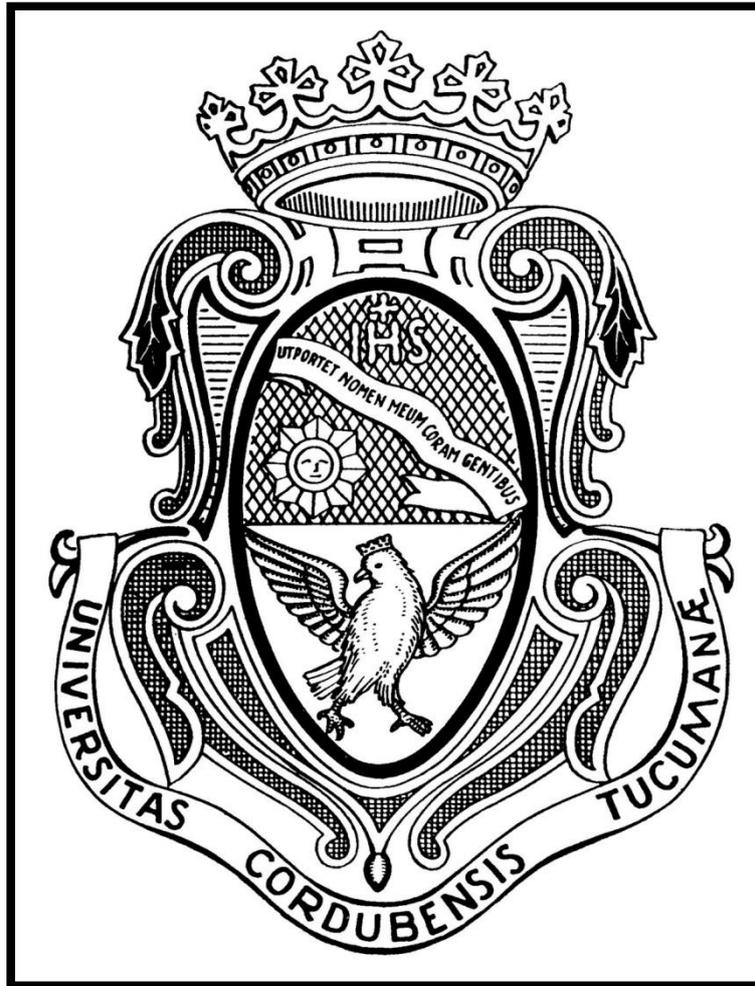


UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA

FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS, FÍSICAS Y
NATURALES



PRÁCTICA SUPERVISADA – Ingeniería Civil

2015

ANÁLISIS DE ACTIVIDAD PUZOLÁNICA EN TOBA ZEOLÍTICA

TUTOR DOCENTE: Ingeniera Civil Patricia Irico

TUTOR EXTERNO: Ingeniero Civil Héctor Gattavara

AUTOR: Franco Soffietti - e-mail: fsoffietti@gmail.com

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer de corazón a mis tutores, Patricia Irico y Héctor Gattavara, y a Marcelo Tissera, por su participación y colaboración indispensable en el desarrollo de esta investigación, por la paciencia y la dedicación, por la confianza y por abrirme las puertas del Laboratorio, brindándome esta posibilidad que me llena de orgullo.

Doy gracias a mis padres, Sergio Soffietti y Liliana Galassi, a mi hermano Fabrizio Soffietti, a mis madrinas, Bibiana y Mariel Ariaudo, a mi abuela Irma Galassi, a mis tíos abuelos y toda mi familia, a quienes amo profundamente, ya que sin ellos nada hubiera sido posible.

Agradezco también los amigos que hice en la Facultad y en el Laboratorio, Francisco Durando, Santiago González, Tomás Tiranti, Lucas Morero, Candela Vecchio, Clara Mozejko, Agustín Mauriño, Samuel Delgado Pardo, Leandro Valverde, Raúl Berlingieri, Lucas Cacciabue, Verónica Fuentes, Sebastián Nolasco, Matias Sandanella, Pablo Díaz, Carlos Cornelli, Fernando Weth, Juli Cruz Doblás, Marcio Lorenzotti, Paolo Depiante, Luciano Velázquez, Juan Pablo Guida, Lisandra Ojeda, Valentín Jehanno y a todos los que, de alguna manera me ayudaron y a quienes hicieron que mi pasar por esta etapa fuera posible y principalmente, por haberme hecho feliz y haberme enseñado cuestiones importantes más allá de las ingenieriles.

A los amigos de Marull: Nicolás Medina, Rodrigo Lamberti, Franco Gaitán, Alfredo Ferreyra y a todos mis compañeros del secundario.

A mis amigos de la vida y la música, Carlos Apaz, Julián Forni, Juan María Carena y Ariel Maidana.

A la Universidad Nacional de Córdoba, a la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, a los profesores de la institución. Agradezco también al jurado que accedió a evaluarme, José Luperi, Jorge Pagliero y Raúl Lopez, por prestar su tiempo y dedicación.

Y agradezco a todos los que colaboraron de alguna manera en la concreción de este objetivo de mi vida.

Infinitas gracias a todos.

RESUMEN

Las adiciones en el hormigón se realizan con el objetivo de mejorar propiedades de este material utilizado ampliamente en la construcción como así también para disminuir la producción de clinker, aumentando la eficiencia en el proceso de la fabricación del cemento y disminuyendo el impacto ambiental del mismo.

Una puzolana es un material con contenidos de sílice y/o alúmina en su interior, que, pudiendo tener propiedades cementantes o no, se adicionan al hormigón para modificar algunas de sus propiedades tanto en estado fresco, como en estado endurecido.

Las principales modificaciones que producen al estado fresco son: pérdida de asentamiento, disminución de la trabajabilidad, disminuye la exudación, disminuyen el calor de hidratación de la pasta, y prolongan el tiempo de inicio de fragüe, entre otras.

En estado endurecido se ve modificada principalmente, la resistencia a la compresión del hormigón al largo plazo (después de los 28 días de producida la mezcla), disminuyen el efecto expansivo de la reacción álcalis – agregado, mayor impermeabilidad y mejoras en la durabilidad del hormigón.

El objetivo principal del presente estudio, es determinar si la toba zeolítica proveída al Laboratorio de Estructuras para su análisis, se comporta como una puzolana, basándose para encuadrar a la toba dentro de esta clasificación, en lo expuesto en la “Norma IRAM 1668. Puzolanas. Caracterización y muestreo”.

Se desarrollaron los ensayos respectivos a la mencionada norma y se incluyeron en la evaluación, ensayos adicionales con el fin de esclarecer y entender mejor el comportamiento de la toba zeolítica.

En base a los resultados, se llegó a la conclusión que el material bajo análisis, según la norma, no puede ser entendido como una puzolana por no cumplir con algunos de los requisitos físicos mencionados en la misma, pero que, el comportamiento que presentó en los ensayos adicionales, demuestran que la toba zeolítica tiene actividad puzolánica, generando modificaciones en las propiedades antes mencionadas del hormigón. El principal inconveniente de la aplicación del material como adición, es la disminución de la resistencia a la compresión de los pastones evaluados.

ÍNDICE

1 - INTRODUCCIÓN.....	8
1.1 – Objetivos.....	9
1.1.1 - Objetivos generales.....	9
1.1.2 - Objetivos particulares.....	9
1.2 - Tareas desarrolladas.....	10
2 - MARCO TEÓRICO Y REFERENCIAL.....	11
2.1 - Adiciones minerales activas.....	11
2.1.1 - Clasificación según su interacción con cemento el cemento pòrtland.....	11
2.1.1.1 - Físicamente activas.....	11
2.1.1.2 - Físico – químicamente activas – No hidráulicas.....	11
2.1.1.3 - Físico – químicamente activas – Hidráulicas y puzolánicas.....	11
2.1.1.4 - Físico – químicamente activas – Hidráulicas y autopuzolánicas.....	12
2.2 – Puzolanas.....	12
2.2.1 - Clasificación por origen.....	13
2.2.1.1 - Puzolanas naturales.....	13
2.2.1.2 - Puzolanas artificiales.....	14
2.3 – Actividad puzolánica.....	14
2.4 – Acciones sobre el hormigón.....	16
2.5 – Cementos puzolánicos.....	19
2.6 –Toba zeolítica.....	21
3 - MARCO NORMATIVO.....	24
3.1 - IRAM 1668: Puzolanas. Características y muestreo.....	24
4 - CARACTERIZACIÓN DE LA TOBA ZEOLÍTICA.....	26
4.1 – Procedimientos iniciales.....	26
4.1.1 - Inspección visual.....	26
4.1.2 - Muestreo.....	27
4.1.2.1 - Muestreo en empresa.....	27
4.1.2.2 - Muestreo en laboratorio.....	27
4.2 - Composición química y pérdida por calcinación.....	27
4.3 - Examen petrográfico.....	29
4.4 - Realización de ensayos según Norma IRAM 1668.....	30
4.4.1 - Diferencia entre valores de densidad absoluta.....	30
4.4.1.1 - Instrumental.....	31
4.4.1.2 - Procedimiento.....	31
4.4.1.3 - Resultados.....	32
4.4.2 - Humedad.....	32
4.4.3 - Finura – Superficie específica.....	31
4.4.3.1 - Instrumental.....	33
4.4.3.2 - Procedimiento.....	34

4.4.3.3 - Resultados.....	34
4.4.4 - Índice de actividad puzolánica – con cemento pórtland.....	35
4.4.4.1 - Instrumental.....	35
4.4.4.2 - Procedimiento.....	35
4.4.4.3 - Resultados.....	37
4.4.5 - Índice de actividad puzolánica – con cal.....	38
4.4.5.1 - Procedimiento.....	38
4.4.5.2 - Resultados.....	39
4.4.6 - Reacción álcalis – agregado.....	39
4.4.6.1 - Procedimiento.....	39
4.4.6.2 - Resultados.....	40
5 - ENSAYOS COMPLEMENTARIOS.....	43
5.1 – Justificación.....	43
5.2 – Ensayos.....	43
5.2.1 - Resistencia a la compresión simple.....	43
5.2.1.1 - Procedimiento.....	44
5.2.1.2 - Resultados.....	48
5.2.2 - Tiempo de fragüe en el hormigón.....	49
5.2.2.1 - Procedimiento.....	49
5.2.2.2 - Resultados.....	51
6 - ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	52
6.1 – Requisitos físicos expuestos en Norma.....	52
6.1.1 - Finura.....	52
6.1.2 - Índice de actividad puzolánica.....	52
6.1.2.1 - Con cemento.....	52
6.1.2.2 - Con cal.....	52
6.1.3 - Requerimiento de agua.....	52
6.1.4 - Diferencia entre valores de densidad absoluta de la partida.....	52
6.1.5 - Reacción álcali – agregado.....	53
6.1.5.1 - Mortero con 10% de reemplazo de cemento por toba.....	53
6.1.5.2 - Mortero con 25% de reemplazo de cemento por toba.....	53
6.1.6 - Constancia de volumen y contracción por secado.....	53
6.1.7 - Humedad.....	53
6.2 - Requisitos químicos expuestos en Norma.....	53
6.3 - ANÁLISIS DE ENSAYOS COMPLEMENTARIOS.....	54
6.3.1 - Comportamiento del hormigón en estado fresco.....	54
6.3.2 - Resistencia a la compresión simple.....	54
6.3.3 - Tiempo de fragüe y calor de hidratación.....	56
6.3.3.1 - Tiempo de fragüe.....	56
6.3.3.2 - Calor de hidratación.....	57
7 - CONCLUSIONES.....	60

8 - COMENTARIOS	62
8.1 - Revisión Norma ASTM C 618 – 05.....	62
8.2 - Consideraciones personales.....	62
8.3 - Consideraciones finales.....	64
9 - BIBLIOGRAFÍA	65

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1. Requisitos físicos solicitados en norma.....	25
Tabla 3.2. Requisitos químicos solicitados en norma.....	25
Tabla 4.1. Composición química toba zeolítica.	28
Tabla 4.2. Composición química toba zeolítica.	29
Tabla 4.3. Composición química toba zeolítica.....	29
Tabla 4.4. Resultados ensayo densidad absoluta.	32
Tabla 4.5. Resultados de ensayo de finura por el método de Blaine.....	34
Tabla 4.6. Dosificación de morteros.....	36
Tabla 4.7. Resultados ensayo índice de puzolaneidad con cemento.....	38
Tabla 4.8. Dosificación de mortero con cal.....	39
Tabla 4.9. Resultados ensayos de compresión mortero con cal.....	39
Tabla 4.10. Análisis granulométrico toba zeolítica.....	40
Tabla 4.11. Resultados reacción álcalis- sílice mortero con 10% de reemplazo.....	41
Tabla 4.12. Resultados reacción álcalis- sílice mortero con 25% de reemplazo.....	42
Tabla 5.1. Resultados de ensayos del hormigón en estado fresco.....	49
Tabla 5.2. Tabla comparativa de desarrollo de resistencia a la compresión simple en el tiempo.....	49
Tabla 5.3. Tabla de resultados de ensayo de penetración y medición de temperatura.....	51
Tabla 6.1. Resistencia a la compresión simple por pastón y por día.....	55
Tabla 6.2. Gradiente y porcentaje de crecimiento de la resistencia a la compresión simple por pastón....	55
Tabla 6.3. Relaciones de resistencia entre pastones patrón y variables.....	55

ÍNDICE DE IMÁGENES

Imagen 1.1 – Laboratorio de Estructuras.....	8
Imagen 1.2 – Yacimiento de origen del material de estudio.....	9
Imagen 2.1 – Clasificación de puzolanas.....	13
Imagen 2.2. Adición de puzolanas al hormigón.....	17
Imagen 2.3 .Ventajas de los cementos puzolánicos.....	21
Imagen 4.1. Toba zeolítica, muestra laboratorio.....	26
Imagen 4.2. Toba zeolítica, muestra laboratorio.....	26
Imagen 4.3. Muestra de toba seca.....	31
Imagen 4.4. Ensayo densidad absoluta.....	32
Imagen 4.5. Aparato de Blaine instrumental restante.....	33
Imagen 4.6. Probetas prismáticas de ensayo.....	35
Imagen 4.7. Probetas prismáticas, ensayo de flexión.....	36
Imagen 4.8. Probetas prismáticas para ensayo de compresión.....	37
Imagen 4.9. Probetas prismáticas luego de ensayo de compresión.....	37
Imagen 4.10. Mortero con cal y toba.....	38
Imagen 5.1. Actividades previas a la preparación de los pastones.....	44
Imagen 5.2. Realización de los pastones.....	45
Imagen 5.3. Medición de asentamiento, cono de Abrams. Pastón 50% de reemplazo.....	45
Imagen 5.4. Cono de hormigón, medición de asentamiento. Pastón patrón.....	46

Imagen 5.5. Mezcla pastón 50% de reemplazo.....	46
Imagen 5.6. Cono de asentamiento pastón 25% de reemplazo.....	47
Imagen 5.7. Preparación de probetas. Pastón con 25% de reemplazo.....	47
Imagen 5.8. Ensayo de resistencia a la compresión simple.....	48
Imagen 5.9. Probeta luego de ser ensayada a la compresión simple.....	48
Imagen 5.10. Control de prensa para realizar ensayo de compresión.....	48
Imagen 5.11. Preparación de probeta para ensayo de penetración. Determinación de tiempo de fragüe.....	49
Imagen 5.12. Probeta para ensayo de penetración, penetrómetro y termómetro.....	50
Imagen 5.13. Regla graduada para medición de fuerza de penetración.....	50
Imagen 9.2. Prueba de colado de mortero para impresión 3D.....	63
Imagen 9.1. Prueba de colado de mortero para impresión 3D.....	63

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 4.1. Resultados reacción álcalis – sílice mortero con 10% de reemplazo.....	41
Gráfico 4.2. Resultados reacción álcalis – sílice mortero con 25% de reemplazo.....	42
Gráfico 5.1. Representación de la evolución de resistencia a la penetración en el tiempo.....	51
Gráfico 6.1. Representación de la evolución de resistencia a la compresión simple en el tiempo.....	54
Gráfico 6.2. Resistencia a la penetración en función del tiempo en hormigón. Determinación de inicio y fin de fragüe.....	57
Gráfico 6.3. Variación de la temperatura ambiental y temperatura del hormigón en el proceso de fragüe.....	57
Gráfico 6.4. Evolución de la temperatura en el interior del hormigón.....	58
Gráfico 6.5. Evolución del calor de hidratación del cemento con distintos contenidos de filler.....	58

1-INTRODUCCIÓN

La Práctica Profesional Supervisada (PPS) es un requisito para poder acceder al título de Ingeniero Civil en la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba. Se trata de una materia del último semestre de la carrera cuyo objetivo principal se centra en integrar los conocimientos teórico-prácticos adquiridos durante el cursado de la carrera, con las actividades realizadas en la vida profesional, tomando contacto con el medio laboral antes de egresar. La misma tiene diferentes modalidades de realización; la PPS que aquí se presenta, se concretó mediante la modalidad de “Pasante Interno – Becario”. Esta modalidad consta de 200 horas de trabajo supervisado bajo la tutoría de un profesional, desarrollado en una institución educativa o centro de vinculación de la Facultad. La tarea debe desarrollarse para un tercer ente que solicite algún trabajo específico al centro de vinculación en el que se realice la práctica profesional.

