes del cemento.

Así se mejora la impermeabilidad y la resistencia mecánicas del sistema (menor porosidad).

4.6 Reacción puzolánica

En una mezcla reaccionan el cemento Portland y la puzolana en la presencia de agua, una reacción similar a la reacción ácido-base se lleva a cabo, participando por una parte la cal y los álcalis liberados por la reacción de hidratación del cemento Portland y por la otra los óxidos ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$) de la puzolana, por consiguiente, la presencia de la puzolana en el sistema de hidratación modifica los mecanismos de hidratación de los compuestos principales del cemento portland, afectando el calor de hidratación, contenido de portlandita, la cantidad de agua combinada y el grado de reacción de los componentes.

La heterogeneidad de la familia de las puzolanas así como el fenómeno complejo que ocurre durante la hidratación, no permite definir un modelo de actividad puzolánica, únicamente permite tener una tendencia general para ser evaluada.

El principal producto de la reacción puzolánica es la fase C-S-H, que es similar al producido en la reacción del agua con el cemento portland y que contribuye adicionalmente a la resistencia mecánica de las pastas especialmente en edades avanzadas de hidratación. Cabe señalar que parte de los álcalis que participan en la reacción puzolánica y que fueron liberados en la reacción de hidratación quedan absorbidos en la estructura de los C-S-H, lo que también contribuye a disminuir la reacción álcali agregado en el concreto.

4.7 Impermeabilidad y durabilidad

Los efectos de la reacción puzolánica son probablemente más importantes en el hormigón que en la pasta de cemento hidratada. La permeabilidad del hormigón, generalmente, es más alta que la de la pasta de cemento debido a las microgrietas que se producen en la zona de la transición.

Se ha sugerido que los procesos de refinamiento del tamaño del poro y del tamaño del grano fortalecen la zona de transición, reduciéndose la microfisuración y aumentando la impermeabilidad del hormigón.

4.8 Efecto de la puzolana

La presencia de la puzolana en el cemento, logra por medio de su reacción con el hidróxido de calcio que éste se transforme en productos de reacción insolubles en el agua y propiedades hidráulicas, evitando ser extraído hacia el exterior y transformando la masa de concreto a una mayor resistencia física y química.

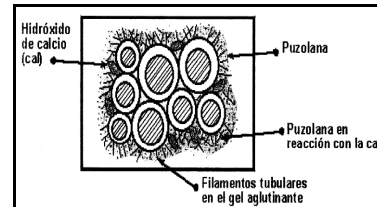


Fig. 4-1. Representación esquemática del proceso de reacción de los granos del cemento, la puzolana y el agua

5. Caracterización básica de la Limolita como material puzolánico

5.1 Métodos de evaluación

El método de Evaluación propuesto es el siguiente:

- Obtener una muestra representativa del banco o área de estudio, etiquetada y con su respectiva ubicación espacial (coordenadas).
- Secar el material por 24 horas a 100°C o hasta peso constante.
- Triturar, pulverizar y moler en molino de bolas hasta lograr una fineza del 90 al 94% que pase la malla # 325.
- Homogenizar y cuartear para obtener una muestra representativa.
- Realizar el análisis mineralógico utilizando la técnica de difracción de rayos X en polvos menores que $45\mu\text{m}$.
- Cuantificar las fases cristalinas y estimar el porcentaje de fase reactiva.
- Fabricación de cubos de mortero para determinar la cinética de reacción mediante la resistencia mecánica a la compresión a las edades de 1, 3, 7 y 28 días de edad, los cubos.
- Evaluar el índice de puzolanidad y establecer si es servible como material aditivo en el cemento, mediante los rangos establecidos.

5.2 Técnicas de caracterización

Las técnicas convencionales que se utilizaron para hacer una debida caracterización de la Limolita como material puzolánico son las siguientes:

- Análisis químico

- La composición de fases minerales (Difracción de Rayos X)
- La composición química de los elementos mayoritarios y minoritarios (Espectrometría de fluorescencia de rayos X)

5.3 Requisitos de la puzolana

Para esta investigación los requerimientos físicos y químicos que debe cumplir las puzolanas naturales o calcinadas, se la determinó de acuerdo a la norma INEM 494 1980-11.

Esta norma comprende las puzolanas naturales o calcinadas que son usadas para obras de construcción ya sea como aditivos para morteros y hormigones de cemento, o como aditivos para morteros de cal hidratada. Y en cuanto a los requisitos complementarios se menciona el almacenamiento y ensacado; y rotulado.

