

UNIVERSIDAD DEL PAPALOAPAN

ACTIVACIÓN ALCALINA DE ESCOMBRO DE CONCRETO

**TESIS PROFESIONAL PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO
DE:**

INGENIERO EN DISEÑO

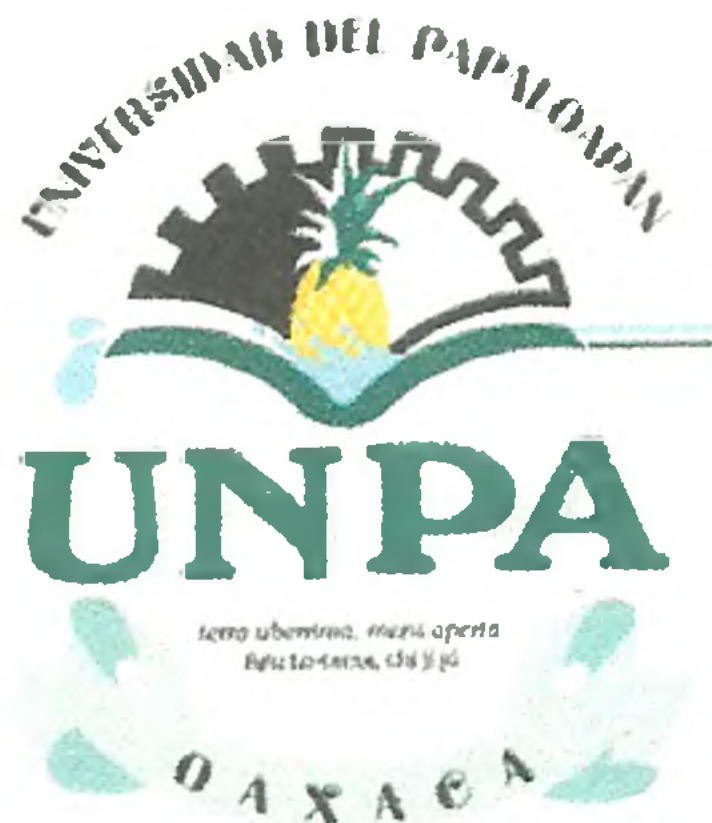
PRESENTA:

JORGE RUIZ MIGUEL

CON LA DIRECCIÓN DE:

DR. ROBERTO SUÁREZ ORDUÑA

LOMA BONITA, OAXACA, 2019



UNIVERSIDAD DEL PAPALOAPAN

INGENIERÍA EN DISEÑO

LA PRESENTE TESIS TITULADA "ACTIVACION ALCALINA DE ESCOMBRO DE CONCRETO", PRESENTADA POR EL PASANTE JORGE RUIZ MIGUEL, BAJO LA DIRECCIÓN DE EL DR. ROBERTO SUAREZ ORDUÑA, HA SIDO REVISADA Y ACEPTADA POR EL JURADO EXAMINADOR PARA SER DEFENDIDA EN EL EXAMEN PROFESIONAL Y OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERO EN DISEÑO.

JURADO EXAMINADOR

DR. ROBERTO SUAREZ ORDUÑA
DIRECTOR

Laura Patricia Rivas Vázquez
DRA. LAURA PATRICIA RIVAS VAZQUEZ

REVISOR


M.C. EDWIN AQUINO BOLAÑOS

REVISOR

LOMA BONITA, OAXACA, 2019.



Universidad del Papaloapan

FECHA:	30 de Octubre del 2019
ÁREA:	Vice-Rectoría Académica
OFICIO NÚMERO:	UNPA/VRA/260/2019
ASUNTO:	Autorización de Impresión de tesis.

C. Jorge Ruiz Miguel
P R E S E N T E:

En base al artículo 120 del reglamento de alumnos, por medio de la presente se aprueba la impresión de la tesis titulada **“Activación alcalina de escombros de concreto”** así como la programación del examen profesional bajo la dirección del Dr. Roberto Suarez Orduña.

Sin más por el momento aprovecho la ocasión para enviarle un cordial saludo.

Atentamente.
terra ubérrima, mens aperta
Bou Lo-tama, chi jí jú


MC. HÉCTOR LÓPEZ ARJONA
Vice-Rector Académico.



C.c.p. Dra. Laura Patricia Rivas Vázquez. Jefe de Carrera de la Lic. En Diseño
C.c.p. L.P. Yesenia Barrientos Arenal. Jefa del Departamento de Servicios Escolares
C.c.p. Dr. Roberto Suarez Orduña. Director de Tesis.
C.c.p. Archivo.

OAXACA



Universidad del Papaloapan

Campus Loma Bonita

Jefatura de la Carrera de Ingeniería en Diseño

Loma Bonita, Oaxaca a 29 de Octubre de 2019

Clave: ID/31SE/2019

**Asunto: Asignación de Sinodales para
Examen de Titulación**

Lic. Yesenia Barrientos Arenal
Jefa de Departamento de Servicios Escolares
Campus Loma Bonita
Presente

Por medio de la presente le informo la asignación de sinodales para el examen de titulación de Jorge Ruiz Miguel egresado de la carrera de ingeniería en diseño que presenta su tema de tesis titulado: "Activación alcalina de escombros de concreto".

Sinodales

Dra. Laura Patricia Rivas Vázquez (presidenta), Dr. Roberto Suárez Orduña (vocal) y M.C. Edwin Aquino Bolaños (secretario)

Suplentes:

Ing. José Benjamín Vergara Rodríguez (primer suplente), M.Arq. Axel Villavicencio Torres (segundo suplente).

Sin otro particular me despido quedando a sus órdenes para cualquier aclaración.

*Terra uberrima, mens aperta
Bou Lo-tama, chí jí jú
Atentamente*

Laura Patricia Rivas Vázquez
Dra. Laura Patricia Rivas Vázquez
Jefa de la Carrera de Ingeniería en Diseño



Vo.Bo.

H. López Arjona
M.C. Héctor López Arjona
Vice-rector académico

C.C.p. M.C. Héctor López Arjona, Vice-rector académico
c.c.p. Archivo

Resumen

En esta tesis se investigó la activación alcalina del escombro de concreto, mediante soluciones de NaOH en un rango de 4 a 9 molar, e $\text{Ca}(\text{OH})_2$ con una concentración de 0.02 molar, para la elaboración de morteros alcalinos, esto con el objetivo de desarrollar un cemento alternativo al CPO y al mismo tiempo ofrecer un método para el aprovechamiento del escombro de concreto.

En el primer capítulo se plantea la problemática sobre el escombro de construcción y el cemento portland, también se describe los antecedentes del cemento portland y de la activación alcalina, en el segundo capítulo se describe los procesos al que se sometió el escombro de concreto para reducir su tamaño y ser usado como precursor en la activación alcalina. El tercer capítulo trata del diseño y desarrollo del experimento, en el cuarto capítulo se describe las pruebas de laboratorio al que se sometieron las probetas activadas alcalinamente, en el quinto capítulo se presentan los resultados de esta investigación, se obtuvieron las siguientes conclusiones, por ejemplo: para este experimento, el mejor desempeño se obtuvo con una solución de NaOH al 6 molar y un curado térmico a 65 °C durante 24 horas para la activación del E.C.M. Con esta concentración de NaOH se obtuvo una resistencia máxima a la compresión de 27.6 kg/cm² a la edad de 56 días, sin embargo, esto es el 16.5% de 172 kg/cm² que alcanzaron las probetas de CPO. También se observó que al usar una solución alcalina de NaOH con una concentración en el rango de 7-9 molar, la resistencia a la compresión comienza a disminuir conforme se aumenta la concentración. Además, se evaluaron las probetas de E.C.M activadas con NaOH a la edad de 56 días debido a que se desconoce a que edad alcanza su resistencia máxima, en base a los resultados se pudo comprobar que la resistencia a la compresión continúa aumentando significativamente después de los 28 días de edad en un 21%, caso contrario a lo ocurrió con las probetas de CPO que solo aumento en 0.5 %. Por otro lado, también se analizó el comportamiento de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ como activador alcalino, obteniéndose resistencias inferiores a las obtenidas por una concentración de 4 molar de NaOH, descartando así el uso de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ activador alcalino.

ABSTRACT

In this thesis, the alkaline activation of concrete debris was investigated, using NaOH solutions in a range of 4 to 9 molar, and $\text{Ca}(\text{OH})_2$ with a concentration of 0.02 molar, for the production of alkaline mortars, this with the objective of develop an alternative cement to the CPO and at the same time offer a method for the use of concrete debris.

In the first chapter the problem about construction debris and portland cement is raised, the background of portland cement and alkaline activation is also described, in the second chapter the processes to which concrete debris was subjected to reduce its size and be used as a precursor in alkaline activation. The third chapter deals with the design and development of the experiment, the fourth chapter describes the laboratory tests to which the alkaline-activated specimens were subjected, in the fifth chapter the results of this research are presented, the following conclusions were obtained, for example: For this experiment, the best performance was obtained with a solution of 6 molar NaOH and a thermal cure at 65°C for 24 hours for the activation of the E.C.M. With this concentration of NaOH, a maximum compressive strength of 27.6 kg/cm^2 was obtained at the age of 56 days, however, this is 16.5% of 172 kg/cm^2 that reached the CPO specimens. It was also observed that when using an alkaline NaOH solution with a concentration in the range of 7-9 molar, the compressive strength begins to decrease as the concentration increases. In addition, the E.C.M. test tubes activated with NaOH were evaluated at the age of 56 days because it is unknown at what age they reach their maximum resistance, based on the results it was found that compression resistance continues to increase significantly after 28 days of age at 21%, otherwise it happened with CPO specimens that only increased by 0.5%. On the other hand, the behavior of $\text{Ca}(\text{OH})_2$ as an alkaline activator was also analyzed, obtaining resistance lower than those obtained by a concentration of 4 molar NaOH, thus discarding the use of $\text{Ca}(\text{OH})_2$ alkaline activator.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad del Papaloapan por permitirme cumplir uno de los objetivos en mi vida.

A mi persona: por hacer o no hacer algo, solo depende de nuestra voluntad y perseverancia.

Al Dr. Roberto Suárez Orduña,
Por ser mi asesor en esta investigación

A la Dra. Laura Patricia Rivas,
Por sus revisiones a mi trabajo

Al M.C. Edwin Aquino Bolaños,
Por su apoyo, orientación, y revisiones continuas de este trabajo, sin sus consejos este trabajo no sería posible, gracias.

Al profesor José Benjamín Vergara por la aportación bibliográfica.

A Laura Magali y Citlali por su amistad, por alentarme a conseguir mis objetivos.

A mis amigos German y Luis, por inspirarme para cumplir mis objetivos.

A Luitzy Shulunni, por su amistad y aportación a este trabajo.

DEDICATORIA

A mis padres

Teófilo y Celina

Por creer en mí y apoyare aun cuando he fallado

Por el gran apoyo que me han brindado, logré cumplir uno de mis objetivos.

A mi hermano que siempre me ha brindado su apoyo.

ÍNDICE DE FIGURAS	VIII
ÍNDICE DE TABLAS	IX
ABREVIATURAS	X
CAPÍTULO I MARCO REFERENCIAL	1
1. INTRODUCCIÓN	2
2. MARCO DE REFERENCIA	2
2.1. Cemento	2
2.2. Antecedentes históricos del cemento	3
2.3. Fabricación del cemento portland	5
2.3.1 Obtención y preparación de materias primas	5
2.3.2 Trituración	6
2.3.3 Etapa de prehomogenización	6
2.3.4 Molienda de la materias primas	6
2.3.5 Precalentador de ciclones	7
2.3.6 Fabricación de clínker	7
3. CEMENTOS ALCALINOS	8
3.1. Antecedentes históricos	8
3.2. Activación alcalina	9
3.3. Residuos o precursor de partida	9
3.4. Activador alcalino	10
3.5. Diferentes sistemas de curado	11
3.6. Antecedentes de residuos activados alcalinamente	12
3.6.1 Cenizas volantes	12
3.6.2 Escorias de hornos altos	13
3.1. Aplicaciones de los cemento alcalinos	14
CAPÍTULO II PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	15
4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	16
4.1. Delimitación	17
4.2. Justificación	17
5. HIPÓTESIS	18
6. OBJETIVOS	18
6.1. Objetivo general	18
6.2. Objetivos específicos	19
CAPÍTULO III DESCRIPCIÓN Y DESARROLLO DEL EXPERIMENTO	20
7. ESCOMBRO DE CONCRETO ESTRUCTURAL	21

7.1. Preparación de escombros de concreto.....	21
7.1.1 Proceso de secado de la pasta.....	23
7.2. Molienda y tamizado	23
8. CARACTERIZACIÓN DE E.C.M.....	24
8.1. Cálculo de la densidad aparente.....	24
8.2. Peso específico aparente de E.C.M.....	25
8.3. Área superficial del E.C.M.	25
8.3.1 Método de permeabilidad al aire de blaine	25
8.3.2 Calibración del aparato de Blaine.....	26
8.3.3 Determinar el factor del aparato de permeabilidad al aire de blaine.	27
8.3.4 Determinación del volumen de cemento estándar	28
8.3.5 Determinación del área superficial del E.C.M.	29
8.4. Análisis de Difracción de rayos x (DRX).....	30
9. ACTIVADORES ALCALINOS EMPLEADOS EN ESTA INVESTIGACIÓN	33
9.1. Hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$)	33
9.1.1 Prueba de disolución	33
9.2. Hidróxido de sodio (NaOH).....	34
9.2.1 Pruebas de disolución.....	35
10. DESCRIPCIÓN DEL EXPERIMENTO.....	35
10.1. Probetas testigo.....	36
10.2. Probetas de mortero activadas alcalinamente	36
10.3. Análisis estadístico.....	37
11. PREPARACIÓN DE LAS PROBETAS TESTIGO	37
11.1. Elaboración de las probetas.....	38
11.2. Curado de las probetas.....	39
11.3. Ensayo a compresión	40
11.4. Resistencia a la compresión a 7, 28 y 56 días de edad	41
CAPÍTULO IV ACTIVACIÓN ALCALINA.....	43
12. ELABORACIÓN PREVIA DE PROBETAS ACTIVADAS.....	44
12.1. Activación con NaOH a 4 molar, nivel bajo.....	44
12.2. Elaboración previa de probetas a 8 molar, nivel alto	45
12.3. Evaluación de 3 tipos de curados	46
12.4. Ensayo a compresión a 7 días de curado	47
13. ACTIVACIÓN ALCALINA NaOH y $\text{Ca}(\text{OH})_2$	48
13.1. Probetas activadas con NaOH	48
13.2. Elaboración de probetas activadas con $\text{Ca}(\text{OH})_2$	49
13.3. Curado térmico de las probetas	50
14. CARACTERIZACIÓN DE LAS PROBETAS.....	51
14.1. Ensayo a compresión a los 7, 28 y 56 días.....	51
14.2. Cálculo de la resistencia a compresión a 7, 28 y 56 días de edad	53
14.3. Análisis Estadístico.....	54
14.4. Análisis mineralógico del E.C.M.A (DRX).....	58

CAPÍTULO V ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	61
15. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	62
15.1. Comparación de la resistencia máxima de CPO y mortero activado.....	62
15.2. Comparación DRX del E.C.M y del E.C.M.A.....	63
CONCLUSIONES.....	65
RECOMENDACIONES.....	66
16. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	67
ANEXOS.....	72
17. CARACTERIZACIÓN DE AGREGADO FINO	73
17.1. Método de cuarteo	73
17.2. Módulo de finura	73
17.3. Calibración del recipiente de 5 dm ³ y 10 dm ³	75
17.4. Determinación de la masa volumétrica del agregado fino	76
17.4.1 Determinación de la masa volumétrica compactada	76
17.4.2 Determinación de la masa volumétrica suelta	77
17.5. Porcentaje de absorción del agregado fino	77
17.6. Cálculo de porcentaje de humedad	78
18. CARACTERIZACIÓN DEL AGREGADO GRUESO	78
18.1. Determinación del tamaño máximo nominal	79
18.2. Determinación de la masa volumétrica	79
18.2.1 Masa volumétrica compactada	80
18.2.2 Determinación de la masa volumétrica suelta	81
18.3. Cálculo del porcentaje de absorción.....	81
18.4. Determinación del porcentaje de humedad	83
18.5. Información de los materiales	83
19. DISEÑO DE MEZCLA SEGÚN LA NORMA ACI 211.1.....	84
20. ELABORACIÓN DE PROBETAS DE CONCRETO.....	91
20.1. Curado	93
20.2. Cabeceo de las probetas de concreto.....	93
20.3. Ensayo a compresión	94
20.4. Resistencia a la compresión.....	95

Fig. 1. Procesamiento del cemento, ...	5
Fig. 2. Ceniza volante, fuente: Asocem. S.f.).	12
Fig. 3. Escorias de altos hornos, fuente (Cristalizada, 2011)	13
Fig. 4. Proceso de corte, fuente propia.	22
Fig. 5. Pasta de concreto, fuente propia.....	22
Fig. 6. Proceso de secado, fuente propia.	23
Fig. 7. Proceso de molienda y tamizado, fuente propia.....	24
Fig. 8. Proceso de permeabilidad, fuente propia.	27
Fig. 9. DRX de E.C.M, fuente Match 3.	31
Fig. 10. Ampliación de DRX, fuente Match 3.....	32
Fig. 11. Disolución de hidróxido de calcio, fuente propia.	34
Fig. 12. Disolución de NaOH, fuente propia.	35
Fig. 13. Preparación de las probetas, fuente propia.....	38
Fig. 14. Secuencia de pisón	39
Fig. 15. Proceso de curado, fuente propia.	40
Fig. 16. Ensayo a compresión de Probetas de mortero, fuente propia.....	40
Fig. 17. Curado en una solución de Ca (OH) ₂ , fuente propia.....	45
Fig. 18. Desmoldado de probetas, fuente propia.....	46
Fig. 19. Probetas de E.C.M, fuente propia.	47
Fig. 20. Secuencia del apisonado, fuente (NMX-C-061-ONNCCE, s.f.).....	48
Fig. 21. Probetas de E.C.M. activadas alcalinamente, fuente propia.	49
Fig. 22. Probetas de E.C.M activadas con Ca(OH) ₂ , fuente propia.	50
Fig. 23. Probetas después de haber sido desmoldado, fuente propia.....	50
Fig. 24. Curado térmico, fuente propia.	51
Fig. 25. Grafica de todas las concentraciones, fuente propia.....	54
Fig. 26. DRX del E.C.M.A. fuente propia.....	59
Fig. 27. Ampliación de DRX del E.C.M.A. fuente propia.	59
Fig. 28. Comparación de CPO y el mortero activado, fuente propia.	62
Fig. 29. Comparación del DRX, fuente Match 3.	63
Fig. 30. Ampliación DRX del E.C.M y E.C.M.A, fuente Match 3.	64
Fig. 31. Cribado del agregado grueso, fuente propia.	79
Fig. 32. Preparación del agregado grueso, fuente propia.	82
Fig. 33. Proceso de elaboración de especímenes de concreto, fuente propia.	92
Fig. 34. Proceso de cabeceo, fuente propia.	94
Fig. 35. Ensayo a compresión, fuente propia.	94