En ese marco, el Laboratorio de Estructuras de la Universidad Nacional de Córdoba se ofrece permanentemente como entidad receptora para que los alumnos puedan desarrollar allí su práctica supervisada. El Laboratorio es una entidad dependiente del Centro de Vinculación del departamento de Estructuras de la mencionada Facultad, que presta servicios (ensayos, asesoramiento, investigación) tanto a empresas privadas como públicas y también a organismos de la Universidad. Como entidad receptora, el Laboratorio aceptó al tesista para que pueda desarrollar allí esta asignatura, asignándole el trabajo “**Análisis de actividad puzolánica de toba zeolítica**”.

Imagen 1.1 – Laboratorio de Estructuras.



La actividad fue encargada por el Sr. Esteban Cavallero, dueño de la cantera de origen del material a evaluar, con el objeto de encontrar aplicaciones comerciales como adición puzolánica para hormigones y otros productos relacionados al ámbito de la construcción; por este motivo, contrataron a esta entidad para que estudie la posibilidad de incluirla en diferentes finalidades, dando origen así al presente trabajo.

Esta empresa está comenzando con la extracción del material en cuestión en una cantera recientemente abierta en la provincia de La Rioja. Producen el material en diferentes granulometrías y además de las aplicaciones para la construcción, que están en estudio, se han demostrado aptitudes de la toba en otras actividades como la rural (secuestrante de micotoxinas en alimentos balanceados para feetlots).

Imagen 1.2 – Yacimiento de origen del material de estudio.



1.1 - OBJETIVOS

De las anteriores consideraciones surgen los objetivos de esta práctica:

1.1.1 - Objetivos generales

- Evaluar el comportamiento puzolánico en toba zeolítica.
- Aprender a utilizar y comprender normas.
- Satisfacer el pedido del cliente.
- Adquirir experiencia para poder detectar ciertos errores y tomar decisiones en el desarrollo de trabajos de investigación.
- Lograr experiencia de trabajo en equipo, participando activamente en distintas tareas de un mismo proyecto, en conjunto con otros profesionales y estudiantes.

1.1.2 - Objetivos particulares

- Recopilar información y estudios previos sobre puzolanas, tobas y adiciones en bibliografía, papers y digitalmente.
- Realizar ensayos de caracterización de la toba zeolítica.

- Estudiar en detalle la actividad puzolánica de la adición propuesta.
- Realizar ensayos requeridos por norma.
- Realizar ensayos complementarios.
- Analizar y comparar los resultados tanto de los ensayos propuestos por norma como los complementarios.

1.2 - TAREAS DESARROLLADAS

La factibilidad de la toba zeolítica en el ámbito de la construcción, es función de sus propiedades físicas, sus propiedades químicas y de la relación beneficio – costo que produciría, teniendo en cuenta las diferentes etapas de producción de la misma: extracción, molienda, clasificación, distribución, comercialización.

Este análisis se basa en la clasificación de puzolana que define la norma IRAM 1668 (1968), la cual diferencia claramente requisitos físicos y químicos para caracterizar el material. Desde esta base, se realizaron los ensayos necesarios para entender el comportamiento del material zeolítico, priorizando los ensayos físicos. En este informe se detallarán las actividades realizadas en pos de la investigación. Las cuestiones de factibilidad económica exceden las incumbencias de este estudio.

Como se verá en los capítulos que componen el informe, las principales tareas realizadas, fueron:

1. Recopilación bibliográfica y normativa.
2. Definición de marco teórico.
3. Caracterización de la toba zeolítica.
4. Realización de los ensayos propuestos por norma.
5. Ejecución de ensayos complementarios.
6. Análisis de resultados.
7. Elaboración de conclusiones.
8. Comentarios.

2 - MARCO TEÓRICO Y REFERENCIAL

En este capítulo se trata de dar una aproximación teórica al mundo de las puzolanas. Las puzolanas son un grupo de materiales de diferentes orígenes, englobados en una clasificación más general que contempla a todas las adiciones minerales que se agregan como suplemento a los hormigones para darle propiedades particulares. De esta forma, se comienza con la definición de adiciones, y dentro de éstas, se define y clasifica a las puzolanas.

2.1 - ADICIONES MINERALES ACTIVAS

Las adiciones minerales activas son materiales que pueden incorporarse al hormigón como reemplazo del cemento o del agregado fino, dando lugar a modificaciones de las propiedades del mismo.

Dada la diversidad de materiales que pueden constituirse en adiciones minerales activas, es que admiten muchas clasificaciones. En diferentes bibliografías y en internet, las clasificaciones varían según el autor. Éstas pueden ser por su forma de producción (naturales y artificiales), por su origen (orgánicas o inorgánicas), por su procesamiento térmico, por su carácter y composición (en relación a las cantidades relativas de óxidos de sílice y de aluminio), por su interacción con el cemento portland, entre otras.

Éstas últimas se describen a continuación.

2.1.1 - Clasificación según su interacción con el cemento portland

Desde este enfoque, se clasifican en físicamente y fisicoquímicamente activas; estas últimas pueden ser no hidráulicas o hidráulicas, las cuales pueden dividirse en puzolánicas y autopuzolánicas.

2.1.1.1 - Físicamente activas

Debido al tamaño de las partículas de las adiciones que en general son menores a 75 micras (0,0075cm), el primer efecto que producen es el de dispersión de los granos de cemento. Este efecto contribuye a la accesibilidad del agua hacia los granos de cemento, mejorando las condiciones de hidratación sirviendo además, de sitios de nucleación de los productos de hidratación del cemento portland.

2.1.1.2 - Físico-químicamente activas – No hidráulicas

Las adiciones que además dan origen a reacciones químicas, cuyos productos de reacción por sí no aportan propiedades hidráulicas a las mezclas, son las adiciones que llevan este nombre.

2.1.1.3 - Físico-químicamente activas – Hidráulicas y puzolánicas

Reciben esta denominación aquellas adiciones cuyos productos de reacción tienen propiedades hidráulicas y constituyen el gran grupo de las puzolanas. Éstas tienen la capacidad de reaccionar con el hidróxido de calcio liberado durante la hidratación del cemento y producir silicatos de calcio hidratados de características similares al originado durante la hidratación del cemento portland. Además de la sílice reactiva, las puzolanas suelen contener alúmina reactiva que da lugar a la formación de otros compuestos del cemento.

2.1.1.4 - Físico-químicamente activas – hidráulicas y autopuzolánicas

Son aquellas en las cuales parte del hidróxido de calcio para la reacción cementante lo aportan ellas mismas, a partir del óxido de calcio libre que contienen; en este grupo se encierra a las escorias granuladas de alto horno y las cenizas volantes cálcicas.

2.2 - PUZOLANAS

De aquí en adelante sólo se hará hincapié en el desarrollo de las adiciones hidráulicas puzolánicas, dado que, el informe está centrado en la evaluación de este tipo de material.

En la historia de la humanidad, el descubrimiento de los materiales y de las acciones cementantes hidráulicas fue posterior al descubrimiento del fuego y debió ser poco posterior al descubrimiento de la cerámica. Tal descubrimiento, por lo que se refiere a los pueblos mediterráneos, debió pasar de egipcios a griegos y romanos, siendo ampliado y perfeccionado en sucesivas etapas. Por razones de puro azar geográfico y geológico, los griegos y romanos, primeros en conocer “la cal”, pudieron mezclarla con materiales naturales de origen volcánico que tenían a la mano. Es probable que el primer empleo de estos materiales fuera el de servir de agregados para los morteros de cal. La observación debió hacer el resto, y de la comparación de la resistencia y del comportamiento general de los conglomerados hechos con cal y con materiales volcánicos y no volcánicos, surgió la nueva técnica de mezclar los primeros, ya como materiales activos, con la cal, en polvo y en seco o en húmedo, para obtener los que han pasado a la historia como “cementos y morteros romanos”, con base en cal y puzolana, ocal, puzolana y arena, respectivamente.³

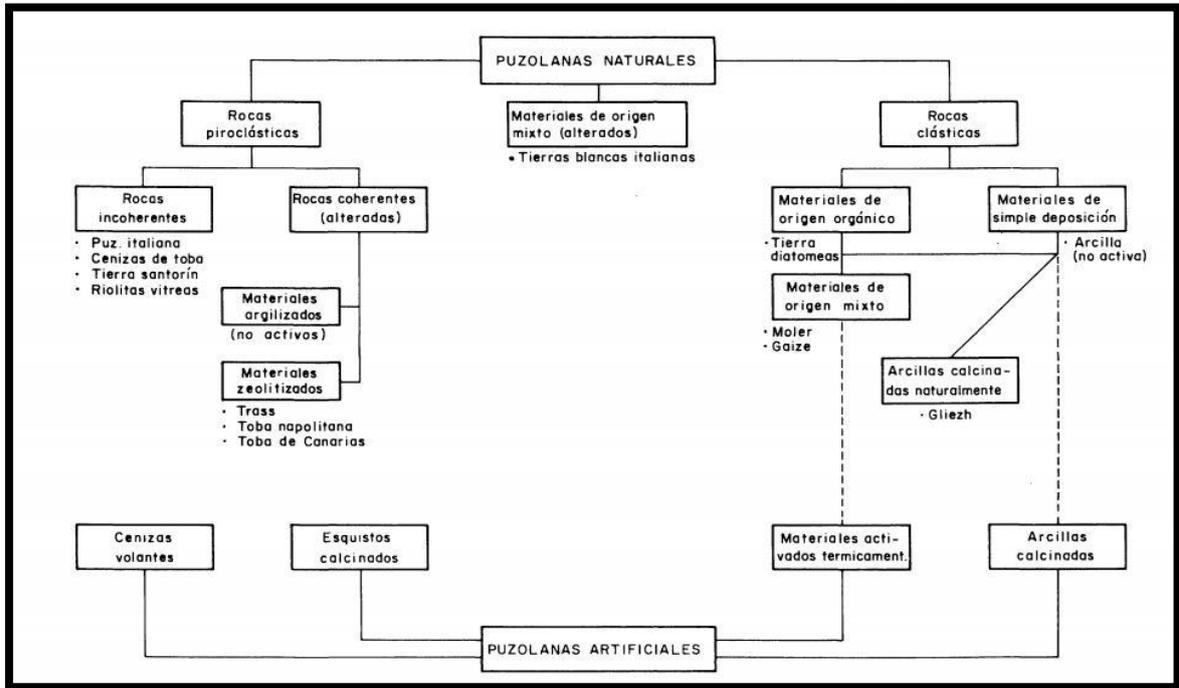
Tales materiales fueron la tierra griega de Santorín y las cenizas y tobas romanas de Pozzuoli, localidad que ha legado el nombre genérico de puzolanas para éstos y para similares materiales en lo sucesivo. De las obras antiguas realizadas con puzolanas que han llegado hasta nuestros días como inestimables reliquias de la civilización romana pueden citarse: panteones, coliseos, estadios, basílicas, acueductos, cisternas, puentes, puertos y las más diversas estructuras que han perdurado. Y lo han hecho como no han podido hacerlos muchas obras realizadas en la Edad Media, con materiales conglomerantes mal cocidos y exentos de puzolanas activas. Por el contrario, cuando el defecto de cocción y la falta de puzolana se subsanaron, las obras cobraron de nuevo el vigor y con él la longevidad. Con la caída del Imperio Romano declinó el empleo de estos materiales y muchos de los conocimientos existentes desaparecieron.

El empleo de adiciones minerales activas como aglomerantes hidráulicos se inicia con los etruscos hacia el año 700 a.C. Pero fue la civilización romana, año 200 a.C., la que descubrió todo el potencial que estos materiales podían ofrecer. Utilizaron morteros formados por cenizas volcánicas, cal y agua, material que en la actualidad se conoce como cemento romano. En América también hubo indicios del uso de adiciones minerales activas, durante el siglo I a.C. En México para la construcción de pirámides mayas, se utilizaban núcleos de tierra apisonada, revestida con piedra aglomerada con una mezcla de tierra volcánica, cal, agua y resinas vegetales. La utilización y el estudio de adiciones minerales no se retomaron hasta la década del 70' del siglo XX, tomando importancia relevante en la actualidad por sus ventajas de índoles económicas, ambientales y tecnológicas.

2.2.1 - Clasificación por origen

Hacer una clasificación precisa de puzolanas es difícil, puesto que, actualmente, con este término se abarcan materiales muy diversos en su origen y en su composición, tanto química como mineralógica, que tienen un comportamiento idéntico al mezclarlos con cal (o cemento) y agua. La clasificación más comúnmente aceptada se relaciona con el origen. Por tanto, una primera subdivisión distingue entre puzolanas naturales y artificiales según se observa en la siguiente imagen.

Imagen 2.1 – Clasificación de puzolanas. Fuente: Estudio sobre puzolanas y adiciones, clasificación y procesos.



2.2.1.1 - Puzolanas Naturales

Los materiales denominados puzolanas naturales pueden tener dos orígenes distintos, uno puramente mineral y otro orgánico. Las puzolanas naturales de origen mineral son productos de transformación del polvo y “cenizas” volcánicas que, como materiales piroclásticos incoherentes procedentes de erupciones explosivas, ricos en vidrio y en estado especial de reactividad, son aptos para sufrir acciones endógenas (zeolitización y cementación) o exógenas (agilización). Las primeras son favorables y las segundas desfavorables. Por una continuada acción atmosférica (meteorización) se convirtieron en tobas, esto es en rocas volcánicas, más o menos consolidadas y compactas, cristalinas, líticas o vítreas, según su naturaleza. El origen volcánico de las puzolanas naturales es determinante de su estructura. La estructura de las rocas, que se han originado por el enfriamiento de grandes masas de lava que han fluido completamente, depende de la velocidad en que se ha producido el fenómeno.

Las puzolanas naturales de origen orgánico son rocas sedimentarias abundantes en sílice hidratada y formadas en yacimientos o depósitos que en su origen fueron submarinos, por acumulación de esqueletos y caparazones silíceos de animales (infusorios radiolarios) o plantas (algas diatomeas).

Todas las propiedades de las puzolanas naturales y en particular aquellas que las hacen especialmente aptas para su aprovechamiento en la industria del cemento,

dependen fundamentalmente de su composición y de su textura, las cuales a su vez están íntimamente relacionadas con su origen y formación.

Algunas puzolanas naturales son: toba zeolítica, cenizas volcánicas, diatomitas y radiolaritas.

2.2.1.2 - Puzolanas Artificiales

Se definen éstas como materiales que deben su condición de tales a un tratamiento térmico adecuado. Dentro de esta condición cabe distinguir dos grupos; uno, el formado por materiales naturales silicatados de naturaleza arcillosa y esquistosa, que adquieren el carácter puzolánico por sometimiento a procesos térmicos “ex profeso”, y otro, el constituido por subproductos de determinadas operaciones industriales, que, en virtud de su naturaleza y de las transformaciones sufridas en las mismas, adquieren las propiedades puzolánicas.

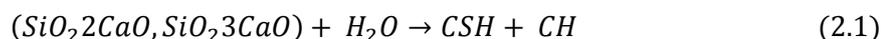
Al primero de estos grupos pueden asimilarse, por su analogía, las puzolanas designadas como mixtas o intermedias, o semiartificiales, es decir, aquellas que, naturales por su origen, se mejoran por un posterior tratamiento. Representantes típicos de este grupo son el polvo de ladrillo obtenido de productos de desecho de la cerámica de alfarería y las bauxitas naturales.

En el segundo grupo encajan los residuos de las bauxitas utilizadas para la obtención del aluminio y el polvo de chimeneas de altos hornos. También pueden incluirse en este grupo, las cenizas volantes y de parrilla de las centrales termoeléctricas y las cenizas de lignitos. Por extensión, las mismas escorias siderúrgicas podrían acoplarse en el grupo. Como queda indicado, el representante más genuino de los materiales arcillosos elevables a la categoría de puzolana artificial es el polvo de ladrillo. Sometida la arcilla a tratamientos térmicos adecuados, se forman en ella compuestos puzolánicamente activos en virtud de reacciones y transformaciones en las que, junto a una estructura y constitución mineralógica de partida y a la composición química, juegan importantísimo papel como variables la temperatura y el tiempo.

2.3 - ACTIVIDAD PUZOLÁNICA

La actividad puzolánica responde a un principio general. Este se basa en que la sílice (SiO_2) y la alúmina (Al_2O_3), como componentes ácidos de materiales puzolánicos, reaccionan con la cal y el agua de amasado para producir silicatos de calcio hidratados. Esta actividad hace referencia a la cantidad máxima de hidróxido de calcio con la que la puzolana puede combinar y la velocidad con la que ocurre esta reacción.