5.4 Proceso de obtención de la Limolita

Para la preparación de la Limolita se realizaron los siguientes pasos:

1. Muestreo: Se realizó un muestreo en el Bloque 2, 4 y 5 del área minera CENACA, haciendo una breve descripción del lugar, tomado las coordenadas espaciales y dirección de los estratos.
2. Trituración: Después de tener la materia prima, se procede a reducir el tamaño de la roca por medio de una trituradora y molino de bolas, dando por resultado un material más fino que la original y casi uniforme.
3. Secado: Una vez el material pasado por el molino se procede a secarlos debido a que tienen un porcentaje de humedad.
4. Molienda: Siguiendo las normas internacionales vigentes, establece el ensayo del retenido en el tamiz de 45 µm como uno de los métodos que determina la finura en base al material retenido en dicho tamiz.

5.5 Muestreo

Se realizó muestreo de campo de Limolita del Área Minera CENACA perteneciente a HOLLCIM S.A, con su debido etiquetamiento y datos de orientación de los estratos, para su respectivo análisis y pruebas que se llevarán a cabo en el laboratorio de HOLLCIM S.A. Planta Guayaquil.

Tabla 5-1. Muestras del área de estudio con su respectiva ubicación espacial

Muestra	Coordenadas	Observaciones
7401	608250/9759275	Limolita meteorizada, en el bloque 2, espesor aproximado de 4m.
7402	608375/9759333	Limolita meteorizada, llegando al límite entre el bloque 1 y 2. Al este del bloque 2.
7403	607868/9759390	Limolita meteorizada aproximadamente 5 m, en bloque 2W, Plataforma 48 m.
7404	607818/9759388	Limolita Meteorizada, Bloque 2W, Límite plataforma 48 m. bajando.
7405	607815/9759377	Limolita Meteorizada aproximadamente 5 m, bajando del nivel 48
7406	607805/9759368	Limolita Meteorizada aproximadamente 5 m, Localización: junto al camino por debajo del camino del nivel 48m.
7407	605509/9759900	Limolita Meteorizada, Bloque 4 al este, lado sur de la cantera.
7408	605430/9759908	Limolita Meteorizada a más de 100 m. al Oeste del Bloque 4
7409	605345/9759906	Limolita verdosa más o menos fresca. Bloque 4 muy cerca del extremo del lado W del lago
7410	604656/9760087	Limolita verdosa en el extremo W de la laguna (Q. Gallegos)
7411	604653/9760082	Limolita verde, al extremo W del lago, Q. Gallegos.
7412	604644/9760073	Limolita Meteorizada aproximadamente 5 m.
7413	604631/9760065	Limolita Meteorizada Bloque 4
7414	604618/9760060	Limolita Meteorizada
7415	604608/9760049	Limolita oxidada aproximadamente 5 m. Bloque 4
7416	604540/9760114	Limolita oxidada, Bloque 5W, Plataforma 60 msnm
7417	604490/9760129	Limolita verdosa fresca, Bloque 5 E, Plataforma 60 msnm.
7418	604298/9760223	Limolita desde el nivel 88 a 84 msnm. Bloque 5.
7419	604251/9760211	Limolita amarilla meteorizada, Nivel 84 msnm
7420	604511/9760151	Limolita meteorizada, Bloque 5E, Nivel 72 E
7421	604484/9760156	Limolita meteorizada Bloque 5, nivel 72.
7422	604418/9760154	Limolita muy levemente meteorizada, Bloque 5, Nivel 72; Limolita muy fresca verde.
7423	604350/9760161	Limolita verde fresca y levemente meteorizada, Bloque 5, Nivel 72.
7424	604285/9760165	Limolita verde y amarilla. Bloque 5, N. 72 msnm.
7425	604250/9760168	Limolita levemente oxidada, Bloque 5, N. 72 msnm.
7426	604268/9760097	Piso 60m, Bloque 5, Tope de las Masas en "contacto" con Ancón, Limolita verde fresca, Tope de las Masas en "contacto" con arcilla gris del Ancón.
7427	604265/9760125	Limolita verde fresca, Nivel 60 m., bloque 5
7428	604290/9760133	Limolita verde fresca, Nivel 60 m., Bloque 5.
7429	604344/9760123	Limolita verde fresca, Nivel 60 m., Bloque 5.

5.6 Trituración y Secado

Para esta etapa se utilizó el molino de bolas, hasta llegar a material fino, para luego ser llevado al horno y secarlo debido a que tiene un porcentaje bajo de humedad.

Para el proceso de trituración se tomo los tiempos en minutos, hasta que el material quede fino.