Tabla 1. Composición del clinker.....	8
Tabla 2. Compuestos del E.C.M, fuente propia.....	31
Tabla 3. Diferente concentración propuesta, fuente propia.....	36
Tabla 4. Dosificación del mortero de CPO.	37
Tabla 5. Ensayo a compresión de probetas de CPO, fuente propia.....	41
Tabla 6. Resistencia a la compresión 7, 28 y 56 días.	42
Tabla 7. Resultado del ensayo a compresión, fuente propia.....	47
Tabla 8. Carga máxima aplicada durante el ensayo a compresión, fuente propia.	52
Tabla 9. Resistencia a la compresión, fuente propia.....	53
Tabla 10. Diseño de experimento factorial con 2 factores, fuente propia.	55
Tabla 11. Fases detectadas, fuente Match 3.....	60
Tabla 12. Masa retenida en las diferentes mallas, fuente propia.	74
Tabla 13. Datos obtenidos, fuente propia.....	75
Tabla 14. Masa volumétrica compactada, fuente propia.	76
Tabla 15. Masa volumétrica suelta, fuente propia.	77
Tabla 16. Resultado de análisis, fuente propia.....	78
Tabla 17. Determinación de masa volumétrica, fuente propia.....	80
Tabla 18. Masa volumétrica suelta, fuente propia.	81
Tabla 19. Porcentaje de humedad, fuente propia.....	82
Tabla 20. Porcentaje de humedad, fuente propia.....	83
Tabla 21. Datos del diseño de mezcla, fuente propia.....	84
Tabla 22. Selección de la resistencia a compresión requerida.....	84
Tabla 23. Selección de revenimiento, fuente (Huanca, 1934).....	85
Tabla 24. Selección del volumen unitario de agua.	85
Tabla 25. Selección del contenido de aire atrapado.....	86
Tabla 26. Selección de la relación a/c por resistencia.....	86
Tabla 27. Interpolación de los datos, fuente propia.....	87
Tabla 28. Selección del a. grueso por unidad de volumen del concreto.	88
Tabla 29. Valores absolutos de los materiales, fuente propia.	91
Tabla 30. Dosificación para 3 cilindros de concreto, fuente propia.	91
Tabla 31. Resultados de ensayo, fuente propia.	95
Tabla 32. Resistencia a la compresión, fuente propia.	95

ABREVIATURAS

Abreviatura	Significado
E.C.M	Escombro de concreto molido.
CPO	Cemento portland ordinario.
E.C.M.A.	Escombro de concreto molido activado.
NaOH	Hidróxido de sodio
Ca(OH) ₂	Hidróxido de calcio
KOH	Hidróxido de potasio
SiO ₂	Dióxido de silicio
CaO	Óxido de calcio
DRX	Difracción de rayos x
A/C	Relación agua cemento
MPa	Mega Pascal
Na ₂ SiO ₃	Silicato sódico
Na ₂ CO ₃	Carbonato de sodio
Gel C-S-H	CaO · SiO ₂ · H ₂ O
H ₂ SO ₄	Ácido sulfúrico
CH ₃ COOH	Ácido acético
N-A-S-H	Aluminosilicato sódico hidratado
Solución/ E.C.M	solución / escombro de concreto

CAPÍTULO I

MARCO REFERENCIAL

1. INTRODUCCIÓN

La motivación para la realización de esta investigación, nació a partir de la preocupación por el cuidado del medio ambiente, por ende, por medio de esta tesis se busca generar y aportar conocimiento que ayude a desarrollar métodos para tratar y aprovechar los residuos de la construcción, ya que hay pocas investigaciones referentes al tema y gran disposición del escombros de concreto. Se espera que con el tiempo se logre obtener resultados satisfactorios y que se continúe investigando acerca de este residuo, con el objetivo reducir su exceso y al mismo tiempo que se pueda reciclar el escombros de concreto y si es posible volverlo a utilizar como un material cementante alternativo al cemento portland, que sea amigable con el medio ambiente.

Es cierto que ya existen formas de aprovechamiento del escombros, sin embargo, aún no es suficiente ya que los métodos existentes se limitan al uso del escombros como material de relleno de suelos, caminos y como agregado para la elaboración de nuevo concreto.

2. MARCO DE REFERENCIA

2.1. CEMENTO

El cemento es un aglomerante artificial que al ser hidratado con agua inicia reacciones químicas complejas, formando así una pasta con la capacidad de adherencia y cohesión, que fragua y endurece progresivamente, incluso bajo el agua, obteniendo característica pétreas, esta definición engloba muchos materiales cementantes (Vidaud, 2013).

El cemento portland

Es un polvo fino que se obtiene de la calcinación a 1300-1500 °C de una mezcla de piedra caliza, arcilla y mineral de hierro (Rend et al., 2015). El producto del proceso de calcinación es el clinker, que se muele finamente con yeso y otros aditivos químicos para

ralentizar el tiempo de fraguado (Facultad de Ingeniería de la Universidad Nordeste Nacional, 2014).

El concreto

Es un material duro como una roca compuesto por cemento, grava, arena y agua, esta mezcla se prepara con una dosificación específica para conseguir una resistencia a la compresión deseada, el concreto es depositada dentro de moldes o espacio donde se requiere el uso, pasa por un proceso de colocado, vibrado, fraguado y curado para obtener su resistencia máxima en un periodo máximo de 28 días (Subsidiarios , 2006).

Escombros

Una vez que concluyó el tiempo de vida del concreto como un material estructural se demuele y se desecha, como material inerte, sin embargo, a todo el material que proviene de demolición también se le conoce como escombros, sin incluir el acero de refuerzo, se obtiene de elementos como; losas, trabes, columnas, cadenas, trabes, castillos, muros de concreto, muros de ladrillo y muro de mampostería (De, 1993).

Existen dos tipos de escombros de demolición:

- Los residuos de elementos prefabricados como; tabique, block, ladrillos losetas etc.
- Los residuos de materiales elaborados en la obra, como morteros y concreto hidráulicos (Salazar, et al., 2015).

Estos residuos se obtienen de manera abundante y no se le da ningún tratamiento para ser desechado.

2.2. ANTECEDENTES HISTÓRICOS DEL CEMENTO

La historia del cemento inicia desde que el ser humano comenzó a establecerse como civilización y realizando pequeñas construcciones, acomodando rocas una tras otra y usando lodo para unirlos. Los etruscos en el año 700 a.c, utilizaban mezclas de puzolana y cal para hacer un mortero, se puede decir que fue el primer cemento (Puteoli, & Mar,

s.f.). Por otro lado, en Egipto alrededor del año 2,570 a.c. se utilizaron pastas de yeso y calizas disueltas en agua para unir bloques de rocas.

Hacia el año 500 a.c. los griegos utilizaron una mezcla de materiales provenientes de depósitos volcánicos, con caliza, agua y arena. Los romanos para el siglo II a. c. en la región de Puzzoli desarrollaron el llamado cemento romano o puzolánico, a partir de la mezcla de caliza calcinada con cenizas volcánicas, la puzolana contiene sílice y alúmina, que al combinarse químicamente con la cal da como resultado el cemento puzolánico (Santamaría, 1963). Este material resistente al fuego y que fraguaba incluso bajo el agua, algunas de las estructuras romanas en las cuales la mampostería se unió con morteros, tales como el Coliseo en Roma y el Pont du Gard, han sobrevivido hasta esta época, con su material cementante aún duro y firme.

En 1758 John Smeaton al reconstruir el faro de Eddystone, en la costa de Cornish, Inglaterra, descubrió que el mejor mortero se obtenía cuando se mezclaba puzolana con caliza que contenía una alta cantidad de material arcilloso. Al darse cuenta del importante papel de la arcilla, que hasta entonces no se consideraba conveniente, Smeaton fue el primero en conocer las propiedades químicas de la cal hidráulica, un material que se obtiene al quemar una mezcla de cal y arcilla. A mediados del siglo XVIII, el inglés James Parker creó un cemento de manera accidental, al quemar unas piedras calizas, fue conocido como cemento romano ya que se pensó que era el que se había utilizado en los tiempos de esta civilización, después en 1817 Vicat, considerado el padre del cemento marcó las pautas a seguir en la fabricación del cemento por medio de mezclas calizas y arcillas dosificadas en las proporciones convenientes y molidas conjuntamente. El sistema de fabricación que empleó Vicat fue el de vía húmeda y con esto marcó el inicio del actual proceso de fabricación del CPO (Troya et al, s.f.). Después el 21 de octubre de 1824 Joseph Aspdin y James Parker patentaron el primer Cemento Portland, obtenido a partir de caliza arcillosa y carbón, calcinados a alta temperatura, la denominación Portland responde a su color grisáceo, muy similar a la piedra de la isla de Portland del canal inglés (Navarro, 2008). A mediados de 1845 Isaac Johnson mejoró este proceso de producción aumentando la temperatura de calcinación, hasta formar el clinker obteniendo así el prototipo del cemento moderno elaborado con base en una mezcla de caliza y arcilla calcinada. Es a partir de 1900 cuando los cementos portland se imponen

en las obras de ingeniería, comenzando así el ascenso veloz del consumo de cemento (Viputeoli, 1995).

2.3. FABRICACIÓN DEL CEMENTO PORTLAND

El proceso de fabricación del cemento se puede resumir en los siguientes procesos: Obtención de la materia prima, homogeneización, molienda de crudo, precalentador de ciclones, fabricación de clínker, molienda de clínker, almacenamiento del cemento y envasado, ver fig. 1.

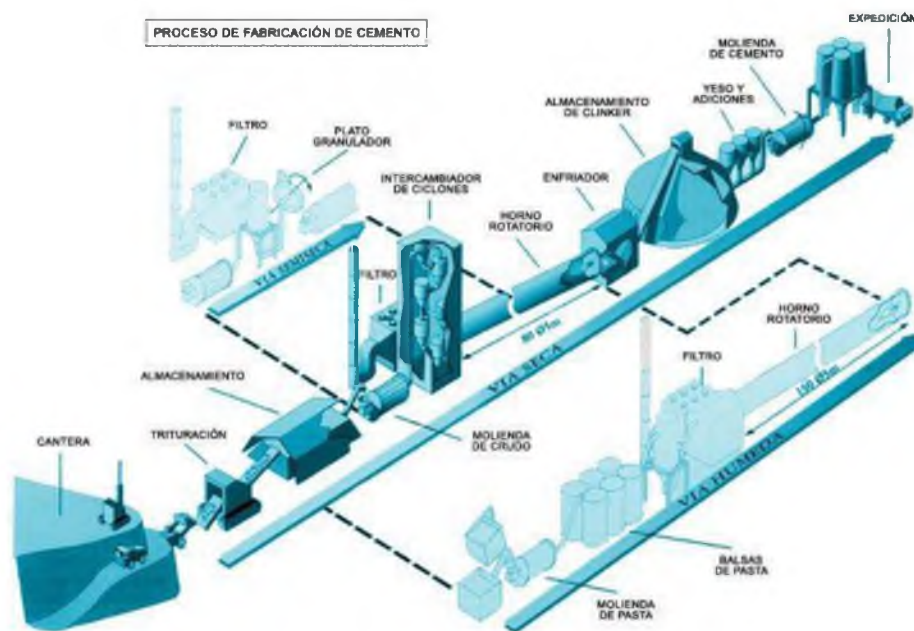


Fig. 1. Procesamiento del cemento, fuente: <https://matdeconstruccion.wordpress.com>

2.3.1 OBTENCIÓN Y PREPARACIÓN DE MATERIAS PRIMAS

El proceso de fabricación del cemento comienza con la extracción de las materias primas, duros y blandos, procedentes de las canteras a cielo abierto que se encuentran aledaños a la fábrica. Los materiales duros como calizas y pizarras se extraen mediante

explosiones controladas, mientras que los materiales blandos (arcillas y margas) se utilizan excavadoras para su extracción. Otras materias primas se suministran a través de fuentes externas, por ejemplo: minerales de hierro, arenas de fundición (Yepes, s.f.).

2.3.2 TRITURACIÓN

Una vez extraído y clasificado el material, se procede a su trituración por medio de trituradoras de grandes dimensiones que reducen el tamaño de las partículas hasta una pulgada, después se traslada a la fábrica mediante cintas transportadoras o camiones para su almacenamiento en el parque de prehomogenización (UANL, 2002).

2.3.3 ETAPA DE PREHOMOGENIZACIÓN

El material triturado se almacena en capas uniformes para ser posteriormente seleccionadas de forma controlada, ya que la composición química del crudo y la adecuada finura del mismo es fundamental para el subsiguiente proceso de cocción en el horno. Este proceso permite preparar la dosificación adecuada de los distintos componentes reduciendo su variabilidad, se puede lograr una prehomogenización inicial por apilamiento del material (caliza, marga, etc.) y extracción tomando secciones transversales de toda la pila, las materias primas empleadas en pequeñas cantidades (Neuzil, 2006).

2.3.4 MOLIENDA DE LA MATERIAS PRIMAS

Existen cuatro tipos de molienda los cuales son; de vía seca, semiseca, húmeda, semi-húmeda. Las materias primas se muelen y se secan en proporciones controladas para formar una mezcla homogénea con la composición química requerida hasta conseguir un polvo fino. Los sistemas más usuales de molienda en seco son: molino de bolas con descarga central, molino vertical de rodillos y molino horizontal de rodillos, en función de cómo se procese el material antes de su entrada en el horno.

La pasta que sale del proceso de molienda, requiere posteriormente un proceso de mezcla y homogenización para lograr la óptima composición del crudo, antes de ser enviada al horno. La pasta se almacena en balsas, tanques o bien en silos, después estos materiales se muelen en molinos verticales o de bolas para reducir su tamaño y favorecer así su cocción en el horno. A partir de ahí, la materia prima se almacena en un silo para incrementar la uniformidad de la mezcla (Neuzil, 2006).

2.3.5 PRECALENTADOR DE CICLONES

La harina cruda (materia prima molida), es introducida mediante sistema de transporte neumático, por la parte superior del sistema que cuenta de 4 a 6 ciclones en cascada, que se encuentran al interior de una torre de concreto armado de varios pisos (asocem, 2015). La materia prima debidamente dosificada va descendiendo por él, dándose así un intercambio de calor por suspensión de gases de varias etapas, en la base del cual se instala un moderno sistema de pre-calcinación. Mientras tanto, los gases provenientes del horno, que están a altas temperaturas, ascienden a contracorrientes, precalentando así el crudo que alcanza los 1000°C (Asesorado, 2012).

2.3.6 FABRICACIÓN DE CLÍNKER

En el proceso de formación del clinker (también llamado clinkerización o sinterización), a medida que la harina va avanzando en el interior del horno, mientras esta, gira. La temperatura va aumentando hasta alcanzar los 1500 °C, a esta temperatura se producen reacciones químicas como la descarbonatación de la caliza (cal que dan lugar al conocido clinker). Para alcanzar las temperaturas necesarias para la cocción de las materias primas, el horno cuenta con una llama principal que arde a 2000°C (Cemento | Holcim Mexico, 2019), después el clinker se introduce en el enfriador, que inyecta aire frío del exterior para reducir su temperatura de los 1400°C a los 100°C. Finalmente el clinker se muele en un molino de bolas y al mismo tiempo se mezcla con 4-5% de yeso para controlar el fraguado final, obteniendo así el cemento portland, también se pueden hacer adiciones como; escoria de altos hornos, ceniza volante, caliza y puzolanas que permiten

alcanzar determinados requerimiento y tipos de cementos como; cemento portland puzolánico, cemento Portland con escoria granulada de alto horno, cemento portland compuesto, cemento portland con humo de sílice (CEMEX, 2013). A continuación, se puede ver la composición del clinker, ver tabla 1.

Tabla 1. Composición del clinker. Fuente (CEMEX, 2013).

Nombre	Fórmula	Composición	%	Fase
Silicato tricálcico	C_3S	$3 CaO \cdot SiO_2$	50-70	Alita
Silicato dicálcico	C_2S	$2CaO \cdot SiO_2$	15-30	Belita
Aluminato tricálcico	C_3A	$3CaO \cdot Al_2O_3$	5-10	Celita
Ferro-aluminato tetracálcico	C_4AF	$4CaOAl_2O_3Fe_2O_3$	5-15	Browmillerita

3. CEMENTOS ALCALINOS

Los cementos alcalinos, son producto de la reacción de un aluminosilicato sólido (mineral que contiene óxido de aluminio Al_2O_3 y sílice SiO_2) con una disolución de hidróxido alcalino, produciendo un material mecánicamente resistente, llamado “geopolímero”, “aluminosilicatos vítreos sintetizados a bajas temperaturas”, “cementos activados alcalinamente”, “geo cementos”, “hidrocerámicas” y “polímero inorgánico” (Rend et al., 2015).

3.1. ANTECEDENTES HISTÓRICOS

En 1940, Purdon propuso el principio de la activación alcalina, también conocidos en ese entonces como aluminosilicatos inorgánicos (Purdon, 1940). Después en la Unión Soviética en los años 1950, los científicos Victor Glukhovsky y Pavel Krivenko, descubrieron la rama de los geopolímeros, el cual denominaron cementos de suelo, quiénes preguntándose el porque de la duración de las estructuras, edificios y piramides de la antigüedad, por tal motivo los estudiaron y analizaron, concluyeron que la respuesta estaba en la presencia de alcalinos libres en las matrices cerámicas (Glukhovsky, 1965).

Más adelante en 1972 el científico e ingeniero francés Joseph Davidovits otorgó el nombre de geopolímeros a los cementantes producidos a partir de la activación alcalina de minerales basados en aluminosilicatos, específicamente aquellos constituidos con arcillas calcinadas (Davidovits, 1991). A partir de los años 70 y hasta la fecha se han realizado a nivel mundial diferentes investigaciones relacionadas con la activación alcalina, entre las que resaltan, por ejemplo: La activación alcalina de las cenizas volantes, la activación de las escorias de altos hornos, ya que existe una gran disposición de estos residuos en la industria (Torgal, et al., s.f.).

3.2. ACTIVACIÓN ALCALINA

Es un proceso químico en el que un material finamente molido, constituido por sílice (SiO_2) y alúmina (Al_2O_3), en estado vítreo o amorfo que puede ser rico o pobres en CaO . Al ser mezclado con una solución altamente alcalina ($\text{pH} > 12$), promueve la ruptura de iones SiO_2 y alúmina Al_2O_3 , y al mismo tiempo la restructuración, fraguando y endureciendo (Krivenko, 2017).

3.3. RESIDUOS O PRECURSOR DE PARTIDA

A continuación, se describe las condiciones de los materiales que pueden ser usados como precursores, de estos materiales, existen 2 grupos:

Materiales ricos en CaO : ($> 40\%$), tal como las escorias de altos hornos y las cenizas volantes tipo C, estos materiales requieren de soluciones relativamente bajas ($< 4 \text{ mol}$) para ser activadas, y un curado a temperatura ambiente, al ser activados producen un gel de silicato cálcico hidratado (C-A-S-H), similar al del CPO (Davidovits & Resins, 1980).

Materiales pobres en CaO : ($< 40\%$), en el que destacan el metacaolin (MK) y la ceniza volante tipo F, dicho precursores requieren de soluciones con concentraciones relativamente altas ($> 4 \text{ mol}$) para ser activados, requieren un curado térmico entre 50 y

90°C. Como productos se obtiene geles tipo aluminosilicatos sódico hidratado (N-A-S-H) (Puertas, 2013) Por ejemplo:

- Escoria de fundición de aluminio, escoria de la producción de acero y ceniza volante, siendo los dos últimos los más estudiados ya que se pueden encontrar en abundancia en la industria.
- Materiales basados en arcillas caoliníticas o ílticas y metakaolinas.
- Materiales volcánicos de diferentes lugares, que encierran puzolana natural como basura y tierra de Santorin, basalto, vidrio de lava, toba volcánica (Buchwald, et al., 2005).
- Desechos cerámicos como; ladrillo rojo, residuos de losetas entre otros.

