

PROPUESTA DE CONCRETO LIGERO AIREADO CURADO EN
AUTOCLAVE DE ALTA RESISTENCIA AL FUEGO.

HAROLD NICOLÁS CORNEJO CÁCERES
JUAN DAVID REINA MIRANDA

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA
2014

PROPUESTA DE CONCRETO LIGERO AIREADO CURADO EN
AUTOCLAVE DE ALTA RESISTENCIA AL FUEGO.

HAROLD NICOLÁS CORNEJO CÁCERES
JUAN DAVID REINA MIRANDA

Trabajo de grado para optar al título de:
Ingeniero Civil

Director:
RICARDO ALFREDO CRUZ HERNANDEZ
Ingeniero Civil, PhD.

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA
2014

DEDICATORIA

A Dios por darme la vida y la oportunidad de crecer y desarrollarme como persona tanto íntegra como profesional.

A mi familia por apoyarme incondicionalmente y ser el motor que me impulsa a ser mejor cada día.

Al ingeniero y director Ricardo Cruz por su experiencia, sus conocimientos, y opiniones para el buen desarrollo de este proyecto.

A la Ingeniera Diana Castellanos por su tiempo y colaboración mientras realizábamos las pruebas a fuego para su correcto análisis y toma de datos.

A los profesores y amigos, los cuales con sus aportes enriquecieron y acompañaron en mi formación como Ingeniero Civil.

A los laboratoristas por su colaboración y apoyo constante.

A los Ingenieros Ludwing Pérez y Julián Herrera, por su ayuda y guía en la etapa investigativa de este trabajo.

Al técnico de mantenimiento el señor Pedro Caldas, quien fue muy amable en ayudarnos en la adecuación del Autoclave para el proyecto.

Nicolás Cornejo

DEDICATORIA

A Dios por haber hecho posible éste momento. Por la gracia que ha derramado en mi vida para guiarme a cumplir mis metas. Gracias por las bendiciones que he recibido hasta hoy y mil gracias por lo que recibiré mañana.

A mis padres por darme todas las herramientas, el amor y el cariño para ser el hombre que soy hoy en día. Gracias por apoyarme en todos los momentos de mi vida.

A todas las personas que creyeron en mí durante mi carrera, y que creen en mí como Ingeniero Civil. Gracias por estar en mi vida y por contribuir a mi crecimiento y formación.

A todos los involucrados en éste proyecto, gracias a ustedes se pudo hacer realidad: Julián Herrera, Miguel Agudelo, Pedro Casas, Jairo Hernández, German Hernández y Diana Castellanos. También, a nuestro Director.

Juan David Reina Miranda

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	16
1. OBJETIVOS	18
1.1.OBJETIVO GENERAL.....	18
1.2.OBJETIVOS ESPECIFICOS	18
2. METODOLOGÍA.....	19
2.1.MATERIALES.....	19
2.2.DOSIFICACIONES.....	21
2.3.FABRICACIÓN Y CURADO DE LAS MUESTRAS.....	22
2.4.ENSAYOS REALIZADOS.....	23
3. ANÁLISIS DE RESULTADOS	27
3.1.DENSIDAD APARENTE Y POROSIDAD	27
3.2.DIFRACCIÓN DE RAYOS X.	28
3.3.EXPOSICIÓN A FUEGO.	30
3.4.RESISTENCIA RESIDUAL.....	35
4. CONCLUSIONES.....	39
BIBLIOGRAFÍA.....	40
ANEXOS.....	43

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Dimensiones del horno.....	23
Figura 2. Ubicación horno y sistema de conexión	24
Figura 3. Ubicación termocuplas en la placa	24
Figura 4. Máquina universal de ensayos INSTRON.	25
Figura 5. Densidades Morteros	27
Figura 6. DRX Cemento (a) y Ceniza Volante (b).....	29
Figura 7. DRX morteros aireados.	29
Figura 8. Curva de Temperatura Muestra Patrón.	30
Figura 9. Curva Temperatura M1-13h.	31
Figura 10. Curva Temperatura M5-6h.	31
Figura 11. Curvas temperatura (Tcent M1, M2, y M3).....	32
Figura 12. Curvas temperatura (Tcent M4, M5, y M6).....	32
Figura 13. Grietas encontradas	33
Figura 14. Fotografía M6-6h, antes (a) y después (b) de fuego.	34
Figura 15. Fotografía muestra patrón, antes (a) y después (b) de fuego.....	34
Figura 16. Fotografía grieta lateral muestra patrón.	34
Figura 17. Efecto de la temperatura en la resistencia residual para las muestras curadas a 6h.	35
Figura 18. Efecto de la temperatura en la resistencia residual para las muestras curadas a 13h.	36
Figura 19. Tipo de falla en M4-6h a T = ambiente (a) y a T = 1000 °C (b).	37

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Granulometría Arena	20
Tabla 2. Dosificaciones mezclas	22
Tabla 3. Porosidad morteros	28
Tabla 4. Resumen del ensayo de Resistencia Residual.....	37

LISTA DE ECUACIONES

	Pág.
Ecuación 1. Reacción Aluminio y Cal Hidratada.....	19
Ecuación 2. Formación de C-S-H.....	21
Ecuación 3. Porosidad – Ley de Boyle.....	25

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. ENSAYO DE RESISTENCIA AL FUEGO (NTC 1480).....	44
Anexo B. CURVAS DE EXPOSICIÓN DE TEMPERATURA DE LAS DIFERENTES DOSIFICACIONES.....	48
Anexo C. COMPOSICIÓN QUÍMICA CENIZA VOLANTE.....	53
Anexo D. FICHA TECNICA CENIZA VOLANTE.....	54

RESUMEN

TÍTULO: PROPUESTA DE CONCRETO LIGERO AIREADO CURADO EN AUTOCLAVE DE ALTA RESISTENCIA AL FUEGO.*

AUTORES: CORNEJO CÁCERES Harold Nicolás

REINA MIRANDA Juan David**

PALABRAS CLAVES: Concreto aireado curado en Autoclave, polvo aluminio, ceniza volante, fuego, resistencia residual, aislamiento, C-S-H.

CONTENIDO:

En busca de un material con alta capacidad aislante, resistente al fuego y con propiedades mecánicas aceptables, se plantearon diferentes dosificaciones para un concreto celular. Éste es un mortero aireado a base de cemento Portland tipo I, arena lavada de río y cal hidratada $(Ca(OH))_2$; para lograr la aireación de la mezcla se empleó el método químico del polvo de aluminio. También, se propuso reemplazar porcentajes de cemento y de agregado fino por una mezcla puzolánica de cal hidratada y ceniza volante con el fin de disminuir la densidad de las diferentes dosificaciones, éste último compuesto proviene de la central termoeléctrica de TermoPaipa. En lugar de las condiciones regulares de curado, las diferentes dosis fueron curadas en Autoclave durante períodos de 6 y 13 horas.

Las propuestas de concreto aireado fueron ensayadas a fuego para medir su capacidad aislante y luego de ser expuestas a altas temperaturas se ensayaron a compresión para conocer la resistencia residual del material. De los resultados obtenidos, se evidencia cómo al disminuir la densidad de una mezcla de concreto se disminuye su resistencia mecánica pero gana capacidad aislante en comparación a una muestra patrón de mortero convencional.

La pérdida de resistencia en los morteros convencionales expuesto a una temperatura de 1000 ° C fue más del 46% de la resistencia inicial, a diferencia del mortero aireado, que tenía una pérdida de resistencia entre 2% y 41% de la resistencia a compresión inicial.

Las condiciones de curado y los materiales utilizados garantizan la formación de C-S-H. Los resultados de las pruebas de difracción de rayos X muestra la formación del mineral silicato cálcico hidratado en las dosis de hormigón celular.

Debido a la composición de las cenizas volantes TermoPaipa, la resistencia a la compresión se reduce mientras se aumenta este segundo producto utilizado.

*Proyecto de grado, Modalidad Investigación

**Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director de proyecto. Ing., Ph.D. Ricardo Alfredo Cruz Hernández.

ABSTRACT

TITLE: AUTOCLAVED AERATED CONCRETE PROPOSAL OF HIGH FIRE RESISTANCE.*

AUTHORS: CORNEJO CÁCERES Harold Nicolás

REINA MIRANDA Juan David**

KEYWORDS: Autoclaved aerated concrete, aluminum powder, fly ash, fire, residual strength, insulation, C-S-H.

CONTENT:

While searching for a material with high insulation, fire resistance and acceptable mechanical properties, different cellular concrete designs have been established. This aerated concrete is made of Portland cement type I, river sand and hydrated lime $(Ca(OH))_2$; to obtain the aeration of the mixture, the aluminum powder method was used. In order to decrease the density of the different doses, it was established to replace percentages of cement and fine aggregate with a pozzolanic mixture of fly ash and hydrated lime. The fly ash comes from the thermoelectric station of TermoPaipa. Instead of regular curing conditions; the different doses were cured in an Autoclave for periods of 6 and 13 hours.

The different aerated concrete doses were fire tested to measure their insulating ability and after being exposed to high temperatures the specimens were tested for compressive residual strength. The results show that density and mechanical strength decrease while insulating capacity improves.

The resistance loss in conventional mortars exposed to a temperature of 1000 ° C was over 46% of the initial strength, unlike the aerated mortar which had a resistance loss between 2% and 41% from the initial strength.

The curing conditions and the materials used guarantees the formation of C-S-H. The test results from X-ray diffraction shows the formation of calcium silicate hydrate mineral in the cellular concrete doses.

Due to the TermoPaipa fly ash composition, compressive strength reduce among the increases of this second hand product.

*Bachelor Thesis. Investigation mode.

**Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director de proyecto. Ing. M. Sc., Ph.D. Ricardo Alfredo Cruz Hernández.

INTRODUCCIÓN

El concreto es un material de excelente desempeño mecánico a la compresión, capaz de retener una capacidad portante aceptable cuando se ve expuesto a diferentes situaciones extremas por un tiempo determinado, cuando se excede el tiempo o la temperatura de exposición, el concreto sufre de “spalling” perdiendo resistencia drásticamente, proceso por el cual ocurre un desprendimiento como resultado del impacto térmico y el cambio de estado del agua intersticial aproximadamente a los 100-150 °C [1]. A diferencia de otros materiales, éste es incombustible y no emite humos tóxicos cuando es expuesto a altas temperaturas, lo que permite operaciones de rescate y reduce el riesgo de colapso estructural [2]. Narayanan y Ramamurthy [3] han propuesto el uso de hormigón celular en espacios de evacuación de vidas humanas debido a su alto grado de aislamiento térmico, logrado gracias a su estructura de poros y baja densidad. Además de su alta capacidad aislante, el concreto celular es de gran ayuda en incendios porque sus poros sirven también para capturar humo y gases tóxicos producidos durante un evento de esta naturaleza [4].

Los primeros concretos ligeros se produjeron con agregados de baja densidad, como la pumita producida en los volcanes. Luego, en 1917, el fabricante de ladrillos Stephen J. Hayde consiguió expandir pizarras y arcillas con el fin de obtener un agregado liviano de baja densidad, mediante un horno tubular giratorio [5]. Para la década de los 60's se obtuvo un nuevo tipo de concreto ligero más liviano que sus predecesores y con un alto aislamiento térmico, adicionando espumas a la mezcla regular de morteros, naciendo así los concretos aireados o celulares [6]. En el contexto actual, existen tres tipos de concretos ligeros: los concretos sin finos, los concretos con agregados de peso ligero y los concretos aireados o celulares. Éstos últimos poseen una alta porosidad y una muy baja densidad, estas propiedades se logran mediante aireación química o por mezclas espumosas [7].