Esta es una reacción equivalente a la que se da en el cemento portland y se obtiene un producto muy similar. Además de esta reacción se producen otras secundarias, como la que da como resultado el aluminato de calcio (en adelante C3A). La reacción de hidratación del cemento portland puede simplificarse, sin tener en cuenta estequiometría ni las fases aluminosas, de la siguiente manera:



En esta ecuación $\text{SiO}_2 \cdot 2\text{CaO}$ y $\text{SiO}_2 \cdot 3\text{CaO}$ (silicatos bicálcico y tricálcico) son los componentes principales del cemento portland, y CSH (silicatos hidratados) y CH (hidróxido de calcio, CaOH) son los productos de la reacción. Mientras que el CSH podría definirse como el “pegamento” del cemento, y principal responsable de su

resistencia e impermeabilidad, el CH no tiene valor cementante y se disuelve fácilmente en medios agresivos. La principal aportación de este compuesto es la de mantener un ambiente alcalino que ayuda a proteger de la corrosión las armaduras en el cemento armado. La capacidad cementante de estos compuestos es debida, entre otras cosas, a su estructura atómica

Los granos de cemento, al contacto con el agua comienzan a desarrollar unos filamentos a su alrededor que en su conjunto forman el denominado "gel". Los filamentos de cada grano se van entrelazando con los pertenecientes a los granos vecinos formando una red. Pero esta no ocupa todo el volumen de la mezcla. La misma se ve salpicada por partículas de CH, pero además existen espacios libres donde esta red no puede llegar debido al relativo gran tamaño de las partículas, dejando una serie de huecos que contienen moléculas de agua. Debido a la diferencia de densidad esta agua tiende a salir hacia la superficie, formando en su camino los denominados poros capilares, que terminan debilitando la estructura global, al igual que las partículas de CH.

Por su parte la reacción puzolánica tendría la siguiente forma:



Es decir, no produce cal, sino que la consume, siendo el CSH su principal producto de reacción. Por tanto, si se adiciona cierta cantidad controlada de puzolana dentro del cemento portland ésta reaccionaría con el CH producto de la hidratación provocando la reducción de fases no deseadas y transformándolas en otras que contribuirían al aumento de su resistencia.

Cabe señalar que, además de estos productos, la reacción puzolánica da lugar a muchos otros que influirán de distinta manera en las propiedades de la mezcla final. Además de los efectos derivados de la componente química de la adición son igualmente importantes aquellos derivados de la componente física, relacionados con su tamaño de partícula y su superficie específica. Aunque depende del tipo de puzolana y del proceso de molienda (en su caso) éstas presentan generalmente tamaños de grano muy pequeños, esto es, una gran superficie específica. Estas partículas minúsculas se introducen en la red creada por el cemento, situándose entre sus granos y desarrollando sus propios filamentos de gel, y promoviendo una mayor compacidad de la mezcla que da como resultado una menor porosidad y por tanto una mayor resistencia e impermeabilidad.

También las puzolanas intervienen en el proceso de liberación del calor de hidratación que se produce durante el fraguado. La reacción de hidratación del cemento es un proceso altamente exotérmico, con una gran cantidad de calor liberado en muy poco tiempo, y por tanto muy inestable. La presencia de puzolanas ralentiza este proceso, alargando el tiempo de fraguado y haciendo la reacción mucho más estable, y en consecuencia menos vulnerable a los ataques.

La actividad puzolánica depende: de la naturaleza y proporción de las fases activas presentes en la puzolana (composición mineralógica), de la relación cal – puzolana de la mezcla, de la finura (o superficie específica) de la puzolana y de la temperatura de la reacción. Los productos de reacción puzolana/cal generalmente son del mismo tipo que los productos de hidratación del Cemento Pórtland: Silicatos Cálcicos Hidratados (CSH), Aluminatos Cálcicos Hidratados (CAH) y Sílico - Aluminatos Cálcicos Hidratados (CSAH). En efecto, por lo que se refiere a las puzolanas de origen mineral, su actividad

se ha atribuido tanto a los constituyentes amorfos como a los cristalinos, y en particular a los de naturaleza zeolítica. La gran reactividad de las puzolanas tanto naturales como artificiales, depende además de su composición química y mineralógica, y de la cantidad de fase amorfa o vítrea, de su gran superficie reactiva, de la presencia de álcalis, alcalinotérreos y del grado de condensación de grupos como SiO_4 , AlO_4 . Algo análogo sucede con las puzolanas de origen orgánico

Existen varios métodos para evaluar esta reactividad, no resultando ninguno de ellos concluyente al 100% a la hora de evaluar las bondades de una puzolana para su uso como adición activa. Es por esto que resulta recomendable la combinación de varios de estos métodos para una correcta selección.

a) Medida de la reducción de contenido de HC con el tiempo; la desaparición paulatina de la cal indica que ha reaccionado de alguna manera, y se ha combinado para formar otros compuestos.

Si bien esta observación no es definitiva para asegurar un aumento de la resistencia, sí lo es en sentido negativo para descartar aquellas combinaciones en las que no se produzca dicha reducción.

b) Medida de la reducción de poros capilares con el tiempo; los productos de la reacción deben precipitarse alrededor de los granos ocupando espacios vacíos entre los granos de cemento.

Según avanza la reacción estos productos se expanden evitando la formación de poros capilares e incluso cerrando parte de los ya formados. Puede darse una disminución del contenido de HC y no observarse una reducción significativa de la porosidad de la matriz, lo que podría entenderse como una reacción insuficiente. Este es un método que puede orientar la investigación en uno u otro sentido, pero nunca resultar definitivo.

c) Observación microscópica; mediante la utilización del microscopio electrónico puede observarse la formación de los productos de reacción gracias a su morfología característica. Al igual que el primero de los métodos descritos éste puede considerarse sólo definitivo en caso negativo, si no se observan los productos esperados se puede descartar la mezcla.

d) Medida del aumento de la resistencia mecánica; éste puede considerarse como la evidencia más fiable de que realmente se ha producido la reacción, además de tratarse de la verificación definitiva de si se han logrado o no los objetivos, al menos en parte.

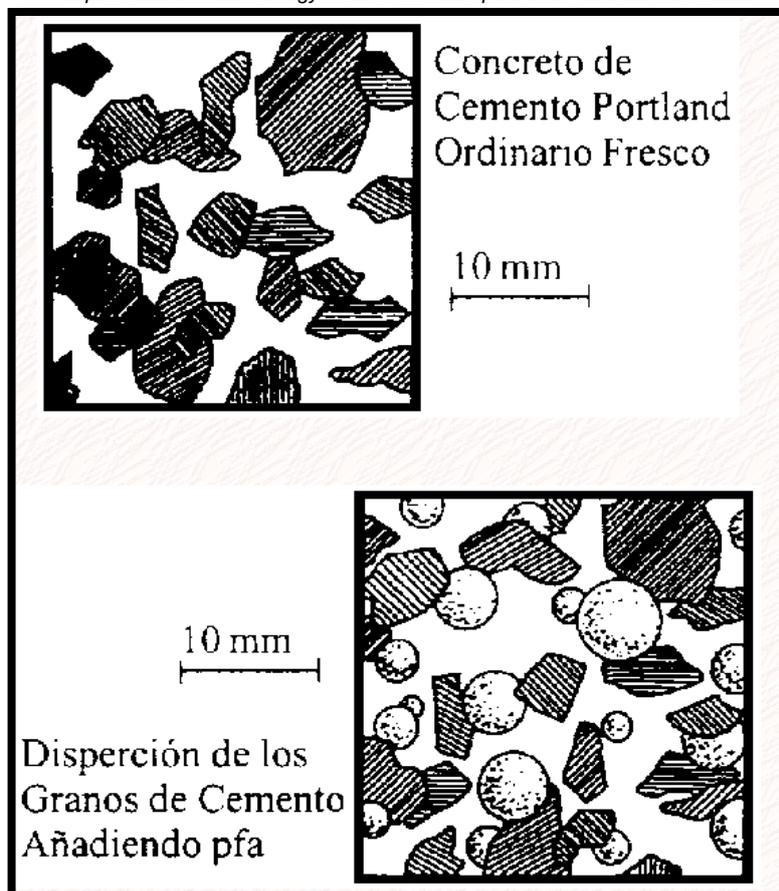
Todos estos métodos deben evaluarse teniendo en cuenta la menor velocidad de la reacción puzolánica, por lo que es necesario realizar comprobaciones intermedias y dar a las muestras el suficiente tiempo para desarrollar la reacción (al menos 28 días). Lamentablemente en el ámbito de este proyecto sólo se han podido evaluar estos factores a través de la resistencia mecánica, que como se verá en las conclusiones ha sido el principal elemento de referencia (Gómez González, 2009).

2.4 - ACCIONES SOBRE EL HORMIGÓN

La reacción puzolánica da lugar a un refinamiento tanto del tamaño de los poros como del tamaño del grano. En el primer caso, la formación de productos de hidratación secundarios, de menor densidad que los formados en la hidratación normal del cemento, rellenan las grandes cavidades capilares, reduciendo el tamaño de los poros y

cortando la comunicación entre ellos. Respecto al tamaño de los granos, la nucleación del CH alrededor de las partículas de puzolana, permite reemplazar los cristales de CH por cristales de menor tamaño y mejor distribución de CSH.

Imagen 2.2. Adición de puzolanas al hormigón. Fuente: informe sobre puzolanas. <http://ces.iisc.ernet.in/energy/HC270799/HDL/spanish/sk01ms/sk01ms09.htm>



Cuando se incorporan adiciones minerales activas a un cemento portland en reemplazo, el efecto que se produce tanto en estado fresco como estado endurecido, resulta de la superposición del efecto de dilución más los efectos de la estimulación físico-química.

Las propiedades en estado fresco que resultan más alteradas, son la trabajabilidad, la exudación, el tiempo de fragüe y el calor de hidratación. El reemplazo de parte de cemento por adiciones, generalmente de menor densidad, da lugar a un aumento del volumen de pasta. Debido a su textura superficial, finura y microtextura, las adiciones, en general, afectan la demanda de agua (entre otras cuestiones, por la disminución de la trabajabilidad) que es la variable de principal influencia sobre las propiedades del hormigón. Otro efecto que se ve al adicionar puzolanas en el hormigón en estado fresco, es la pérdida de asentamiento.

Entre las ventajas que se presentan, en este estado, se reduce la exudación, se reduce la segregación por proveer una matriz más cohesiva, disminuyen la velocidad de reacción de hidratación, lo que conlleva una disminución en el calor de hidratación.

Otro efecto beneficioso que conlleva la utilización de estos materiales suplementarios del hormigón, es la inhibición de la reacción álcalis – sílice (RAS). La reacción álcali-

agregado o RAS es un fenómeno químico, que se produce en el interior del hormigón entre determinados minerales reactivos provenientes del agregado y los álcalis disueltos en la pasta de cemento hidratada en forma de hidróxidos. Esta reacción es un fenómeno lento, pero la presencia de ciertos factores desencadenantes como la humedad y la temperatura puede hacer que se acelere.

La degradación del hormigón por esta reacción se manifiesta de diferentes formas que van desde fisuraciones, deformaciones excesivas, exudación de gel, hasta la reducción de las propiedades mecánicas y de la vida útil de la estructura.

La puzolana natural utilizada en el presente estudio muestra un comportamiento efectivo para reducir la expansión lineal debida a la reacción álcali-sílice; por lo tanto esta puzolana puede ser utilizada en mezclas de hormigón que contengan agregados reactivos. El agregado antes de ser utilizado en la construcción, debe ser sometido a pruebas de reactividad con adiciones minerales u otras medidas, para inhibir efectivamente la reactividad álcali-sílice. Se observa que existe una relación directa entre los porcentajes de adición de la puzolana y su eficiencia para reducir la expansión. Para inhibir eficazmente la reacción álcali-sílice, es necesario que la puzolana tenga una finura superior al 92% (similar al cemento), para que la reacción con la portlandita sea rápida y eficiente. (Cenzano M. del C., et al., 2011).

En estado endurecido, la adición de puzolanas naturales activas, influye de manera importante en propiedades características del concreto. Entre las más afectadas se denota la resistencia a la compresión, siendo las resistencias menores en hormigones puzolánicos que en hormigones corrientes.

Giaccio *et al.* han determinado que la incorporación de 40 y 60% de puzolana al hormigón produce una reducción de entre 30 y 53% a los 8 días, mientras que la resistencia a los 90 días alcanzada por estos hormigones es del mismo orden que la obtenida por los hormigones patrones.

La reactividad de la puzolana está relacionada con la composición y la cantidad de material vítreo y su finura, pues es bien conocido que la sílice amorfa reacciona más rápidamente que la sílice cristalina, como así también que las partículas gruesas no pueden reaccionar completamente en un tiempo de curado razonable del hormigón.

Giaccio y Zerbino han determinado que la incorporación de 60% de puzolana al hormigón mejora en mayor medida la resistencia de los hormigones con elevada relación agua / (cemento + toba) que a los hormigones con baja relación.

El empleo de algunas puzolanas permite obtener a edades avanzadas, altas resistencias a la flexión. Esto es atribuido al mejoramiento de la interface matriz-agregado.

En resumen, las cantidades normalmente empleadas de adiciones hidráulicamente activas, respecto a las propiedades del hormigón endurecido, reducen la resistencia mecánica a temprana edad, contribuyendo con la resistencia a edades avanzadas. El módulo de elasticidad en general resulta afectado por las mismas variables que afectan a la resistencia. La contracción que ocurre por secado cuando la humedad relativa desciende por debajo del 100%, depende fundamentalmente del tamaño de poros capilares, y dado que éste disminuye, por el refinamiento del tamaño de los poros, la contracción general aumenta, no obstante la fisuración ocasionada por ella disminuye por la redistribución del tamaño de los poros. Con respecto a la durabilidad de los

hormigones, las variables que gobiernan este fenómeno están íntimamente relacionadas con el medio en el que se encuentran expuestos y las características físicas del mismo. Por sus efectos de refinamiento del tamaño de los granos y de los poros, las adiciones proveen al hormigón de una matriz más densa y menos permeable al ingreso de los agentes agresivos. Aunque esto puede variar según la composición de las puzolanas.

2.5 - CEMENTOS PUZOLÁNICOS

La norma IRAM 50000 define que el cemento portland puzolánico (CPP) puede reemplazar, en su composición, desde un 15% hasta un 50% de clinker por puzolanas. Los materiales puzolánicos permitidos para ser incluidas en estos cementos especiales deben tener un índice de actividad puzolánica mínimo del 75%, esta propiedad se definirá más adelante.

Estos cementos se recomiendan aplicar en caso de obras de hormigón masivo, por su menor calor de hidratación; en obras hidráulicas, por su aumento de impermeabilidad; para estructuras en contacto con medios agresivos; para hormigones con agregados reactivos frente a los álcalis; hormigones donde se aproveche el aumento de la resistencia a largo plazo. Hay que tener especial cuidado en su utilización en hormigonados en tiempo frío y con el curado, sobretodo en climas secos.

Entre las principales propiedades de los cementos puzolánicos son de destacar las siguientes:

- Calor de hidratación

El calor desarrollado en la hidratación de un cemento puzolánico disminuirá, con el tiempo, en una cantidad prácticamente proporcional a la puzolana añadida. No se obtienen valores rigurosamente proporcionales porque también la reacción cal-puzolana es débilmente exotérmica y porque el efecto de dispersión de la puzolana sobre la fracción de portland facilita su ataque y acelera un poco su calor de hidratación. Consecuencia inmediata de esta propiedad es la reducción de la tendencia a la fisuración de origen térmico.

- Resistencia química a ambientes agresivos

En este aspecto debe recordarse que el cemento portland hidratado y endurecido, por su gran cantidad de cal liberada, es altamente básico y, por constitución (C3A, en mayor o menor cuantía) es vulnerable al ataque de sulfatos en general (terrenos y aguas selenitosas, agua de mar, etc.). Ambas causas de posible agresión (cal liberada y aluminatos) pueden llegar a reducirse y hasta anularse, en presencia de puzolana. Para tener éxito conviene que el cemento hidratado adquiera suficiente madurez antes de exponerlo al medio agresivo para que el cemento reduzca su contenido en $\text{Ca}(\text{OH})_2$, causa de la alcalinidad y ambiente propicio para el desarrollo de otras reacciones secundarias perniciosas, como las que tienen lugar en presencia de sulfatos.

A este fenómeno debe añadirse la colaboración del efecto de geles de nueva creación procedentes de la reacción cal-puzolana y que tienden a rellenar los espacios vacíos, reforzando la compacidad y estanqueidad, cualidad muy valiosa en trabajos que han de soportar el continuo contacto con el agua: mayor impermeabilidad y, en consecuencia, menor tendencia al deslavado de la cal por aguas puras o acidas, y a la formación de

eflorescencias.

- Resistencias mecánico-resistentes

En este sentido, la presencia de una puzolana en el cemento portland tiene dos efectos distintos y en los que juega un papel importante el tiempo. Inicialmente, actúa como un inerte no nocivo, con un endurecimiento más lento que el portland base. Más adelante, aparece como un componente activo, cuyos óxidos ácidos (sílice, alúmina e, incluso, óxido de hierro) combinan gradualmente con la cal liberada en la hidratación de los silicatos del portland, para formar nuevos compuestos hidráulicos estables; las discrepancias mecánicas con el portland disminuyen, más tarde desaparecen y, finalmente, la resistencia del cemento puzolánico es superior a la del cemento portland, a igualdad de condiciones. Es el reflejo de la ampliación del fenómeno hidráulico que se citaba anteriormente.

Como inciso debe señalarse que el incremento de la resistencia a flexo-tracción es más rápido que el de la de compresión, manteniendo siempre más elevado el factor tracción/compresión, lo que conduce a materiales más flexibles, más elásticos, por la naturaleza de sus productos hidratados, que los cementos portland puros. Esto es una garantía frente a la posible fisuración de origen térmico.