3.4. ACTIVADOR ALCALINO

Para la activación de CPO se requiere de agua para su hidratación dando así el inicio de complejas reacciones químicas, formando una pasta de cemento. De igual manera se da con los morteros y concretos activados alcalinamente, con la diferencia de que el agua se sustituye por una solución altamente alcalina con un pH superior a 12 (Provis et al., 2014). Comúnmente se emplea hidróxidos y sales, como: Hidróxido (NaOH, KOH), silicatos (Na_2SiO_3), sales de ácidos débiles (Na_2CO_3), sales de ácidos fuertes (Na_2SO_4), además se pueden emplear combinaciones de varios activadores para mejorar el resultado (Fernández et al., 1996).

Davidovits introdujo los activadores con hidróxidos, NaOH, KOH y $\text{Ca}(\text{OH})_2$, los cuales introducen iones OH^- , que disuelven la alúmina y sílice reactivas, mientras que los elementos alcalinos Na^+ y K^+ se introducen en los tetraedros, pasando a ser parte de la estructura resistencia ($>10 \text{ mol}$).

Sin embargo, el uso de estos activadores se ve poco factible por su poca disponibilidad o el costo de producción, por ende, se ha investigado la posibilidad de la adición de diferentes residuos, para reducir la concentración del activador y al mismo tiempo mejorar

la resistencia de la matriz cementante (Villamor Lora, 2016), estas adiciones pueden ser, por ejemplo:

Adición de silicio soluble

La adición de silicatos solubles o waterglass tiende a mejorar la estructura de los geopolímeros, permitiendo mejores propiedades mecánicas. Otros estudios confirman que aumentar la cantidad de silicatos solubles produce una mayor fase de gel geopolimérico, incrementando así la resistencia mecánica.

Adición de vidrio molido

También se han realizado investigaciones sobre la adición de vidrio molido al precursor para reducir la concentración de las soluciones alcalinas, ya que contiene un alto contenido de sodio y sílice en su estructura (Torres Carrasco, 2016).

Ceniza de cáscara de arroz

Se ha investigado recientemente el uso de la ceniza de la cascarilla de arroz como fuente de sílice, aumentando el porcentaje de sílice en la matriz, mejora considerablemente la resistencia a la compresión, a edades tempranas de curado (Villaquirán et al., 2016).

Por otro lado, también existen técnicas que mejoran la reactividad de los precursores como son:

- . Calcinación del precursor para mejorar la reactividad.
- . Molienda prolongada del precursor, para obtener partículas inferiores a $<45\mu\text{m}$

3.5. DIFERENTES SISTEMAS DE CURADO

Los concretos a base de CPO requieren de un curado por inmersión en agua o en una solución de Ca(OH)_2 , para la hidratación constante durante 28 días, tiempo en el que alcanza su máxima resistencia a la compresión. De igual manera para los concretos y

morteros activados alcalinamente se requiere de un curado para lograr finalizar las reacciones químicas iniciadas. La elección el método de curado dependerá de la composición del precursor, a continuación, se enlistan los diferentes sistemas de curado que se ha ido ha ido utilizando (Thomas, et al., 2016).

- Inmersión en una solución de cal saturada a 23 ° C.
- Expuesto al aire a temperatura ambiente, con una humedad relativa del 50 % (Collins & Sanjayan, 2001).
- Curado térmico durante 24 horas a 65 °C con humedad relativa del 98 % (Fernández, et al., 1997).

3.6. ANTECEDENTES DE RESIDUOS ACTIVADOS ALCALINAMENTE

3.6.1 CENIZAS VOLANTES

También conocidas como Coal Fly Ash, es un polvo fino con partículas principalmente esféricas, semicristalinas, generadas en plantas termoeléctricas, y captadas mediante sistemas de precipitación electrostática. Estas partículas tienen propiedades puzolánicas, compuesta fundamentalmente por SiO_2 (28.53%), Al_2O_3 (19.18%) y CaO 6.8 % (Kovalchuk, et al., 2008), ver fig.2.



Fig. 2. Ceniza volante, fuente: Asocem. S.f.).

Este tipo de ceniza se ha utilizado para obtener cemento alcalinos, se utilizó una solución de $(\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O})$, se ajustaron las proporciones de agregados gruesos de tipo sílice (tamaño máximo 19 mm), arena de río como agregado fino (módulo de finura de 3.1) y la relación solución/precursor fue de 0.48, se elaboraron probetas cilíndricas, las cuales se sometieron a un curado térmico durante 24 horas una temperatura de 65 °C con una humedad relativa de 98%. Se ensayaron a compresión a una edad de 28 días con lo cual se consiguió concretos con una resistencia superior 30 MPa (Palomo, et al.,1999).

3.6.2 ESCORIAS DE HORNOS ALTOS

Las escorias de hornos alto, es un tipo de residuo que se obtiene de la fundición de aceros a altas temperaturas, después pasa por un proceso de enfriamientos, por lo que existe gran disposición de este material, ver fig.3.

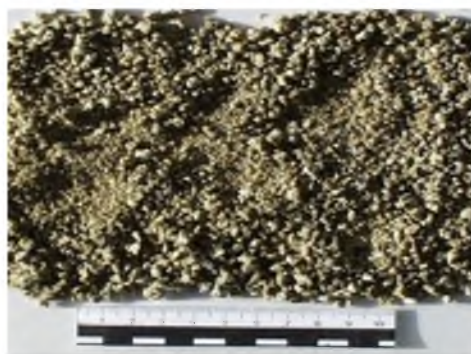


Fig. 3. Escorias de altos hornos, fuente (Cristalizada, 2011)

En España se realizaron investigaciones para elaborar concretos alcalinos con las escorias de altos hornos se utilizó una solución de hidróxido de sodio a 4 molar.

La escoria se molió hasta tener partículas de $4.500 \text{ cm}^2/\text{g}$ con una fase vítrea del 98-99%, se utilizó un agregado fino con una riqueza de 99% en SiO_2 , se elaboraron probetas de morteros 1x1x6cm, la relación de árido/escoria fue de 2/1 y la de la solución activante /escoria fue 0.35, el curado se llevó a cabo temperatura ambiente (25 °C), las probetas se ensayaron a compresión a la edad de 28 días, consiguiendo resistencias a la compresión de 60 MPa. Además se evaluaron las probetas a ataques de ácidos y sulfato, con eso se pudo comprobar que el concreto producido con la escoria posee ventajas

frente al concreto convencional, tales como gran resistencia mecánica, con menor calor de hidratación, resistencia a los sulfatos, al ataque por ácidos y elevada resistencia mecánica a las 48 horas de curado (Puertas, 1995).

3.1. APLICACIONES DE LOS CEMENTO ALCALINOS

Esta nueva generación de materiales, tiene aplicaciones en todos los campos de la industria, por ejemplos: Para la fabricación de contenedores para almacenar residuos tóxicos o radiactivos, como cemento alternativo al CPO, elaboración de morteros y concreto resistentes a los sulfatos (Valencia et al., 2018), fabricación de moldes para fundiciones de aleaciones de aluminio, fabricación de tubos para canalizaciones (Luukkonen, et al., 2018). Aunado a esto, este material posee ventajas frente al cemento portland ordinario, por ejemplo: resistencia mecánicas comparables al CPO, baja generación de CO₂ en su producción, baja permeabilidad, buena resistencia a ciclos de hielo-deshielo (Skvára, 2007) , gran resistencia ante la acción de los ácidos, resistencia al fuego (Luna, et al., 2015), resistencia a la corrosión (Davidovits, 1994), resistencia al ion cloruro (Davidovits & Resins, 1980) y gran resistencia a los sulfatos. Sin embargo, su desventaja frente al CPO, es que para su elaboración se requiere de soluciones alcalinas, lo que los hace poco seguro para ser manipulado por cualquier persona. Además, aún hay mucho que se desconoce sobre la cinética de reacción de estos materiales, por lo cual su utilización aún está en duda.

CAPÍTULO II PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Desde la invención del concreto a base de cemento portland, ha crecido exponencialmente el uso de este material dentro de la industria de la construcción de obras civiles, debido a sus propiedades mecánicas, convirtiéndolo en un material ideal para soportar grandes esfuerzos a compresión y su bajo costo de producción, lo ha convertido en el material más usado a nivel mundial. Por tal motivo, la industria cementera busca satisfacer la demanda de CPO aumentando así su producción, explotando canteras de arcillas, calizas, con lo que se fabrica el clinker, solo en el año 2018 se produjeron 4.1 billones de toneladas de cemento portland a nivel mundial, esto impacta negativamente al medio ambiente (Key facts & s.f.). Paralelamente a esto, existe un problema con la gestión de los residuos de construcción también conocido como escombros de concreto (escombros de losas, puentes y edificios, trabes, columnas). El escombros es un material que se obtiene en abundante volumen, producto de las demoliciones, difícil de reciclar o reutilizar, por lo cual la mayor parte de estos residuos terminan en tiraderos ilegales, en campos abiertos, calles y arroyos.

Solo en la Ciudad de México, cada día se producen alrededor de 7 mil toneladas de residuos de construcción, y un estimado de 10 millones de toneladas de escombros se producen anualmente en todo el país (Cascajo afecta áreas naturales protegidas de México ,s.f.).

Durante el sismo del 19 de septiembre de 2017 en la ciudad de México, se calcula que se generó alrededor de 250,000 metros cúbicos (CDMX necesita plan de manejo de escombros para casos de contingencia | El Economista, 2019), hasta la fecha no existe un método eficiente el cual aproveche al escombros al 100 %, sin embargo, últimamente se ha ido utilizando como agregado para la elaboración de nuevo concreto, con lo que se continua consumiendo más cemento (consejo mundial empresarial para el desarrollo sostenible, 2012).

4.1. DELIMITACIÓN

Este tema de tesis se limitó a la investigación del uso de escombros de concreto estructural como precursor en la activación alcalina, procedente de demoliciones de; losas, cadenas, trabes, contratraveses, muros de concreto armado y otros. También se estudió la viabilidad del hidróxido de calcio (Ca(OH)_2) e hidróxido de sodio (NaOH) como activadores alcalinos. Con el objetivo de recuperar las propiedades del cemento; tales como el fraguado, endurecimiento y su resistencia a la compresión.

4.2. JUSTIFICACIÓN

La presente investigación se enfocó en el estudio del escombros de concreto como precursor para elaborar un mortero alcalino debido a que este material se obtiene de manera abundante en la demolición de construcciones de concreto y habiendo pocas formas para procesar este residuo y reducir la contaminación de productos de las demoliciones de concreto. Por otro lado, con el crecimiento desmedido de las ciudades, cada vez se requiere de la construcción de más edificios, puentes, escuelas, hospitales y presas a base de concreto. El aumento de la demanda de este material obliga a las empresas cementeras a incrementar su producción anualmente, esto impacta negativamente al medio ambiente ya que durante el proceso de fabricación del cemento se liberan muchos gases de efecto invernadero al medio ambiente. Existen estudios que calculan que las empresas cementeras contribuyen entre el 5-7% del volumen total de CO_2 emitido a nivel mundial causando estragos en la capa de ozono, por otro lado, estas empresas consumen aproximadamente el 3% de energía a nivel mundial (Andrew, 2017).

La demolición de estructuras de concreto puede durar cuestión de minutos u horas, pero terminan produciendo un volumen muy alto de residuos, que comúnmente es conocido como escombros de construcción. Esta cifra es alarmante si se considera que todos los días se demuelen estructuras de concreto, considerando que solo se aprovecha una parte del volumen total generado lo cual hace que el reciclaje o reutilización sea un proceso poco eficiente (consejo mundial empresarial para el desarrollo sostenible, 2012). Se han

realizado muchas investigaciones buscando materiales alternativos para ser usado dentro de la construcción y sustituir al cemento portland, pero poco sea conseguido ya que otros materiales representan costos más altos y complejos procesos de fabricación. Por otro lado, se encuentran los cementos alcalinos, el cual requiere de un precursor que contengan SiO_2 y Al_2O_3 , en su composición, compuestos que el CPO también contiene, por ende, el concreto podría usarse como precursor en la activación alcalina y esta manera obtener un cemento alcalino aprovechando el escombros de concreto (Concreto, 2013).

5. HIPÓTESIS

Por medio de la activación alcalina usando hidróxido de calcio (Ca(OH)_2), e hidróxido de sodio (NaOH), se reactivarán los compuestos del cemento contenido en el escombros de concreto con lo cual se pretende obtener del 40 - 60% de la resistencia a la compresión de un mortero convencional.

6. OBJETIVOS

6.1. OBJETIVO GENERAL

Activar alcalinamente los compuestos del cemento contenido en el escombros de concreto producto de demoliciones, utilizando soluciones de hidróxidos altamente alcalinos, tales como el Ca(OH)_2 y el NaOH , para recuperar sus propiedades cementantes, fraguado, endurecimiento y resistencia a la compresión.

6.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterización de los materiales para la elaboración del concreto de partida.
- Preparación de material de partida (escombros de concreto).
- Estudio de los activadores alcalinos, NaOH y $\text{Ca}(\text{OH})_2$.
- Caracterización del escombros de concreto molido.
- Elaboración de probetas con mortero activado alcalinamente.
- Ensayos a compresión de probetas activadas alcalinamente.
- Identificar las condiciones óptimas de dosificación de solución activadora/concreto molido.
- Análisis estadístico de los datos obtenidos, mediante un análisis Anova.
- Caracterización estructural del mortero activado alcalinamente, (DRX).

CAPÍTULO III

DESCRIPCIÓN Y DESARROLLO DEL EXPERIMENTO

7. ESCOMBRO DE CONCRETO ESTRUCTURAL

Son desechos provenientes de demolición de obras civiles como: edificios, puentes, casa, etc, considerado un material inerte con una resistencia a la compresión superior a los 200 kg/cm² (Meli, s.f.).

Como se mencionó el escombros proviene de estructuras de concreto por ende la calidad del concreto influye directamente con la composición del escombros, esto conlleva a que exista una gran cantidad de variables que modifican su composición.

Para esta investigación, se optó reducir estas variables por lo cual se elaboró un diseño de mezclas para un concreto con un $f'c = 250$ kg/cm², después se elaboraron probetas cilíndricas de concreto, esto con el objetivo de garantizar las proporciones de los materiales y que la resistencia a la compresión cumpla con las de un concreto de uso estructural como lo indica la norma ACI 211.1-91, para todo este proceso fue necesario realizar varios estudios para determinar las diferentes características de los agregados finos y grueso a utilizar ya que estos datos influyen directamente en la proporción a utilizar para conseguir una resistencia deseada. A continuación, se determinaron las diferentes características de los agregados fino y grueso, ver anexo 17 y 18.

7.1. PREPARACIÓN DE ESCOMBRO DE CONCRETO

Inicialmente se elaboraron tres cilindros de concreto, se curaron, cabecearon y se ensayaron a compresión, finalmente se determinó su resistencia a la compresión, con lo cual se aseguró de que la resistencia obtenida está en el rango de 250-300 kg/cm², confirmando así de que se trata de un concreto de uso estructural, ver anexo, punto 20.

Por otra parte, en las investigaciones que se ha realizado en torno a las activaciones alcalinas de cenizas volantes y escorias de altos hornos concluyen, en que se requiere de un precursor con dimensiones de partícula inferiores a 45 micrómetros. Por tal motivo las probetas de concreto se sometieron a varios procesos como; corte, molienda decantación, secado, molienda y tamizado.

Para el corte se utilizó una sierra marca CORE CUT, con sistema de aspersión de agua para atrapar las partículas de polvo de concreto, el proceso consistió en realizar cortes a cada 3 mm en la sección transversal de la probeta en forma continua, ver fig. 4.



Fig. 4. Proceso de corte, fuente propia.

De este proceso se obtuvo una mezcla de agua y concreto molido, todo este material fue recolectado y se dejó decantar en el interior de un contenedor de 20 litro durante 24 horas, todo el tiempo se mantuvo cerrado el bote. Con la decantación se consiguió separar el agua y el sólido, después se extrajo la mayor cantidad del líquido, dejando al fondo la mayor cantidad de pasta de concreto molido, ver fig. 5.



a) Pasta de agua y cemento b) Decantación en contenedor.

Fig. 5. Pasta de concreto, fuente propia.

7.1.1 PROCESO DE SECADO DE LA PASTA

Este proceso consistió en poner a secar la pasta de concreto molido en un horno de convección marca Fisher sientific, se vertió la cantidad suficiente dentro de una charola de lámina galvanizada y después se introdujo dentro del horno, después se inició el proceso con una temperatura de 30 °C y comenzó a incrementarse de 5 grados por minutos hasta alcanzar 110 °C, el tiempo de secado duró 48 horas, se obtuvo un compuesto de grumos y partículas de concreto que no fue molido, ver fig. 6.



a) Horno marca Fisher



b) Pasta de concreto



c) Concreto molido seco

Fig. 6. Proceso de secado, fuente propia.

7.2. MOLIENDA Y TAMIZADO

Una vez finalizado el proceso de secado se retiró la muestra del horno y se dejó enfriar durante 30 minutos a temperatura ambiente, se pudo observar que la muestra se había endurecido formando grumos, por lo cual se procedió a molerlo en un molino de bolas marca U.S. STONEWARE. Se utilizó un recipiente de porcelana con capacidad de un kg y piezas de burundum como medios de molienda, primero se vertieron 250 g de burundum en el interior del recipiente, después se vertió 400 g de E.C.M. y se volvió a verter más piezas de burundum las cuales molieron la muestra mediante impacto, se cerró el contenedor y se colocó sobre los rodillos del molino. El equipo se encendió, se configuró a una velocidad de 300 rpm, el proceso de molienda duró aproximadamente 5 minutos. Después se retiró la muestra del interior de la jarra de porcelana y se observó

que había muchas partículas de gran tamaño en la muestra, finalmente se tamizó la muestra, para este proceso se utilizó un tamiz del número 200 con charola y tapa, con esto se excluyó las partículas de gran tamaño, ver fig. 7.



b) Material



b) Recipiente



c) Molino de bolas



c) Escombros tamizados

Fig. 7. Proceso de molienda y tamizado, fuente propia.

8. CARACTERIZACIÓN DE E.C.M.

8.1. CÁLCULO DE LA DENSIDAD APARENTE

Para este proceso se utilizó una muestra representativa E.C.M, se pesaron 18.39 g en una balanza analítica marca ACCULAB y se colocó en el interior de un vaso precipitado graduado de 80 ml, después se acomodó la muestra de tal manera que tuviese una superficie uniforme, se observó que el volumen fue de 40 ml, equivalente a 40 cm³.

A continuación, se calculó la densidad con la siguiente formula.

$$d=m/v$$

$$d = \frac{18.39g}{40cm^3}$$

$$d=0.459 \text{ g/cm}^3$$

Donde:

m: masa

d: densidad

v: volumen

8.2. PESO ESPECÍFICO APARENTE DE E.C.M.

Para el cálculo del peso específico de la muestra se utilizó la densidad aparente calculada en el punto anterior y haciendo uso de la siguiente formula:

$$Pe = (p) \times (g)$$

$$Pe = (459 \text{ kg/m}^3) (9.81 \text{ m/s}^2)$$

$$Pe = 4502.79 \text{ N/m}^3$$

Donde:

p: densidad de la muestra (459 kg/m^3)

g: gravedad

8.3. ÁREA SUPERFICIAL DEL E.C.M.

Para conocer el tamaño promedio de las partículas, se determina el área superficial dado por cm^2/g , ya que las partículas son tan pequeñas que ya no es posible el tamizado con mallas. A continuación, se describe el método para determinar el área superficial utilizando el aparato de permeabilidad de Blaine.