En el siguiente proyecto se trabajará con un concreto celular obtenido con el método de aireación química específicamente de la reacción del polvo de aluminio con la cal hidratada, ésta libera hidrógeno en estado gaseoso formando así las cárcavas de aire al interior de la pasta de mortero [7,16].

El C-S-H antiguamente era conocido como “gel de tobermorita” por su similitud al compuesto natural producto de la alteración hidrotermal de las rocas de carbonato de calcio [24]. Stephen Brunauer establece en su libro de 1962 la importancia del C-S-H en las mezclas de concreto afirmando que “el gel de tobermorita juega un papel vital determinando las propiedades reológicas de la pasta fresca del cemento Portland, propiedades que determinan la consistencia y manejabilidad de concreto fresco. El gel de tobermorita juega un rol dominante en el fraguado y

endurecimiento de la pasta y determinando la resistencia y la estabilidad dimensional de la pasta endurecida y del concreto” [8].

1. OBJETIVOS

1.1. OBJETIVO GENERAL

Proponer un concreto aireado curado en condiciones de alta presión y temperatura a base de ceniza volante como agregado fino y porcentajes de cal-cemento como aglutinante con propiedades mecánicas aceptables y de alta resistencia contra fuego.

1.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Determinar las condiciones de presión, temperatura y tiempo de curado de las mezclas en el Autoclave.
- Establecer dosificaciones de ceniza volante y Cal hidratada que reemplacen al agregado fino y parte del cemento portland en las mezclas de concreto ligero.
- Determinar las propiedades mecánicas y de resistencia al fuego de las propuestas de concreto ligero.

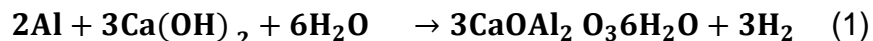
2. METODOLOGÍA

En esta investigación se proponen seis mezclas de concreto celular curado en Autoclave, nombradas así; M1, M2, M3, M4, M5 y M6, cada dosificación fue curada a dos periodos de tiempo diferentes dando un total de doce muestras en diferentes condiciones. Para cada una de las mezclas de concreto celular se examinaron las propiedades de resistencia compresión según la normal NTC 220 [9], aislamiento térmico según la norma ISO 834 [10] y resistencia residual después de estar expuestas al fuego [9].

Para aligerar el material, se plantea reemplazar porcentajes del cemento Portland tipo I y del agregado fino –arena- por una mezcla puzolánica entre cal hidratada y ceniza volante.

Para garantizar la existencia de C-S-H en el concreto elaborado, las probetas serán curadas en un Autoclave, el cual genera condiciones de alta presión y temperatura, de ésta manera se cataliza la reacción entre el hidróxido de cal libre y el sílice presente en la ceniza volante con agua y así obtener el silicato monocálcico hidratado presente en cementos convencionales [7].

La reacción entre el polvo de aluminio y la cal hidratada libera burbujas de hidrógeno produciendo cárcavas de aire internas en el concreto, logrando así un material cerámico, aireado y de baja densidad. En la Ec. (1) se puede observar los subproductos de dicha reacción:



2.1. MATERIALES

Los materiales usados en este proyecto de investigación fueron el cemento Portland tipo I marca Ultracem gris que cumple con la norma NTC 121 [11], arena lavada de río proveniente de Medellín como agregado fino y cal hidratada $(Ca(OH))_2$. La ceniza volante utilizada es de clase F proveniente del proceso de quema de carbón de la central de generación Térmica de Termopaipa, ubicada en el Kilómetro 3 vía Paipa – Tunja.

La granulometría del agregado fino utilizado se muestra en la Tabla 1 realizada según la norma NTC 77 [12]. De la granulometría se obtiene un coeficiente de uniformidad con valor mayor a 6 y un coeficiente de curvatura con un valor entre 1 y 3; y según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) el agregado empleado es una arena bien gradada (SP). El tamaño máximo de las partículas de arena usado en este estudio fue de 4.75 mm.

Tabla 1. Granulometría Arena.

GRAVEDADES ESPECÍFICAS		FINO				
	FINO	PESO UNITARIO SUELTO	1.41 kg			
REAL	2.69	PESO UNITARIO COMPACTADO	1.58 kg			
APARENTE	2.53	ABSORCIÓN %	2.0			
APARENTE S S S	2.66	PORCENTAJE DE VACÍOS %	37			
MATERIA ORGÁNICA:		FINO #1	ICONTEC 127			
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO:						
FINO	TAMIZ		PESO RETENIDO	% RETENIDO	% RETENIDO ACUMULADO	% QUE PASA
	4	4.76	89	8.90	8.90	91.10
	8	2.36	190.6	19.06	28.50	71.50
	16	1.18	215.3	21.53	50.03	49.97
	30	0.6	183.1	18.31	68.34	31.66
	50	0.3	138.6	13.86	82.20	17.80
	100	0.15	98.3	9.83	92.03	7.87
	FONDO	0.075	84.3	8.43	99.92	0.08
	TOTAL		999.2	99.92	PESO MUESTRA	1000 gr
MODULO DE FINURA	3.3	Cu	9.230786			
D60	1.692308	Cc	1.034988			
D30	0.566667					
D10	0.183333					

Para la elaboración de las probetas el tamaño máximo de las partículas de ceniza usado fue de 37 μm , porque es el tamaño más representativo del material enviado por TermoPaipa (Anexo E).

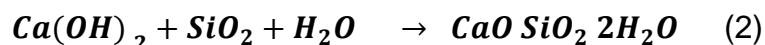
La absorción de la ceniza volante fue medida en el laboratorio siguiendo el procedimiento descrito en la NTC 237 [13], Midiendo el peso de la ceniza saturada y superficialmente seca (S) y el peso seco (A) se obtuvo:

$$\text{Absorción, \%} = 10.7 \%$$

2.2. DOSIFICACIONES

Las diferentes dosificaciones parten del diseño de mezcla utilizado para la muestra patrón de concreto convencional, el cual se realizó para un mortero de 17.5 MPa [14] manteniendo las proporciones 1:3.11 en volumen cemento:arena para la muestra patrón con relación agua/cemento de 0.5 realizando corrección por humedad del agregado fino. En las seis mezclas realizadas en este estudio, tres fueron sustituyendo el cemento Portland tipo I (C) por una mezcla puzolánica entre ceniza volante y cal hidratada (MP), y otras tres fueron sustituyendo la arena del agregado fino (A) por una mezcla puzolánica entre ceniza volante y cal hidratada (MP).

Para las muestras M1, M2, M3 la relación C:MP fue de 55:45, 25:75 y 85:15 de porcentaje en peso respectivamente. Para las muestras M4, M5 y M6 la relación A:MP fue de 55:45, 25:75 y 85:15 de porcentaje en peso respectivamente. La relación agua/sólidos en las primeras cuatro dosificaciones es de 0.24. Las muestras M5 y M6 requieren de una mayor cantidad de agua debido a la absorción de la ceniza volante, relación agua/sólidos de 0.45 y 0.29 respectivamente, porque por el contenido de carbón remanente y su porosidad generan un efecto absorbente [15]. La cantidad de sólidos en la relación agua/sólidos hace referencia al peso combinado del cemento, arena, ceniza y cal hidratada. La cantidad en las diferentes dosificaciones de ceniza volante y cal hidratada es obtenida de la evaluación estequiométrica de la siguiente reacción química Ec. (2), para así garantizar la formación de C-S-H, requerida en los morteros:



Finalmente la cantidad de polvo de aluminio que fue añadido en las diferentes mezclas es de un 0.2% respecto al peso de los sólidos [16]. Las diferentes cantidades de las dosificaciones se pueden observar en la Tabla 2.

Tabla 2. Dosificaciones mezclas

Materiales	Cantidades de las dosificaciones*						
	Patrón	M1	M2	M3	M4	M5	M6
		55:45 C:MP	25:75 C:MP	85:15 C:MP	55:45 A:MP	25:75 A:MP	85:15 A:MP
Cemento (kg/ m³)	530	292	133	451	530	530	530
Ceniza Volante (kg/ m³)	-	94,14	157	31,38	255	426	85,12
Arena (kg/ m³)	1438	1438	1438	1438	335	359	1222
Cal Hidratada (kg/ m³)	-	127	204	49,9	790	535	116
Polvo de Aluminio (kg/ m³)	-	3,88	3,84	3,92	3,78	3,68	3,88
Agua (Kg/ m³)	270	468	464	473	566	848	456

*Cantidades calculadas para en volumen total de 1 l de mezcla.

2.3. FABRICACIÓN Y CURADO DE LAS MUESTRAS.

Las cantidades de material utilizadas fueron pesadas y mezcladas adecuadamente para que toda la muestra quedase uniforme y así agregar la cantidad agua requerida por el diseño de mezcla. Después, la pasta fue vertida en los moldes, se fundieron dieciséis cubos (50 x 50 x 50 mm) y seis placas de dimensión (100 x 100 x 40 mm) para cada dosificación.

Las probetas fueron dejadas a temperatura ambiente por un tiempo de fraguado de 24 horas antes de ser desmoldadas, luego de desmoldadas las diferentes muestras fueron puestas a curar en un Autoclave. La máquina fue configurada para alcanzar una temperatura de 150 °C y una presión de 180 psi. La mitad de las probetas (8 cubos y 3 placas) fueron curadas a un tiempo de 6 horas y las probetas restantes fueron curadas a un tiempo de 13 horas de acuerdo al proceso industrializado mostrado por Short y Kinniburgh [7].

Para generar dicha presión al interior del Autoclave, se agrega agua dentro de la cámara principal para que sea calentada y evaporada. Como el Autoclave está cerrado herméticamente, las condiciones de humedad desarrolladas son constantes, lo que permite alcanzar altas temperaturas durante el curado sin afectar las condiciones de humedad [17]. El agua usada, debe ser destilada para que al evaporarse, ésta no contamine o corroa las probetas y el interior de la máquina. Después del proceso de curado en el Autoclave, los especímenes se dejaron por 15 días a temperatura ambiente para luego ser ensayados tanto a compresión como a fuego.

2.4. ENSAYOS REALIZADOS

El ensayo de resistencia a fuego consiste en tomar una placa (100 x 100 x 40 mm) y exponer una cara a las llamas y medir la temperatura en la parte posterior del espécimen. La prueba se hizo a partir de la norma ISO 834 [10], siguiendo la curva de carga de fuego correspondiente. El ensayo se hace para 3 placas de la misma dosificación y de igual tiempo de curado para obtener valores más confiables.

El grado de alteración que se produce en un material expuesto al fuego depende fundamentalmente de la temperatura alcanzada, del tiempo de exposición, de la composición del material y del modo de enfriamiento [18].

El tiempo de exposición para las placas fue de 2 horas siguiendo la curva estándar ISO 834 [10], alcanzando una temperatura de 1029 ° C a los 7200 (seg). Se determinó esa duración para el ensayo debido a que en ese momento se empezaban a producir grietas sobre la cara expuesta del espécimen.

Para llevar a cabo la prueba a fuego, se empleó un horno con dimensiones iguales a las mostradas en la Figura 1. Se hizo de ésta manera para garantizar que sólo la cara frontal de la placa de concreto celular fuera la expuesta a la llama, y previniendo que en la parte trasera se modificara la lectura de la temperatura. El horno está hecho de ladrillos refractarios con una pega preparada con arena sílice, cemento, caolín, agua y melaza.