- Otros efectos

En otro orden de cosas, ciertas puzolanas como las cenizas volantes y las puzolanas vítreas, mejoran la docilidad de las pastas y reducen la tendencia de los áridos a la segregación, así como la relación agua/cemento. Otras, como la tierra de diatomeas, exigen mucha agua para producirán hormigón trabajable, con el consiguiente aumento de la retracción por secado. La reacción "árido-álcali", que transcurre entre áridos silíceos reactivos (ópalo, cristobalita y algunos vidrios volcánicos) y los álcalis o sales alcalinas (aportados por el cemento, principalmente, y, en menor proporción, por áridos y aditivos) puede combatirse paradójicamente con el empleo de puzolanas, evitando sus peligrosos efectos expansivos. Paradójicamente, porque la puzolana es un árido de gran reactividad frente a los álcalis; sin embargo, su finura y su reactividad son tales que, gran parte de la reacción se produce tan rápida y homogéneamente que no crea dilataciones una vez fraguado y endurecido el cemento. Por otro lado, la adición de puzolana a los cementos que presentan expansión, singularmente si se emplea va acompañado de tratamiento térmico, transforma un producto defectuoso en un cemento que puede emplearse con toda seguridad y sin precauciones especiales. Esto, naturalmente, es aplicable con garantías cuando la expansión es producida por cal libre.

A modo de cuadro resumen se presenta a continuación las principales ventajas de los cementos puzolánicos:

Imagen 2.3 .Ventajas de los cementos puzolánicos. Fuente: Tobs zeolíticas para elaboración de arena puzolánica.

<p>A. En la resistencia mecánica A.1 A largo plazo, al prolongar el período de endurecimiento A.1.1 A tracción A.1.2 A compresión A.1.3 Mejor relación tracción - compresión</p>	<p>E. En la plasticidad D.1 Rebajando la relación a/c D.2 Reduciendo la segregación D.3 Evitando la exudación y el sangrado</p>
<p>B. En la estabilidad B.1 Frente a la expansión por cal libre B.2 Frente a la expansión por sulfatos B.3 Frente a la expansión por la reacción álcalis - agregado B.4 Frente a la retracción hidráulica de secado, por la menor relación a/c B.5 Frente a la retracción térmica por enfriamiento B.6 Frente a la fisuración</p>	<p>F. En la impermeabilidad F.1 Reduciendo la porosidad F.2 Evitando la formación de eflorescencias F.3 Produciendo la mayor cantidad de Tobermorita</p>
<p>C. En la durabilidad C.1 Frente a ataques por agua puras y ácidas C.2 Frente a ataques por aguas y suelos sulfatados C.3 Frente a ataques por agua de mar C.4 Frente a ataques por gases de descomposición y fermentación de materias orgánicas C.5 Frente a la desintegración por la reacción álcalis - agregado</p>	<p>G. En la adherencia G.1 Del agregado a la pasta G.2 Del mortero a las armaduras</p>
<p>D. En el rendimiento y la economía D.1 Al corresponder a los cementos puzolánicos mayor volumen que a otros conglomerantes a igualdad de peso D.2 Al ser los cementos puzolánicos, en general, conglomerantes más baratos</p>	<p>H. En el comportamiento térmico H.1 Al liberar menor calor de hidratación H.2 Al producir menor elevación de temperatura</p>

3.6 - TOBA ZEOLÍTICA

La piedra toba es una roca ígnea extrusiva que se forma a partir de la actividad volcánica. Esta roca puede consistir en una variedad de tipos de fragmentos que son muy finos a finos en tamaño. El método de formación de la roca puede variar ligeramente, dependiendo del asentamiento del depósito y de la composición mineral.

El descubrimiento de la zeolita se realizó en el año 1756 por el geólogo sueco Barón Axel Cronstedt, el cual observando una roca basáltica, se percató que en el interior de las vesículas existían unos pequeños cristales bien definidos, los que, sometidos al calor, para su sorpresa, observó que desprendían el agua de hidratación o combinación en forma de vapor, de aquí que su nombre de piedra hirviente provenga de dos palabras griegas Zein (hervir) y Lithos (piedra).

Esta simple observación también trascendió en el campo de la química y la mineralogía, ya que dio lugar a que se determinara que las zeolitas constituyen los únicos silicatos naturales que hierven, al ser calentados.

La Zeolita es un mineral compuesto fundamentalmente por Silicio y Aluminio, se presenta preferentemente en las rocas de origen volcánico, en las cuales se agrupan en grandes cantidades que les permite formar yacimientos. Investigaciones han determinado un total aproximado de 40 minerales pertenecientes a la familia de las Zeolitas, siendo los más importantes: Analcima, Chabacita, Clinoptilolita, Erionita, Mordenita, Faujasita, Ferrierita, Heulandita, Gismondita, Natrolita.

Debido al origen volcánico de las Zeolitas, sus yacimientos naturales no son tan abundantes, lo que ha dado lugar a que se hayan diseñado diferentes métodos para su obtención artificial. Las Zeolitas son combinaciones hidratadas, donde el agua se encuentra en ellas unida flojamente, por consecuencia de la estructura, el agua presente en la estructura de las Zeolitas se puede desprender por calor de modo continuo sin que se altere la estructura del mineral. El agua desalojada puede ser reincorporada colocando el material en atmósfera húmeda.

La Zeolita es un mineral que pertenece al grupo de los aluminosilicatos, básicamente hidratados del sodio, del potasio y del calcio, en los cuales el agua se sostiene en las cavidades de los enrejados. Los enrejados se cargan negativamente y sostienen libremente los cationes tales como calcio, sodio, amonio, y potasio. Su capacidad de intercambiar un catión por otro se conoce como su capacidad de intercambio del catión - o CIC.

La capacidad de intercambio catiónico es una medida del número de cationes por el peso de unidad disponible para dicho intercambio, expresado generalmente como mili equivalentes por 100 gramos de material. Las zeolitas también se refieren como tamices moleculares, porque las cavidades del canal dentro de la estructura cristalina son extremadamente pequeñas y pueden ser utilizadas para separar las moléculas grandes de moléculas más pequeñas. Debido a su estructura cavernosa asegura una enorme área en su interior, pero el paso a las mismas está limitado sólo a moléculas con un tamaño determinado. El volumen vacío en algunas zeolitas puede alcanzar valores tan altos como un 47%, mientras que las dimensiones de los canales, en las distintas especies minerales de zeolitas, permiten el paso de moléculas con diámetros específicos efectivos de varios angstroms, las cuales son absorbidas en los espacios vacíos; esto explica el empleo de algunas zeolitas como absorbentes industriales. Son resistentes a la pulverización, tienen baja resistencia a la abrasión y no se aterronan. Presentan una gran resistencia térmica y a la acción de agentes químicos, así como una gran capacidad y selectividad para cationes de magnesio, calcio, amonio, cesio, estroncio, plata, cobre, níquel, zinc y otros cationes metálicos.

Las Zeolitas poseen una estructura silicática tridimensional y cristalina peculiar, la que puede ser designada como cavernosa, por lo que todos los minerales pertenecientes al grupo zeolíticos están caracterizados por una red de canales o poros que conducen a cavidades centrales. Los enlaces de estos minerales son muy rígidos en todas las direcciones, por lo que cuando se sumergen en agua no se hinchan.

La mayor parte las zeolitas cristalizan en los sistemas monoclinicos o rómbicos, pero existen también zeolitas tetragonales, trigonales y cúbicas. En general, son incoloras o blancas, aunque pueden presentarse con diferentes tonalidades debido a su contenido de impureza, principalmente de óxido de hierro y de materia orgánica; presentan una dureza 3,5 a 5,3 un peso específico entre 2 y 2,4 y su peso volumétrico inferior al rango 1,7 – 1,8 g/ cm³.

La propiedad absorbente le permite un sin número de posibilidades de uso, principalmente en la agricultura, ya que al deshidratarse su volumen está constituido por hasta un 50 % de espacio poroso, lo cual le confiere una alta capacidad de absorción a baja presión; la hidratación también es una propiedad de gran importancia, pudiendo llenarse con líquidos o gases repetidos.

3 - MARCO NORMATIVO

Las puzolanas son reglamentadas en Argentina mediante la Norma IRAM 1668.

3.1 - IRAM 1668: Puzolanas. Características y muestreo

Esta norma define a los materiales puzolánicos y detalla las características físicas y químicas que deben satisfacer y los límites mínimos y máximos de cada requisito. Estos pueden verse en las tablas 1 y 2 respectivamente. También identifica las normas correspondientes a cada ensayo necesario.

La misma define las puzolanas como:

“... un material sílico-aluminoso que a pesar de carecer por sí mismo de propiedades aglomerantes hidráulicas, contiene elementos constituyentes que a las temperaturas ordinarias se combinan en presencia de agua, con el hidróxido de cálcico y con los diferentes componentes del cemento portland, originando productos de gran estabilidad en el agua y poseen propiedades aglomerantes”.

Estas definiciones han sido objeto de muchas críticas, ya que se ha probado la existencia de materiales que aun saliéndose de los límites marcados aquí, presentan un comportamiento netamente puzolánico.

Los requisitos propuestos por la norma son los expresados en las tablas x y x.

En base a los ensayos que requiere la norma, se consultaron las normas:

- IRAM 1654: Puzolanas. Métodos de ensayo generales.
- IRAM 1624: Cemento pórtland. Método de determinación de la densidad absoluta.
- IRAM 1648: Reacción álcali-agregado. Método de ensayo de inhibidores minerales.

Siguiendo los ensayos requeridos para caracterizar una puzolana, se realizaron aquellos que permiten determinar requisitos físicos, posibles de ser ejecutados en las instalaciones del Laboratorio de Estructura y otros centros de vinculación de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.

Tabla 3.1. Requisitos físicos solicitados en norma. Fuente: Norma IRAM 1668.

Requisito		Unidad	Mín.	Máx.	Método de ensayo	
Finura	Material retenido sobre el tamiz IRAM 44 micras (Nº 325)	%	-	12	IRAM 1654	
	Superficie específica	cm ² /g	3000	-		
Índice de actividad puzolánica	Con cemento portland	a los 28 días	%	75		-
	Con cal	a los 7 días	kg/cm ²	42		-
Requerimiento de agua		%	-	115		
Diferencia entre valores de densidad absoluta de la partida		%	-	3		IRAM 1624
Reacción álcali-árido	Reducción de la expansión del mortero a los 14 días	%	75	-	IRAM 1648	
	Expansión del mortero a los 14 días		-	0.020		
Contracción por secado		%	-	0.03	IRAM 1654	
Constancia de volumen	Ensayo de expansión en autoclave	%	-	0.5		
Humedad		%	-	3		

Tabla 3.2. Requisitos químicos solicitados en norma. Fuente: Norma IRAM 1668.

Requisito	Unidad	Mín.	Máx.	Método de ensayo
Óxido de magnesio soluble total	%	-	5	IRAM 1654
Pérdida por calcinación	%	-	10	
Anhídrido sulfúrico	%	-	3	

4 - CARACTERIZACIÓN DE LA TOBA ZEOLÍTICA

4.1 - PROCEDIMIENTOS INICIALES

En base a los antecedentes bibliográficos consultados, el primer paso para completar el análisis del material, fue la caracterización de la toba zeolítica. Con esto se pretendió evaluar el comportamiento de la misma y analizar su composición y principales características.

4.1.1 - Inspección visual

La primera tarea realizada, fue la inspección visual de la muestra que proveyó el solicitante. En esta actividad se determinó que la toba zeolítica estaba compuesta por un material muy fino de color marrón claro. La muestra no presentó olor característico.

Imagen4.1. Toba zeolítica, muestra laboratorio.



Imagen4.2. Toba zeolítica, muestra laboratorio.



4.1.2 -Muestreo

4.1.2.1 - Muestreo en empresa

El material fue provisto por los responsables de la cantera, llevando a las instalaciones del laboratorio tres muestras de 25 kg, las cuales fueron utilizadas para todos los ensayos subsiguientes.

4.1.2.2 -Muestreo en laboratorio

Para realizar los ensayos se colocó el contenido de las tres bolsas provistas por la empresa en un recipiente y se mezcló de manera tal de obtener una muestra homogénea del material.

Imagen

Para obtener la muestra necesaria para cada ensayo se procedió de la siguiente manera:

1. Se dividió en cuatro la muestra homogénea y se seleccionó un cuarto, colocándolo en un recipiente aparte, separándolo para ser utilizado.
 2. La porción seleccionada se mezcló nuevamente y se la volvió a cuartear.
 3. Se separó un cuarto nuevamente y se lo colocó en estufa para obtener el material seco. La cantidad de material fue variable según el ensayo a realizar.
 4. El material restante se volvió a mezclar con la muestra homogénea y se protegió la misma para no sufrir alteraciones ambientales.
- Imágenes.

4.2 - COMPOSICIÓN QUÍMICA Y PÉRDIDA POR CALCINACIÓN

El cliente brindó un ensayo de análisis semicuantitativo de elementos mayoritarios encontrados en una muestra del material estudiado. El resultado del mismo se observan en la tabla 4.1.

También se realizó el ensayo de pérdida por calcinación a 800 °C el cual ayudó a concluir sobre la actividad puzolánica del material en cuestión, ya que este resultado es un requisito exigido por norma como se vio anteriormente.

Tabla 4.1. Composición química toba zeolítica. Fuente: Informe CEPROCOR.

 GOBIERNO DE LA PROVINCIA DE CÓRDOBA CEPROCOR				
Pág. 1 de 2	INFORME DE ENSAYO Unidad Estudios Físicos			UEF - 00312
Datos del Solicitante / Cliente				
Cliente: ESTEBAN EMILIO CAVALLERO Teléfono: 0351- 155518588 Domicilio: AV. GRAL. PAZ 220. Email: ESTEBANCAVALLERO@GMAIL.COM				
Datos de la Muestra				
N° de Solicitud de Servicio: 12126		Código de Muestra: 31305	Fecha Recepción: 29/01/2015	
Lote: No aplica		Fecha Elaboración: No aplica	Fecha de toma de muestra: 14/10/2014	
Responsable de toma de muestra: Solicitante		Fecha Vencimiento: No aplica		
Lugar de toma de muestra: La Rioja		Tipo de Muestra:		
Identificación dada por el solicitante: Muestra según DDJJ: Tobs Zeolíticas/ Zeolitas.R.M.V.H (Cantera Maco V),				
Observaciones: Horario de Muestreo: 10:00 h				
Resultado de los Ensayos Análisis Semicuantitativo de Elementos Mayoritarios				
<i>Determinación</i>	<i>Resultado</i>	<i>Incertidumbre</i>	<i>Límite de cuantificación</i>	<i>Unidades</i>
SiO ₂	57,1	0,6	0,005	%
Na ₂ O	3,7	0,4	0,005	%
MgO	1,6	0,2	0,005	%
Al ₂ O ₃	14,2	0,33	0,005	%
SO ₃	0,64	0,06	0,005	%
CaO	4,0	0,4	0,005	%
Fe ₂ O ₃	5,1	0,5	0,005	%
P ₂ O ₅	0,29	0,03	0,005	%
Cl	0,64	0,06	0,005	%
K ₂ O	1,4	0,2	0,005	%
TiO ₂	0,81	0,08	0,005	%
MnO	0,047	0,005	0,005	%
SrO	0,17	0,02	0,005	%
PPT (800°C)	10,2	0,2	----	%
Información Adicional: % - Porcentaje de concentración peso en peso. PPT- Pérdida por temperatura				
Opiniones e Interpretaciones: Ninguna.				

4.3 - EXÁMEN PETROGRÁFICO

El cliente solicitó al laboratorio la realización de un examen petrográfico del material. El mismo fue realizado por la cátedra de Petrografía Ígnea y Metamórfica de la Escuela de Geología.

El ensayo se realizó según las normas DNV – G2 VN E 67-75 e IRAM 1649 – 1703. Los resultados del mismo se observan en las tablas 4.2 y 4.3:

- “Identificación petrográfica del agregado”

Tabla 4.2. Composición química toba zeolítica. Fuente: elaboración propia en base estudio proveído por cliente.

Minerales presentes en el agregado			
Minerales	%	Observaciones de estabilidad	Observaciones generales
Feldespatos	38,82	Estables	Bien conservado
Fracción arcillosa	27,41	Estables	Muy abundante
Cuarzo	13,21	Estables	Normal
Carbonatos	5,34	Inestables	Muy fino
Muscovita	4,89	Estables	Bien conservada
Clorita	3,74	Inestables	Verde botella inestable
Hornblenda	2,56	Estables	Bien conservada
Vidrio Volcánico	1,62	Inestables	Pardo rojizo inestable
Biotita	1,29	Estables	Bien conservada
Minerales opacos	1,12	Estables	Parcialmente oxidados inestables

Tabla 4.3. Composición química toba zeolítica. Fuente: elaboración propia en base estudio proveído por cliente.