8.3.1 MÉTODO DE PERMEABILIDAD AL AIRE DE BLAINE

Para realizar este proceso se basó en el procedimiento descrito en la norma ASTM C 204-84 (Simeon J, s.f.).

Para determinar el área superficial se usó el método de permeabilidad, para el cual se utilizó el aparato de permeabilidad al aire, el método consiste en determinar el tiempo que tarda el aire en pasar a través de una muestra de cemento estándar y de una muestra de prueba. A continuación, se describe como se desarrolló el procedimiento para determinar el área superficial del E.C.M, siguiendo los siguientes puntos:

8.3.2 CALIBRACIÓN DEL APARATO DE BLAINE

Determinación de la cantidad de la muestra de cemento

Para este proceso se utilizó una celda de permeabilidad y embolo, primero se colocó el disco de metal perforado en el interior de la celda de permeabilidad y después el papel filtro, y con cuidado se vertió la cantidad suficiente de mercurio para llenar la celda de permeabilidad, se enrasó con un vidrio de 6 mm de espesor para eliminar el exceso de mercurio. Después se extrajo el mercurio del interior del cilindro y se determinó su masa usando una balanza analítica marca ACCULAB, se obtuvo una masa de 103.607 g.

A continuación, se procedió a pesar 2.8 g de cemento estándar, además se vertió en el interior de la celda de permeabilidad y se le colocó el papel filtro después se procedió a compactarlo con el pistón, paso siguiente se vertió el mercurio en el interior del cilindro hasta desbordarse y se enrasó con el vidrio. A continuación, se retiró el mercurio del interior del cilindro después se calculó su masa, dando así 76.165 g.

Finalmente se calculó el volumen del lecho del cemento estándar mediante la siguiente formula:

$$V = \frac{w_a - w_f}{d}$$

$$V = \frac{(103.6076 - 76.1656)}{313.54 \text{ g/cm}^3}$$

$$V = 2.02 \text{ cm}^3$$

Donde:

V= volumen

wa= masa inicial del mercurio

wf= masa final del mercurio

d= densidad mercurio: 313.54 g/cm³

A continuación, se calculó el peso de la muestra de cemento estándar mediante la siguiente fórmula:

$$W = (P) (V) (1 - \epsilon)$$

$$w = (3.15 \text{ g/cm}^3) (2.02) (1 - 0.5)$$

$$w = 3.18 \text{ g}$$

Donde:

W: peso del cemento estándar

P: peso específico del cemento estándar (3.15 g/cm^3)

V: volumen promedio del lecho del cemento (2.02 cm^3)

ε : porosidad deseada del lecho en aumento (0.500 ± 0.005)

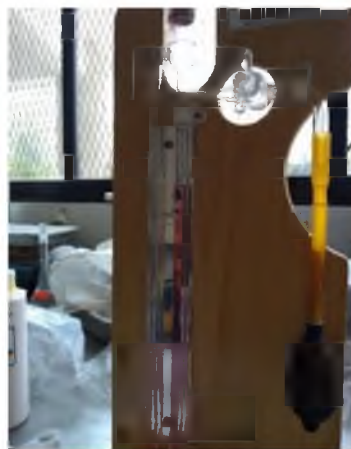
8.3.3 DETERMINAR EL FACTOR DEL APARATO DE PERMEABILIDAD AL AIRE DE BLAINE.

Primero se colocó el disco perforado en el interior de la celda de permeabilidad luego el papel filtro y después se empujó con el embolo. A continuación, se pesó la cantidad 3.18 g de cemento estándar y se vertió en el interior de la celda, luego se colocó el otro papel filtro sobre la cama de cemento y se compactó con el pistón.

Por otro lado, se llenó el manómetro en forma u con líquido manométrico, después se colocó la celda de permeabilidad en el compartimento del equipo y se presionó para que bloquear la entrada de aire, se procedió a evacuar el aire abriendo la válvula y presionando la perilla, el líquido manométrico subió hasta la marca superior (0) y se cerró la válvula. El líquido comenzó a descender y cuando el menisco alcanzó la marca (1) se accionó el cronómetro y se detuvo hasta que el menisco alcanzó la marca (2), ver fig. 8, se tardó un tiempo de 76.65 segundos.



a) Colocación de la celda



b) Descenso de liquido manométrico.

Fig. 8. Proceso de permeabilidad, fuente propia.

El factor del aparato Blaine FB, se obtuvo mediante la siguiente ecuación:

$$FB = \frac{S_s}{\sqrt{T}}$$

$$FB: \frac{3460}{\sqrt{76.57}}$$

$$FB = 395.43 \text{ UB}$$

Donde:

$$S_s = 3460 \text{ cm}^2/\text{g}$$

S_s : superficie específica en cm^2/g de la muestra de cemento estándar

T : tiempo en segundos (76.65 s)

8.3.4 DETERMINACIÓN DEL VOLUMEN DE CEMENTO ESTÁNDAR

Para determinar el volumen de cemento se utilizaron los siguientes datos.

Datos:

$$T = 30 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$W_c: 12.3091 \text{ g}$$

$$W_a: 116.3959 \text{ g}$$

$$W_b: 91.6132 \text{ g}$$

$$D_{\text{mercurio}} = 13.51 \text{ g/cm}^3$$

Donde:

T : temperatura del laboratorio

W_c : peso del crisol sin el mercurio

W_a : masa inicial con mercurio

W_b : masa del mercurio

D_{mercurio} : densidad del mercurio

Cálculos

$$W1 = W_a - W_c = 116.3959 - 12.3091 = 104.0868 \text{ g}$$

Entonces:

$$V1 = (W2 - W1) / D = (104.0868 - 79.3041) / 13.51$$

$$\text{Volumen de cemento} = 1.8317 \text{ cm}^3$$

8.3.5 DETERMINACIÓN DEL ÁREA SUPERFICIAL DEL E.C.M.

Una vez que se calibró el aparato de Blaine se procedió a determinar la finura del escombros de concreto molido. Primero se pesó el crisol (w_c) y se colocó el disco perforado en el interior del crisol junto con el papel filtro y se acomodó con el pistón. Después se pesó 2.18 g de E.C.M y se vertió dentro del crisol, después se colocó otro papel filtro y se volvió a compactar, a continuación, se colocó el crisol en el compartimento del equipo manométrico y se extrajo todo el aire abriendo la válvula y presionando la perilla, esto permitió que el líquido manométrico subiera por encima de la primera marca a continuación se tomó el tiempo cuando el líquido empezó a descender por la primera marca y se detuvo el cronometro hasta que el líquido paso por la segunda marca tardando un tiempo de 277 segundos, para el cálculo del área superficial se utilizó los siguientes datos :

Temperatura ambiente: 34 °C

Tiempo T: 277s

ϵ : 0.500 ± 0.005

ϵ_s : 0.500 ± 0.005

$\sqrt{\epsilon^3}=0.354$

B=0.9

Peso específico de E.C.M =4510.14 N/m³

Se calculó el área superficial mediante la siguiente ecuación:

$$S = [(FB) P_s(1 - \epsilon_s)(\sqrt{\epsilon^3})(\sqrt{T})] / [P(1 - \epsilon)(\sqrt{\epsilon_s^3})]$$

$$S = [(395.43) 3.15 (1 - \sqrt{0.5^3}) (0.354) (\sqrt{277})] / [1.47(1 - 0.5) (0.354)]$$

$$S=14102.71 \text{ cm}^2/\text{g}$$

Dónde:

S: Superficie específica de la muestra de estudio (E.C.M.), cm^2/g .

FB: Factor Blaine del aparato.

T: segundos transcurrido en el descenso del líquido manométrico entre los meniscos.

ε : Porosidad del lecho preparado de la muestra de prueba.

ε_s : Porosidad del lecho preparado de la muestra estándar en la calibración del aparato.

P: Peso específico aparente del E.C.M.

P_s: Peso específico del cemento estándar (3.15).

8.4. ANALISIS DE DIFRACCIÓN DE RAYOS X (DRX)

Para determinar la composición microestructural del escombro de concreto se empleó un difractómetro de rayos x D8 Advance BRUKER empleando una radiación de Cu-ka(1.54Å) en un intervalo de barrido de 10°- 50 ° en el rango 2 Theta, el análisis se realizó a un voltaje de 30 kv y una corriente de 10 mA, a una velocidad de 4° min, de este análisis se obtuvo un perfil de difracción.

Para la interpretación del perfil de difracción rayos x se utilizó el software Match 3 y bases de datos de licencia libre, el software traza la gráfica del perfil que se obtuvo de manera experimental, haciendo una comparación de la intensidad de los picos graficados con la base de datos, para identificar los compuestos y después mediante un refinamiento Rietvel se ajusta el perfil experimental con el teórico para obtener una mayor precisión de los compuestos y fases presentes en la muestra.

Se identificaron los siguientes óxidos y su porcentaje correspondiente de manera general, ver tabla 2.

Tabla 2. Compuestos del E.C.M, fuente propia.

Compuestos	Porcentaje %
SiO ₂	62.6
CaCO ₃	11.7
CaO	7.6
Fe ₂ O ₃	6.4
MgO	3.6
Al ₂ O ₃	3.0
TiO ₂	0.5
otros	0.9

También se identificaron varias fases mineralógica, el más altos fue el cuarzo con un intensidad máxima de 3000, seguido por la etringita, estratlingita, alita, calcita, portlandita, entre otros, ver fig.9 y 10 (Ikuta D, et al. 2007).

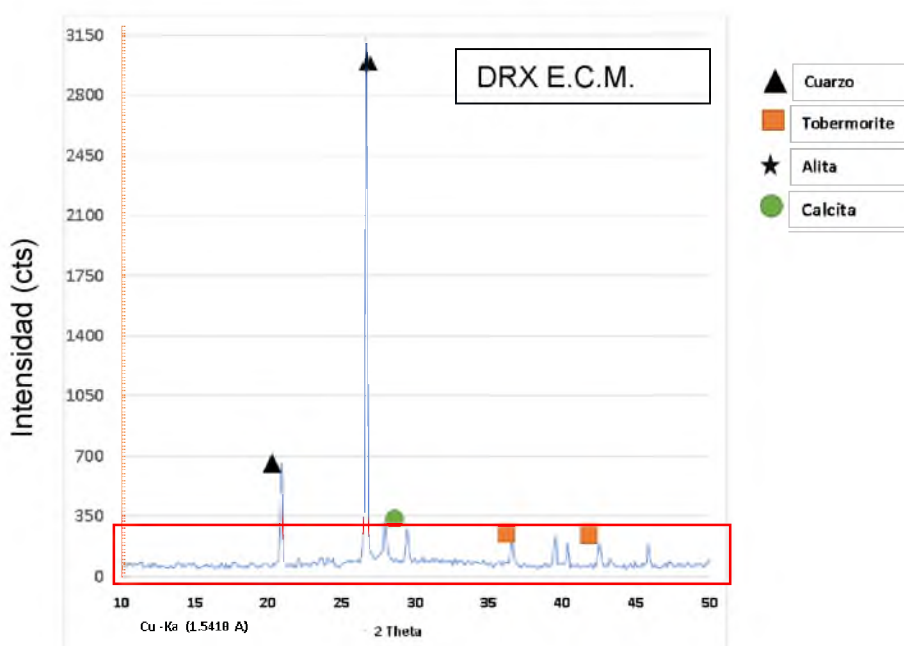


Fig. 9. DRX de E.C.M, fuente Match 3.

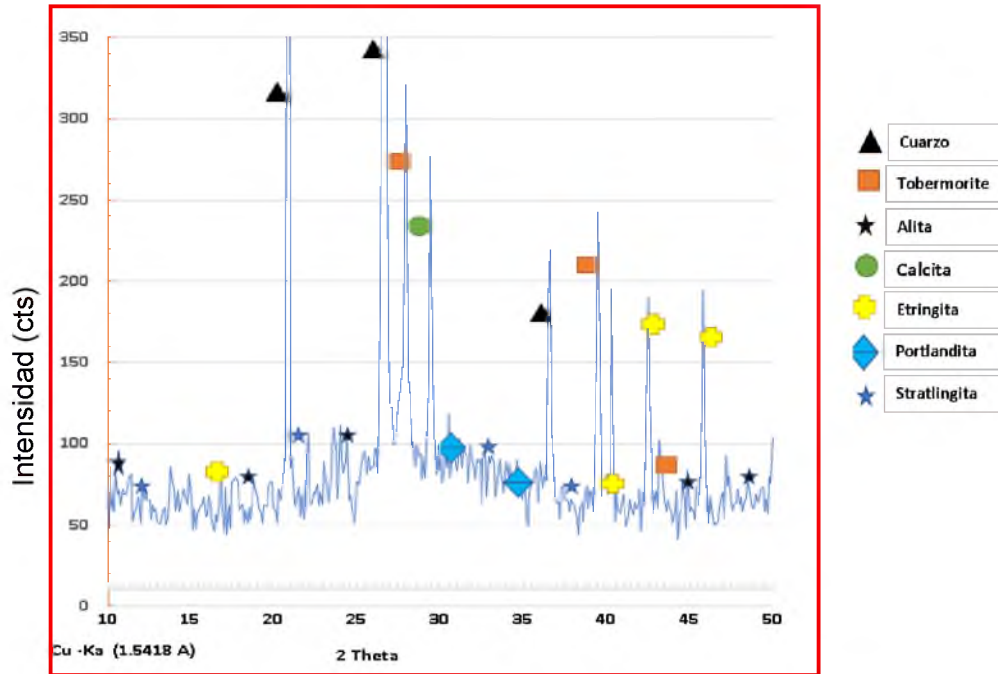


Fig. 10. Ampliación de DRX, fuente Match 3.

Conclusión:

cómo se pudo verificar, el escombros de concreto posee compuesto de SiO_2 (62.6%) y Al_2O_3 (3%), sin embargo, el porcentaje de Al_2O_3 es muy inferior a los que se encuentra en la ceniza volante y la escoria de hornos altos que se ha investigado. Sin embargo, existe la posibilidad de que el E.C.M pueda ser activado alcalinamente.

9. ACTIVADORES ALCALINOS EMPLEADOS EN ESTA INVESTIGACIÓN

A continuación, se describen dos de los activadores empleados en esta investigación: El hidróxido de calcio (Ca(OH)_2) por su disponibilidad y su bajo costo de adquisición y por otro lado el hidróxido de sodio (NaOH), siendo este último el más usado en la activación alcalina. Por lo cual se usaron para realizar la activación alcalina de escombro de concreto (David, E., & Martínez, R. 2009).

9.1. HIDRÓXIDO DE CALCIO (Ca (OH)_2)

El hidróxido de calcio o cal apagada es un polvo fino de color blanco, que se obtiene de la calcinación del carbonato de calcio natural (por ejemplo: caliza, creta, conchas) a temperaturas de $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$. De este proceso se obtiene como resultado la cal viva u óxido de calcio, después pasa por un proceso de hidratación con agua, reaccionando y liberando calor, oxidándose para convertirse en hidróxido de calcio (Ca(OH)_2).

El hidróxido de calcio posee un peso molecular de 74.093 g/mol y una densidad de 2.211 g/cm^3 en estado sólido. Pose un punto de fusión de $580\text{ grados centígrados}$ y poca solubilidad en agua, pudiéndose disolver $1.89\text{ gramos por litro}$ a $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, $1.73\text{ gramos por litro}$ a $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $0.66\text{ gramos por litro}$ a $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Hidróxido de Calcio: Fórmula, Propiedades, Reactividad y Usos, s.f.).

9.1.1 PRUEBA DE DISOLUCIÓN

Para conocer la solubilidad del hidróxido de calcio, se preparó una disolución de hidróxido de calcio a cuatro molar, en un litro de agua destilada (296.16 g /L), se observó que la disolución era lenta por ende se continuo la agitación de mezcla durante 60 minutos, después se dejó reposar durante 180 minutos para que las partículas que se encontraban suspendidas se sedimentaran, quedando así en la parte superior del contenedor solo el

hidróxido de calcio disuelto en el agua. Se observó que el hidróxido de calcio por su composición posee poca solubilidad con lo cual se comprueba lo descrito en la literatura, sin embargo, tiene un pH de 12 (Hidroxido de calcio controversia, s.f.), ver fig. 11.



Fig. 11. Disolución de hidróxido de calcio, fuente propia.

Sin embargo, se han utilizado para la activación de las escorias de altos hornos, (Fernández Jiménez et al., 1996). Por ende, esto no descartó al hidróxido de calcio como un activador alcalino.

9.2. HIDRÓXIDO DE SODIO (NaOH)

Hidróxido de sodio (NaOH) o sosa caustica es un compuesto solido cristalino de que se puede encontrar en formas de escamas y de pellets, se obtiene de diferentes métodos, por ejemplo:

- Producto de una reacción entre el carbonato de sodio y el hidróxido de calcio, (INSHT, 2010).
- De la electrólisis del agua de mar, entre otros.

El hidróxido sodio es altamente alcalino, posee un pH de 13.5 y un peso molecular de 64 g/mol, (UNAM, 2016). También es uno de los compuestos más usados en la activación de escorias de altos hornos y cenizas volantes (Palomo & Criado, 2006).

9.2.1 PRUEBAS DE DISOLUCIÓN

De igual manera se realizó una prueba de disolución para determinar qué tan soluble es NaOH en agua destilada, se disolvieron 40 g de pellets de NaOH con una pureza de 99 % en 1000 ml de agua destilada, se usó una varilla de vidrio para agitar la solución constantemente durante cinco minutos. A simple vista se observó que los pellets de NaOH se disolvieron por completo y con un potenciómetro se midió el pH, se obtuvo una lectura de 13.5, estas características hacen al hidróxido de sodio un activador alcalino idóneo para la activación alcalina (Gómez, 2005), ver fig. 12.



Fig. 12. Disolución de NaOH, fuente propia.

10. DESCRIPCIÓN DEL EXPERIMENTO

Por la limitación del E.C.M. se optó por elaborar probetas de mortero, siguiendo lo estipulado en la norma (NMX-C-021-ONNCCE-2010, Mortero), para el ensayo de morteros de cemento hidráulico, utilizando especímenes cúbicos de 5cm x 5cm x 5cm. Se elaboraron como máximo tres muestras por cada edad de curado tal como lo indica la norma NMX-C-148-ONNCCE, la proporción del mortero fue de 1:2.75 (una parte de cemento por 2.75 partes de arena). El experimento constó de probetas testigo y de probetas activadas alcalinamente, a continuación, se describe la preparación de ambas probetas.

10.1. PROBETAS TESTIGO

Para la elaboración de las probetas testigo se utilizó cemento portland ordinario, arena con mf de 2.8 y agua destilada con un pH de 7, se utilizó una relación agua /cemento de 0.48, el curado fue por inmersión en una solución de hidróxido de calcio, el ensayo compresión se realizó a la edad de 7, 28 y 56 días de edad (Cabinets, R, et al., 2008).

10.2. PROBETAS DE MORTERO ACTIVADAS ALCALINAMENTE

A continuación, se enlistan los puntos más importantes a considerar para la elaboración de las probetas.

- Se sustituyó el CPO por el escombros de concreto molido al 100% (Fernández Jiménez et al., 1996).
- Se reemplazó el agua por la solución alcalina (Kovalchuk et al., 2008).
- Se utilizó soluciones a 4,5,6,7,8 y 9 molar de NaOH (nivel bajo y alto).
- Se utilizó una concentración de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ al 0.02 molar.
- La edad de ensayo fue a los 7, 28 y 56 días de curado, por norma (NMX-C-159-ONNCCE-2004 - Elaboración de especímenes laboratorio).