Figura 1. Dimensiones del horno

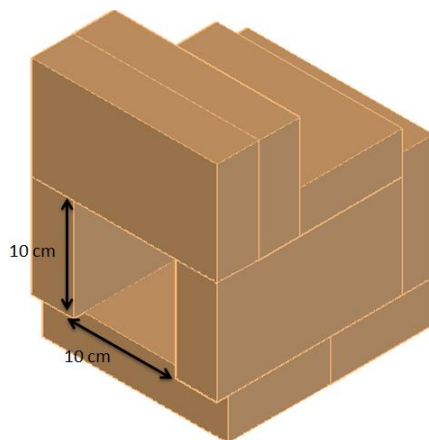


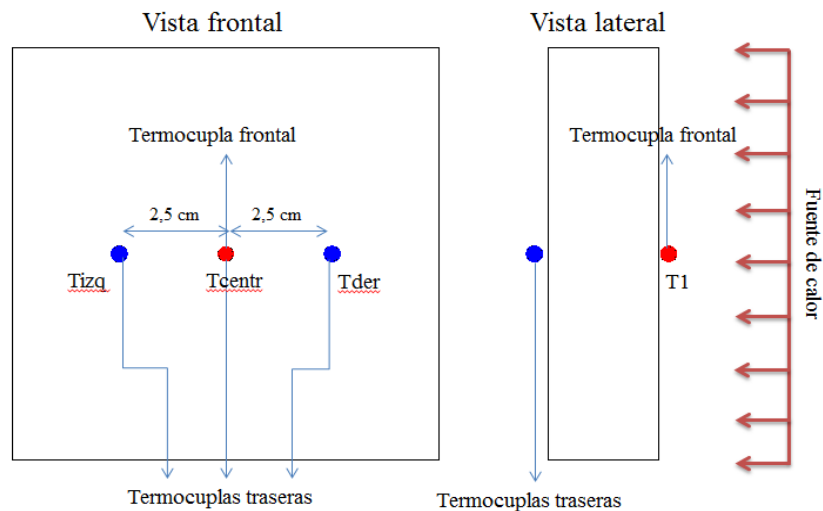
Figura 2. Ubicación horno y sistema de conexión



La llama se suministra directamente de un quemador alimentado con gas propano regulado manualmente observado en la Figura 2. Al finalizar la prueba de fuego se dejaron enfriar las probetas por un tiempo de 1 hora dentro del horno, antes de sacarlas y realizar un análisis cualitativo.

La adquisición de datos durante la prueba a fuego se realizó con termocuplas tipo K, ubicadas como se muestra en la Figura 3 para el registro de los datos se utilizó el software “Adquisicion4termocuplas” elaborado por el grupo de investigación en materiales y estructuras de construcción (INME) de la escuela de Ingeniería Civil y el cual se trabaja en la plataforma Labview 8.5.

Figura 3. Ubicación termocuplas en la placa



Para la medición de la porosidad de las probetas fabricadas fue necesario el cálculo del volumen de sólidos o granos, seguido de la medición del volumen total de la misma. Según la ecuación (3) de la Ley de Boyle [19]:

$$\text{Porosidad}(\%) = \left(1 - \frac{V_{\text{granos}}}{V_{\text{total}}}\right) * 100 \quad (3)$$

Para evaluar la resistencia a compresión y resistencia residual del concreto celular propuesto se utilizaron ocho cubos de (50 x 50 x 50 mm) de los cuales cada dos fueron evaluados a una temperatura máxima diferente siguiendo la curva de carga ISO 834 [10]: Temperatura ambiente, 600 °C, 800 °C y 1000 °C, siguiendo la curva de carga de fuego ISO 834 [10]. Las probetas expuestas hasta una temperatura de 600 °C y 800 °C tuvieron un periodo de enfriamiento de 30 minutos y de 1 hora para las probetas expuestas a 1000 °C. Luego fueron llevados a la falla en la máquina de compresión según la norma NTC 220 [9]. Esta prueba también se aplicó a las probetas de muestra patrón.

Este estudio se lleva a cabo en probetas ensayadas a 15 días después de curado en Autoclave, los resultados cambiarán a medida que transcurre el tiempo, debido a que la actividad puzolánica de la ceniza se activa a edades mucho mayores [23].

La prueba de compresión fue llevada a cabo en la máquina universal de ensayos INSTRON mostrada en la Figura 4.

Figura 4. Máquina universal de ensayos INSTRON.



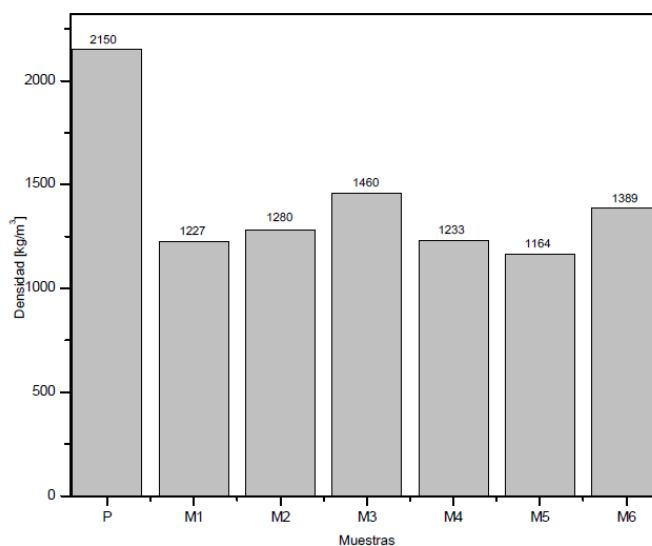
Para la identificación de las fases de los morteros evaluados en esta investigación fue utilizado un difractómetro de polvo marca BRUKER modelo D8 ADVANCE con geometría DaVinci. Las muestras analizadas fueron M1, M2 y M3, para ambas condiciones de curado de cada muestra, dado que son los morteros con menor porcentaje de cemento, el cual fue sustituido por ceniza volante y cal hidratada. Con ello se busca comprobar la formación de C-S-H luego del proceso de curado en Autoclave. También, se llevaron a cabo otros dos análisis por difracción de rayos X (DRX) para dos de las materias primas utilizadas: cemento Portland tipo I y ceniza volante. Las muestras fueron pulverizadas en un mortero de ágata y llevadas a un tamaño de $38\ \mu\text{m}$ (400 mesh). El espécimen seleccionado de cada muestra fue montado en un portamuestras de polimetilmetacrilato (PMMA) mediante la técnica de llenado frontal.

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1. DENSIDAD APARENTE Y POROSIDAD

Las densidades aparente para las diferentes muestras evaluadas en este proyecto se encuentran señaladas en la Figura 5. Se puede observar una gran diferencia entre las densidades de la muestra patrón (P) de mortero convencional con las densidades de las muestras con ceniza volante y cal hidratada, esto se debe al aumento del volumen para la misma masa producido por la reacción del polvo de aluminio junto con la cal hidratada. Esto infiere en gran medida la resistencia a compresión.

Figura 5. Densidades Morteros



En la Tabla 3 se muestran las porosidades de cada dosificación a diferentes periodos de curado. No se aprecia una influencia notoria del tiempo de curado sobre la porosidad, esto ocurre porque la aireación de la mezcla se logra en las primeras horas de fabricación durante el tiempo de fraguado. También se puede observar que las muestras M4, M5 y M6, donde la arena fue sustituida por la mezcla puzolánica entre cal hidratada y ceniza volante, presentan una mayor porosidad respecto a las mezclas con sustitución de cemento.

Tabla 3. Porosidad morteros

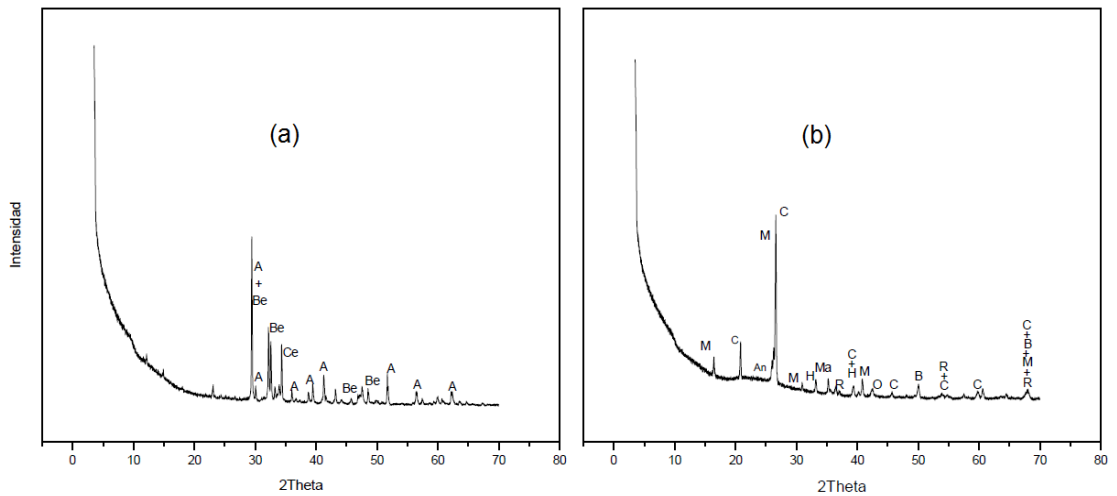
Muestra	Vgranos	Voltotal	Porosidad [%]
M1-6h	85	400	78,75
M1-13h	100,6	400	74,85
M2-6h	74,9	400	81,28
M2-13h	83,9	400	79,03
M3-6h	92,7	400	76,83
M3-13h	99,1	400	75,23
M4-6h	45,9	400	88,53
M4-13h	48,1	400	87,98
M5-6h	16,3	400	95,93
M5-13h	34,6	400	91,35
M6-6h	56,6	400	85,85
M6-13h	69,4	400	82,65

3.2. DIFRACCIÓN DE RAYOS X.

Los resultados de los ensayos de difracción de rayos X se muestran a continuación en gráficas. Las cuales muestran los difractogramas de las materias primas utilizadas para la fabricación de las diferentes dosificaciones y también el correspondiente a las dosificaciones M1, M2, y M3 para ambos tiempos de curado.

En la figura 6, se puede observar la existencia de las fases características del cemento base; Alita (A) en $2\theta = 29.4, 32.09, 39.4, 43.3, 57.5$; Belita (Be) en $2\theta = 29.06, 33.03, 59.85$ y Celita (Ce) en $2\theta = 33.93$. Para la ceniza volante se evidencio la aparición de las fases características como son el Cuarzo (C) en $2\theta = 20.75, 26.53, 59.85$; Omphacita (O) en $2\theta = 42.4$; Mullita (M) en $2\theta = 26.2, 16.34, 40.78$; Hematita (H) en $2\theta = 33.14$; Magnetita (Ma) en $2\theta = 35.52$; Berlinita (B) en $2\theta = 49.64$; Rutilo (R) en $2\theta = 54.34, 36.06$; y Anatasa (An) en $2\theta = 25.71$. El pico más pronunciado representa el cuarzo lo que indica una gran cantidad de SiO_2 en la ceniza [22].

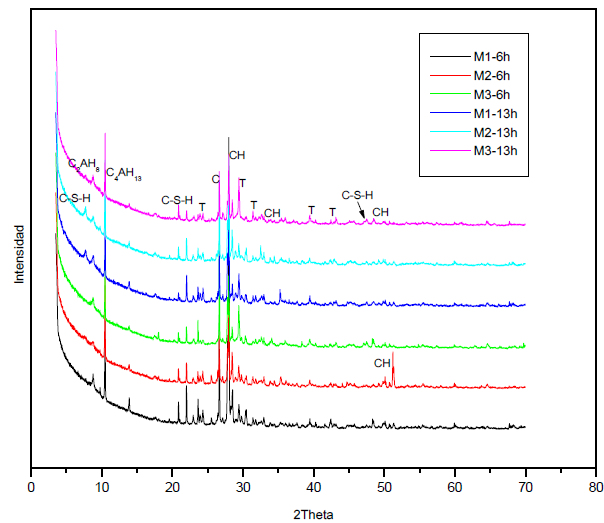
Figura 6. DRX Cemento (a) y Ceniza Volante (b)



Fuente: Elaboración propia a partir de los difractogramas del laboratorio de DRX – Sede UIS-Guatiguará.