Tabla 5-2. Resultado de tiempo de Molienda

Tiempo de Molienda	
Muestra	Tiempo (min)
7401	83.5
7402	83.5
7403	83.5
7404	83.5
7405	83.5
7406	83.5
7407	83.5
7408	83.5
7409	83.5
7410	83.5
7411	83.5
7412	106
7413	106
7414	106
7415	106
7416	106
7417	106
7418	106
7419	106
7420	106
7421	106
7422	106
7423	106
7424	106
7425	106
7426	106
7427	106
7428	106
7429	106

5.7 Finura

El material es pasado sobre un tamiz de 35 µm, esto determina la finura en base al material retenido en dicho tamiz. Los resultados dan una lectura en porcentajes. Mientras mayor sea la cantidad de material que pase por la malla de 45 µm, mayor será su efecto sobre la resistencia del

concreto, aunque es conveniente aclarar que este efecto no es una función de la superficie específica medida por la permeabilidad al aire, sino que es una función de las partículas, de ahí el uso de la malla.

5.8 Análisis químico

Los análisis químicos se llevaron a cabo en el laboratorio de Holcim S.A. con el material debidamente molido, donde se utilizó la técnica de espectrometría de rayos x para su respectivo análisis.

La prueba consiste en preparar las muestras como pastillas prensadas de polvo o discos fundidos (perlas) y se excitan con una radiación, normalmente generada por un tubo de rayos X operado a un potencial entre 10 y 100 kv.

Tabla 5-2. Resultado de análisis químicos

Muestra	%P	%SiO ₂	%Al ₂ O ₃	%Fe ₂ O ₃	%CaO	%MgO	%SO ₃	%K ₂ O	%Na ₂ O	%TiO ₂	%P ₂ O
7401	5.6	84.5	5.65	2.85	1.03	1.16	0.06	0.38	0.01	0.21	0.01
7402	5.2	83.8	5.53	2.81	0.90	1.28	0.02	0.45	0.01	0.22	0.04
7403	7.2	81.4	5.59	2.37	2.87	1.10	0.17	0.24	0.01	0.20	0.03
7404	8.6	76.3	5.27	2.83	4.93	1.23	0.01	0.34	0.01	0.20	0.01
7405	10.3	73.4	4.93	1.23	0.01	0.34	0.07	0.17	0.21	0.19	0.02
7406	13.5	66.4	4.70	2.51	12.0	1.06	0.04	0.33	0.01	0.18	0.06
7407	14.0	65.1	5.17	2.88	11.4	1.19	0.01	0.42	0.01	0.21	0.08
7408	15.6	60.5	6.59	3.53	11.7	1.64	0.01	0.64	0.01	0.28	0.07
7409	13.6	64.1	6.19	3.18	10.3	1.69	0.08	0.73	0.01	0.25	0.06
7410	16.5	57.7	5.19	2.74	14.9	1.40	0.36	0.57	0.01	0.22	0.08
7411	12.0	67.3	7.40	3.91	7.24	1.78	0.07	0.76	0.01	0.31	0.08
7412	9.6	71.8	7.20	3.89	3.29	1.64	0.05	0.68	0.01	0.30	0.07
7413	12.8	65.6	5.66	2.83	11.1	1.34	0.04	0.54	0.01	0.22	0.08
7414	14.7	72.0	5.74	2.89	3.79	1.25	0.01	0.46	0.01	0.23	0.07
7415	12.3	68.0	5.30	2.39	9.82	1.05	0.02	0.45	0.01	0.21	0.08
7416	14.9	61.6	6.47	3.50	11.1	1.72	0.01	0.74	0.01	0.27	0.08
7417	17.7	54.6	4.73	2.60	17.0	1.38	0.22	0.59	0.01	0.20	0.07
7418	13.6	66.4	4.50	2.11	12.1	0.93	0.02	0.32	0.01	0.17	0.07
7419	14.6	63.0	5.58	3.18	12.0	1.36	0.01	0.44	0.01	0.23	0.07
7420	16.9	58.5	4.77	2.50	15.7	1.14	0.01	0.46	0.01	0.18	0.08
7421	18.1	57.0	4.56	2.33	16.5	1.03	0.01	0.46	0.01	0.19	0.08
7422	16.4	58.1	4.92	2.58	15.6	1.15	0.21	0.46	0.01	0.20	0.08
7423	17.2	56.9	5.19	2.63	16.0	1.49	0.24	0.52	0.01	0.21	0.08
7424	16.2	60.1	5.20	3.05	14.1	1.00	0.08	0.28	0.16	0.22	0.06
7425	16.4	58.5	5.34	3.13	14.2	1.09	0.11	0.32	0.18	0.22	0.06
7426	13.8	60.0	7.53	3.57	11.5	1.39	0.65	0.47	0.52	0.31	0.06
7427	16.0	59.2	5.18	2.89	14.3	1.10	0.18	0.31	0.26	0.20	0.06
7428	15.5	60.0	5.57	3.30	13.0	1.25	0.09	0.34	0.24	0.23	0.06
7429	16.0	56.6	4.96	3.78	15.3	1.15	0.23	0.33	0.22	0.21	0.06