A continuación se puede ver las proporciones de los activadores y de los agregados que se utilizaron, ver tabla 3.

Tabla 3. Diferente concentración propuesta, fuente propia.

N°	muestras	Material	E.C.M g	CPO g	Agua ml	Arena g	Mol $\text{Ca}(\text{OH})_2$	Mol NaOH	Relación A/C
1	6	Ref CPO	-----	250	242	1375	-----	-----	0.48
2	6	E.C.M.	500	-----	242	1375	0.02		0.48
3	6	E.C.M.	500	-----	242	1375	-----	9	0.48
4	6	E.C.M.	500	-----	242	1375	-----	8	0.48
5	6	E.C.M.	500	-----	242	1375	-----	7	0.48
6	6	E.C.M.	500	-----	242	1375	-----	6	0.48
7	6	E.C.M.	500	-----	242	1375	-----	5	0.48
8	6	E.C.M.	500	-----	242	1375	-----	4	0.48

10.3. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

El diseño de experimentos es fundamental para estudiar cómo influyen las diferentes variables sobre el resultado, el diseño experimental funciona mediante una entrada de datos, un proceso, variables controlables, variables no controlables y un resultado.

Es por eso que se propuso un diseño factorial 2^2 ya que se tiene dos variables siendo x1 la edad de curado con 3 niveles y x2 la concentración de la solución alcalina con 6 niveles, que influyen directamente con la resistencia a la compresión. Para poder realizar las posibles combinaciones y analizar el resultado del ensayo a compresión, también se realizó un análisis de varianza (Anova) el cual evalúan la importancia de uno o más factores al comparar las medias de la variable de respuesta en los diferentes niveles de los factores, también se propuso un porcentaje de Confianza = 95%, (Montgomery, D, (2004)).

11. PREPARACION DE LAS PROBETAS TESTIGO

Para la elaboración de las probetas de referencia se basó en las proporciones indicadas en la norma NMX-C-061-ONNCCE, ver tabla 4.

Tabla 4. Dosificación del mortero de CPO.

Materiales	Caso 1
Numero de especímenes	6
Cemento Portland ordinario	500 g
Arena graduada	1375 g
Agua para CPO	242 ml
Agua para CPP, CPC, CPEG, CPS, CEG	La necesaria para dar una fluidez de 110 % $\pm$ 5%

Fuente (NMX-C-061-ONNCCE-2010).

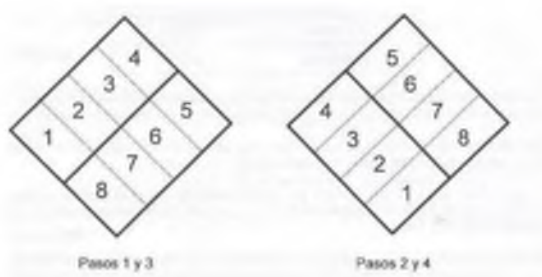
11.1. ELABORACIÓN DE LAS PROBETAS

Para la elaboración de las probetas de mortero estructural se siguió la norma (NMX-C-061-ONNCCE-2010), se utilizó una balanza marca ae ADAM con precisión de 0.1 g para pesar los materiales: cemento arena, para medir el agua a utilizar se utilizó una probeta graduada de 100 ml. y dos moldes de bronce con tres cavidades cubicas cada una. A continuación, se describe los pasos que se siguieron para elaborar las probetas de mortero estructural. Teniendo todos los materiales en las proporciones especificadas se procedió a mezclarlo en un recipiente, primero se vertió toda el agua y se le fue adicionando gradualmente el cemento, al mismo tiempo se mezcló con una cuchara metálica hasta que se consiguió una mezcla homogénea, finalmente se le fue adicionando la arena a la mezcla. Este orden facilitó el mezclado, el proceso de mezclado duró 5 minutos, ver fig. 13.



a) Preparación de moldes b) Preparación de la solución C) Preparación del mortero
Fig. 13. Preparación de las probetas, fuente propia.

Después se depositó la mezcla en los moldes de bronce, previamente fueron limpiados estos moldes y se les aplicó una capa de aceite mineral, que funge como desmoldante. El llenado de los moldes se realizó en dos fases, primero se llenó la mitad de un cubo hasta la mitad y rápidamente fue compactado 16 veces con un pisón con una sección transversal de 13 mm x 25 mm y 12 cm de largo, siguiendo la secuencia, ver fig. 14.



a) Secuencia de pisón

b) Apisonamiento de las probetas

Fig. 14. Secuencia de pisón fuente (NMX-C-061-ONNCCE-2010, s.f.).

Después se llenó la otra mitad del molde y se volvió a realizar el proceso de compactado, se enrazó con el pisón y se aplanó la cara superior de las probetas, cabe aclarar que para empezar a hacer el llenado de otra cavidad se terminó de llenar el anterior, este mismo proceso se repitió con las seis probetas que se elaboraron, finalmente se dejaron los moldes en un área donde no hubiera cambios bruscos de temperatura hasta que cumplieron una edad de 24 horas.

11.2. CURADO DE LAS PROBETAS

Para el curado de probetas se siguió lo establecido en la norma (NMX-C-148-ONNCCE-2010 - Cuartos de curado).

Después de transcurrido las 24 horas de que se elaboraron las probetas de mortero estructural se procedió desmoldarlos, se extrajeron las probetas y por otro lado se preparó una disolución de hidróxido de calcio, con una proporción de 8 gramos por cada litro de agua, para evitar el fenómeno de lixiviación del mortero.

A continuación, introdujeron las seis probetas en la solución, donde tres de las probetas permanecieron siete días de curado y los otros tres restantes permanecieron 28 días, la disolución de $\text{Ca}(\text{HO})_2$ se cambió tres veces durante el tiempo que duró el curado.

ver fig. 15.



a) Preparación de la solución.



B) Curado de las probetas.

Fig. 15. Proceso de curado, fuente propia.

11.3. ENSAYO A COMPRESIÓN

Las probetas de mortero a base cemento Portland fueron ensayadas a compresión a una edad de 7, 28 y 56 días, como lo indica la norma, (NMX-C-083-ONNCCE-2014 - Compresión, s.f.).

Para el ensayo a compresión se utilizó una prensa eléctrica marca DAVISA con capacidad de 120 toneladas, el proceso comenzó colocando la probeta marcado con el número uno sobre la placa base, las caras laterales que estuvieron en contacto con el molde son los que fueron alineados con el eje de la placa de carga mientras que la placa superior hace un contacto suave y uniforme sobre la cara superior de la probeta después se reinició el equipo y se procedió a cerrar la puerta de la prensa, Ver fig. 16.



a) Probetas



b) Colocación



c) Ensayo a compresión

Fig. 16. Ensayo a compresión de Probetas de mortero, fuente propia.

A continuación, se presionó el botón de inicio y el equipo comenzó con la prueba, aplicando una carga de 1 toneladas/minuto. La carga fue aplicada de manera uniforme, después de haber transcurrido 4 minutos el equipo automáticamente se detuvo, esto es debido a que la probeta falló a compresión, de la misma manera se ensayaron las 3 probetas de mortero y se obtuvieron los siguientes resultados, también se tomaron los datos de cada probeta, ver tabla 5.

Tabla 5. Ensayo a compresión de probetas de CPO, fuente propia.

Probeta	Dimensiones en mm	Masa (g)	Fecha de elaboración	Fecha de ensayo	Carga de ruptura
Ensayo a los 7 días de curado					
1	50 x 50 x 49	276.6	29/04/2019	13/05/2019	3.5 ton.
2	50 x 50 x 49	274.4	29/04/2019	13/05/2019	3.7 ton.
3	49 x 50 x 50	275.4	29/04/2019	13/05/2019	3.4 ton.
Ensayo a los 28 días de curado					
1	50 x 50 x 49	277.2	29/04/2019	27/05/2019	4.2 ton.
2	50 x 50 x 49	275.3	29/04/2019	27/05/2019	4.4 ton.
3	49 x 50 x 50	276.3	29/04/2019	27/05/2019	4.3 ton.
Ensayo a los 56 días de curado					
1	50 x 50 x 49	277.2	29/04/2019	25/06/2019	4.3 ton.
2	50 x 50 x 49	275.3	29/04/2019	25/06/2019	4.4 ton.

A continuación, se calculó la resistencia a la compresión de cada uno de las probetas.

11.4. RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN A 7, 28 Y 56 DÍAS DE EDAD

Para determinar la resistencia a la compresión se siguió el procedimiento establecido en la norma (NMX-C-061-ONNCCE-2010.) mediante la siguiente formula.

$$R = \frac{C_{\text{máx}}}{A}$$

Donde:

$C_{\text{máx}}$ es la carga máxima en (kgf).

R es la resistencia a la compresión.

A es el área de la sección transversal del espécimen.

Los resultados de se pueden observar en la tabla 6.

Tabla 6. Resistencia a la compresión 7, 28 y 56 días.

Ensayo a compresión a 7 días de curado	
Probeta	Resistencia kg/cm²
Probeta 1	138.4 kg/cm ²
Probeta 2	148 kg/cm ²
Probeta 3	136 kg/cm ²
Resistencia promedio	140.8 kg/cm ²
Ensayo a compresión a 28 días de curado	
Probeta 1	168 kg/cm ²
Probeta 2	176 kg/cm ²
Probeta 3	172 kg/cm ²
Resistencia promedio	172 kg/cm ²
Ensayo a compresión a 56 días de edad	
Probeta 1	173 kg/cm ²
Probeta2	174 kg/cm ²
Resistencia promedio	173 kg/cm ²

CAPÍTULO IV

ACTIVACIÓN ALCALINA

12. ELABORACIÓN PREVIA DE PROBETAS ACTIVADAS

Debido a que desconoce el comportamiento del escombro de concreto como precursor en la activación alcalina se tomó la decisión de elaborar 2 probetas previamente y de esta manera evaluar su comportamiento ante la solución alcalina de bajo nivel y alto. A continuación se describe la preparación.

12.1. ACTIVACIÓN CON NaOH A 4 MOLAR, NIVEL BAJO

Según la norma NMX-C-061-ONNCCE, para elaborar 6 probetas cúbicas se requiere de 500 g de cemento, 1375 g de agregado fino y 242 ml de agua, en base a estos datos se calculó cantidad del material necesario para la preparación de 2 probetas cúbicas. Se utilizó 166 g de E.C.M, 224 g de agregado fino, 40 ml. de agua y 6.4 de NaOH, Primero se preparó la solución alcalina, en un vaso de precipitado se vertieron 40 ml de agua destilada y después se le adicionó el hidróxido de sodio, después se agitó con una varilla de vidrio. En un recipiente se agregó todo el E.C.M. y se le fue adicionando la solución de hidróxido de sodio de cuatro molar, y se mezcló con una cuchara, una vez mezclado se le adicionó el agregado fino y se comenzó a mezclar hasta obtener una mezcla homogénea, pero se observó que la cantidad de solución alcalina no era suficiente para una mezcla trabajable, por tal motivo fue necesario agregar 20 ml más de solución alcalina a la mezcla, pero tampoco fue suficiente, la mezcla seguía muy seca y se le volvió a adicionar 10 ml de la solución, con esto se logró obtener una mezcla trabajable.

Por otro lado se limpió el molde de bronce y se le aplicó una capa de aceite mineral como desmoldante, después se llenaron las cavidades de los moldes, el llenado se realizó en dos partes, primero se llenó hasta la mitad y se apisonó como lo indica la norma NMX-C061-ONCE, después se llenó la otra mitad y de volvió a apisonar finalmente se enrasó y se uniformizó la cara superior y para terminar se dejó fraguar durante 24 horas. Finalmente se desmoldaron las probetas, se observó que las muestras poseían una consistencia suave y poca dureza, por lo cual se sometieron a un proceso de curado en una solución de Ca(OH)_2 de 8 g/ litro, ver fig. 17.



Fig. 17. Curado en una solución de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, fuente propia.

Después de 7 días de curado se observó que las probetas poseían poca dureza, a partir del resultado de la activación del E.C.M. con una solución de hidróxido de sodio de 4 molar, se concluye que para elaborar un mortero trabajable se requiere de una relación escombro/ solución de 0.75 debido al gran volumen del escombro de concreto y que el método de curado no era el adecuado ya que no ayudó a que las probetas fraguaran, por lo tanto, se propone evaluar diferentes tipos de curado para este mortero.

12.2. ELABORACIÓN PREVIA DE PROBETAS A 8 MOLAR, NIVEL ALTO

En base a los resultados obtenidos en el punto anterior se decidió elaborar 2 probetas de E.C.M. con una concentración de 8 molar para estudiar el comportamiento del precursor. A continuación, se describe el procedimiento, se utilizó 166 g de E.C.M, 224 g de agregado fino, 70 ml. de agua y 22.4 g de NaOH.

Primero en un recipiente se vertió el E.C.M y se adicionó la solución alcalina, se mezcló con una cuchara, después se le adicionó el agregado fino y se siguió mezclando hasta conseguir una mezcla homogénea.

Se usó un molde de bronce, se limpió y se le aplicó una capa de aceite como desmoldante, después se vertió el mortero hasta la mitad de la cavidad del molde y se apisonó como se describe en la norma NMX-C-061-ONNCCE, se volvió a repetir el proceso hasta llenar 2 cavidades del molde, se dejó fraguar durante 24 horas. Se observó

a simple vista que el mortero fraguó y obtuvo una consistencia dura, por ende se procedió al desmoldado de las probetas, se desarmaron los moldes de bronce pero no se pudo extraer las probetas ya que el NaOH neutralizó el aceite que se usó como desmoldante haciendo que las probetas se adhirieran a las paredes del molde, con un una espátula se procedió a la separación pero terminaron rompiéndose las esquinas de las probetas, con lo que se concluyó cambiar el desmoldante por una capa de plástico Diurex para evitar que las probetas se adhirieran al molde, ver fig. 18.



a) Moldes con restos de probeta



b) Probeta rota

Fig. 18. Desmoldado de probetas, fuente propia.

12.3. EVALUACIÓN DE 3 TIPOS DE CURADOS

Se analizó 3 tipos de curados, los cuales fueron: curado en una solución de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, curado térmico a $65\text{ }^{\circ}\text{C}$ y curado a temperatura ambiente. Con el objetivo de determinar el método adecuado a utilizar, se elaboraron 3 probetas de E.C.M. con una solución de NaOH a 8 molar, en un recipiente se vertió el escombros de concreto y se le adiciono la solución alcalina, finalmente el agregado fino, se mezclaron todos los materiales hasta homogenizarse. Por otra parte, se preparó el molde colocándole una película de diurex en las paredes internas del molde. El llenado se hizo en 2 partes, se vertió el mortero hasta la mitad de la cavidad y después se apisonó conforme a la norma, y se volvió a llenar y se volvió a compactar, finalmente se dejaron fraguar las probetas durante 24 horas, Ver fig. 19.



Fig. 19. Probetas de E.C.M, fuente propia.

Concluido las 24 horas, se procedió a desmoldar las probetas para someterlas al proceso de curado.

Una probeta se envolvió en plástico de polietileno para mantener la humedad y después se introdujo en un horno de convención marca Fisher para ser curadas térmicamente a una temperatura de 65 °C durante 24 horas, otra probeta se sometió a un curado por inmersión en una solución de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y la última probeta se dejó curando a temperatura ambiente para que termine el proceso de fraguado.

12.4. ENSAYO A COMPRESIÓN A 7 DÍAS DE CURADO

Las probetas fueron ensayadas a compresión a una edad de 7 días de curado siguiendo lo estipulado en la norma NMX-C-083-ONNCCE-2014, se ensayaron las probetas una a una en una prensa marca DAVISA con una capacidad de 120 toneladas. Las probetas se colocaron del lado que estuvieron en contacto con las paredes del molde, esto garantiza su uniformidad, para que la aplicación de la carga sea uniforme, se ensayaron las 3 probetas y se obtuvieron los siguientes resultados, ver tabla 7.

Tabla 7. Resultado del ensayo a compresión, fuente propia.

Material	Tipo de curado	Carga de ruptura (kg)
E.C.M.	Térmico	300
E.C.M.	Ambiente	160
E.C.M.	Solución de $\text{Ca}(\text{OH})_2$	140

13. ACTIVACIÓN ALCALINA NaOH Y Ca (OH)₂

13.1. PROBETAS ACTIVADAS CON NaOH

Para la elaboración de las probetas con mortero activado alcalinamente a partir de escombros de concreto, se utilizaron moldes cúbicos en forma reticular de 30 probetas, un pisón con una sección transversal de 13 mm x 25 mm y 12 cm de largo, agua destilada con un pH de 7, arena con un módulo de finura de 2.8, NaOH con una pureza del 99% , un recipiente para la elaboración del mortero y la relación s /E.C.M, fue de 0.75. Primero, a los moldes se les aplicó una capa de plástico diurex en interior y por otro lado en un vaso precipitado de 400 ml se preparó la solución alcalina de hidróxido de sodio con las concentraciones especificadas en la descripción del experimento una a una dependiendo del tipo de concentración descrita para las probetas a elaborar.

Segundo, en un recipiente se vertió 500g de E.C.M y después se le fue adicionando la solución alcalina y al mismo tiempo se fue mezclando ambos compuestos durante tres minutos, finalmente se le adicionó el agregado fino y se mezcló hasta conseguir una pasta homogénea. Terminado este proceso se procedió a llenar las cavidades de los moldes en 2 fases primero se llenó hasta la mitad y después se usó el pisón para compactar el mortero siguiendo el orden del paso 1 y 2, después se procedió a llenar la segunda mitad y se apisonó como lo indica el paso 2 y 4, ver fig. 20.

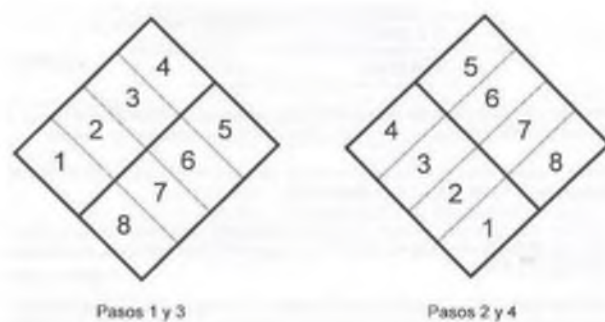


Fig. 20. Secuencia del apisonado, fuente (NMX-C-061-ONNCCE, s.f.)

El llenado se llevó a cabo uno a uno, se tenía que terminar el llenado de una cavidad para continuar con la siguiente y finalmente se enrasó la probeta con ayuda del mismo pisón, usando el lado longitudinal. Este proceso se realizó de la misma manera para elaborar todas las probetas con mortero de E.C.M. activado con las soluciones de hidróxido de sodio, ver fig. 21.

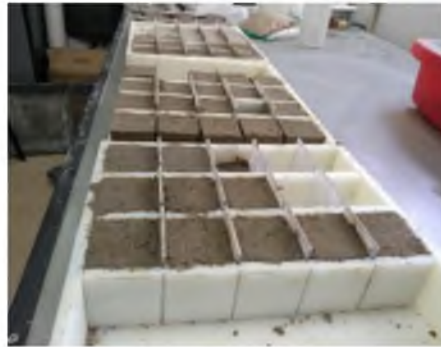


Fig. 21. Probetas de E.C.M. activadas alcalinamente, fuente propia.