En la Figura 7 se puede apreciar la presencia de Tobermorita ($x\text{CaOSiO}_2\cdot z\text{H}_2\text{O}$) en los morteros fabricados, lo que comprueba que con el proceso de curado en Autoclave, los morteros aireados obtuvieron en su composición minerales que se presentan también en morteros convencionales.

Figura 7. DRX morteros aireados.



Fuente: Elaboración propia a partir de los difractogramas del laboratorio de DRX – Sede UIS-Guatiguará.

3.3. EXPOSICIÓN A FUEGO.

En la Figura 8 se puede observar la curva de temperatura de la muestra patrón y en la Figura 9 y 10 se muestra la curva de temperatura de la dosificación M1 curada a 13 horas y de la dosificación M5 curada a 6 horas respectivamente.

La placa M1-13h registró una temperatura media en la cara no expuesta a fuego de 202,5 °C, 48,9°C por debajo de la temperatura registrada en la muestra patrón, siendo ésta la placa de menor aislamiento. Por otro lado, la M5-6h fue la muestra de mayor aislamiento porque registró una temperatura media en su cara no expuesta de 106,3 °C, 145,1 °C por debajo de la muestra patrón. Cabe mencionar que la temperatura en la cara frontal de todas las muestras al final de la prueba fue de 1029 °C.

Figura 8. Curva de Temperatura Muestra Patrón.

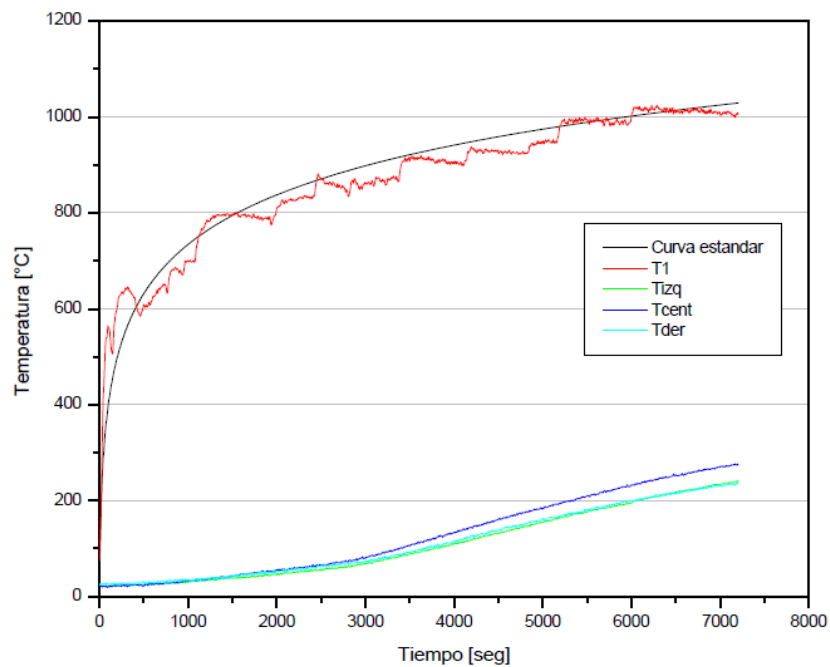


Figura 9. Curva Temperatura M1-13h.

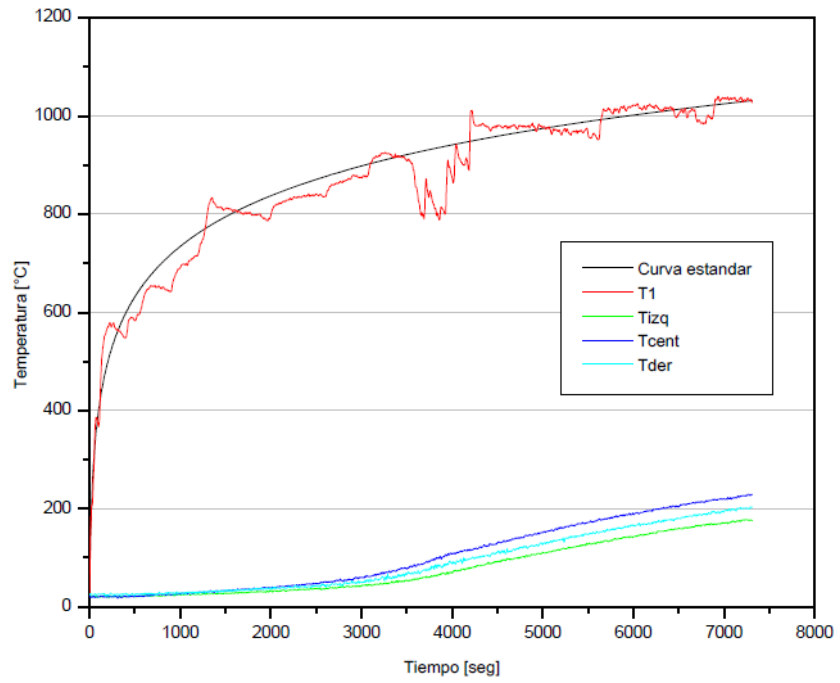
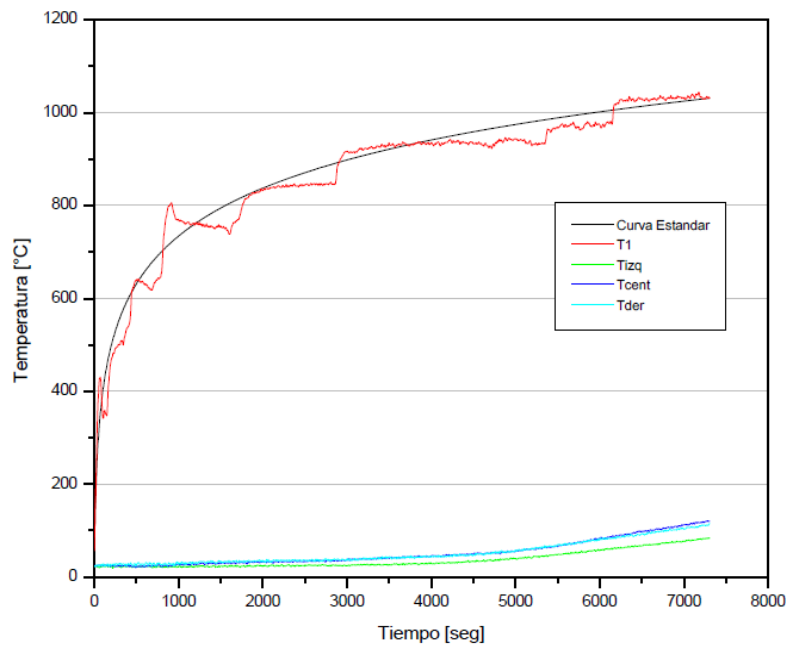


Figura 10. Curva Temperatura M5-6h.



En la Figura 11 y 12 se muestran las gráficas resumen de las temperaturas medidas por la Termocupla Tcent de todas las placas de las muestras M1, M2, M3 y M4, M5, M6 respectivamente. La Termocupla Tcent es la que recibe el foco de la llama desde el lado posterior de la placa o cara no expuesta ubicada en el centro de ella.

Figura 11. Curvas temperatura (Tcent M1, M2, y M3)

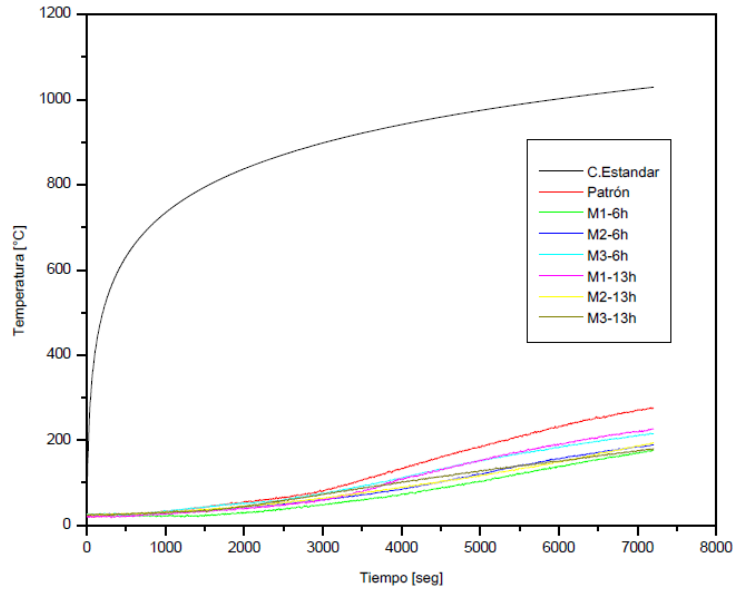
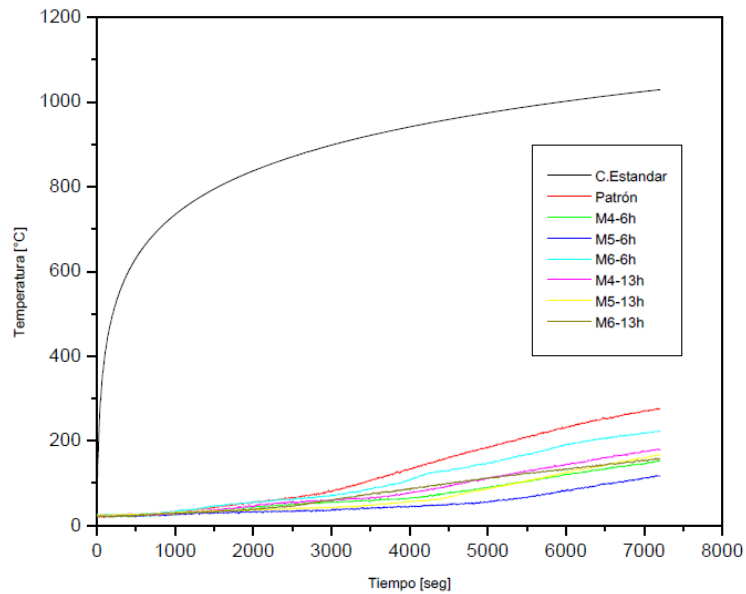


Figura 12. Curvas temperatura (Tcent M4, M5, y M6)



En la Figura 11 y 12 se puede observar un mayor aislamiento en las muestras propuestas de mortero aireado respecto a la muestra patrón de mortero convencional, ya que son materiales de menor densidad y mayor porosidad, comprobándose que un cuerpo con una estructura celular (cárcavas de aire internas) logra disipar el calor de una manera más eficiente a un cuerpo totalmente sólido.

Los registros fotográficos de las placas M5 y M6 de concreto celular curados a 6 h se observan en la Figura 13 y 14, y para la muestra patrón en la Figura 15.

Las grietas en la placa M5 evidenciadas en la Figura 13 son producidas luego de una exposición de 2 horas siguiendo la curva ISO 834 y de una temperatura mayor a los 1000 °C, el deterioro del material es solamente superficial. Éste comportamiento se da porque la estructura de poros del concreto aireado permite una liberación más controlada del vapor de agua evitando mayores daños en él.