Minerales y rocas potencialmente reactivos			
Reacción	Minerales/rocas	Contenido máximo (%)	Contenido hallado (%)
Reacción alcalisílice (RAS)	Cuarzo fuertemente tensionado, microfracturado	5,00	0,00
	Cuarzo microcristalino (tamaño promedio menor a 62 micras)		
	Fanita, chert	3,0	0,0
	Calcedonia		
	Tridimita	1,0	0,0
	Cristobalita		
	Ópalo	0,5	0,0
	Vidrio volcánico contenido en rocas volcánicas	3,0	1,62

Reacción álcali-carbonato (RAC)	Dolomita (tamaño promedio menor a 50 micras)	40,0	5,34
Sustancias perjudiciales	Pizarras, micas, fragmentos blandos, partículas cubiertas por películas superficiales, esmectitas, piritas, serpentinita, zeolitas	5,0	31,15

- Nota a considerar por los ejecutantes del ensayo:

“A los efectos de ser usado en hormigones la roca presenta menos del 3% de vidrio volcánico y un muy abundante 31,15% de minerales perjudiciales, en este caso, cloritas + minerales arcillosos (hidrómicas + zeolitas) los cuales le dan al agregado una muy baja coherencia y resistencia a la compresión. Aparte de partículas de 2mm el material es friable (se rompe con presión de los dedos). El material supera los límites de minerales potencialmente reactivos a pesar que su porcentaje de vidrio volcánico no es muy abundante”.

4.4 - REALIZACIÓN DE ENSAYOS REQUERIDOS SEGÚN NORMA IRAM 1668.

Se ejecutaron los ensayos propuestos por la Norma IRAM 1668: Puzolanas. Características y muestreo, pero además se realizaron ensayos complementarios para obtener un conocimiento más completo del material.

Los requerimientos según norma para determinar si un material se puede considerar como puzolana fueron expresados en el capítulo X. Los ensayos realizados fueron aquellos posibles de ser ejecutados en el Laboratorio de Estructura, para determinar las características físicas del material en estudio.

Las normas de consulta que reglamentan los ensayos fueron:

- IRAM 1654: Puzolanas. Métodos de ensayo generales.
- IRAM 1624: Cemento pórtland. Método de determinación de la densidad absoluta.
- IRAM 1623: Cemento. Determinación de finura por tamizado seco y por determinación de la superficie específica por permeabilidad al aire (método Blaine).
- IRAM 1648: Reacción álcali-agregado. Método de ensayo de inhibidores minerales.

Los requisitos analizados fueron:

- Diferencia entre valores de densidad absoluta de la partida.
- Humedad
- Finura – Superficie específica
- Índice de actividad puzolánica – con Cemento Pórtland
- Índice de actividad puzolánica – con Cal
- Reacción álcali – árido.

A continuación se detalla cada uno.

4.4.1 - Diferencia entre valores de densidad absoluta de la partida

Este ensayo está desarrollado en la Norma IRAM 1624. Se realizaron algunas variaciones respecto a la norma. Estas fueron:

- Se utilizó agua en vez de nafta.
- En vez del frasco de Le Chatelier, se utilizó un matraz aforado, debido a la disposición del mismo en el laboratorio.

4.4.1.1 - Instrumental

Los instrumentos utilizados para realizar el ensayo fueron:

- Balanza (Precisión 0,1g)
- Matraz de vidrio de fondo plano (Capacidad: 500cm³)

4.4.1.2 - Procedimiento

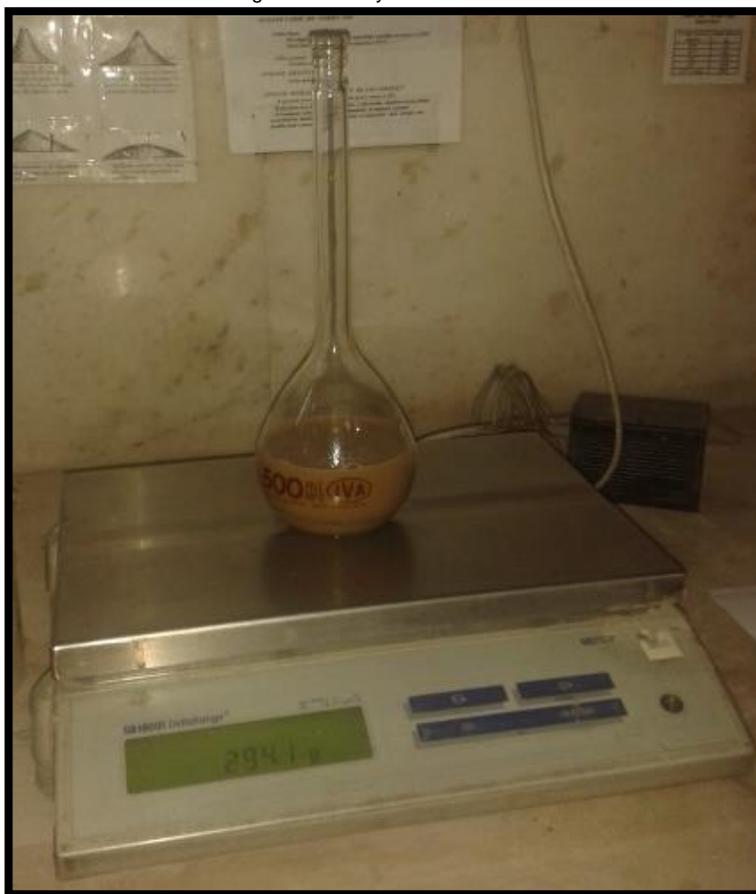
Para determinar la densidad absoluta del material en estudio, se realizó el ensayo tres veces para poder evaluar la variabilidad del material. El proceso se realizó, en todos los casos, de la siguiente manera:

- Secado y pesaje de la toba zeolítica.
- Vertido dentro del matraz.
- Agregado de agua.
- Determinación de la densidad absoluta.

Imagen 4.3. Muestra de toba seca.



Imagen 4.4. Ensayo densidad absoluta.



4.4.1.3 - Resultados

Los resultados fueron los expresados en la siguiente tabla:

Tabla 4.4. Resultados ensayo densidad absoluta. Elaboración propia

	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3
(1) Peso toba seca (g)	195,8	196,1	216,6
(2) Peso toba + agua (g)	608,6	1104,3	1118,7
(3) Peso agua (g)	497,7	993,8	993,4
(4) Volumen agua (cm ³) [2 - 1]	412,8	908,2	902,1
(5) Volumen toba (cm ³) [3 - 4]	84,9	85,6	91,3
Densidad (g/cm ³) [1 / 5]	2,31	2,29	2,37
Densidad promedio (g/cm³)	2,32		
Variación respecto al promedio (%)	0,43	1,29	2,16

4.4.2 - Humedad

Este ensayo no fue desarrollado debido a la falta de instrumental específico en las instalaciones del Laboratorio de Estructuras.

4.4.3 - Finura – Superficie específica

Este ensayo está explicitado en la Norma IRAM 1623: Cemento. Determinación de finura por tamizado seco y por determinación de la superficie específica por permeabilidad al aire (método Blaine).

4.4.3.1 - Instrumental

El aparato de Blaine está compuesto por:

- Celda de permeabilidad
- Balanza (Precisión 0,01g)
- Disco perforado
- Émbolo
- Papel filtro
- Bomba de succión

En la siguiente imagen se puede ver la celda de permeabilidad, el aparato de Blaine, el émbolo y la bomba de succión.

Imagen 4.5. Aparato de Blaine instrumental restante.



4.4.3.2 - Procedimiento

El método de ensayo por medio del aparato de Blaine, determina la finura de un material mediante la medición de la permeabilidad al aire de una muestra normalizada. Dicha

finura se da en términos de superficie específica, expresada como área total por gramos de material.

Para esto se hizo pasar aire a través de una muestra de toba zeolítica, la cual estaba delimitada por dos filtros, uno superior y otro inferior. Luego se procedió a medir el tiempo que demoraba en atravesar, el líquido dentro del tubo de vidrio, dos líneas calibradas.

Este procedimiento debe realizarse con dos muestras de toba zeolítica y tomándose dos mediciones por cada muestra. Es importante medir la temperatura de realización del ensayo y corregir los resultados obtenidos con factores determinados en la norma.

La superficie específica (S, medida en cm²/g) queda definida por la siguiente ecuación:

$$S = \frac{S_s p_s (1 - \varepsilon_0) \sqrt{\varepsilon^3} \sqrt{T}}{p (1 - \varepsilon) \sqrt{\varepsilon^3} \sqrt{T_s}} \quad (4.2)$$

Los términos de esta ecuación son: S_s, superficie específica de la muestra normalizada en cm²/g; p_s, peso específico de la muestra normalizada usada en la calibración del aparato en g/cm³; p, peso específico de la toba zeolítica en g/cm³; ε₀, porosidad de la capa preparada de la muestra normalizada, usada en calibración del aparato; ε, porosidad deseada en la muestra de ensayo (0,50); T, intervalo de tiempo para la muestra de ensayo en s; T_s, intervalo de tiempo muestra calibrada usada en calibración del aparato en s.

4.4.3.3 - Resultados

Los resultados del ensayo se determinan en las siguientes tablas:

Tabla 4.6. Resultados de ensayo de finura por el método de Blaine. Elaboración propia.

Datos de ensayo	
Volumen celda (cm ³)	1,6321
Densidad (g/cm ³)	2,31
Masa celda (g)	1,89

Muestra 1				Muestra 2			
Prueba 1		Prueba 2		Prueba 1		Prueba 2	
Temperatura (°C)	Tiempo (s)						
23,0	45	22,9	46	23,0	48	23,2	49

S (cm ² /g) 1	1238	S (cm ² /g) s	1251	S (cm ² /g) 1	1289	S (cm ² /g) 1	1293
S promedio 1	1245			S promedio 2	1291		
Superficie específica promedio =			1268				

4.4.4 - Índice de actividad puzolánica – con Cemento Pórtland

Este ensayo se realizó según lo recomendado en la Norma IRAM 1654.

4.4.4.1 - Instrumental

Los instrumentos utilizados para realizar el ensayo fueron:

- Mezcladora mecánica
- Balanza (Precisión: 0,1g)
- Cuchara
- Moldes indeformables
- Prensa hidráulica (Capacidad: 20t)

4.4.4.2 - Procedimiento

El ensayo consistió en realizar dos grupos de probetas prismáticas de 4cm de alto por 4cm de ancho por 16cm de largo de morteros.

Imagen 4.6. Probetas prismáticas de ensayo.



El primero, mortero patrón, se realizó con cemento, arena y agua. El mismo se utilizó como referencia para comparar los resultados del segundo mortero.

El segundo mortero fue realizado con cemento, arena, agua y con toba zeolítica. La cantidad a toba a adicionar, se determinó en función de la relación entre su densidad absoluta y la densidad absoluta del cemento utilizado, mediante la siguiente fórmula:

$$Puz (g) = \frac{175 \times p}{p_1} \quad (4.3)$$

Siendo ρ , la densidad absoluta de la toba zeolítica en g/cm^3 y ρ_1 , la densidad absoluta del cemento utilizado, considerándose para cálculo el valor de $3,15 \text{ g/cm}^3$.

Tabla 4.7. Dosificación de morteros. Elaboración propia

	Mortero patrón	Mortero ensayo
Cemento (g)	500	325
Arena (g)	1500	1500
Toba (g)	-	129
Agua (g)	250	250

Una vez finalizada la realización de los pastones, se moldearon, se compactaron según norma y se colocaron en cámara de curado con condiciones de temperatura y humedad controladas. Al día siguiente, las probetas fueron desmoldadas y se mantuvieron en curado por 27 días más, hasta su rotura.

Imagen 4.7. Probetas prismáticas, ensayo de flexión.



Imagen 4.8. Probetas prismáticas para ensayo de compresión.



4.4.4.3 - Resultados

Las probetas prismáticas, a los 28 días de realizadas, se rompieron por flexión, obteniendo seis medias probetas por pastón. Éstas luego fueron ensayadas a compresión simple.

Imagen 4.9. Probetas prismáticas luego de ensayo de compresión.



El índice de puzolaneidad con cemento, se determinó, como se muestra en la siguiente tabla, mediante la relación entre el promedio de las resistencias a la compresión del mortero patrón y el promedio de las resistencias del mortero variable.

El resumen de resultados se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 4.8. Resultados ensayo índice de puzolaneidad con cemento. Elaboración propia

Probeta	Fuerza rotura			Resistencia compresión (MPa)	Resistencia compresión promedio (Mpa)	Índice de puzolaneidad (%)
	Fuerza 1 (kg)	Fuerza 2 (kg)	Promedio (kg)			
MP 1	6300	5900	6100	38.1	38.3	55.2
MP 2	6050	5900	5975	37.3		
MP 3	6150	6500	6325	39.5		
ME 1	3700	3800	3750	23.4	21.1	
ME 2	2900	3600	3250	20.3		
ME 3	3550	2750	3150	19.7		

4.4.5 - Índice de actividad puzolánica – con Cal

4.4.5.1 - Procedimiento

Para realizar este ensayo se procedió de la misma manera y con el mismo instrumental que en el ensayo explicitado en el ítem anterior.

Imagen 4.10. Mortero con cal y toba.



La diferencia radica en que se realizó un solo pastón. El mismo se dosificó según norma y se confeccionó con una parte en peso de cal aérea hidratada, nueve partes de arena y una parte de toba zeolítica obtenida como dos veces el peso de la parte de cal por la relación entre las densidades absolutas de ambos materiales. La dosificación queda expresada en la siguiente tabla:

Tabla 4.9. Dosificación de mortero con cal. Elaboración propia

	Mortero Cal
Cal (g)	150
Arena (g)	1350
Toba (g)	315
Agua (g)	560

La otra diferencia importante con el ensayo anterior, es que para determinar el índice de puzolaneidad, los ensayos sobre las probetas se realizaron a los 7 días de realizado el mortero.

4.4.5.2 - Resultados

El resumen de los resultados obtenidos se adjunta en la siguiente tabla:

Tabla 4.10. Resultados ensayos de compresión mortero con cal. Elaboración propia

Probeta	Fuerza rotura			Resistencia compresión (kg/cm ²)	Resistencia compresión promedio (kg/cm ²)
	Fuerza 1 (kg)	Fuerza 2 (kg)	Promedio (kg)		
MC 1	90,0	95,0	92,5	5,8	6,0
MC 2	100,0	95,0	97,5	6,1	
MC 3	100,0	95,0	97,5	6,1	

El índice de puzolaneidad es el promedio de las resistencias.

$$I_p = 6,0 \frac{kg}{cm^2}$$

Se observó que el índice de puzolaneidad fue significativamente bajo.

4.4.6 - Reacción Álcalis – agregado

Este ensayo se realizó según norma IRAM 1674: Agregados. Determinación de la reactividad alcalina potencial. Método acelerado de la barra de mortero.

También se consultó la norma IRAM 1505: Agregados. Análisis granulométrico.

Para estudiar la existencia de actividad puzolánica y la no existencia de reactividad de la arcilla contenida en el polvo, se convino con el solicitante realizar análisis granulométrico, determinación del módulo de fineza y el ensayo del método acelerado de la barra de mortero en probetas prismáticas.

4.4.6.1 – Procedimiento

El Método de las Barras de Mortero Acelerado consiste básicamente en verificar la variación de longitud de las barras de mortero sumergidos en una solución de 1N de Hidróxido de Sodio (NaOH). Las barras de mortero, preparadas de acuerdo a la norma, tienen una dimensión de 25mm x 25mm x 285mm, y el dosaje del mortero es 1:2,25 (cemento: agregado) en masa y la relación agua/cemento 0,47. La Norma indica que el agregado utilizado debe tener una composición granulométrica determinada. Para el

ensayo se realizaron dos morteros. El primero, con un reemplazo de 10% de cemento por toba zeolítica; el segundo, con un reemplazo del 25% de cemento por el material en evaluación.

Los cuerpos prueba se colocaron en cámara húmeda inmediatamente después de haberlos moldeados y se mantuvieron en ella durante 24 horas. Luego se desmoldaron las probetas y se efectuó una lectura preliminar. Después las probetas fueron colocadas en agua a $80 \pm 2^\circ\text{C}$, durante 24 horas. Finalizado este periodo las barras fueron medidas (lectura inicial) y comparadas con la medida de la barra de referencia (lectura cero). El siguiente paso fue almacenar las barras en solución de Hidróxido de Sodio 1N a 80°C por 14 días, después de la lectura inicial, y se realizan las lecturas finales verificando el porcentaje medio de tres lecturas de expansión de esos cuerpos de prueba.

Después de transcurridos los 14 días, se calcula la diferencia porcentual entre la lectura inicial de la probeta y la lectura final con respecto al largo de la barra de referencia, con aproximación al 0,001 % y se registra la expansión promedio de las tres probetas para una combinación de cemento/agregado como la expansión para dicha combinación, con aproximación al 0,01 %.