13.2. ELABORACIÓN DE PROBETAS ACTIVADAS CON $\text{Ca}(\text{OH})_2$

Para la elaboración de estas probetas se utilizó la solución de hidróxido de calcio con una pureza del 85 % que se había preparado previamente con una concentración molar de 0.2 molar, un agregado fino con un módulo de finura del 2.8, moldes cúbicos de plástico con 30 cavidades y la relación solución /E.C.M fue de 0.75.

Primero en un recipiente se vertió 500 g de E.C.M. y después se le fue adicionando la solución de hidróxido de calcio, se mezcló con una espátula durante 3 minutos hasta conseguir una pasta homogénea, después se le fue adicionado el agregado fino y mezclando continuamente hasta conseguir un mortero con una consistencia uniforme.

Después se vertió el mortero en los moldes uno a uno, el llenado se realizó en 2 etapas, primero se llenó la mitad de cada cavidad y después se apisonó como lo indica la norma, terminado este paso se llenó la segunda mitad de la cavidad, se apisonó, se enrasó y finalmente se dejó fraguar durante 24 horas, ver fig. 22.



Fig. 22. Probetas de E.C.M activadas con Ca(OH)_2 , fuente propia.

13.3. CURADO TÉRMICO DE LAS PROBETAS

Después de haber transcurrido 24 horas de haberse elaborado las probetas, se procedió al desmoldado de las mismas, visualmente se pudo notar de que una probeta tenía diferentes consistencia y dureza. Por ejemplo, las probetas activadas con Ca(OH)_2 poseían consistencias suaves incluso se despostillaron las esquinas de algunas probetas al ser desmoldadas, a diferencias de las probetas de mortero activado con NaOH , también se puede observar la diferencia de tonalidad que iban presentado las diferentes probetas, ver fig. 23.



a) Probetas de mortero activadas con NaOH



b) Probetas de mortero activadas con Ca(OH)_2

Fig. 23. Probetas después de haber sido desmoldado, fuente propia.

Una vez que se desmoldaron todas las probetas se procedió a envolverlos en una bolsa de plástico y después se introdujeron en un horno de convección marca Fisher, donde se llevó a cabo el curado térmico a una temperatura de 65 °C durante 24 horas, también se mantuvo una humedad relativa de 95% esto se consiguió con la protección del plástico el cual evitó la pérdida excesiva de agua de los morteros, ver fig. 24.



Fig. 24. Curado térmico, fuente propia.

Una vez que concluyó las 24 horas de curado se procedió a apagar el horno para que la temperatura descendiera después se extrajeron las probetas y dejaron al ambiente hasta la fecha de ensayo.

14. CARACTERIZACIÓN DE LAS PROBETAS

14.1. ENSAYO A COMPRESIÓN A LOS 7, 28 Y 56 DÍAS

Las probetas elaboradas con un mortero a base de escombro de concreto molido se ensayaron una edad de 7, 28 y 56 días de edad como lo indica la norma (NMX-C-083-ONNCCE-2014 - Compresión).

Para el ensayo a compresión se utilizó una prensa eléctrica marca DAVISA con capacidad de 120 toneladas, el proceso comenzó colocando la probeta marcado con el número uno sobre la placa base, las caras laterales que estuvieron en contacto con el molde son los que fueron alineados con el eje de la placa de carga mientras que la placa

superior hace un contacto suave y uniforme sobre la cara superior de la probeta después se reinició el equipo y se procedió a cerrar la puerta de la prensa. A continuación, se presionó el botón de inicio de la prensa, con lo que se da inicio al ensayo a compresión, todas las probetas fueron ensayadas en las mismas condiciones, los resultados obtenidos fueron las siguientes, se seleccionaron dos de las tres probetas ensayadas, las cuales las cargas de faya no hubiera mucha diferencia, ver tabla 8.

Tabla 8. Carga máxima aplicada durante el ensayo a compresión, fuente propia.

Ensayo a compresión a 7 días de curado		
Concentración de la solución alcalina	Probeta 1 Carga aplicada(kg)	Probeta 2 Carga aplicada(kg)
9 mol de NaOH	300	380
8 mol de NaOH	420	420
7 mol de NaOH	340	360
6 mol de NaOH	420	500
5 mol de NaOH	360	320
4 mol de NaOH	260	260
0.02 mol de $\text{Ca}(\text{OH})_2$	120	160
Ensayo a compresión a 28 días		
9 mol de NaOH	380	420
8 mol de NaOH	420	420
7 mol de NaOH	500	580
6 mol de NaOH	560	580
5 mol de NaOH	380	340
4 mol de NaOH	220	280
0.02 mol de $\text{Ca}(\text{OH})_2$	120	180
Ensayo a compresión a 56 días		
9 mol de NaOH	380 kg	420 kg
8 mol de NaOH	420 kg	420 kg
7 mol de NaOH	500 kg	580 kg
6 mol de NaOH	560 kg	580 kg
5 mol de NaOH	380kg	360kg
4 mol de NaOH	260kg	300kg
0.02 mol de $\text{Ca}(\text{OH})_2$	50kg	60 kg

14.2. CÁLCULO DE LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN A 7, 28 Y 56 DÍAS DE EDAD

Después de que se obtuvieron las cargas a las que las probetas fallaron a compresión se procedió a determinar la resistencia a la compresión, como se ensayaron 2 probetas por cada edad de curado se promediaron ambas cargas y mediante la siguiente ecuación se determinó la resistencia.

$$R = \frac{C_{\text{máx}}}{A}$$

Donde:

- $C_{\text{máx}}$ es la carga máxima en (kgf).
- R es la resistencia a la compresión.
- A es el área de la sección transversal del espécimen

A continuación, se presentan la resistencia a la compresión de las diferentes concentraciones, ver tabla 9.

Tabla 9. Resistencia a la compresión, fuente propia.

Resistencia promedio a la compresión			
Concentración	7 días kg/cm ²	28 días kg/cm ²	56 días kg/cm ²
9 mol de NaOH	13.6	16.0	17.6
8 mol de NaOH	14.0	16.8	13.2
7 mol de NaOH	16.8	21.6	16.4
6 mol de NaOH	18.4	22.8	27.6
5 mol de NaOH	13.6	14.4	14.8
4 mol de NaOH	10.0	10.4	11.2
0.02 mol de Ca(OH) ₂	5.6	6.0	2.0

A continuación, se muestra gráficamente como fue la variación de la resistencia a la compresión entre las diferentes edades de ensayo, ver fig. 25.

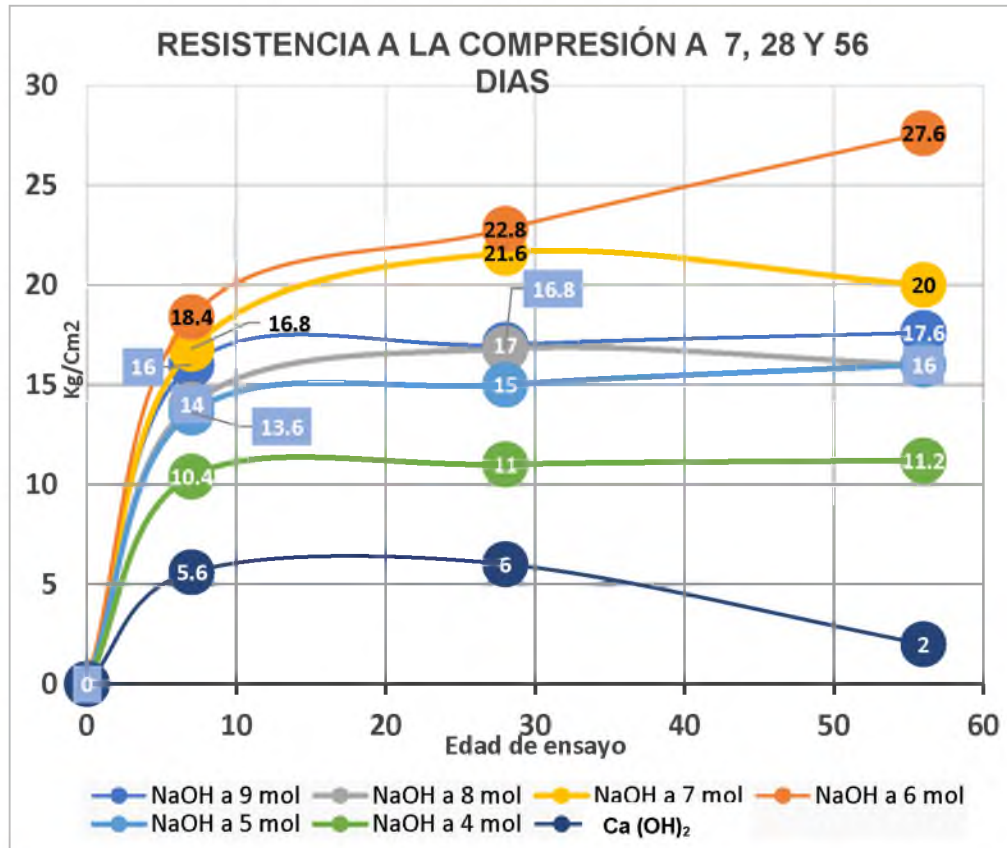


Fig. 25. Grafica de todas las concentraciones, fuente propia.

14.3. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Se realizó un experimento factorial en el software Minitab 17, se usó 2 factores siendo x1 la concentración con 6 niveles, x2 la edad de ensayo con 3 niveles y la resistencia a la compresión como la variable respuesta.

Para la interpretación de los resultados, es necesario recordar que un efecto es significativo, si el valor de $P > \alpha$.

Para desarrollar este análisis se utilizaron los datos obtenidos experimentalmente, ver tabla 10.

Tabla 10. Diseño de experimento factorial con 2 factores, fuente propia.

Concentración	Edad de ensayo a compresión		
	7	28	56
9 mol	12	15.2	16.8
9 mol	15.2	16.8	18.4
8 mol	13.6	16.8	15.2
8 mol	14.4	16.8	11.2
7 mol	16.8	20	12.8
7 mol	16.8	23.2	20
6 mol	16.8	22.4	34.4
6 mol	20	23.2	20.8
5 mol	14.4	15.2	15.2
5 mol	12.8	13.6	14.4
4 mol	10.4	11.2	10.4
4 mol	10.4	11.6	12

Se propusieron las siguientes comparaciones para determinar si existe, y como se la interacción entre los factores y la variable respuesta, también se propuso una hipótesis nula y una hipótesis alternativa, como se puede ver a continuación.

Homogeneidad de varianza

Hipótesis

Ho : las varianzas son homogéneas

H1 : al menos una varianza es diferente

Nivel de significancia $\alpha=0.05$

p-valor : 0.201

p-valor > α

Decisión: no se rechaza la hipótesis nula

Conclusión: con un valor de significancia del 95 % se concluye que las varianzas son homogéneas.

Combinación de los niveles de edad de ensayo y las concentraciones del activador

Hipótesis

HO: existe interacción entre los niveles de edad de ensayo y las concentraciones del activador que influye en la resistencia a la compresión.

H1: no hay interacción entre los niveles de edad de ensayo y las concentraciones del activador que influya en la resistencia a la compresión. Nivel de significancia: $\alpha=0.05$

Estadístico F=1.08

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
concentración	5	503.38	100.676	12.39	0.070
tiempo	2	48.65	24.324	2.99	0.076
concentración*tiempo	10	88.15	8.815	1.08	0.422
Error	18	146.32	8.129		
Total	35	786.50			

p-valor : 0.422

p-valor> α

Decisión: no se acepta la hipótesis nula

Conclusión: con un valor de confianza del 95% se acepta la hipótesis nula.

Factor Tiempo vs resistencia a la compresión

Hipótesis

HO: hay afluencia de la edad de ensayo sobre la resistencia.

H1: no hay influencia de la edad de ensayo sobre la resistencia.

Nivel de significancia $\alpha=0.05$

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
concentración	5	503.38	100.676	12.39	0.070
tiempo	2	48.65	24.324	2.99	0.076
concentración*tiempo	10	88.15	8.815	1.08	0.422
Error	18	146.32	8.129		
Total	35	786.50			

p-valor: 0.076

p-valor > α

Decisión: se acepta la hipótesis nula

Conclusión: con un valor de confianza del 95 % se concluye que existe influencia de la edad de ensayo sobre la resistencia.

Concentración de la solución alcalina

Hipótesis

HO: hay influencia de la concentración sobre la resistencia

H1: no hay influencia de la concentración alcalina sobre la resistencia

Nivel de significancia $\alpha=0.05$

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
concentración	5	503.38	100.676	12.39	0.070
tiempo	2	48.65	24.324	2.99	0.076
concentración*tiempo	10	88.15	8.815	1.08	0.422
Error	18	146.32	8.129		
Total	35	786.50			

p-valor :0.070

p-valor > α

Conclusión: con un valor de significancia del 95 % se concluye que existe influencia de la concentración alcalina sobre la resistencia.

Finalmente se evaluó cuál es la concentración y la edad de ensayo a la se obtiene la mayor resistencia, mediante una comparación tukey.

Respuesta = Resistencia, Término = concentración*tiempo

Agrupar información utilizando el método de Tukey y un valor de confianza de 95%.

Concentración*tiempo	N	Media	Agrupación		
6 56	2	27.6	A		
6 28	2	22.8	A	B	
7 28	2	21.6	A	B	C
6 7	2	18.4	A	B	C
7 7	2	16.8	A	B	C
8 28	2	16.8	A	B	C
7 56	2	16.4	A	B	C
9 28	2	16.0		B	C
8 56	2	16.0		B	C
5 56	2	14.8		B	C
5 28	2	14.4		B	C
8 7	2	14.0		B	C
5 7	2	13.6		B	C
9 7	2	13.6		B	C
9 56	2	13.6		B	C
4 28	2	11.4		B	C
4 56	2	11.2			C

Conclusión: La resistencia más alta se obtiene con la concentración de 6 molar de NaOH, a una edad de 56.

14.4. ANÁLISIS MINERALÓGICO DEL E.C.M.A (DRX)

Se analizó una muestra del mortero activado con una concentración de 6 molar de hidróxido de sodio, curados durante 24 horas a una temperatura de 65 °C, y ensayados a la edad de 28 días. Se empleó un difractómetro de rayos x D8 Advance BRUKER empleando una radiación de Cu-ka(1.54Å) en un intervalo de barrido de 10°- 50 ° en el rango 2 Theta. Para la interpretación del perfil de difracción de rayos x, se utilizó el software Match 3, con bases de datos de licencia libre. El software traza una gráfica a partir de los datos obtenidos en el análisis de difracción que se obtuvo de manera experimental, después se realizó una comparación de la intensidad de los picos graficados, con los datos de la base de datos de compuestos minerales, para identificar las fases presentes y después mediante un refinamiento Rietvel se ajustó el perfil experimental con el teórico con lo que se obtuvo una mayor precisión de los porcentajes de los compuestos, a continuación se muestran la gráfica obtenida a partir del perfil de difracción, ver fig. 26 y 27.

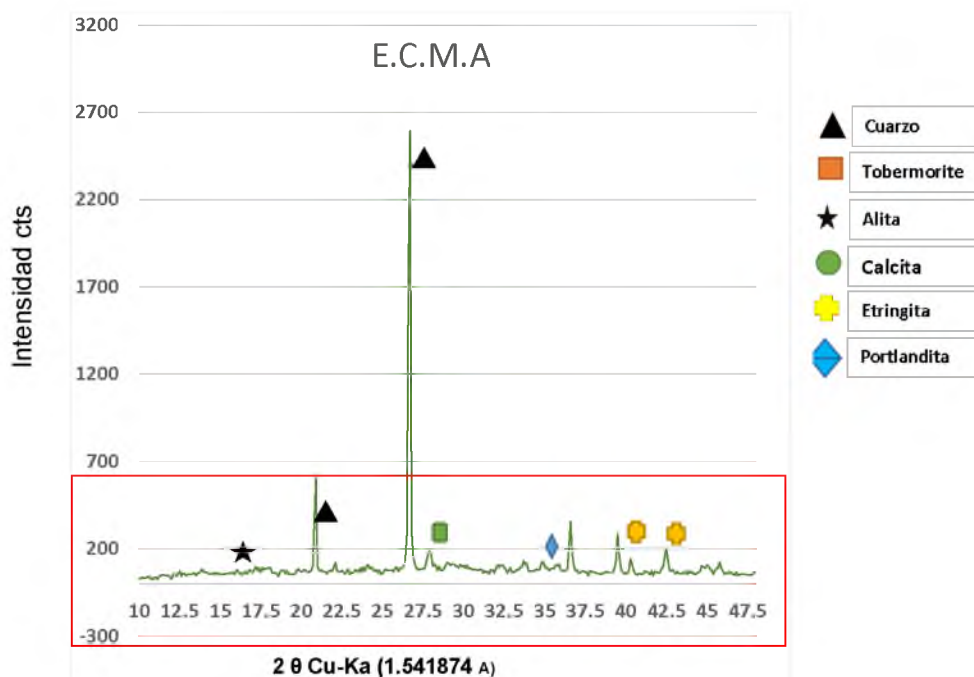


Fig. 26. DRX del E.C.M.A. fuente propia.

A continuación, se puede ver una ampliación de la zona encerrada con color rojo, debido a que a intensidad máxima de 3150 obtenida con la fase de cuarzo reduce la apreciación de los picos de menor intensidad, ver fig. 27.

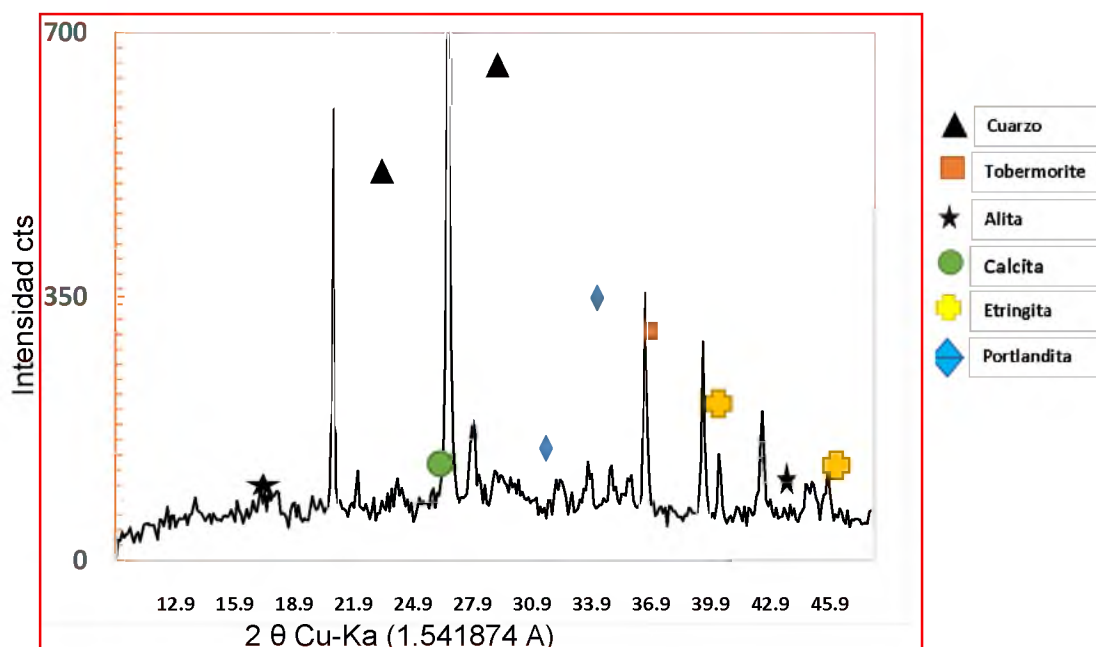


Fig. 27. Ampliación de DRX del E.C.M.A. fuente propia.