En la Figura 14 y 15 se muestra el cambio de coloración en la cara expuesta al fuego, su color natural cambia a un amarillo oscuro en ambas placas. Una diferencia cualitativa del efecto del fuego sobre el material está en el agrietamiento producido, para la muestra M6-6h, que posee una estructura más porosa, no presenta gran cantidad de grietas. Por el contrario, en la muestra patrón se produjo una fisura con una profundidad de 3 cm, en la parte lateral de la placa, ver Figura 16.

Figura 13. Grietas encontradas

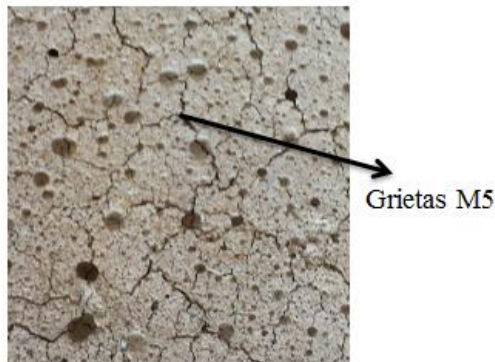


Figura 14. Fotografía M6-6h, antes (a) y después (b) de fuego.



Figura 15. Fotografía muestra patrón, antes (a) y después (b) de fuego.

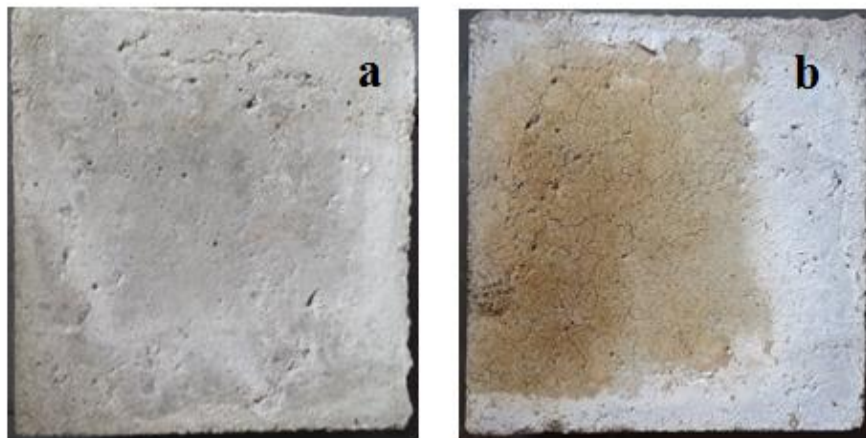


Figura 16. Fotografía grieta lateral muestra patrón.



3.4. RESISTENCIA RESIDUAL

Para mostrar los resultados obtenidos en la prueba de resistencia a compresión a las probetas cúbicas después de estar expuesta a fuego durante el periodo de 2 horas se implementaron dos gráficas diferenciadas por tiempo de curado mostradas en la Figura 17 y Figura 18 donde se observa la relación que hay entre la pérdida de resistencia en porcentaje (%) respecto a la Temperatura de exposición.

Figura 17. Efecto de la temperatura en la resistencia residual para las muestras curadas a 6h.

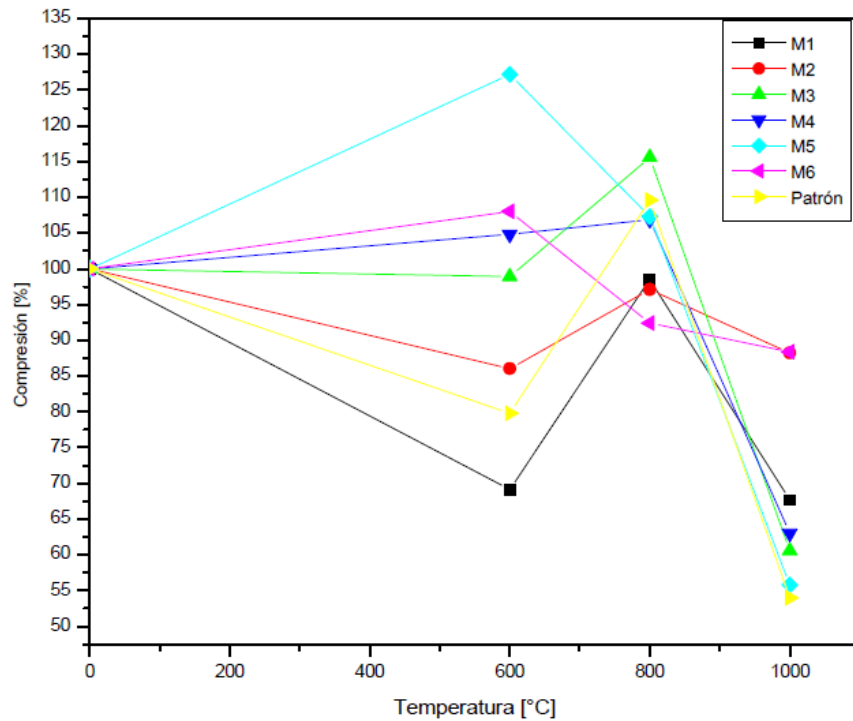
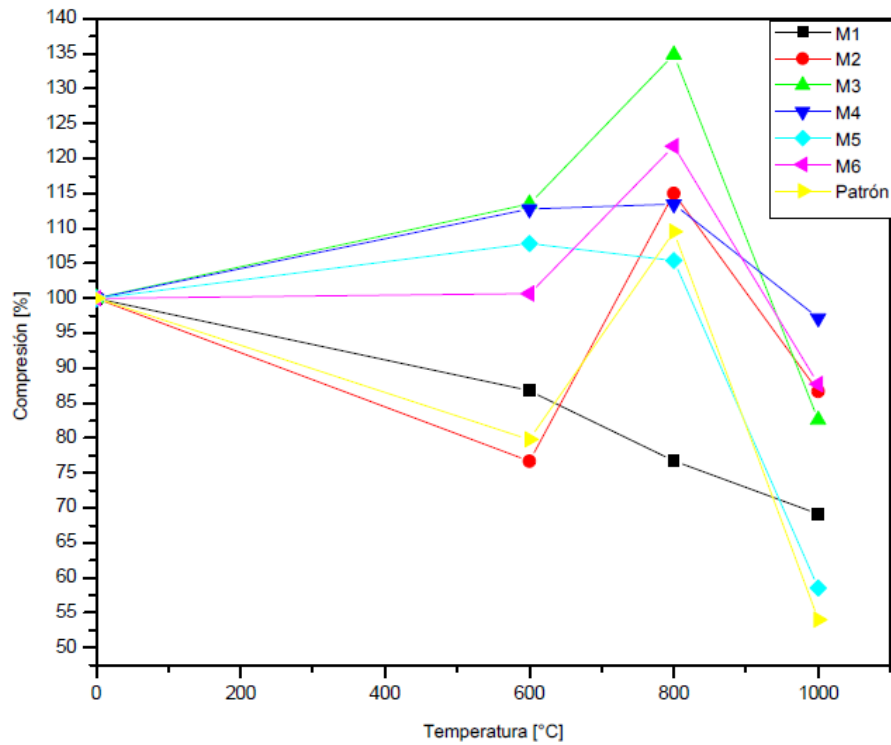


Figura 18. Efecto de la temperatura en la resistencia residual para las muestras curadas a 13h.



Las dosificaciones pasan por diferentes fases a medida que se incrementa la temperatura de exposición. Comportamientos similares se pueden observar en los estudios de D. Cree, M. Green y A. Noumowé [20] y William D.A. Rickard, Arie van Riessen [21]. Se observa que las muestras curadas a 13 horas en Autoclave tienen menos pérdida en su resistencia residual, en comparación a las curadas a 6 horas y a la muestra patrón. Las dosificaciones de concreto aireado indican pérdidas en la resistencia última respecto a su valor inicial entre 2.8% y 40.5%, a diferencia de la muestra patrón que presentó una pérdida de resistencia del 46%.

En la Tabla 4 se muestran los resultados obtenidos del ensayo de resistencia residual de todas las muestras. Al igual que los resultados de la resistencia residual de la muestra patrón de mortero convencional.

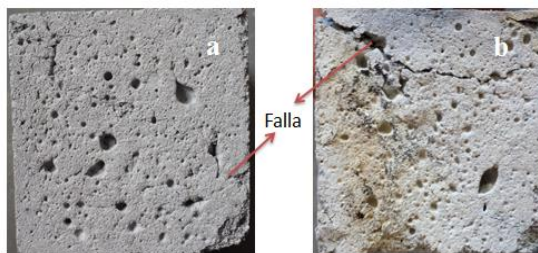
Tabla 4. Resumen del ensayo de Resistencia Residual

	Curado 6 [h]						Curado 13 [h]						Patrón
	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M1	M2	M3	M4	M5	M6	
Temperatura													
-	2.72	2.72	7.28	5.84	4.12	4.48	3.18	2.40	6.20	5.64	4.08	5.88	18.80
600°C	1.88	2.34	7.20	6.12	5.24	4.84	2.76	1.84	7.04	6.36	4.40	5.92	15.00
800°C	2.68	2.64	8.32	6.24	4.42	4.14	2.44	2.76	8.36	6.4	4.30	7.16	20.30
1000°C	1.84	2.40	5.04	3.68	2.45	3.96	2.20	2.08	5.12	5.48	2.50	5.16	10.20

Resistencia en [MPa].

La muestra M3 curada a 6 horas fue la que presentó mayor pérdida en la resistencia, es también, la dosificación con mayor densidad. Se puede determinar que la resistencia residual es una propiedad que depende de la densidad del material, porque entre más densa sea la probeta, mayores daños presentará cuando ésta es expuesta a fuego disminuyendo considerablemente su resistencia, un comportamiento similar se observa en la muestra patrón.

Figura 19. Tipo de falla en M4-6h a T = ambiente (a) y a T = 1000 °C (b).



La falla en los cubos de mortero son fallas de tipo corte diagonal, ver Figura 19. La probeta en la imagen (a) no fue expuesta a fuego, y en la imagen (b) se observa la falla en la probeta expuesta a 1000 °C. La de mayor temperatura de exposición obtuvo una coloración amarilla y un mayor desgaste en la matriz porosa del material, produciendo una grieta de mayor profundidad a una menor carga aplicada.

Las dosificaciones M3 y M6, fueron las de mejor resistencia a compresión a temperatura ambiente por su estructura menos porosa y matriz más densa pero mostraron una reducción en la resistencia a compresión mayor en comparación

con las otras muestras de mortero aireado. Esto sucede porque al no tener una estructura celular tan definida, el vapor producido por el agua evaporada del interior de la probeta durante el proceso de exposición al fuego genera un mayor efecto de spalling y esto produce una reducción en las capacidades portantes del material.

La resistencia de las diferentes dosificaciones se reduce considerablemente entre más contenido de ceniza tenga respecto a la muestra patrón; un análisis realizado en otro estudio [15] determinó que la ceniza clase F de TermoPaipa presenta un bajo contenido de CaO (ver Anexo C), componente necesario para la formación de C-S-H.