4.4.6.2 – Resultados

Los resultados del análisis se adjuntan en las siguientes tablas y gráficos:

Tabla 4.11. Análisis granulométrico toba zeolítica Elaboración propia

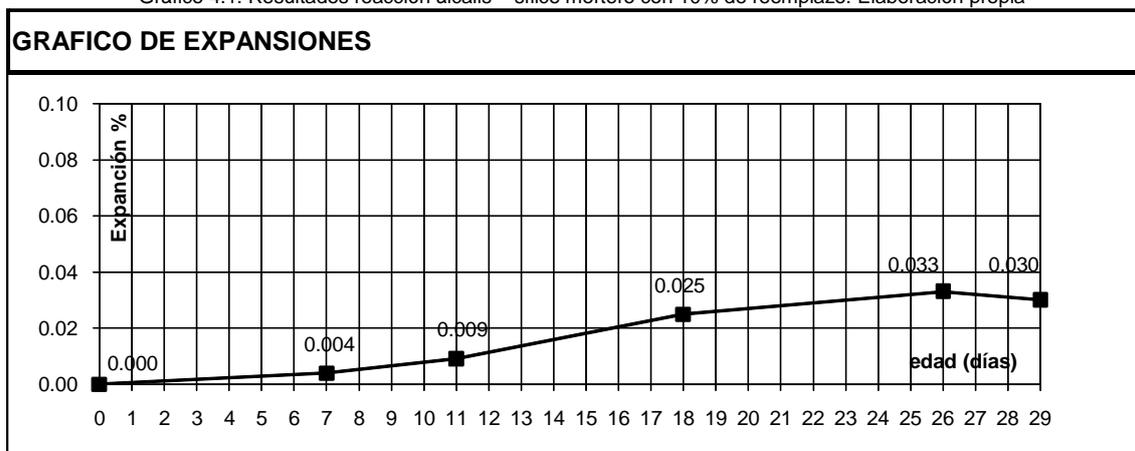
Análisis granulométrico			Mod.Fineza: 0,18				Tmax.: polvo			Norma IRAM1505	
TAMIZ N°	1"	3/4"	1/2"	3/8"	N° 4	N° 8	N° 16	N°30	N°40	N°50	N°100
Pasante %	---	---	---	---	---	---	100	99.1	97.8	96.1	86.9

- Resultados barra de mortero con 10% de reemplazo de cemento pórtland por toba zeolítica:

Tabla 4.12. Resultados reacción álcalis- sílice mortero con 10% de reemplazo. Elaboración propia

REACCIÓN ÁLCALI-SILICE			
IDENTIFICACION Y PROCEDENCIA DEL CEMENTO.			
Identif. S/Laboratorio		Identificación s/solicitante	
N° LIM	2319	CPN 40 LOMA NEGRA	
IDENTIFICACION Y CONFORMACION DE LAS MUESTRAS DE ÁRIDO			
ÁRIDO	N° LIM	Identificación s/solicitante	Proporción
ARENA	8349	Arena Rio II	100%
POLVO	2279	TOBA ZEOLÍTICA (COMO REEMPLAZO DE CEMENTO)	10% EN PESO
RESULTADOS DE ENSAYO			
EDAD Días	FECHA DE LECTURA	VARIACION PROM. %	OBSERVACIONES :
-1	12/10/2014	DESMOLDE	
0	12/11/2014	0.000	INMERSION
7	12/18/2014	0.004	
11	12/22/2014	0.009	
18	12/29/2014	0.025	
26	1/6/2015	0.033	
29	1/9/2015	0.030	INOCUO

Gráfico 4.1. Resultados reacción álcalis – sílice mortero con 10% de reemplazo. Elaboración propia

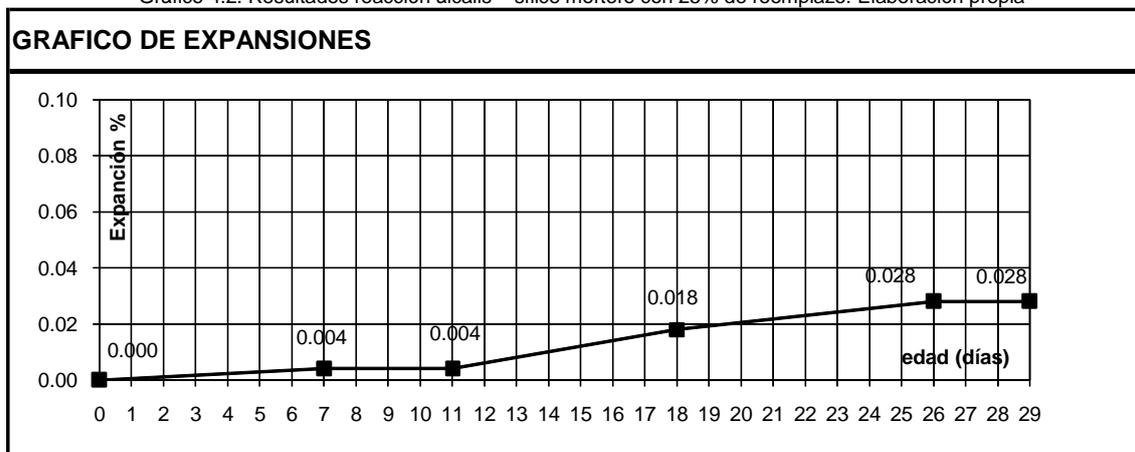


- Resultados barra de mortero con 25% de reemplazo de cemento pórtland por toba zeolítica:

Tabla 4.13. Resultados reacción álcalis- sílice mortero con 25% de reemplazo. Elaboración propia

REACCIÓN ÁLCALI-SILICE			
PROBETA N° LIM 2341			
IDENTIFICACION Y PROCEDENCIA DEL CEMENTO.			
Identif. S/Laboratorio	Identificación s/solicitante		
N° LIM	2319	CPN 40 LOMA NEGRA	
IDENTIFICACION Y CONFORMACION DE LAS MUESTRAS DE ÁRIDO			
ÁRIDO	N° LIM	Identificación s/solicitante	Proporción
ARENA	8349	Arena Rio II	100%
POLVO	2279	TOBA ZEOLÍTICA (COMO REEMPLAZO DE CEMENTO)	25% EN PESO
RESULTADOS DE ENSAYO			
EDAD Días	FECHA DE LECTURA	VARIACION PROM. %	OBSERVACIONES :
-1	12/10/2014	DESMOLDE	
0	12/11/2014	0.000	INMERSION
7	12/18/2014	0.004	
11	12/22/2014	0.004	
18	12/29/2014	0.018	
26	1/6/2015	0.028	
29	1/9/2015	0.028	INOCUO

Gráfico 4.2. Resultados reacción álcalis – sílice mortero con 25% de reemplazo. Elaboración propia



5 - ENSAYOS COMPLEMENTARIOS

5.1 - JUSTIFICACIÓN

Además de los ensayos requeridos por norma, se realizaron otros estudios, a pedido del cliente, con el objetivo de complementar la investigación, saliendo del reglamento para comprender de manera integral el comportamiento del material al que se enfrentó la investigación.

El fin de los siguientes procesos fue el de analizar el comportamiento de la toba en el hormigón y se buscó que los resultados ayudaran a concluir sobre el comportamiento puzolánico de la toba zeolítica.

Se incorporó el material estudiado en distintos porcentajes y se realizaron ensayos de propiedades, sobre las que se tiene mayor cantidad de marco teórico de referencia y resultados de numerosos ensayos. Estas propiedades según lo revisado en la teoría existente, son representativas de la actividad puzolánica de un material.

Los ensayos realizados fueron:

- Resistencia a compresión simple.
- Tiempo de fragüe en el hormigón.

5.2 - ENSAYOS

En este ítem se profundizan los estudios realizados, describiendo el procedimiento realizado y los resultados obtenidos.

5.2.1–Resistencia a la compresión simple

Este ensayo consistió en determinar la resistencia a la compresión simple de tres pastones, uno patrón y dos variables.

Se realizó la dosificación de un pastón patrón de hormigón con resistencia característica de 25 MPa (250 kg/cm²) y de dos pastones variables, el primero con reemplazo de 25% de cemento pórtland por toba zeolítica y, un segundo pastón, con el reemplazo de 50% de cemento pórtland por el material en estudio.

El estudio se basó de las normas:

- IRAM 1509: Agregados para hormigones. Muestreo.
- IRAM 1520: Agregados finos. Métodos de laboratorio para la determinación de la densidad relativa real, densidad relativa aparente y de la absorción de agua.
- IRAM 1533: Agregados gruesos. Métodos de laboratorio para la determinación de la densidad relativa real, densidad relativa aparente y de la absorción de agua.
- IRAM 1569: Morteros, hormigones y sus componentes. Definiciones.
- IRAM 1602-1 y 2: Hormigón de cemento portland. Métodos para la determinación del contenido de aire en el hormigón.
- IRAM 1627: Agregados. Granulometría de los agregados para hormigón.
- IRAM 1672: Hormigones. Preparación y curado de probetas en laboratorio.

No se profundiza en los ensayos de caracterización de los materiales, en el método de dosificación ni en los ensayos en estado fresco y endurecido del hormigón ya que exceden los objetivos de este trabajo de investigación. Sólo se describen los procedimientos y resultados obtenidos, siendo estos últimos los relevantes a la hora de sacar conclusiones.

5.2.1.1 - Procedimiento

- Caracterización de los materiales que componen el hormigón.

Para esto se utilizó piedra y arena de río, cemento Loma Negra - CPC 40 y toba zeolítica, todos los materiales proveídos por el cliente.

Se realizó el análisis granulométrico de los agregados y de la toba; la densidad relativa y absorción de los agregados y finalmente se determinó la humedad natural de todos los materiales a la hora de realizar los pastones para corregir la cantidad de agua de amasado.

- Dosificación de los pastones.

Con los resultados de los ensayos antes mencionados, se realizaron las dosificaciones de los hormigones propuestos y las correcciones necesarias a la hora de realizar el mezclado.

Imagen 5.1. Actividades previas a la preparación de los pastones.



- Mezclado de los pastones y ensayos en estado fresco del hormigón.

El mezclado se realizó con una mezcladora eléctrica de 50 litros de capacidad, luego de haberse pesado las cantidades correspondientes de cada material.

Imagen 5.2. Realización de los pastones.



Los ensayos realizados en estado fresco fueron el asentamiento mediante el cono de Abrams, el porcentaje de aire de la mezcla, la temperatura de mezclado y la densidad en estado fresco.

Imagen 5.3. Medición de asentamiento, cono de Abrams. Pastón 50% de reemplazo.



Imagen 5.4. Cono de hormigón, medición de asentamiento. Pastón patrón.



Se confeccionaron por pastón, cuatro probetas cilíndricas de 15cm de diámetro y 30cm de alto y seis probetas cilíndricas de 10cm de diámetro y 20 cm de alto. Las mismas fueron desencofradas al día siguiente de haberse moldeado y en todo el proceso de fragüe estuvieron en cámara de curado bajo condiciones de temperatura y humedad controlados, sumergidas en agua con pH = 12.

Imagen 5.5. Mezcla pastón 50% de reemplazo.



Imagen 5.6. Cono de asentamiento pastón 25% de reemplazo.



Imagen 5.7. Preparación de probetas. Pastón con 50% de reemplazo.



- Ensayos en estado endurecido.

Se realizó el ensayo de compresión simple a todas las probetas a los 3, 7, 28 y 120 días.

Imagen 5.8. Ensayo de resistencia a la compresión simple



Imagen 5.9. Probeta luego de ser ensayada a la compresión simple.



Imagen 5.10. Control de prensa para realizar ensayo de compresión.



5.2.2.2 - Resultados

En las siguientes tablas y gráficos se expresan las dosificaciones finales de cada uno de los tres pastones y los resultados de resistencia a la compresión en función de los días de realizado cada mezcla.

Tabla 5.1. Resultados de ensayos del hormigón en estado fresco. Elaboración propia

	Patrón	20% Reemplazo	50% Reemplazo
Asentamiento (cm)	2,5	2,0	0,0
Plasticidad	Regular	Baja	Nula

Tabla 5.2. Tabla comparativa de desarrollo de resistencia a la compresión simple en el tiempo. Elaboración propia

	Pastón testigo	25% reemplazo	50% reemplazo
Días	Resistencia	Resistencia	Resistencia
0	0	0	0
3	16.4	11.3	4.7
7	21.2	12.3	8.2
28	28.6	19.0	13.5
120	32.0	21.0	16.7

5.2.3 - Tiempo de fragüe en el hormigón.

Este ensayo se realizó según Norma IRAM 1662: Hormigones y morteros. Determinación del tiempo de fraguado. Método de resistencia a la penetración.

El mismo consta en medir la resistencia a la penetración del hormigón a medida que pasa el tiempo. Esta resistencia se obtiene midiendo la fuerza ejercida sobre un penetrómetro para penetrar la masa de hormigón la profundidad de una pulgada (2,5 cm). Para medir esta fuerza, el aparato penetrómetro dispone una regla graduada y calibrada.

5.2.3.1 –Procedimiento

Imagen 5.11. Preparación de probeta para ensayo de penetración. Determinación de tiempo de fragüe.



Para realizar el ensayo se confeccionó un hormigón con reemplazo de 50% de cemento pòrtland por toba zeolítica según lo dosificado anteriormente. Luego se tamizó el hormigón por un tamiz N° 12, según lo especificado en la norma y se moldeó una probeta cúbica de 20cm de ancho por 20cm de ancho por 20cm de alto.

Una vez que se confeccionó la probeta se tomaron mediciones a diferentes tiempos, con el objetivo de tomar tres muestras antes de llegar a la resistencia de inicio de fragüe, tres muestras intermedias y una muestra luego de llegar a la resistencia indicativa del final de fragüe. Durante el ensayo, se midió la temperatura ambiente y la temperatura del hormigón en el mismo momento en que se realizaron las penetraciones. Este factor también colaboró en la conclusión del análisis.

Imagen 5.12. Probeta para ensayo de penetración, penetrómetro y termómetro.



Imagen 5.13. Regla graduada para medición de fuerza de penetración.

La norma considera que el hormigón comienza su proceso de fragüe cuando adquiere una resistencia a la penetración de 35 kg/cm² y “finaliza” el proceso cuando este valor alcanza los 280 kg/cm².

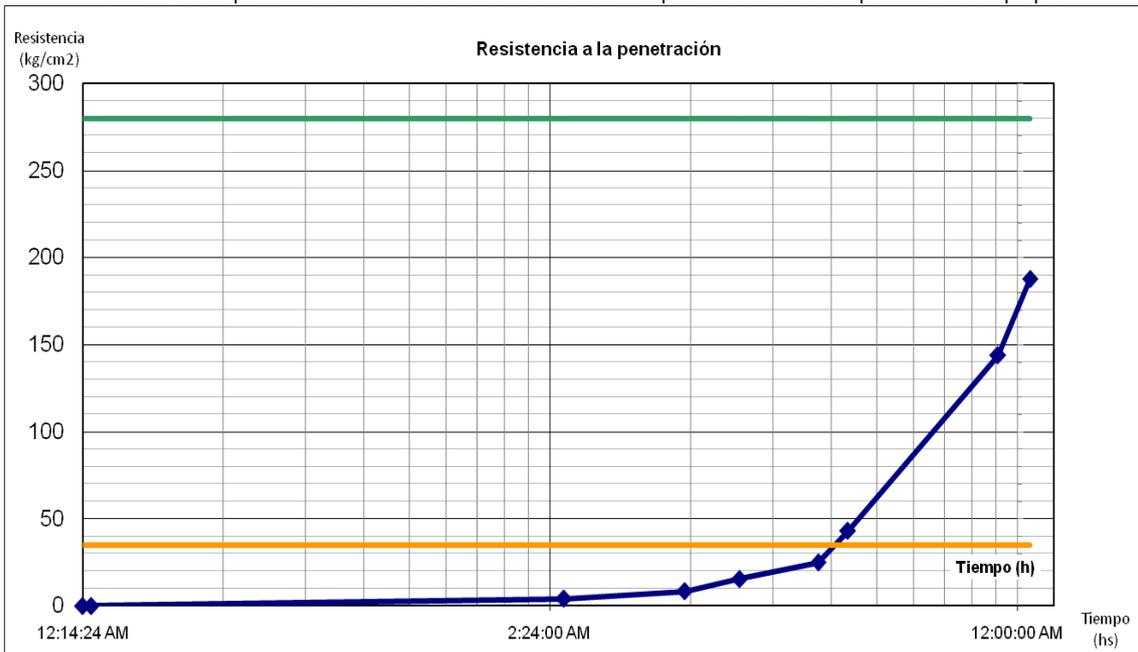
5.2.3.2 - Resultados

En la siguiente tabla y gráfico se muestran los resultados que dejó el ensayo:

Tabla 5.3. Tabla de resultados de ensayo de penetración y medición de temperatura. Elaboración propia

Hora	t	A [cm ²]	F [kg]	P [kg/cm ²]	Temperatura ambiente [°C]	Temperatura interior mezcla [°C]
11:20:00	00:00:00	Inicio de mezclado	0.00	0.00	17,1	16,8
11:35:00	00:15:00	6.45	0.00	0.00	17,3	16,6
13:54:00	02:34:00	6.45	26.00	4.03	20,0	16,9
16:00:00	04:40:00	6.45	54.00	8.37	20,3	19,7
17:27:00	06:07:00	3.23	50.00	15.48	20,2	20,2
20:20:00	09:00:00	1.61	40.00	24.84	20,3	20,2
21:45:00	10:25:00	0.65	28.00	43.08	20,5	20,3
09:10:00	21:50:00	0.16	23.00	143.75	20,4	20,3
12:55:00	01:35:00	0.16	30.00	187.50	20,0	20,2

Gráfico 5.1. Representación de la evolución de resistencia a la penetración en el tiempo. Elaboración propia



Se puede ver que la resistencia a la penetración alcanza el valor de 35 kg/cm² entre las horas 20:20 y 21:45, comenzando a fraguar después de 9 horas de realizada la mezcla. También puede verse que en las más de 25 horas que duró el ensayo, no se alcanzó la resistencia de 280 kg/cm², de manera que no se pudo saber en qué momento finalizaba el proceso de fragüe.

6 – ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se expresará la evaluación que se realizó de los resultados obtenidos en los ensayos descritos en los capítulos 4 y 5.