A continuación, se muestra las diferentes fases detectadas a partir del refinamiento Rietvel, ver tabla 11.

Tabla 11. Fases detectadas, fuente Match 3.

Fase	Porcentaje %
Cuarzo	50
alita	3.5
Lime	2.7
Ettringita	1.5
Portlandita	1.2
Stratlingite	0.7
NaOH	1.3

CAPÍTULO V

ANÁLISIS DE RESULTADOS

15. ANÁLISIS DE RESULTADOS

15.1. COMPARACIÓN DE LA RESISTENCIA MÁXIMA DE CPO Y MORTERO ACTIVADO

A continuación, se puede ver la gráficamente el aumento de la resistencia a compresión del mortero a base de CPO y del E.C.M activado con una solución de NaOH a 6 molar, claramente se puede observar que después de los 7 días el CPO empieza a incrementar su resistencia de manera considerable, alcanzando este a la edad de 28 días, por otro lado, se observa que la resistencia del mortero activado, continúa aumentando su resistencia incluso a la edad de 56 días, aunque la resistencia es muy inferior al del CPO, ver fig. 28.

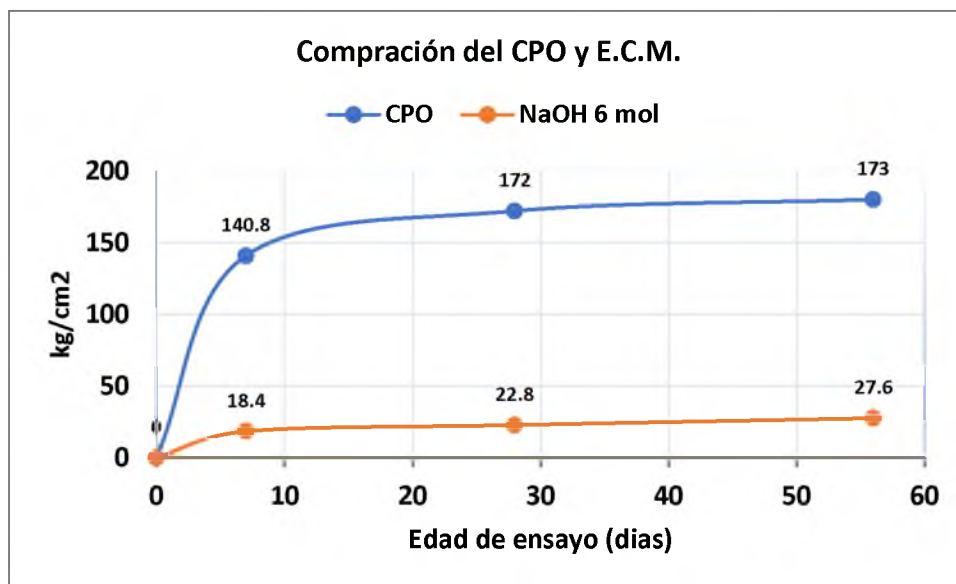


Fig. 28. Comparación de CPO y el mortero activado, fuente propia.

15.2. COMPARACIÓN DRX DEL E.C.M Y DEL E.C.M.A.

A continuación, se hace una comparación de los perfiles obtenidos a partir del Análisis de DRX de E.C.M. y del E.C.M.A, ver fig.29.

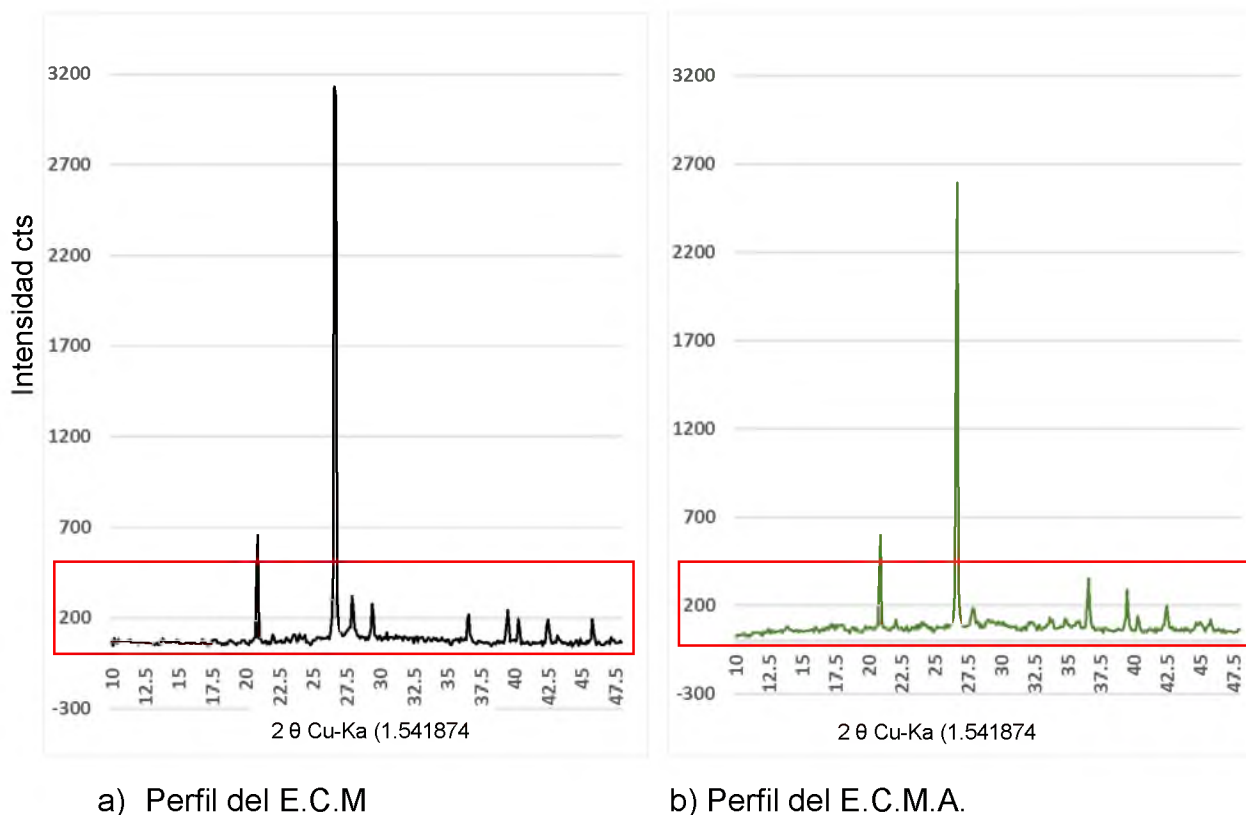


Fig. 29. Comparación del DRX, fuente Match 3.

Se observó una disminución de intensidad en el pico ubicado en el 26.5 en el rango de 2 theta, el cual pertenece a la fase de cuarzo, también hay otros puntos que llegaron casi a desaparecer como los que se ubican en los valores de 27-35 por otro lado, se observa un crecimiento de intensidad en los picos ubicados en los valores de 37.5 y 40.

A continuación, se hace una comparación y ampliación de la zona encerrada con color rojo, debido a que a intensidad máxima de 3150 obtenido con la fase de cuarzo, reduce la apreciación de los picos de mayor intensidad en toda la gráfica, ver fig. 30.

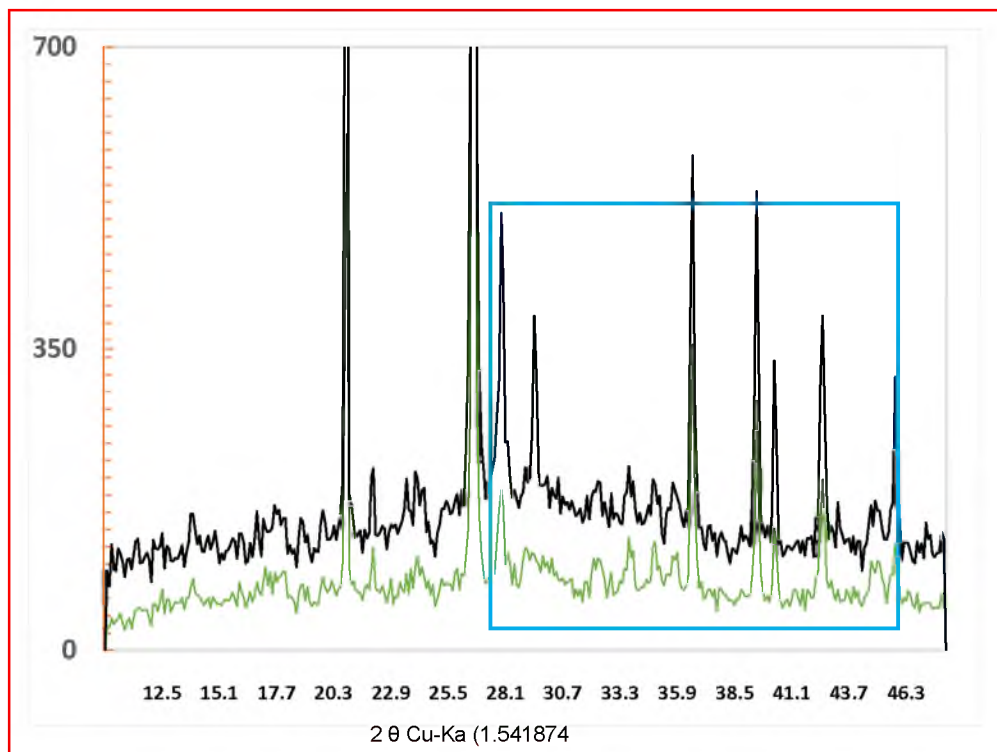


Fig. 30. Ampliación DRX del E.C.M y E.C.M.A, fuente Match 3.

En la ampliación se puede observar una mayor disminución de intensidad de los picos en la zona marcada con color azul, de la gráfica del E.C.M.A. (color verde), la disminución se debe posiblemente a la activación alcalina, los enlaces de Al_2O_3 se rompe para unirse a otros compuestos.

De esto se concluyó que hay un cambio microestructural del E.C.M. al E.C.M.A posiblemente a los productos de reacción, sin embargo, se requiere de estudios más avanzados para confirmar esto.

CONCLUSIONES

- En esta investigación se realizó la activación alcalina del E.C.M. con una solución de NaOH y $\text{Ca}(\text{OH})_2$, utilizando el hidróxido de sodio se obtuvo mayor resistencia a la compresión en comparación a las probetas activadas con el hidróxido de calcio, demostrando de esta manera que el escombro de concreto puede usarse como precursor en la activación de cementos alcalinos.
- Se evaluaron probetas de mortero E.C.M activadas con concentraciones que van desde 4 hasta 9 molar de NaOH y curados térmicamente durante 24 hora a 65°C , del cual se obtuvo una resistencia mayor con una concentración de 6 molar.
- Con la solución de NaOH a 6 molar se obtuvo una resistencia máxima a la compresión de 27.6 kg/cm^2 a la edad de 56 días, sin embargo, solo es el 16.5% de 172 kg/cm^2 que alcanzó las probetas de CPO.
- Usando una solución alcalina de NaOH en el rango de 7-9 molar, se observó una disminución en resistencia a la compresión conforme se aumenta la concentración.
- En esta investigación se evaluaron las probetas de E.C.M activadas con NaOH a la edad de 56 días debido a que se desconoce a que edad alcanza su resistencia máxima, en base a los resultados se pudo comprobar que la resistencia a la compresión continúa aumentando significativamente después de los 28 días de edad en un 21%, caso contrario a lo ocurrido con las probetas de CPO que solo aumento en 0.5 %.
- Las probetas activadas con la solución de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ obtuvieron las resistencias más bajas comparada con una concentración al 4 molar de hidróxido de sodio, demostrando de esta manera que el $\text{Ca}(\text{OH})_2$ no es un buen activador para llevar a cabo la activación alcalina de E.C.M. debido a su baja solubilidad.
- En esta investigación se utilizó una relación, solución/ escombro de 0.75 en base a la masa del escombro, para conseguir un mortero trabajable.

Del análisis estadístico se puede concluir

- La edad de ensayo influye sobre la resistencia a la compresión de las probetas debido a que el análisis de varianza, en la se analizó el tiempo, con un valor de

confianza del 95%, se obtuvo un p-valor de 0.076, demostrando que es menor a $\alpha=0,05$, por lo cual se acepta la hipótesis de que la edad influye sobre la resistencia.

- Se evaluó la interacción de la concentración del activador con el tiempo de curado, mediante el análisis de varianza se obtuvo un p-valor de 0.422 el cual es mayor a $\alpha= 0.05$, demostrando así, que existe dicha interacción con valor de confianza del 95% que influye sobre la resistencia a la compresión.

RECOMENDACIONES

Para futuras investigaciones acerca de la activación del E.C.M se recomienda realizar una activación híbrida entre el E.C.M y la ceniza volante o ceniza de caña, para compensar el bajo contenido de Al_2O_3 (Valencia-Saavedra, et al., 2018).

La adición de vidrio molido también sería una buena opción como fuente de SiO_2 , Na_2O , de esta manera aumentar la resistencia a la compresión (Espinoza & Escalante García, 2011).

Probar combinaciones de soluciones activadoras como son: hidróxido de sodio y silicato de sodio (Escalante, et al., 2003).

También sería recomendable investigar la temperatura óptima para la calcinación del E.C.M. esto con el objetivo de eliminar impurezas en el material y al mismo tiempo mejorar su reactividad.

Realizar la activación del escombro de concreto sin hacer diferencia del elemento estructural de su procedencia ya que existe la posibilidad de que esta variable no influya en la activación alcalina.

Realizar ensayo a compresión a la edad de 90, 120, 180 y 360 días para verificar si mejora de forma significativa la resistencia a la compresión.

16. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- ACI 211 DISEÑO DE MEZCLAS. (2011).
- A. Purdon. (1940). The action of alkalis on blast-furnace slag. Journal of the Society of Chemical Industry.
- David, E., & Martínez, R. (2009). SISTEMAS GEOPOLIMERICOS DE CENIZA VOLANTE
- Andrew, R. M. (2017). Global CO₂ emissions from cement production. Earth System Science Data Discussions.
- Asesorado, O. A. D. P. (2012). La evolución de la industria del cemento con énfasis en latinoamérica.
- ASOCEM. (2015). El Proceso de Fabricación del Cemento.
- ASTM C136-01. (2001). ASTM C 136- 01 Método de ensayo normalizado para determinar el análisis granulométrico de los áridos finos y gruesos. ASTM International.
- Buchwald, A., Dombrowski, K., & Weil, M. (2005). Evaluation of Primary and Secondary Materials under Technical, Ecological and Economic Aspects for the Use as Raw Materials in Geo-Polymeric Binders. 2nd International Symposium of Non-Traditional Cement and Concrete.
- Cabinets, M., Rooms, M., Statements, B., & Mass, D. (2008). Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in . or [50-mm] Cube Specimens).
- Cañas, Jose Simeon. (s.f.). Determinacion de la finura del cemento portland usando el aparato de permeabilidad al aire de blaine.
- Cañas, Jose Simeón. (2014). Analisis de tamaño de partículas por tamizado en agregado fino y grueso y determinación de material más fino que el tamiz No. 200 (75um) en agregado mineral por lavado. Universidad Centroamericana, (01).
- Cascajo afecta áreas naturales protegidas de México - mexico. (2019). Retrieved August 11, 2019, from <https://news.culturacolectiva.com/mexico/cascajo-afcta-areas-naturales-protegidas/>
- CDMX necesita plan de manejo de escombros para casos de contingencia | El Economista. Retrieved August 11, 2019, from <https://www.eleconomista.com.mx/politica/-CDMX-necesita-plan-de-manejo-de-escombros-para-casos-de-contingencia-20171002-0168.html>
- Cemento | Holcim Mexico. So the world builds better.. Retrieved August 14, 2019, from <https://www.holcim.com.mx/cemento>
- CEMEX. (2013). Manual del constructor. Manual Del Constructor.
- Collins, F., & Sanjayan, J. G. (2001). Microcracking and strength development of alkali

- activated slag concrete. Cement and Concrete Composites.
- Concreto, P. D. E. L. (2013). Cemento Portland, concreto y calor de hidratación.
- CONSEJO MUNDIAL EMPRESARIAL PARA EL DESARROLLO SOSTENIBLE. (2012). Reciclando Concreto, 56.
- Cristalizada, E. (2011). Escorias De Horno Alto Escoria Granulada Escoria Cristalizada, (2), 1–20. Retrieved from <http://www.cedex.es/NR/rdonlyres/BFF81F23-BDB7-4B5B-85A5-A7ABD2974A42/119856/ESCORIASDEHORNOALTO>.
- David, E., & Martínez, R. (2009). SISTEMAS GEOPOLIMERICOS DE CENIZA VOLANTE
- Davidovits, J. (1991). Geopolymers. Journal of Thermal Analysis.
- Davidovits, Joseph, & Resins, G. (1980). Geopolymer chemistry and sustainable Development. The Poly (silicate) terminology : a very useful and simple model for the promotion and understanding of green-chemistry ., (November 2018).
- De, A. (1993). 3.5 Escombros 1.
- Escalante-García, J. I., Fuentes, A. F., Gorokhovskiy, A., Fraire-Luna, P. E., & Mendoza-Suarez, G. (2003). Hydration products and reactivity of blast-furnace slag activated by various alkalis. Journal of the American Ceramic Society.
- Espinoza, L. J., & Escalante García, I. (2011). Morteros a base de vidrio de desecho/escoria de alto horno; activación mecanoquímica del vidrio en soluciones alcalinas. Nexa Revista Científica.
- Facultad de Ingeniería de la Universidad Nordeste Nacional. (2014). Cemento Portland. Cemento Portland.
- Fernández-jiménez, A., & Palomo, A. (2009). Properties and uses of alkali cements. Revista Ingeniería de Construcción.
- Fernández-Jiménez, A., & Puertas, F. (1997). alkali-activated slag cements: Kinetic studies. Cement and Concrete.
- Fernández Jiménez, A., Puertas, F., & Fernández-Carrasco, L. (1996). Procesos de activación alcalino-sulfáticos de una escoria española de alto horno. Materiales de Construcción.
- FRANCISCA PUERTAS. (2013). SFCM 12/13 16: LOS GELES C-A-S-H FORMADOS EN LAS PASTAS DE LOS CEMENTOS - YouTube. Retrieved from <https://www.youtube.com/watch?v=K74W4jggDz0>
- Glukhovskiy, V. D. (1965). Soil Silicates. Their Properties, Technology and Manufacturing and Fields of Application. Engineering Institute of Kiev, Kiev, Ukraine.
- Gómez, J. (2005). UNIVERSIDAD CATÓLICA ANDRÉS BELLO – GUAYANA Escuela de Ingeniería Industrial Manual de Prácticas Laboratorio Química.