4. CONCLUSIONES

- Se determinaron las propiedades aislantes y de resistencia residual de las diferentes dosificaciones de concreto ligero propuestas.
- El grado de agrietamiento inducido por el efecto del spalling en los morteros ligeros aireado es menor al observado en una mezcla de mortero convencional.
- El aislamiento térmico es una propiedad inversamente proporcional a la densidad. Las muestras de mayor densidad mostraron el menor aislamiento.
- La muestra con sustitución de arena y la muestra con sustitución de cemento por cal y ceniza al menor porcentaje presentan una mayor resistencia y un aislamiento aceptable.
- Se evidencia una mayor resistencia mientras menor cantidad de ceniza sea utilizada en su dosificación, esto se debe al tipo de ceniza volante empleada, la ceniza clase F de TermoPaipa presenta un bajo contenido de óxido de calcio (CaO) produciendo pocas cantidades de C-S-H.
- La presencia de poros disminuye la transmisión de calor, gracias al aire dentro de éstos. La muestra de mayor porosidad tuvo el mayor aislamiento.
- La porosidad en los concretos celulares es independiente al tiempo de curado en autoclave. La aireación de la mezcla se logra en las primeras horas de fabricación durante el fraguado.
- El tiempo de curado no influye en la capacidad aislante del material.
- El tiempo de curado influye en el comportamiento mecánico de las probetas, ya que las muestras curadas a 6 h en Autoclave presentaron mayores pérdidas en su resistencia última luego de estar expuestas a altas temperaturas a diferencia de las probetas curadas a 13 horas en Autoclave.
- La resistencia residual es una propiedad que depende de la densidad del material, entre más densa sea la probeta, mayores daños presentará cuando ésta es expuesta a fuego disminuyendo considerablemente su resistencia.
- Los concretos celulares son un material “verde” o amigable con el medio ambiente en procesos productivos a mediana escala, ya que usa residuos de actividades industriales y reduce el uso de cemento.
- Las bajas densidades y alta porosidad de las dosificaciones propuestas son una excelente opción en usos no estructurales porque disminuye la carga muerta de una estructura.

BIBLIOGRAFÍA

Agregados CA. Historia de los agregados livianos. [Publicación en línea]. 2012. <http://www.aliven.com.ve/producto_historia.html>. [Consulta: 17-1-2014]. [5]

AIRCRETE EUROPE. Especificaciones de productos. [Web en línea]. <<http://www.aircrete-europe.com/es/>> [consulta: 1-7-2014]. [4]

BARRERA QUIJANO Juan Carlos. Análisis del comportamiento mecánico del cemento hidráulico adicionado con cenizas volantes provenientes de la central de generación Térmica Termopaipa. Trabajo de grado. Escuela de Ingeniería Química. Universidad Industrial de Santander. 2010. [15]

BARTHELMY David. Tobermorite Mineral Data. Mineralogy Database. [Online Website], 1997. [Consulta 20-7-2014]. [24]

BRUNAUER Stephen. Tobermorite Gel- The Heart of Concrete. Research and Development Laboratories of the Portland Cement Association. Research Departmen Bulletin 138. U.S.A 1962. [8]

Cervantes, A. Nuevas tecnologías en concretos – concretos celulares – concreto reforzado con fibra – concreto ligero estructural. [Documento en Línea]. 2008. <http://administracionytecnologiaparaeldisenio.azc.uam.mx/publicaciones/memorias_cong2008/10.pdf> [Consulta: 17-1-2014]. [6]

CORZO PATIÑO, Laura; GARCÍA DUARTE, Johana. Relación entre resistencia a la compresión, porosidad y la velocidad de pulso ultrasónico en el concreto variando la relación agua/cemento. Trabajo de grado metalurgia UIS. Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería metalúrgica y Ciencia de los Materiales. 2008. [19]

CUESTA G. Harry, LUQUE P. Hector. Evaluación del efecto sobre la velocidad de pulso ultrasónico y resistencia a la compresion del concreto sin refuerzo sometdo a fuego. Trabajo de Grado. Escuela de Ingenieria Metalúrgica y ciencia de materiales. Universidad Industrial de Santander. 2010. [2]

D. Cree, M. Green, A. Noumowé. Residual strength of concrete containing recycled materials after exposure to fire: A review. 2013. [20]

DI MAIO, A, FERREYRA HIRSCHI, E, GIACCIO, G. y ZERBINO, R. Hormigones expuestos a elevadas temperaturas: Evaluación de la permeabilidad y otras propiedades físicas. 1999. pp. 204 [18]

Institute of Experimental Mineralogy Russian Academic of Sciences. Crystallographic and Crystallochemical Database for Mineral and their Structural Analogues. [Online Website]. 1997. [Consulta: 20-7-2014]. [22]

ISO 834 (1975). "Fire Resistance Test – Element of Building Construction". ISO – International Organization of Standardization. [10]

LAFARGE. El curado del hormigón. Folleto Técnico. 2012. [17]

N.Narayanan, K.Ramamurthy. Structure and properties of aerated concrete: a review. India, 2000. [3]

NTC 220 (1995). Determinación de la resistencia de morteros de cemento hidráulico usando cubos de 50 mm ó 50.8 mm de lado. NTC – Norma Técnica Colombiana. [9]

NTC 121 (1995). Cemento Pórtland. Especificaciones físicas y mecánicas. NTC – Norma Técnica Colombiana. [11]

NTC 77 (1995). Método de ensayo para el análisis por tamizado de los agregados finos y gruesos. NTC – Norma Técnica Colombiana. [12]

NTC 237 (1995). Método para determinar la densidad y la absorción del agregado fino. NTC – Norma Técnica Colombiana. [13]

PUENTE CÁRDENAS Gabriela Salomé. Patología de la construcción en mampostería y hormigones. Escuela Politécnica del Ejército. Sangolquí 2007. [1]

RIVERA LÓPEZ, Gerardo Antonio. Concreto Simple. Popayán: Universidad del Cauca. 3ª. Edición, 2006. [14]

Short, A, & Kinniburgh, W. Lightweight concrete, Londres, Inglaterra: C.R. Broocks Limited. 1963. [7]

William D.A. Rickard, Arie van Riessen. Performance of solid and celular structured fly ash geopolymers exposed to a simulated fire. Perth, Australia. 2013. [21]

Wongkeo, W., Thongsanitgarn, P., Pimraksa, K. & Chaipanich, A., (2011). *Compressive strength, flexural strength and thermal conductivity of autoclaved concrete block made using bottom ash as cement replacement materials.* [16]

WU, Tehnsien; CHI, Maochieh; HUANG, Ran. Characteristics of CFBC fly ash and properties of cement-based composites with CFBC fly ash and coal-fired fly ash. Taiwan. 2014. [23]

ANEXOS

ANEXO A. ENSAYO DE RESISTENCIA AL FUEGO (NTC 1480)

Antecedente: International Organization For Standardization (ISO 834)

Objeto del ensayo: Esta norma determina un método de ensayo y fijar un criterio para determinar la resistencia al fuego de diferentes tipos de elementos de construcción, en relación con el tiempo, durante el cual, elementos de dimensiones determinadas que se sometan al ensayo, deben satisfacer los criterios impuestos bajo las condiciones prescritas, durante el periodo de exposición al fuego.

Equipo utilizado

- **Horno:** Capaz de someter un elemento de ensayo a las condiciones de temperatura y presión indicadas.
- **Termopares:** para medir la temperatura interna del horno y de la superficie.

Condiciones del ensayo

- TEMPERATURA

La temperatura en el interior del horno se podrá controlar dentro de los límites especificados en los numerales 6.2.4 y 6.2.5 de acuerdo con la siguiente formula:

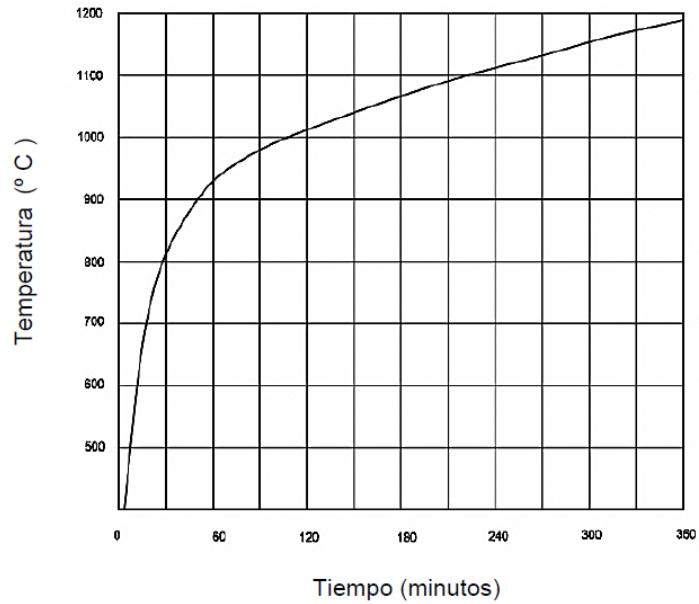
$$T - T_o = 345 * \text{Log}_{10}(8t + 1)$$

Donde:

- t: Tiempo expresado en minutos
T: Temperatura del horno en el tiempo t, medida en grados Celsius.
To: Temperatura inicial del horno, medida en grados Celsius.

La ecuación anterior corresponde al siguiente grafico que representa la curva normalizada tiempo-temperatura.

Curva normalizada tiempo-temperatura



De esta ecuación se obtienen los valores numéricos que se indican en la siguiente tabla:

Tiempo t mín	Elevación de la temperatura del horno (T – T _o) en función del tiempo
5	556
10	659
15	718
30	821
60	925
90	986
120	1 029
180	1 090
240	1 133
360	1 193

Método del ensayo

Elementos de separación. Representados por muestras de ensayo de elementos cuya función es separa espacios, éstos deben calentarse sobre el total de una de sus caras únicamente. Los elementos que tengan que resistir al fuego en una sola dirección, se deben ensayar de acuerdo a ésta.

Los elementos que tengan que resistir al fuego en cualquier dirección, se deben ensayar en la dirección, que a juicio del cuerpo de ensayo ofrezca la menor resistencia. En caso de duda cada cara debe ser ensayada por separado.

Criterios

- AISLAMIENTO

En el caso de elementos con una superficie no expuesta al calor, la temperatura de ésta debe medirse por medio de cinco termopares como mínimo, uno de los cuales se coloca aproximadamente en el centro de la cara y los otros aproximadamente en los puntos medios de las rectas que unen el centro con las esquinas. Otros termopares adicionales deben disponerse tan uniformemente como sea posible sobre la cara no expuesta de la muestra.

Ninguno de estos termopares colocados para medir la elevación media de temperatura, debe fijarse en su posición utilizando elementos metálicos o más cerca de 100 mm al borde de la muestra de ensayo. En el caso de estructuras que comprendan elementos compuestos, la disposición del elemento para el ensayo se debe asegurar de forma que las uniones no coincidan con los puntos de medida antes indicados.

La medida de las temperaturas en estos puntos, sin contar las temperaturas tomadas en las uniones, se considera como la temperatura media de la cara no expuesta.

Temperatura máxima de la cara no expuesta. Como complemento, se debe medir en cualquier momento durante el ensayo. La temperatura en el punto en que aparezca como la más elevada. Esta temperatura no debe emplearse para calcular la temperatura media, excepto el punto en el cual la temperatura corresponde a una de las localizaciones especificadas en el numeral 6.4.3.1, pero se debe tener en cuenta para determinar si se ha cumplido con el criterio de máxima temperatura.

Duración del ensayo

Normalmente, el elemento que se ensaya se calienta en la forma prescrita, hasta que se observe el fallo de alguno de los requisitos exigidos en la prueba, principalmente:

- a) Capacidad de soporte de carga**
- b) Aislamiento**
- c) Estanqueidad**

- RESISTENCIA AL FUEGO

La resistencia al fuego de los elementos para el ensayo, se da por el tiempo, expresado en minutos, de la duración del calentamiento, de acuerdo a la curva normalizada, hasta que dejen de cumplirse las condiciones relativas a capacidad de soporte de carga, aislamiento, estanqueidad, de acuerdo a la función apropiada para cada elemento que se ensaye.