También se expondrá la comparación que se hizo con el marco teórico existente estudiado y se contrastaran resultados con los requisitos propuestos por norma.

6.1 – REQUISITOS FÍSICOS EXPUESTOS EN NORMA

El primer análisis que se realizó fue contrastar los resultados obtenidos con los valores expresados en la norma. Se detallará individualmente cada requisito.

6.1.1 – Finura

Respecto a este requisito, se realizó el cálculo de la superficie específica de la toba zeolítica. Los resultados del ensayo se detallaron en el apartado 4.4.3.

La norma IRAM 1668 requiere valores de superficie específica como mínimo de 3000 cm²/g. El material en estudio dio un resultado de esta propiedad de 1268 cm²/g.

Esta propiedad no cumple con el requisito denotado en la norma.

6.1.2 – Índice de actividad puzolánica

6.1.2.1 – Con cemento

El resultado del ensayo dio a conocer que la toba, en su aplicación como adición para un mortero cementicio normalizado, no cumplió con los requisitos estipulados para resistencia a la compresión simple.

El índice de puzolaneidad obtenido, medido como la razón entre la resistencia a la compresión de probetas prismáticas de un mortero con adición y un mortero patrón, fue de 55%, mientras que la norma de referencia dispone que este resultado debe estar por encima del 75%, por lo tanto tampoco cumple con este requisito.

6.1.2.2 – Con cal

El índice obtenido en este ensayo fue de 6,0 kg/cm² a los 7 días de realizadas las probetas. Mientras que la norma requiere que los ensayos den un resultado mínimo, a los 7 días de realizado el pastón, de 42 kg/cm².

Se observa que la toba zeolítica no verifica este requisito, obteniendo valores de resistencia muy por debajo de las mínimas.

6.1.3 – Requerimiento de agua

Este ensayo no se realizó.

6.1.4 – Diferencia entre valores de densidad absoluta de la partida

La norma establece valores de diferencia máxima del 3%. El ensayo que mayor dispersión generó tuvo un valor de 2,19 %.

Por lo tanto, este requisito está satisfecho en comparación con la norma.

6.1.5 –Reacción álcali – árido

La norma establece dos valores para cumplimentar este requisito. Para la reducción de la expansión del mortero a los 14 días, establece un mínimo de 75%. En el caso del valor de la expansión del mortero, establece un valor máximo de 0,020%. Se realizó el ensayo de medición de variación de la expansión.

6.1.5.1 – Mortero con reemplazo del 10% de cemento por toba

En este caso se verifica que, a los 14 días, el valor de la expansión mostró un valor de 0,018%.

6.1.5.2 – Mortero con reemplazo del 25% de cemento por toba

Este ensayo presentó, para el valor de expansión, constatado a los 14 días, una variación del 0,010%.

En este ensayo se vio que, en ambos casos, los valores obtenidos verifican los requisitos expuestos en el reglamento de verificación.

Otro importante análisis que se realizó fue que a medida que se aumenta el porcentaje de reemplazo de cemento por toba zeolítica, disminuye la expansión de la barra de mortero ensayada.

6.1.6 – Constancia de volumen y contracción por secado

Estos ensayos no fueron realizados.

6.1.7 – Humedad

Este ensayo no fue realizado.

6.2 – REQUISITOS QUÍMICOS EXPUESTOS EN NORMA

En este caso, no se realizó ninguno de los ensayos en el laboratorio, por no disponer de las herramientas y equipos necesarios para la correcta ejecución de los mismos.

Sin embargo, se pudo corroborar la información necesaria con el análisis químico provisto por el solicitante donde se observó que:

- Si bien no hay medición del óxido de magnesio soluble total, la cantidad total de este elemento contenido en la muestra analizada es de 1,6% y contrastando con la norma, ésta requiere un contenido máximo de MgO soluble de 3%. Por lo tanto este requisito se ve aceptado.

- La pérdida por calcinación máxima expuesta en la norma es del 10%. El análisis químico mostró un valor de pérdida de 10,2 %. Aunque el ensayo se realizó con una incertidumbre de 0,2, pudiendo entrar en los valores expuestos por norma.
- Finalmente, el contenido de anhídrido sulfúrico (SO_3) medido en el análisis es de 0,64%, cumpliendo ampliamente con el límite máximo de 3% expuesto en la normativa.

6.3 – ANÁLISIS DE ENSAYOS COMPLEMENTARIOS

6.3.1 – Comportamiento del hormigón en estado fresco

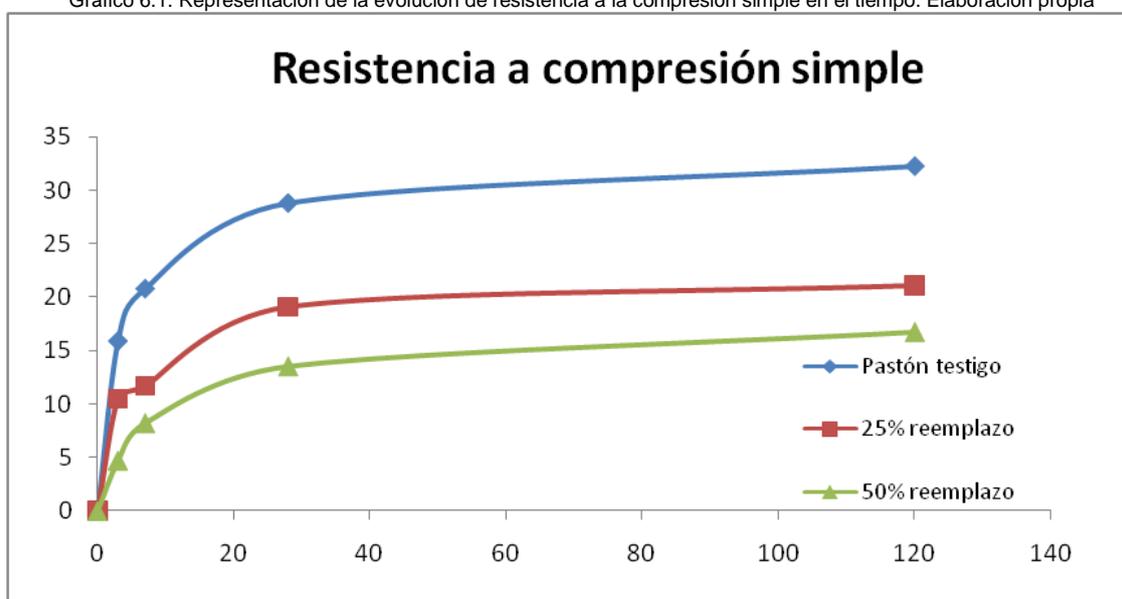
En estado fresco el hormigón patrón se comportó según lo dosificado, mientras que en los hormigones con adición de toba zeolítica, fue evidente la pérdida de trabajabilidad, la pérdida de asentamiento y si bien no se midió la exudación, se pudo observar que el requerimiento de agua aumentaba acorde aumentaba el porcentaje de reemplazo de cemento por toba.

Se constató que estas propiedades expuestas (pérdida de trabajabilidad y pérdida de asentamiento) aumentan al aumentar el porcentaje de adición. Comportándose de acuerdo a lo visto en la bibliografía existente, indicando que el comportamiento del material en estudio responde de manera similar a otros estudios realizados sobre puzolanas.

6.3.2 – Resistencia a la compresión simple

De todos los ensayos realizados en los diferentes pastones, el resumen de los resultados se expresa en el siguiente gráfico:

Gráfico 6.1. Representación de la evolución de resistencia a la compresión simple en el tiempo. Elaboración propia



En el mismo se puede analizar que la adición de toba en reemplazo de cemento reduce ampliamente la resistencia a la compresión simple.

El pastón con 25% de reemplazo, mostró una curva de crecimiento que se vuelve asintótica al valor de su resistencia final luego de los 28 días, denotando que la actividad puzolánica para este porcentaje de adición no tiene efecto.

En el pastón con 50% de reemplazo, la resistencia tuvo tendencia ascendente, pudiendo estimarse que luego de los 120 días, esta propiedad siguió creciendo en el hormigón. A este nivel de reemplazo, la actividad puzolánica toma mayor relevancia, con el inconveniente de la importante disminución de la resistencia respecto al hormigón patrón.

Estos resultados se observan numéricamente en la tabla x-x.

La siguiente tabla muestra las relaciones antes mencionadas:

Tabla 6.1. Resistencia a la compresión simple por pastón y por día. Elaboración propia

Días	Resistencia a la compresión (Mpa)			
	3	7	28	120
Patrón	15,90	20,85	28,65	30,20
25% Reemplazo	10,73	11,75	18,90	20,60
50% Reemplazo	4,70	8,25	13,50	16,70

Tabla 6.2. Gradiente y porcentaje de crecimiento de la resistencia a la compresión simple por pastón. Elaboración propia

Pastón	Gradiente de crecimiento (Mpa/día)	Porcentaje de crecimiento (%)
	Respecto a los 28 días de edad	
Testigo	0,038	12
25% Reemplazo	0,022	10
50% Reemplazo	0,035	24

Tabla 6.3. Relaciones de resistencia entre pastones patrón y variables. Elaboración propia

Aumento de resistencia (%)	Diminución de resistencia a los 28 días (%)	Aumento de resistencia (%)	Diminución de resistencia a los 120 días (%)
Entre 7 y 28 días	Respecto al patrón	Entre 28 y 120 días	Respecto al patrón
37,41	-	5,41	-
60,85	34,03	8,99	31,79
63,64	52,88	23,70	44,70

En las tablas expuestas se analizó también cuál fue el aumento de resistencias entre los 7 y 28 días y luego se analizó el mismo aumento en el período transcurrido entre 28 y 120 días. También se evaluó la disminución de la resistencia respecto a los valores testigos para los mismos períodos de tiempo.

Se observó que el pastón con toba reemplazando 25% de cemento, tuvo disminuciones del 34% a los 28 y del 32% a los 120 días. Esto significa que la resistencia del pastón testigo aumentó en menor porcentaje de lo que lo hizo el pastón variable. Esta situación puede constatarse también al analizar los porcentajes de aumento entre los 28 y 120 días.

Con el pastón de 50% de reemplazo, el comportamiento se mostró similar pero con mayor intensidad.

Al evaluar estos porcentajes de aumento de resistencia, se observó que el pastón testigo, entre los 7 y los 120 días, aumentó su resistencia un total de 43%, adquiriendo la mayor parte de su resistencia a corto tiempo (entre los días 1 y 7). El mismo análisis se realizó en ambos pastones variables, corroborando que el pastón de 50% de reemplazo, en el que este comportamiento es más acentuado, adquirió entre los 7 y los 120 días el 87% de su resistencia final, incrementándose un 24% en el último período de tiempo. Esta evaluación permitió pensar que la toba zeolítica tiene efectos puzolánicos, visto en este caso por las propiedades que adquirió el hormigón respecto a su resistencia a largo plazo.

Comparando estos resultados con la bibliografía relevada, en el largo plazo, las resistencias a la compresión simple de los hormigones con adiciones puzolánicas aumentan de tal manera, que en general, luego de 90 días sobrepasan la resistencia del hormigón convencional con el que se realizó la comparación. Esto no sucedió con este material en particular, ya que como se observó, las resistencias de los pastones variables son inferiores a los valores patrones durante todo el intervalo de tiempo que se analizó, siendo estas resistencias, inversamente proporcional al porcentaje de toba adicionado.

6.3.3 – Tiempo de fragüe y calor de hidratación

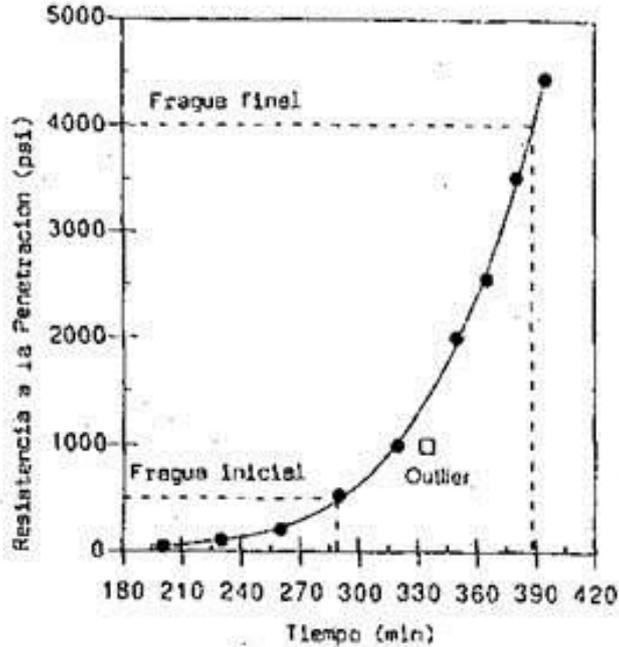
6.3.3.1 – Tiempo de fragüe

Según lo expuesto en el apartado correspondiente a la descripción de este ensayo, el tiempo de fragüe del hormigón dosificado con un 50% de reemplazo de cemento portland por toba zeolítica presentó un amplio período de tiempo, desde el fin de realizada la mezcla hasta el comienzo del fragüe.

Los resultados obtenidos demuestran que la toba en estudio presenta un comportamiento, respecto al tiempo de fragüe, acorde a lo esperado en puzolanas, según se ha expresado en estudios ya existentes revisados en la bibliografía existente.

No se realizó un pastón testigo en este caso, pero se corroboró con una vasta cantidad de estudios informados en la bibliografía analizada, pudiendo constatar que en hormigones convencionales, el tiempo de fraguado se comporta según lo resume el gráfico x a continuación:

Gráfico 6.2. Resistencia a la penetración en función del tiempo en hormigón. Determinación de inicio y fin de fragüe. Fuente: informe sobre fraguado en el hormigón, www.civilgeeks.com/2011/12/10/el-fraguado-en-el-concreto/

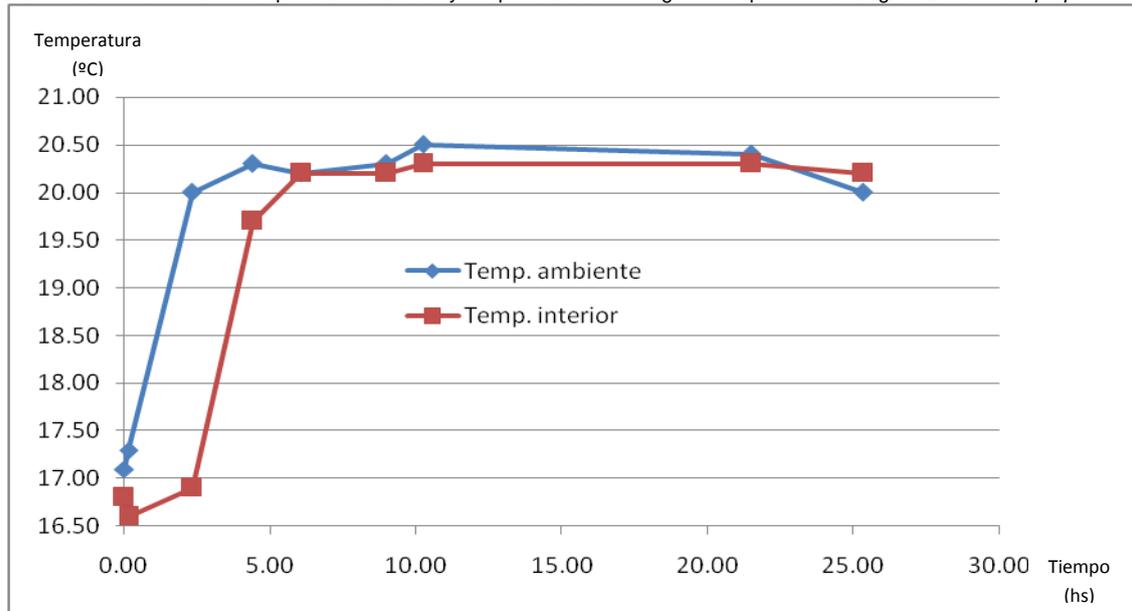


En el gráfico expuesto se puede leer que en hormigones convencionales el comienzo de fragüe, o fragua inicial, se alcanza a los 290 minutos aproximadamente (alrededor de 5 horas), corroborando también lo expresado en otros estudios, en los cuáles determinan que el fraguado, dependiendo de las condiciones exteriores, se da entre las 3 y 6 horas de finalizado el proceso de mezclado del hormigón.