5.9 Almacenamiento de muestras

Después de moldearlas, coloque los moldes con las muestras (sobre sus placas de base) en el cuarto o gabinete húmedo a $23 \pm 1,7^{\circ}\text{C}$ durante 2' a 24 horas. Mientras se encuentren en el cuarto o gabinete húmedo proteja la superficie de las muestras de goteo de agua.

5.10 Ensayos de resistencia a la compresión

Se determina la resistencia a la compresión de las tres muestras de la mezcla de control y de la mezcla de prueba de una edad de 28 días en

concordancia con el método de ensayo de la NTE INEN 488.

Tabla 5-2. Ensayos de resistencia a la compresión

Muestra	Resistencia (MPa)			
	Día			
	R1D	R3D	R7D	R28D
7401	8.7	18.0	24.2	31.8
7402	9.7	20.8	26.9	35.7
7403	9.4	20.0	26.6	34.9
7404	8.8	18.2	24.7	33.0
7405	9.4	20.1	27.6	36.4
7406	10.1	20.0	26.7	35.4
7407	9.7	19.6	26.3	34.3
7408	8.7	18.8	23.8	32.7
7409	8.4	18.5	24.1	32.8
7410	9.6	20.7	26.6	34.2
7411	8.6	19.2	25.7	32.1
7412	9.0	18.8	25.3	32.5
7413	10.0	21.5	27.8	38.2
7414	9.1	20.7	28.0	43.8
7415	9.7	21.8	29.1	44.5
7416	9.7	20.9	26.7	35.2
7417	10.6	20.6	29.0	37.4
7418	10.0	22.0	28.5	36.7
7419	9.1	20.3	25.5	33.9
7420	9.4	20.1	26.2	34.0
7421	10.2	21.2	27.0	35.5
7422	9.7	20.6	26.7	33.5
7423	10.1	20.5	27.0	34.8
7424	10.1	19.9	25.7	34.7
7425	10.0	20.4	26.2	34.6
7426	9.6	19.7	25.7	34.6
7427	10.3	20.7	28.8	38.4
7428	10.0	20.2	25.1	33.9
7429	10.7	21.4	25.8	32.8
Patrón	12.6	24.5	32.0	41.9

5.11 Cálculos

Se calcula el índice de actividad puzolánica con cemento Portland como sigue:

Índice de actividad puzolánica con cemento Portland = $(A/B) \times 100$

En donde:

A= Resistencia promedio a la compresión de los cubos de la mezcla de prueba, MPa.

B= Resistencia promedio a la compresión de los cubos de la mezcla de control, MPa.

Tabla 5-2. Resultados de índices de puzolanidad

Muestra	R28D	AI28D
7401	31,6	75,4
7402	35,7	85,2
7403	34	81,1
7404	33	78,8
7405	36,4	86,9
7406	35,4	84,5
7407	34,3	81,9
7408	32,7	78,0
7409	32,8	78,3
7410	34,2	81,6
7411	32,1	76,6
7412	32,5	77,6
7413	38,2	91,2
7414	43,8	104,5
7415	44,5	106,2
7416	35,2	84,0
7417	37,4	89,3
7418	36,7	87,6
7419	33,9	80,9
7420	34	81,1
7421	35,5	84,7
7422	33,5	80,0
7423	34,8	83,1
7424	34,7	82,8
7425	34,6	82,6
7426	34,6	82,6
7427	38,4	91,6
7428	33,9	80,9
7429	32,8	78,3
7430	31,6	75,4
Patrón	41,9	100

Tabla 5-2. Rango de Estado de muestras con relación al índice de Puzolanidad

Muy Malo (< 65)	
Malo (66 - 73)	0
Suficiente (74 - 82)	15
Bueno (83 - 91)	8
Muy bueno (92 - 100)	1
Excelente (>100)	2

6. Análisis de resultados

La relación de agua – cemento expresa la íntima relación que existe entre el peso del agua utilizada en la mezcla y el peso del cemento. Esta afecta parámetros como la resistencia, la durabilidad, la contracción, el agrietamiento y la permeabilidad del concreto, pero es necesario el uso de agua en exceso para darle trabajabilidad a la mezcla. Y en las pruebas realizadas dio como resultado un promedio de 53.74 en porcentaje, rigiéndonos a la norma INEN 490:2005, en cuanto a requerimiento de agua y % en peso del cemento posee un máximo de 56, cumpliéndose así con las normas vigentes.