- CRITERIO DE RESISTENCIA AL FUEGO

El criterio funcional de la resistencia al fuego comprende los requisitos relacionados con la capacidad de soporte de carga, para un elemento estructural que tenga soporte carga; aislamiento y estanqueidad, para un elemento de separación, y capacidad de soporte de carga. Así como estanqueidad y aislamiento, para un elemento de separación y de soporte de carga.

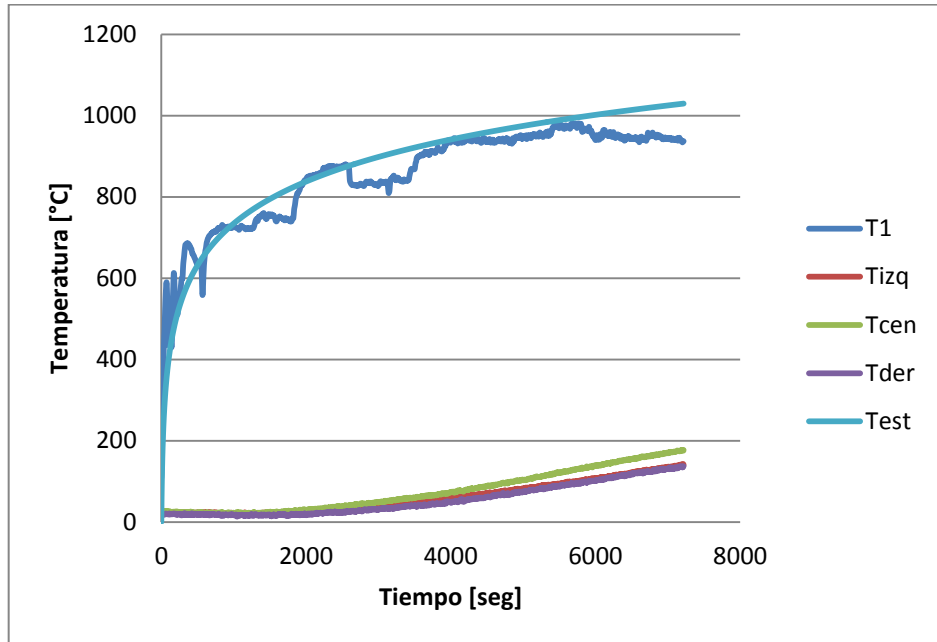
Aislamiento. Para elementos de estructura tales como muros y pisos cuya función es la de separar dos partes del edificio se requiere:

Que la temperatura media de la cara no expuesta del elemento no aumente sobre la temperatura inicial en más de 140 °C.

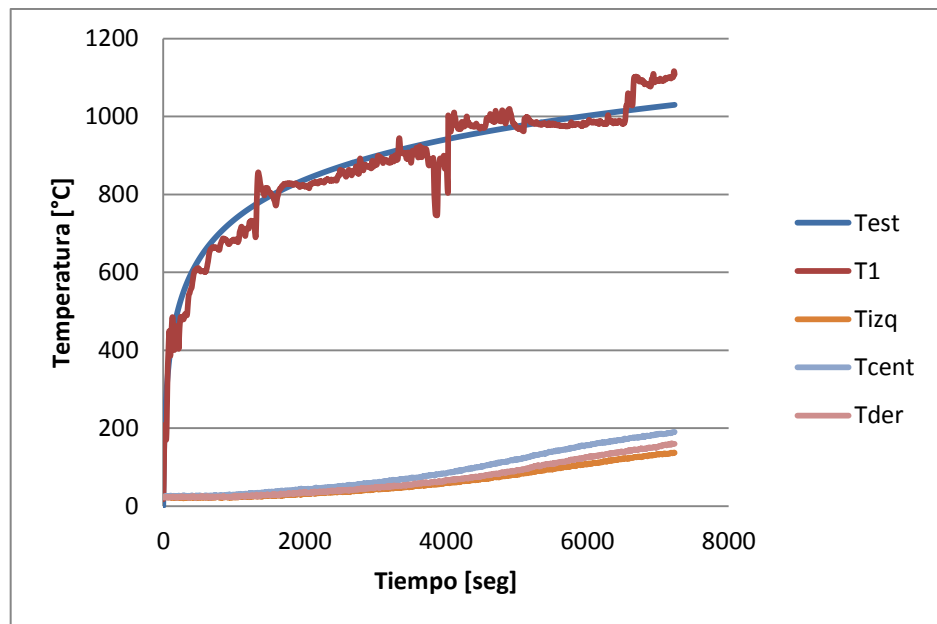
Que la temperatura máxima en cualquier punto de esta cara no exceda a la temperatura inicial en más de 180 °C. y prescindiendo de la temperatura inicial, no debe exceder de 220 °C.

ANEXO B. CURVAS DE EXPOSICIÓN DE TEMPERATURA DE LAS DIFERENTES DOSIFICACIONES.