6.3.3.2 – Calor de hidratación

También se tomó medida de la temperatura ambiental y de la temperatura en el interior del hormigón. En el siguiente gráfico se muestra la relación entre estas:

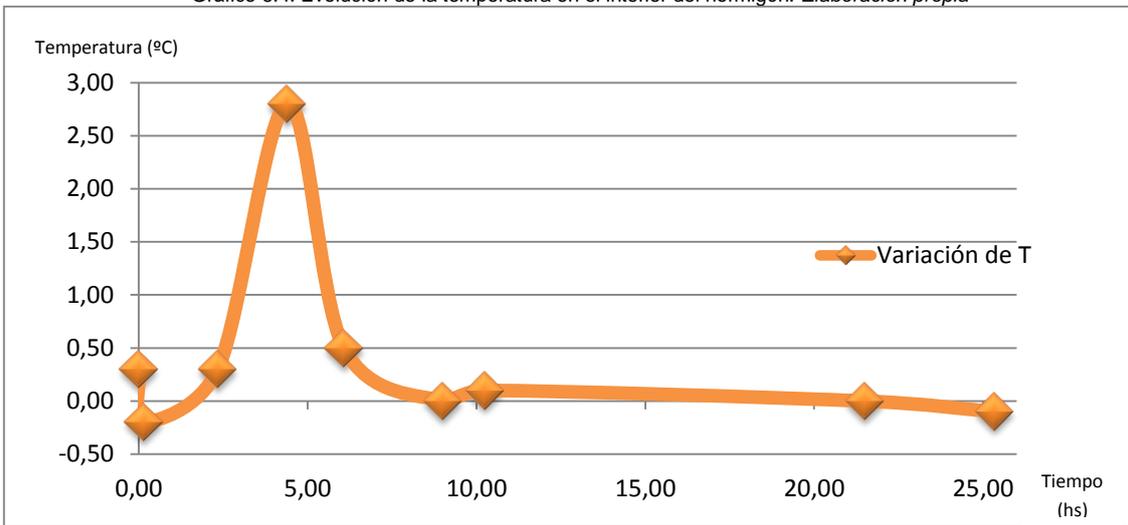
Gráfico 6.3. Variación de la temperatura ambiental y temperatura del hormigón en el proceso de fragüe. *Elaboración propia*



Se pudo ver que en ningún momento la diferencia de temperatura entre el medio y el interior de la masa de hormigón superó el valor de 0,6 °C. El pico que se da en la tercera medición se debió al momento en que se colocó la probeta de ensayo en cámara de curado.

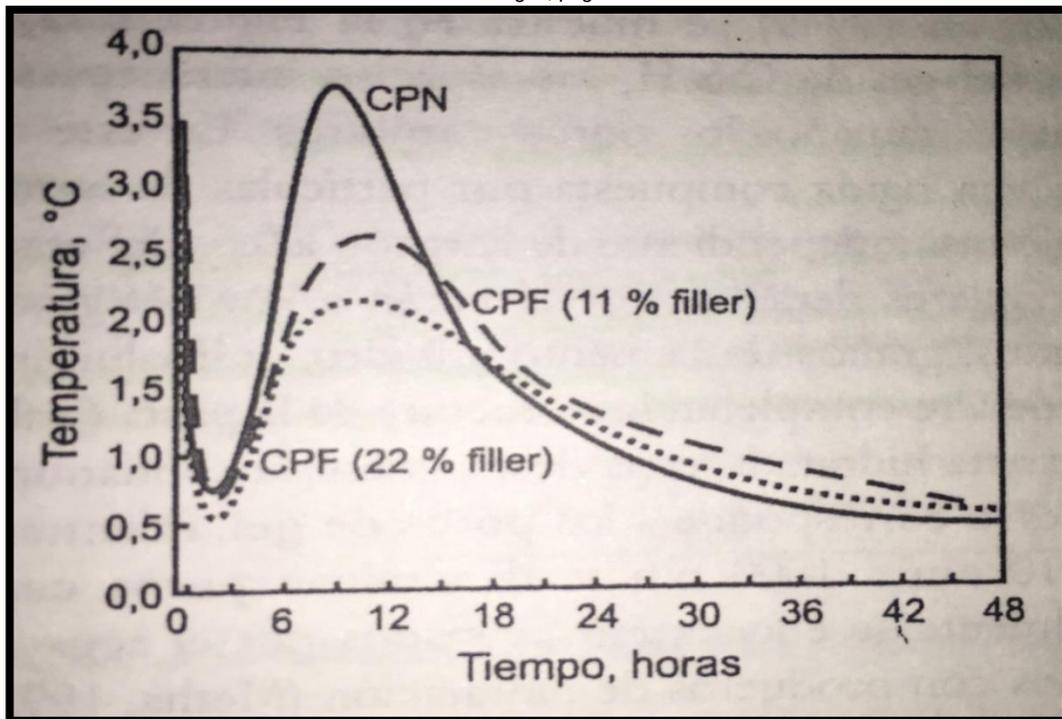
En el siguiente gráfico se estudió la evolución de la temperatura interna del hormigón durante el fragüe en representación de la liberación de calor producida.

Gráfico 6.4. Evolución de la temperatura en el interior del hormigón. *Elaboración propia*



En el gráfico pudo observarse que la evolución de la temperatura se comporta de manera muy similar a los estudios realizados sobre hormigones cementicios sin adiciones expresadas en la bibliografía. Como se puede ver en el siguiente gráfico:

Gráfico 6.5. Evolución del calor de hidratación del cemento con distintos contenidos de filler. *Fuente: Ese material Llamado Hormigón, pág. 59.*



En el mismo se puede observar que el pico de variación de la temperatura se da en un tiempo similar al que se corroboró en el ensayo de tiempo de fragüe.

Se ve que el pico máximo de temperatura para un cemento pòrtland normal es levemente superior a 3,5 °C. En el ensayo se midió que este pico máximo es de 2,8 °C, siendo un 20% menor que el expresado en el gráfico 6.4.

Cabe aclarar que el pico máximo de 2,8 °C se dio cuando la probeta de ensayo fue llevada a cámara de curado debido a que se equilibraron las temperaturas del medio con la del interior de la masa de concreto.

Con esta última comparación se deduce que la adición de toba produce también una disminución en el calor de hidratación del cemento, manteniéndose la temperatura interior de la mezcla sin presentar grandes variaciones con la temperatura del medio.

7 – CONCLUSIONES

Finalmente, luego de un exhaustivo análisis de resultados de los ensayos realizados, se llegó a las siguientes conclusiones.

El primer ensayo realizado, fue la determinación de la reacción álcalis-sílice de un mortero cementicio con la aplicación de toba zeolítica como adición. Este análisis es muy importante para determinar cuán puzolánico es un material, ya que la inhibición de la RAS es uno de los requisitos principales buscados al aplicar una puzolana.

El cliente proveedor de la toba, al comenzar la investigación disponía de un análisis químico y un examen petrográfico, en los que se determinaba que el material en estudio, poseía propiedades puzolánicas. Fue por eso que se escogió, en primera medida, el estudio de la RAS. Al obtener resultados favorables, invitó a seguir investigando.

La finura del material evaluado no verifica satisfactoriamente el requisito expresado en norma.

El índice de actividad puzolánica es un requisito de gran importancia para la aplicación de la toba zeolítica como adición en hormigones. En este caso se vio que, tanto el índice con cemento, como el índice con cal, no cumplieron con los valores mínimos especificados.

Sí verificó el ensayo de variabilidad en la densidad absoluta del material, lo que indica que el mismo es homogéneo en su composición física, determinando que el comportamiento de la adición no producirá grandes variaciones en las propiedades físicas del hormigón resultante, comportándose de manera similar cada vez que se aplique; esto se verificó cualitativamente en todos los ensayos realizados.

En relación con los ensayos químicos determinados en la norma, los resultados fueron positivos, encuadrándose todos los resultados dentro de los límites enunciados en el marco regulatorio sobre el que se basó el estudio. Esta condición es determinante a la hora de resolver si el material es una puzolana o no, ya que los efectos puzolánicos que un material puede aportar, dependen en gran medida de la composición química del mismo.

Al analizar los resultados de los ensayos complementarios realizados, se vio que la toba zeolítica, al adicionarse al hormigón, mostró un comportamiento similar al esperado.

La resistencia a la compresión simple de los pastones estudiados, se relaciona directamente con el índice de puzolaneidad analizado. Se vio que, la adición de puzolana provoca un crecimiento en la resistencia luego de los 28 días de realizado el pastón y este efecto es más intenso mientras más grande es el porcentaje de cemento reemplazado por toba zeolítica. De esta forma se verificó que esta propiedad elemental de las puzolanas, que es la obtención de resistencias a largo plazo, es proveída por el material analizado. El inconveniente al respecto, es la gran disminución de los valores de resistencia observados, principalmente en edades tempranas.

También se corroboró un comportamiento favorable a la actividad puzolánica del material, verificado en el tiempo de fragüe del hormigón estudiado. Los resultados de este ensayo demostraron que la toba zeolítica bajo análisis, actúa de la manera en que lo hacen las puzolanas en los estudios existentes revisados, siendo otra propiedad

importante de este tipo de adiciones. La misma determinación se obtuvo al analizar el comportamiento térmico del material, medido con la temperatura de reacción durante el fragüe.

En conclusión, basándose en los estudios revisados en la bibliografía existente y según los resultados de los ensayos complementarios realizados, se determinó que el material provisto para análisis, tiene comportamiento puzolánico. También se verificó que cumple con todos los requisitos químicos exigidos en la Norma IRAM 1668, aunque no verifique algunas de las condiciones físicas expresadas en la misma. El principal inconveniente de la misma, en términos de aplicación en hormigones, es la gran disminución de la resistencia a la compresión simple.

8 – COMENTARIOS

8.1 – REVISIÓN NORMA ASTM C 618 – 05

A modo de conocer los requisitos normativos a nivel internacional para determinar cuándo un material puede ser considerado puzolana, se revisó la norma ASTM C 618 – 05, encontrando que:

- Cumple con todos los requisitos químicos de la misma. Estos requisitos son los mismos que se expresan en la Norma IRAM 1668 - 68, sumado a un condicionante particular, el cuál expresa que la suma de los siguientes elementos componentes del material, sílice (SiO_2), álcalis (Al_2O_3) y óxido férrico (Fe_2O_3) debe ser superior al 70%. En el material estudiado se encontró que este valor asciende al 76,4%.
- Los requisitos físicos expuestos en la norma sobre la que centró el presente estudio, son los mismos que los que se expresan en su par norteamericano.

8.2 – CONSIDERACIONES PERSONALES

Este material puede ser aplicado en mezclas cementicias donde la resistencia a la compresión de la misma no sea la propiedad fundamental, como así también, en otras aplicaciones donde las características puzolánicas que presenta la toba puedan ser aprovechadas eficientemente. Por ejemplo:

- Revoques
- Revestimientos
- Morteros de elevación de mampostería
- Bloques de suelo – cemento
- Bloques de hormigón
- Hormigonado en altas temperaturas
- Hormigones con baja necesidad de resistencia mecánica y con altos requerimientos térmicos
- Mezclas donde la reactividad de los agregados sea perjudicial

Se recomienda un análisis profundo de la aplicación con que se vaya a utilizar el material, estudiando el comportamiento en las diferentes propiedades que se requieran.

En el Laboratorio de Estructuras, se realizó paralelamente y con la aplicación de esta toba, la dosificación y caracterización de un mortero cementicio para aplicación en impresoras 3D de viviendas y partes prefabricadas.

El principio sobre el que se posicionó esta investigación, fue el de lograr una granulometría continua entre el cemento y el árido fino agregado. Este concepto fue extraído de un estudio, sobre el mismo tipo de morteros, realizado en la Universidad Loughborough, Reino Unido. La toba zeolítica completa de manera óptima el espacio granulométrico entre los dos extremos antes mencionados.

En este estudio se lograron resultados favorables tanto estado fresco como en estado endurecido, logrando alcanzar en el primero de los casos, que el material soporte su propio peso, soporte el peso de capas superiores y a la vez, sea bombeable, propiedad fundamental para el mortero requerido. Esto se puede ver en las siguientes imágenes:

Imagen 9.1. Prueba de colado de mortero para impresión 3D.



Imagen 9.2. Prueba de colado de mortero para impresión 3D.



En estos pastones se alcanzaron valores de resistencia a la compresión simple a 60 días de hasta 27 Mpa. También se obtuvieron excelentes resultados de resistencia a la tracción de estas mezclas, alcanzando relaciones tracción – compresión de hasta 35%, siendo que la relación comúnmente aceptada es que la resistencia a tracción del hormigón es del orden del 12% de la resistencia a compresión del mismo.

Las mezclas fueron realizadas reemplazando 40% de cemento pòrtland por toba, con relaciones agua/cemento de 0,45 y 0,50, agregando para lograr fluidez, superfluidificantes.

8.3 – CONSIDERACIONES FINALES

Es probable que la baja resistencia a compresión que se obtiene en los hormigones con reemplazo de cemento por toba zeolítica se deba, principalmente al contenido en su composición de un 31,15% de cloritas y materiales arcillosos, siendo estos, perjudiciales para la cohesión y resistencia a la compresión.

Según estudios realizados, publicados en la bibliografía de referencia, se determinó que las puzolanas con partículas gruesas no pueden reaccionar completamente en un tiempo de curado razonable. Por lo tanto la resistencia a la compresión y la actividad puzolánica aportada por la toba zeolítica, puede verse beneficiada, al igual que los requisitos de finura, modificando el material desde el proceso de molienda, generando un material con partículas de menor tamaño, tratando de alcanzar superficies específicas superiores a 3000 cm²/g.

Otros estudios realizados por el CONICET muestran que, al adicionar puzolanas en mezclas cementicias, hay variaciones favorables en la reacción de las puzolanas al calcinarlas. Mejorando la capacidad de reaccionar al aumentar la temperatura de calcinación. Por lo tanto, es recomendable la evaluación de este proceso, previo a la aplicación de la toba zeolítica.

9 – BIBLIOGRAFÍA

- [1] - Estudio sobre puzolanas y adiciones, clasificación y procesos (2009). *Indian Institute of Sciences*. <http://ces.iisc.ernet.in/>
- [2] - Tiburcio – Munive, G.; Servín – Rodríguez, J. L. & Jordan – Hernández, R. (2010). Tobs zeolíticas para elaboración de arena puzolánica. *INTEC JOURNAL*, Vol. 1, Nº 1.
- [3] - Montes de Oca, J. J. *et al.* (2009). Efecto de la adición mineral cal – zeolita sobre la resistencia a la compresión y durabilidad de un hormigón. *Revista de ingeniería de construcción* Vol. 24, Nº 2, pág. 181 - 194. *Santiago de Chile, 2009.*
- [4] - Rocas y Minerales Industriales de Iberoamérica. *Instituto Tecnológico Geominero de España, 2000.*
- [5] - Tiburcio – Munive, G. (2008) Morteros para revestimientos de muros, utilizando arena zeolítica. *Revista Épsilon* Nº 10, pág. 57 – 65, *Junio 2009.*
- [6] - López, M. & Castro, J. T. (2010). Efecto de las puzolanas naturales en la porosidad y conectividad de poros de hormigón con el tiempo. *Revista Ingeniería de Construcción*, Vol. 25, Nº 3, pág. 419 – 431. *Santiago de Chile, 2010.*
- [7] - Cenzano, M. del C; Ramos Maita, Ángel & Ulo Quispe, C. R. (2011). Inhibición de la reacción álcali – agregado utilizando puzolana natural. *Revista Investigación y Desarrollo*, Vol. 6, Nº 6. *La paz, 2011.*
- [7] - Etxeberria, M. & Vázquez, E. (2010). Reacción álcali sílice en el hormigón debido al mortero adherido del árido reciclado. *Materiales de Construcción*, Vol. 60, Nº 297, pág. 47 – 58. *España, 2011.*
- [8] - Acosta, A. *et. al.* Determinación de la reactividad potencial álcali – agregado por el método acelerado de las barras de mortero. *Universidad Nacional de Asunción. Cátedra de Tecnología de materiales.*
- [9] - Sánchez, M. I., Fías, M. & Rivera, J. (2000). Estudios sobre el calor de hidratación desarrollado en morteros con materiales puzolánicos: naturales y subproductos industriales. *Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja.*
- [10] - Sánchez, M. I., Fías *et. all*, (2000). Investigación sobre la actividad puzolánica de materiales de desecho procedentes de arcilla cocida. *Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja.*
- [11] - Gómez González, A. (2009). Caracterización y utilización de puzolanas como aditivos minerales activos en cementos. Aplicación en viviendas de bajo coste. *Tesis final – Universidad Politécnica de Valencia.*
- [12] - Becker, E. Cemento Pórtland Puzolánico– Características y recomendaciones de uso. *Publicación de Loma Negra C.I.A.S.A.*
- [13] - Becker, E. Reacción álcali – sílice. Introducción al conocimiento y recomendaciones. *Publicación de Loma Negra C.I.A.S.A.*

- [14] - Corella, C. Las zeolitas, mineral del siglo XX. Usos y Aplicaciones. *Publicación no oficial obtenida de: www.monografias.com.*
- [15] – Segarra Forada, J. (2007). Envejecimiento de presas por reacciones expansivas en el hormigón. Capítulo 2: Las reacciones expansivas. *Tesina - Escola Tècnica Superior d'Enginyers de Camins, Canals i Ports de Barcelona - Enginyeria de Camins, Canals i Ports.*
- [16] - Frazao – Ndumba, M. *et. al.* (2007). Caracterización mineralógica de tobas zeolitizadas del yacimiento Caimanes para su beneficio por molienda diferencial. *Revista Minería y Geología, Vol. 23, N° 4.*
- [17] - Norma ASTM C 618 – 05: *Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Pozzolan for Use in Concrete.*
- [18] - Autores varios. Hormigones Especiales. *Publicación de la Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, 2004.*
- [19] - Autores varios. Ese material llamado hormigón. *Publicación de la Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, 2012.*
- [20] – Le, T. T. *et al.* (2011). Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete. *Department of Civil and Building Engineering, Loughborough University.*
- [21] – Conferencia: “Repensando los materiales de base cementicia”. *Dictada por el Ing. Irassar, E. F. El día 25 de Noviembre de 2015. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales – Universidad Nacional de Córdoba.*