En los ensayo de resistencia a la compresión en diferentes tiempos de curado se obtuvo un promedio de 26.5 MPa a los 7 días y 36.4 MPa a los 28 días, en las especificaciones vigentes para los cementos mezclados, la resistencia a la compresión debe tener un mínimo de 25 MPa a los 28 días. Los resultados de las muestras a los 28 días nos servirán para obtener el índice de actividad puzolanica.

Los resultados se pueden observar en la gráfico No. 1, donde de las muestras analizadas el 51.72%, están en el rango de suficiencia como material puzolanico, el 27.8% están dentro del

rango de bueno, un 3.49% es muy bueno; y el 6.89% incluyéndose la muestra patrón son de excelente estado. Lo que demuestra que más del 50% de las muestras cumple con el requerimiento en el rango de suficiencia de las especificaciones INEN 494 1980-11 a los 28 días de edad.

Basándonos en las especificaciones de la norma INEN 494 1980-11 para el uso de puzolanas naturales como adición mineral, la suma del contenido de los requisitos químicos del material tales como el Óxido de silicio (SiO₂), Óxido de Aluminio (Al₂O₃) y Óxido Férrico (Fe₂O₃) debe ser del 70%, pero el resultado del promedio de la suma de la muestra de Limolita utilizada en los ensayo es de 73.27%. El contenido máximo de Trióxido de Azufre (SO₃) debe ser de 4% y la Limolita dio como resultado 0.11%. Cuyos resultados indican que las muestras cumplen las especificaciones vigentes.

7. Conclusiones

Dentro del trabajo realizado, los resultados de las pruebas físicas y químicas con el fin de conocer el proceso del cemento tipo I con adición de Limolita, y establecer si vale como material puzolanico a través de pruebas y ensayos cualitativos y cuantitativos, con el cual nos referimos al análisis químico, análisis físico, pruebas de índice de actividad puzolánica que se la determino mediante la prueba del cemento, dadas en las especificaciones vigentes del INEN.

A través de las pruebas y ensayos físicos, se obtuvieron resultados de resistencia a la compresión en diferentes tiempos de curado (1, 3, 7 y 28 días), tomando como dato principal la resistencia a los 28 días, para hallar el índice de actividad puzolanica cuyos resultados nos muestran que más del 50% de las muestras están dentro del rango de suficiencia, indicando que la Limolita es un buen material aditivo para la mezcla de cemento.

Los análisis químicos, y la realización de los debidos cálculos en cuanto al porcentaje de la composición del oxido de aluminio, oxido de silicio y oxido férrico cumplen con las especificaciones de las normas vigentes del INEN.

La composición mineralógica de las puzolanas influye de forma determinante en la actividad puzolánica y en las propiedades de los cementos mezclados; que los mejores desarrollos de resistencias en el tiempo y los menores requerimientos de agua en las mezclas, se obtiene cuando en las adiciones predomina la fase vítrea.

8. Agradecimientos

Agradezco el aporte intelectual del Ing. Ricardo Franco y al Ing. Juan Antonio Zamora

perteneciente a la Empresa Holcim S.A. Ecuador por su apoyo para la realización de esta tesina.

9. Referencias

- [1] “La puzolana” – Ingeniero de Minas Valerio Cortés Ayllón.
- [2] Cemento Portland Puzolanico – Características y Recomendaciones. Publicaciones de Loma Negra C.I.A.S.A. Ing. Edgardo Becker
- [3] Geología de la Concesión CENACA, Cantón Guayaquil, Provincia del Guayas, Ecuador. Holcim S.A. por Ing. Ricardo Franco.
- [4] Estudio Calorímetro del cemento Portland con Puzolanas Naturales españolas y Yeso. V. Rahhal*, H. Donza*, A. Delgado2*, JP. Gutiérrez2*, R. Talero2.
- [5] “Puzolanas en los Alrededores de Irra” JORGE IVÁN TOBON.
- [6] Caracterización Básica de Las Zeolitas (Fm Cayo) para su aplicación como material Puzolanico. P. Robalino, F. Morante, V. Ramos , H. Egüez.
- [7] Tipos de Cemento y sus Usos. Instituto Costarricense del cemento y concreto.

Atentamente,

Andrea Valeria Hermenejildo de La A
C. I. 0924927189

Joyce Katherinne León Florencia
C. I. 0914488689

Ing. Gastón Proaño Cadena
DIRECTOR DE TESIS