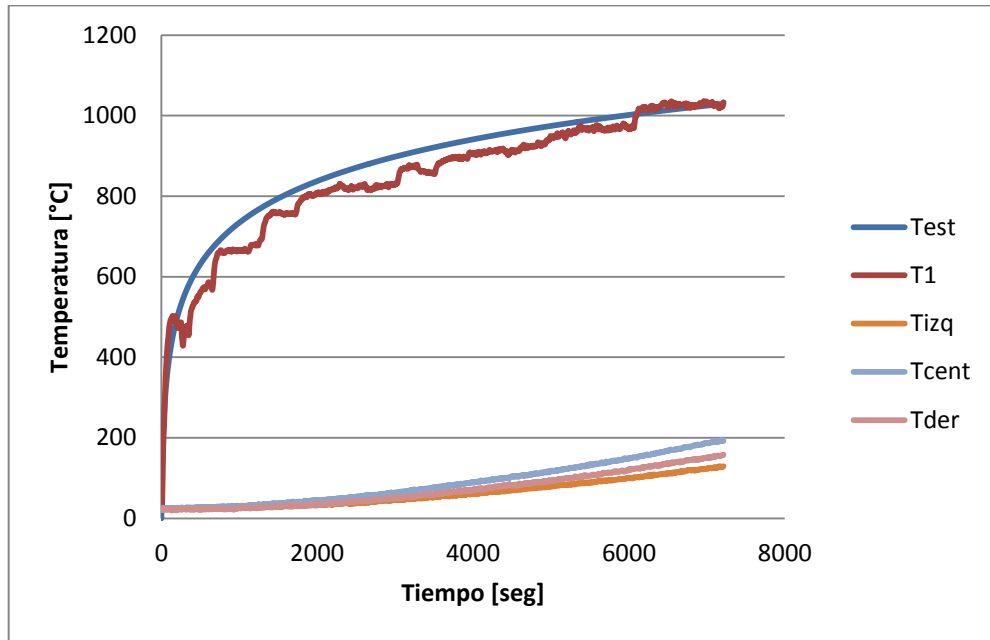
Gráfica Curva de Temperatura M1-6h



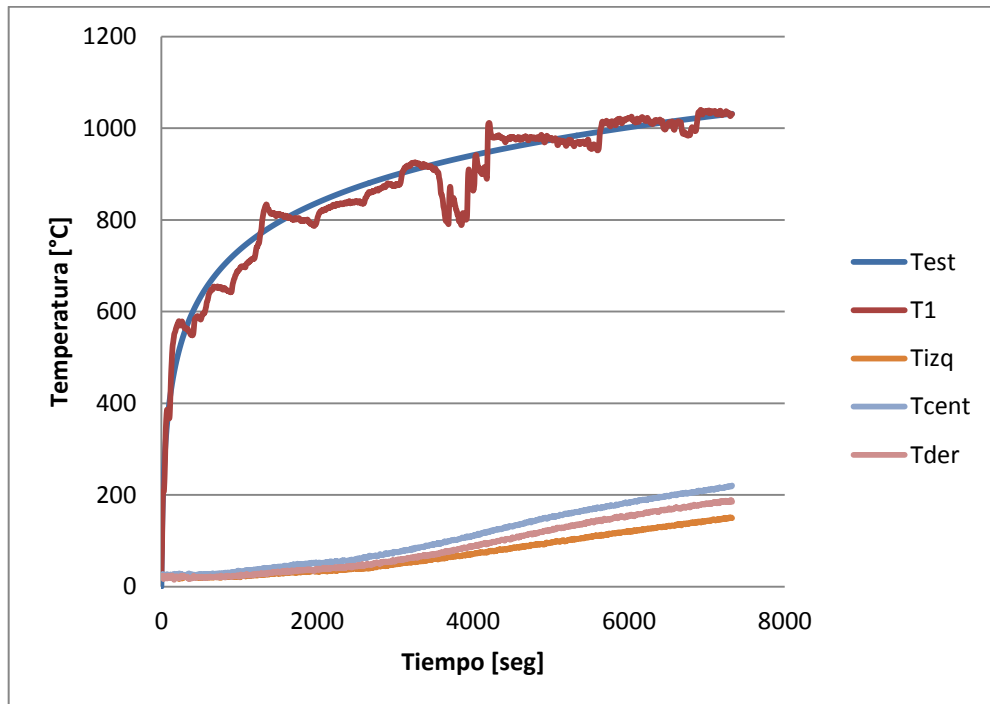
Gráfica Curva de Temperatura M2-6h



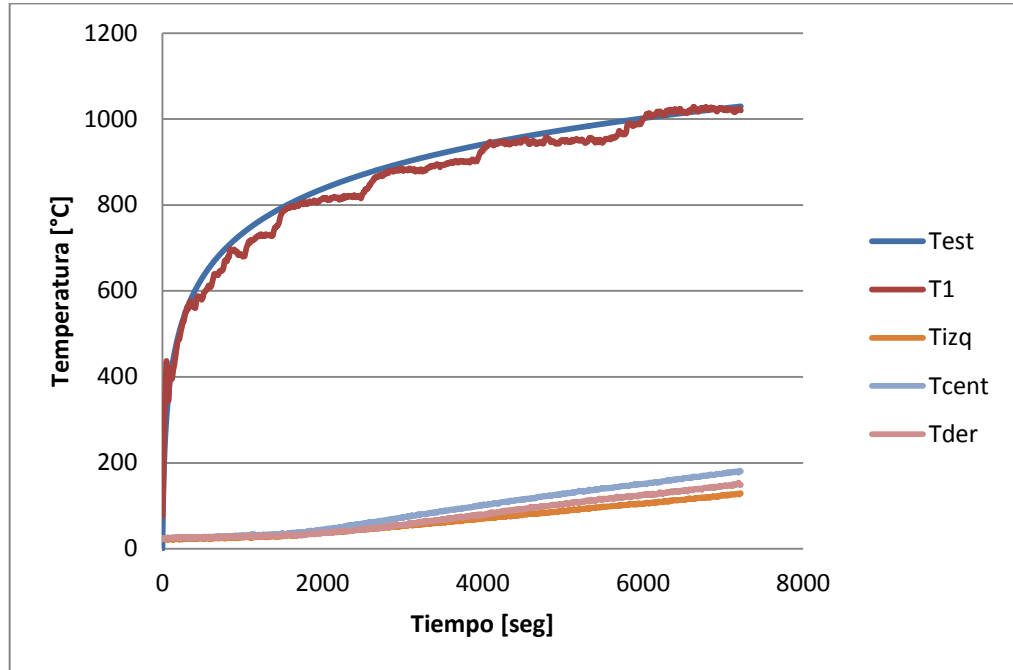
Gráfica Curva de Temperatura M2-13h



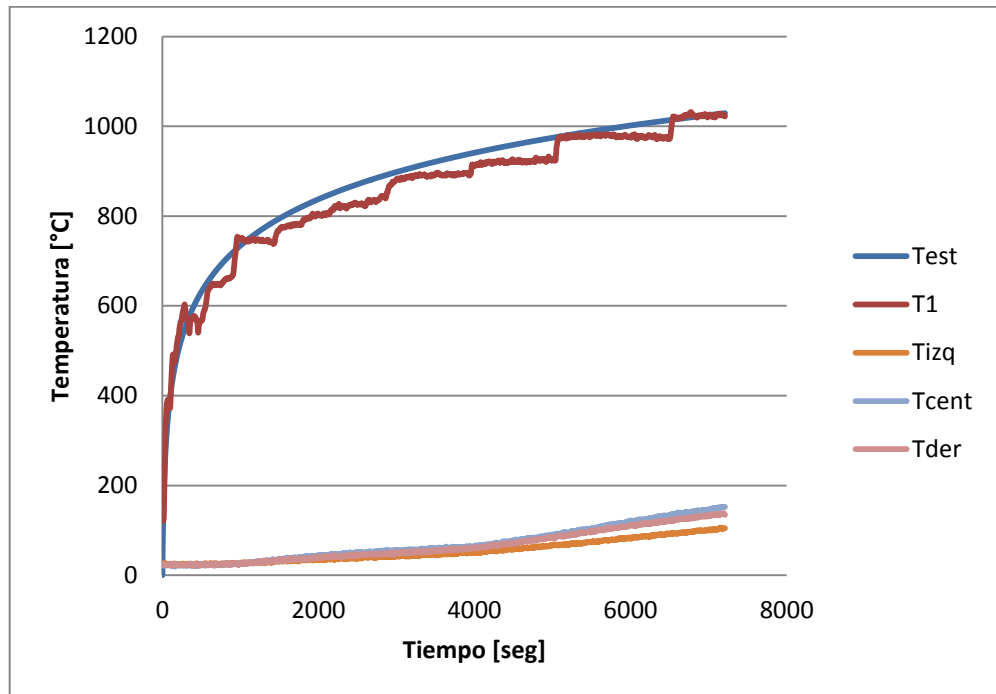
Gráfica Curva de Temperatura M3-6h



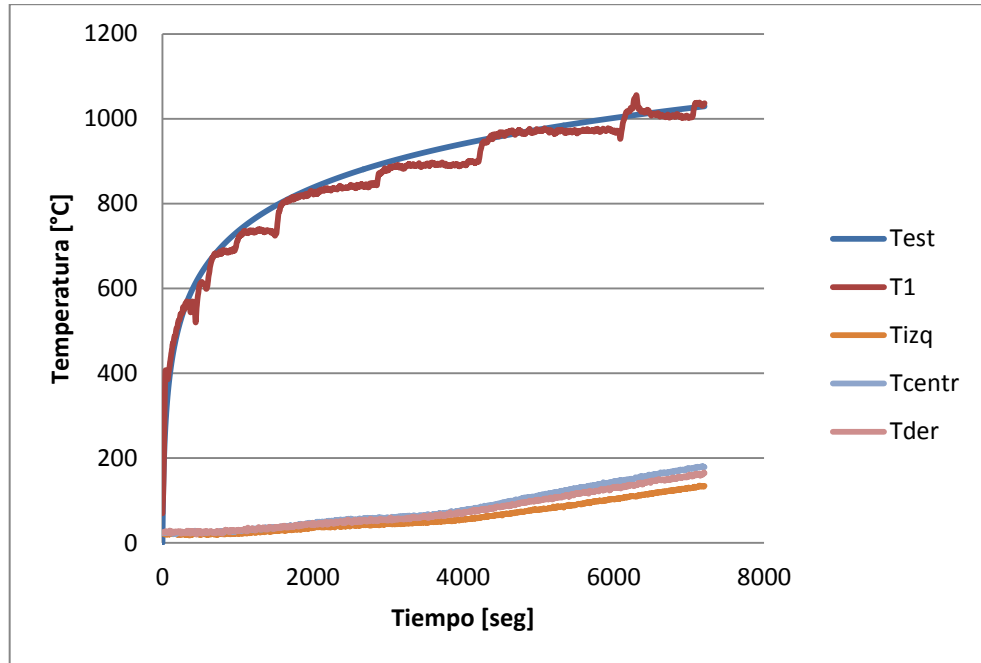
Gráfica Curva de Temperatura M3-13h



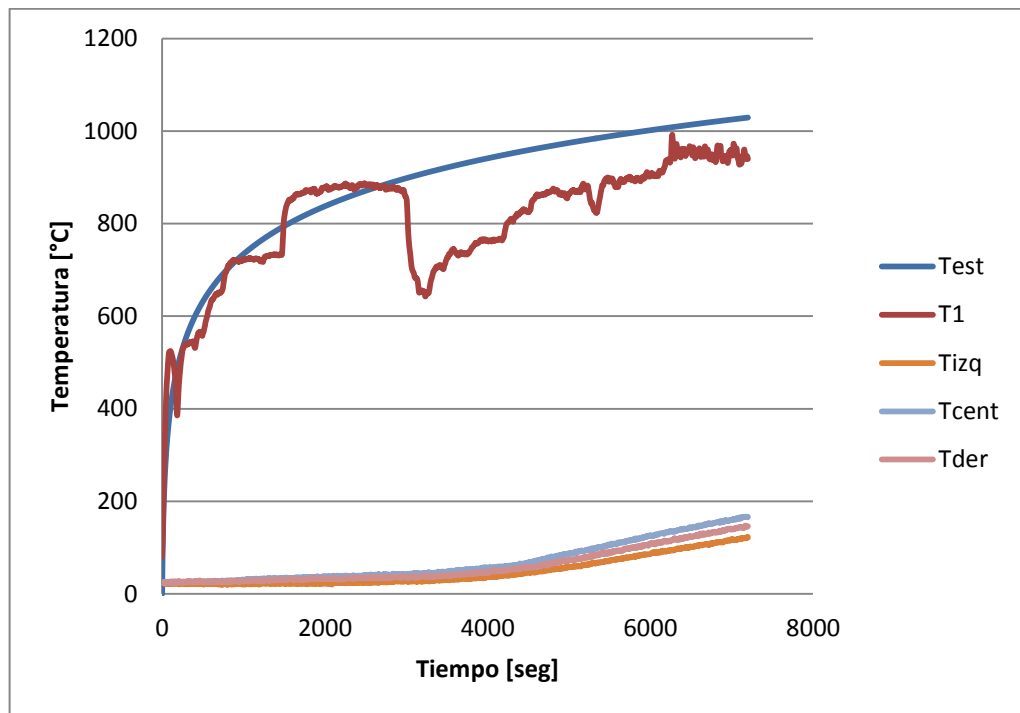
Gráfica Curva de Temperatura M4-6h



Gráfica Curva de Temperatura M4-13h



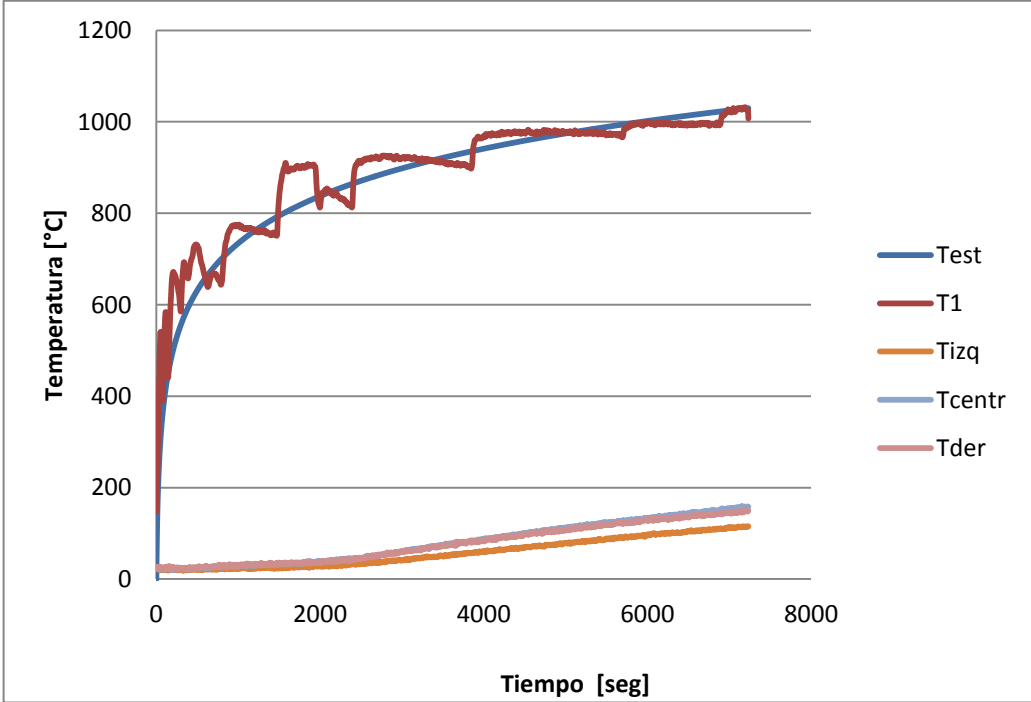
Gráfica Curva de Temperatura M5-13h



Gráfica Curva de Temperatura M6-6h



Gráfica Curva de Temperatura M6-13h



ANEXO C. COMPOSICIÓN QUÍMICA CENIZA VOLANTE

El análisis químico para la ceniza volante fue realizado siguiendo la norma NTC 3823, (MUESTREO Y ENSAYO DE CENIZAS VOLANTES O PUNZOLANAS NATURALES PARA USO COMO ADITIVO MINERAL EN EL CONCRETO DE CEMENTO PORTLAND.) proveniente de la central de generación térmica de Termopaipa.[15]

Composición química Ceniza Volante

COMPONENTE	Ceniza Volante
	% EN PESO
SiO ₂	52,43
Al ₂ O ₃	19,39
Fe ₂ O ₃	4,72
CaO	0,68
K ₂ O	1,26
MgO	0,41
SO ₃	0,48
Cloruros	0,05
Perdidas al fuego	16,59
Residuo insoluble	78,03

ANEXO D. FICHA TECNICA CENIZA VOLANTE

NOMBRE DE MATERIAL: Ceniza Volante

USO DEL PRODUCTO: la ceniza volante se utiliza como material cementoso o puzolana para cemento y productos de hormigón.

1. COMPOSICIÓN/ INFORMACIÓN DE LOS INGREDIENTES

COMPONENTES

Composición mineralógica

Compuesto	Contenido (%)
Mullita	19.2
Quarzo	19.0
Omphacita	0.7
Hematita	0.3
Amorfo	60.8

2. TAMAÑO DE PARTICULA

TAMAÑO		RETENIDO		ACUMULADO (%)	
MALLA	µm	g	%	RETENIDO	PASANTE
Malla 16	1.180	0,0389	0,01	0,0	100,0
Malla 30	595	0,2298	0,07	0,1	99,9
Malla 50	297	1,5878	0,50	0,5	99,5
Malla 100	149	10,101	3,18	3,2	96,8
Malla 170	88	59,8143	18,81	18,8	81,2
Malla 200	74	2,5105	0,79	19,6	80,4
Malla 325	44	29,2785	9,21	28,8	71,2
Malla 400	37	23,4101	7,36	36,2	63,8
FONDO	-	187,9073	59,09	95,3	4,7
PÉRDIDA	-	3,12	0,98	96,2	3,8
TOTAL		314,8782	100		
Diámetro efectivo		320	D10	320	
Coeficiente de uniformidad		1,56	D60	500	
Coeficiente de curvatura		1,00	D30	400	

Fuente: TermoPaipa.