- Hidróxido de Calcio: Fórmula, Propiedades, Reactividad y Usos. Retrieved June 9, 2019,
- HIDROXIDO DE CALCIO controversia. Retrieved June 9, 2019.
- Ikuta D., Kawame N., Banno S., Hirajima T., Ito K., Rakovan J. F., Downs R. T., T. O. (2007). Match ! Phase Analysis Report. American Mineralogist, 4(2005).
- INSHT. (2010). Hidróxido De Sodio. Fichas Internacionales de Seguridad Química, 2.
- Investigación: Elevar el uso de las cenizas volantes en el cemento - Asocem. (s.f.). Retrieved August 19, 2019.
- Joseph Davidovits. (1994). Properties of Geopolymer Concrete. Alkaline Cements and Concrete.
- Key facts & figures. (s.f.). Retrieved August 16, 2019.
- Kovalchuk, G., Fernández-Jiménez, A., & Palomo, A. (2008). Alkali-activated fly ash . Relationship between mechanical strength gains and initial ash chemistry. Materiales de Construcción.
- Krivenko, P. (2017). Why alkaline activation - 60 years of the theory and practice of alkali-activated materials. Journal of Ceramic Science and Technology.
- Laura Huanca, S. (1934). Diseño de mezclas de concreto. Anales de Ingenieria.
- Luna-Galiano, Y., Cornejo, A., Leiva, C., Vilches, L. F., & Fernández-Pereira, C. (2015). Properties of fly ash and metakaolín based geopolymer panels under fire resistance tests. Materiales de Construcción.
- Luukkonen, T., Abdollahnejad, Z., Yliniemi, J., Kinnunen, P., & Illikainen, M. (2018). One-part alkali-activated materials: A review. Cement and Concrete Research.
- Montgomery, Diseño de experimento.(2004).
- Manuel Torres Carrasco. (2016). Reutilización de residuos vítreos urbanos e industriales en la fabricación de cementos Alcalinos. - YouTube. Instituto Torroja TV. Retrieved from <https://www.youtube.com/watch?v=9rbZlfe9iBU&t=1577s>
- Meli, B. /. (s.f). Diseño Estructural - Roberto Meli Piralla (2da Edición - UNAM).
- Neuzil, P. (2006). Introducción a la fabricación y normalización del Cemento Portland. Nucleic Acids Research (Vol. 34).
- Neville, A. M. (1999). Tecnología del concreto ((Fourth an). Adam M. Neville.
- NMX-C-021-ONNCCE-2010 - Mortero (s.f.).
- NMX-C-030-ONNCCE-2004 - Muestreo (s.f.).
- NMX-C-061-ONNCCE-2010 (s.f.).
- NMX-C-073-ONNCCE-2004 - Masa Volumétrica (s.f.).
- NMX-C-077-1997-ONNCCE - Análisis granulométrico (s.f.).

- NMX-C-083-ONNCCE-2014 - Compresión (s.f.).
- NMX-C-109-ONNCCE-2013 - Cabeceo (s.f.).
- NMX-C-148-ONNCCE-2010 - Cuartos de curado (s.f.).
- NMX-C-159-ONNCCE-2016 - Elaboración de especímenes (s.f.).
- NMX-C-164 - Densidad relativa y absorción del agregado grueso (s.f.).
- NMX-C-166-ONNCCE-2006 - Contenido de agua (s.f.).
- Nuevos concretos a partir de residuos de la construcción - Ciencia UNAM. (s.f.). Retrieved August 11, 2019.
- Palomo, A., M. Grutzeck, and M. B. (1999). 17 Alkali-activated fly ashes: a cement for the future. Cement and concrete research. Cement and Concrete Research.
- Palomo, a, & Criado, M. (2006). Alkali activated fly ash binders. A comparative study between sodium and potassium activators. Materiales de Construcción.
- Planta Procesadora de Cemento | Materiales de Construcción Universidad José Cecilio del Valle. (s.f.). Retrieved August 14, 2019, from <https://matdeconstruccion.wordpress.com/2009/07/27/planta-procesadora-de-cemento>
- Provis, J. L., & van Deventer, J. S. J. (2014). Alkali activated materials. Rilem Tc 224.
- Puertas, F. (1995). Cementos de escorias activadas alcalinamente : Situación actual y perspectivas de futuro.
- Reciclaje de escombros evitaría daños al medio ambiente | Excélsior. (s.f.). Retrieved January 9, 2019, from <https://www.excelsior.com.mx/comunidad/reciclaje-de-escombros-evitaria-danos-al-medio-ambiente/1235274>
- Rend, M., Fern, B. A., Mart, M., Andr, M., Jos, T. A., & Publicaci, Q. (2015). Desarrollo de nuevos cementos : “ Cementos alcalinos y cementos híbridos .”
- S.J. Navarro. (2008). Definicion y elaboracion del cemento.
- Salazar, R., Cneteno, P., & Silva, Y. (2015). Residuos de construcción y demolición: Análisis hacia su gestión, maneja y aprovechamiento.
- Škvára, F. (2007). ALKALI ACTIVATED MATERIAL – GEOPOLYMER 1 Introduction.
- Soria Santamaría, F. (1963). Puzolanas y cementos puzolánicos. Materiales de Construcción.
- Subsidiarios, Y. O., & Mexicanos, D. E. P. (2006). Diseño de estructuras de concreto. Society.
- Thomas, R., Ye, H., Radlinska, A., & Peethamparan, S. (2016). Alkali-Activated Slag Cement Concrete. Concrete International.
- Torgal, F. P., Gomes, J. P. C., & Jalali, S. (s.f.). Some Considerations about the

Durability of Historic Mortars.

- Torres-Carrasco, M., Rodríguez-Puertas, C., Del Mar Alonso, M., & Puertas, F. (2015). Alkali activated slag cements using waste glass as alternative activators. Rheological behaviour. Boletín de La Sociedad Española de Cerámica y Vidrio.
- Troya, E., Puteoli, E., & Mar, S. (s.f.). HISTORIA DEL CEMENTO Introducción. UANL. (2002). Desarrollo histórico del cemento. Uanl.
- UNAM. (2016). Hoja de seguridad II Hidróxido de Sodio. Retrieved from <https://quimica.unam.mx/wpcontent/uploads/2016/12/22hipocloritona>.
- Valencia-Saavedra, William Gustavo 1 ; Angulo-Ramírez, Daniela Eugenia 2 ; de Gutiérrez, R. M. 3. (2018). Resistencia química de concretos de activación alcalina ceniza volante/ escoria: Sulfatos y ácidos .
- Vidaud, E. (2013). De la historia del cemento. Construcción y Tecnología En Concreto.
- Villamor Lora, Á. (2016). Geopolímeros sintetizados a partir de distintos materiales residuales. Activación alcalina de cenizas de cascarilla de arroz.
- Villaquirán Caicedo, M. A., & Mejía de Gutiérrez, R. (2016). Synthesis of ternary geopolymers based on metakaolin, boiler slag and rice husk ash. Dyna, 82(194).
- Viputeoli, E. (1995). Historia del cemento.
- Yepes, S. (s.f.). cemento portland proceso de fabricación.

ANEXOS

17. CARACTERIZACIÓN DE AGREGADO FINO

Para determinar las diferentes características del agregado fino se requiere obtener una muestra representativa del material por lo cual a continuación se describe el método que se siguió para obtener dicha muestra.

17.1. MÉTODO DE CUARTEO

Para obtener una muestra representativa del agregado fino se siguió el método de cuarteo descrito en la norma (NMX-C-030-ONNCCE-2004 - Muestreo).

El cual consistió en pesar 100 kg de arena de la muestra de campo, después se mezcló y homogenizó la muestra completamente sobre el piso, previamente el espacio de trabajo fue limpiado con escoba y cepillo para retirar cualquier partícula de materia orgánica que pudiese contaminar la muestra. Después se apiló en forma de cono sobre el piso, el cono fue aplanando hasta conseguir un diámetro y espesor uniforme, se dividió la pila aplanada en cuatro partes iguales y se eliminó dos de las partes diagonales opuestas, a continuación se volvió a mezclar toda la muestra restante y se volvió a apilar en forma de cono, después se aplanó de la misma manera y se eliminaron dos de las partes diagonales opuestas, este proceso se repitió hasta obtener 15 kg de la muestra sobre el piso, esta muestra se utilizó para realizar las pruebas que se describen a continuación.

17.2. MÓDULO DE FINURA

El objetivo de este estudio es determinar el módulo de finura del agregado fino ya que este valor influye directamente con el volumen del agregado grueso por lo cual se basó en el método establecido en la norma (NMX-C-077-1997-ONNCCE - Análisis granulométrico) y (ASTM C136-01, 2001). Se utilizaron los siguientes equipos; Balanza marca Rhino con capacidad de cuatro Kg, Juego de tamices N° 4, 8 16, 30, 50, 100 y 200 con charola de fondo y tapa, una brocha de cinco cm, un horno de convección marca Fisher y 500g de arena de río el cual se obtuvo como se describe en el punto 17.1

Se puso a secar la muestra representativa de arena en el horno a una temperatura $110\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante 24 horas con el fin de eliminar la humedad contenida en la arena, y facilitar el tamizado de la muestra. Después de este tiempo se procedió a verter la muestra en los juegos de tamices sobrepuestos, después con las dos manos se procedió a mover de lado a lado los tamices durante aproximadamente cinco minutos. Con esto se consiguió que las partículas de mayor tamaño nominal quedaran retenidas en los diferentes tamices, Después se pesó la cantidad de arena retenida en los diferentes tamices para el cálculo del módulo de finura, ver tabla 12.

Tabla 12. Masa retenida en las diferentes mallas, fuente propia.

Análisis Granulométrico de 500 g. de arena				
Apertura	N° de malla	Masa	%	%Acumulado
4.75 mm	4	24.20 g	5%	5%
2.36 mm	8	24.80 g	5%	10%
1.18 mm	16	54.00 g	11%	21%
0.6 mm	30	179.40 g	36%	56%
0.3 mm	50	160 g	32%	88%
0.15 mm	100	37.4 g	7%	96%
0.074mm	200	20 g	4%	100%

A continuación, se procedió a calcular el módulo de finura mediante la siguiente ecuación.

$$MF = \frac{\sum \% \text{ Retenido_Acumulado}(N^{\circ}4 + N^{\circ}8 + N^{\circ}16 + N^{\circ}30 + N^{\circ}50 + N^{\circ}100)}{100}$$

$$MF = \frac{5+10+21+56+88+96}{100} \quad MF = 2.8$$

Donde:

MF: módulo de finura

N: número de tamiz

$\sum\%$: sumatoria de masas

Con lo que se obtiene un módulo de finura de 2.8, se considera arena gruesa (Simeón Cañas, 2014).

17.3. CALIBRACIÓN DEL RECIPIENTE DE 5 dm³ y 10 dm³

Este proceso se realizó con el objetivo de obtener un factor de calibración del recipiente cilíndrico de cinco y 10 dm³, se utilizó una placa de vidrio de 20 cm x 20 cm con seis mm de espesor, cinco litros de agua y una báscula de 30 kg marca TORREY. Se pesó el recipiente de prueba con el vidrio de enrase, se tomó lectura del peso y después se procedió a llenar con agua limpia el interior del recipiente hasta que se llenó por completo, a continuación, se colocó la placa de vidrio de sobre la boca del recipiente cuidando de que el agua no se derramara, con esto se consigue eliminar el excedente de agua. Por último, se toma la lectura del peso del recipiente con el agua y el vidrio, finalmente se tomó la temperatura del agua con un termómetro. El proceso se realizó de la misma manera para los 2 recipientes, todos los datos obtenidos se pueden ver en la tabla 13.

Tabla 13. Datos obtenidos, fuente propia.

Calibración del recipiente cilíndrico		
Datos	Recipiente de 5 dm ³	Recipiente 10 dm ³
Masa del recipiente vacío	1.075 kg	2.56 kg
Masa del recipiente + el vidrio	2.960 kg	4.445 kg
Masa del recipiente + vidrio + agua	5.770 kg	9.420 kg
Masa del agua	2.81 kg	4.975 kg
Temperatura del agua	30 °C	30 °C
Masa unitaria del agua a 30° C	995.75 kg/m ³	995.75 kg/m ³
Factor F del recipiente	354.359 m ³	200.95 m ³

Para el cálculo del factor F se realizó mediante la siguiente ecuación.

$$F = MU/MA$$

Donde:

F : es el factor en m³ (1/m³)

MU : es la masa unitaria del agua a 30 ° C

MA : es la masa de agua requerida para llenar el recipiente, en kg.

17.4. DETERMINACIÓN DE LA MASA VOLUMÉTRICA DEL AGREGADO FINO

Se basó en la norma (NMX-C-073-ONNCCE-2004 .), para determinar esta característica, se empleó una muestra representativa de agregado fino el cual se obtuvo mediante el método de cuarteo descrito en el punto 17.1, se utilizó un recipiente cilíndrico de 5 dm³. La muestra de agregado fino pasó por un proceso de secado en un horno marca Fisher scientific, a una temperatura de 110 ° C ± 5 °C durante 24 horas.

17.4.1 DETERMINACIÓN DE LA MASA VOLUMÉTRICA COMPACTADA

Para este procedimiento se utilizó el método de compactación con varilla, primero el recipiente de cinco dm³ se llenó en tres capas aproximadamente iguales, cada capa fue compactada con 25 penetraciones utilizando una varilla de punta redonda, distribuidas uniformemente sobre la superficie. Después se enrasó el recipiente con una regla mediante un corte horizontal y finalmente se pesó el recipiente con el agregado fino en la báscula TORREY, este procedimiento se realizó para tres muestras y se promedió, ver tabla 14.

Tabla 14. Masa volumétrica compactada, fuente propia.

Peso del agregado suelto	
Peso neto de la arena (muestra 1)	4.68 kg
Peso neto de la arena (muestra 2)	4.68 kg
Peso neto de la arena (muestra 3)	4.67 kg
Promedio del peso neto de la arena	4.67 kg

A continuación, se calculó la masa volumétrica del agregado, mediante la fórmula:

$$M_v = m_n \times F$$

$$M_v = (4.67 \text{ kg}) \times (354.359 \text{ m}^3)$$

$$M_v = 1658.40 \text{ kg/m}^3$$

Donde:

Mv: masa volumétrica

mn: masa neta

F: factor de calibración del recipiente.

17.4.2 DETERMINACIÓN DE LA MASA VOLUMÉTRICA SUELTA

Se utilizó la muestra representativa obtenida en el punto 17.1, se basó en el procedimiento descrito en la norma NMX-C-073-ONNCCE.

Primero se llenó el recipiente de cinco dm^3 con agregado fino con ayuda de un cucharón metálico, se dejó caer el agregado a una altura de 50 mm sobre el borde del recipiente distribuyéndolo uniformemente, se enrazó con una regla haciendo un corte horizontal y finalmente calculó la masa neta del agregado en kg usando la báscula TORREY, este proceso se repitió tres veces para obtener una masa promedio, ver tabla 15.

Tabla 15. Masa volumétrica suelta, fuente propia.

Peso del agregado suelto	
Datos	Masa
Peso neto de la arena (muestra 1)	4.337 kg
Peso neto de la arena (muestra 2)	4.38 kg
Peso neto de la arena (muestra 3)	4.37 kg
Promedio del peso neto de la arena	4.36 kg

A continuación, se calculó la masa volumétrica del agregado, mediante la fórmula

$$M_v = m_n \times F$$

$$M_v = (4.36 \text{ kg}) \times (354.359 \text{ m}^3) = 1545 \text{ kg/m}^3$$

17.5. PORCENTAJE DE ABSORCIÓN DEL AGREGADO FINO

Se utilizó la muestra obtenida en el punto 17.1, Dicha, a continuación, se preparó una probeta graduada con 100 ml, al cual se le agregó 70 ml de agua y se le adicionó 54.83g de arena, se observó que el nivel de agua comenzó a subir hasta la marca de 91 ml, después se dejó reposar la muestra durante 24 horas, tiempo suficiente para que la muestra de arena absorbiera la mayor cantidad de agua. Transcurrido el tiempo se tomó la lectura del nivel del agua y se observó que el nivel del agua descendió a 90 ml, esto indica que el agregado finó absorbió un ml de agua, a continuación, se realizó las operaciones correspondientes para calcular el % de absorción.

$$\% \text{ absorción} = \frac{\text{volumen inicial} - \text{volumen final}}{\text{volumen final}} \times 100$$

$$\% \text{ absorción} = \frac{91 - 90}{90} \times 100 = 1.1\%$$

17.6. CÁLCULO DE PORCENTAJE DE HUMEDAD

Para calcular el porcentaje de humedad se utilizó una termobalanza MOISTURE BALANCE MOC-120H, Se tomaron tres muestras representativas de arena a utilizar, después se pesaron seis gramos de cada muestra en una balanza analítica marca RHINO BAPRE-3. Se colocó una de las tres muestras en el contenedor de la termobalanza, después se cerró el contenedor y se presionó el botón de inicio con lo que comenzó a incrementarse la temperatura hasta eliminar la humedad. Este proceso se realizó con las tres muestras, Ver tabla 16.

Tabla 16. Resultado de análisis, fuente propia.

Muestra	Masa	T °C	Tiempo min.	% Humedad
1	6 g.	45	3	0.91
2	6 g.	74	3	0.91
3	6 g.	78	3	0.91
% promedio de humedad				0.91

18. CARACTERIZACIÓN DEL AGREGADO GRUESO

Se optó por usar un agregado con un tamaño máximo nominal de ¾" por lo cual se procedió a obtener una muestra representativa del agregado y así obtener sus diferentes características, mediante diferentes pruebas, a continuación, se describe el proceso que se siguió.

18.1. DETERMINACIÓN DEL TAMAÑO MÁXIMO NOMINAL

Para homogenizar el tamaño máximo nominal se realizó el tamizado de la muestra para obtener un agregado de $\frac{3}{4}$ ", en este proceso se utilizó dos tamices sobrepuestos, uno con una abertura de 1" y otra de $\frac{3}{4}$ " con charola y tapa. El agregado fue vertiéndose poco a poco sobre el tamiz con abertura de una pulgada, después se tapó y se empezó a mover con las manos, dándole pequeños golpes alrededor del tamiz, con esto se consiguió que las partículas más grandes quedaran retenidas en el primer tamiz y las partículas de menor tamaño a $\frac{3}{4}$ " pasó a través del el, por lo que el agregado que tuvo las dimensiones intermedias fueron retenidas en el tamiz de $\frac{3}{4}$ " , con este material se determinaran las características fisicas, siguiendo la norma: (NMX-C-077-1997-ONNCCE - Análisis granulométrico), ver fig. 31.



a) Tamices 1" y $\frac{3}{4}$ "



b) Tamizado de 1"



c) Tamizado de $\frac{3}{4}$ "

Fig. 31. Cribado del agregado grueso, fuente propia.

18.2. DETERMINACIÓN DE LA MASA VOLUMÉTRICA

Se define como la masa que ocupa un material por unidad de volumen y se obtiene del producto entre el peso neto por un factor F del recipiente a utilizar, tal como se describe en la norma (NMX-C-073-ONNCCE-2004 - Masa Volumétrica), por lo cual se procedió a determinar el factor del recipiente y después el peso neto del agregado, a continuación, se describe el proceso.

Preparación del material

Se usó una muestra representativa de agregado grueso con un tamaño máximo nominal de $\frac{3}{4}$ " el cual se obtuvo mediante el método de cuarteo, reduciéndose a una cantidad de 1.5 veces la capacidad del recipiente, después el material se lavó sobre el tamiz número 4, con agua limpia para eliminar cualquier residuo. Después se vertió en una charola de lámina galvanizada, por último, se sometió a un proceso de secado en un horno marca Fisher scientific, a una temperatura de $110\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante 24 horas.

18.2.1 MASA VOLUMÉTRICA COMPACTADA

Por su versatilidad se utilizó el procedimiento de compactación por impactos, para esto el recipiente cilíndrico de 10 dm^3 , se llenó en tres capas aproximadamente iguales y cada una de estas se compactó colocando el recipiente sobre el piso de concreto, se levantó y se dejó caer alternativamente dos lados diametralmente opuestos del recipiente a una altura de 50 mm sobre el piso, mediante este proceso las partículas del agregado se acomodaron, cada capa se compactó dejando caer 50 veces el recipiente. Una vez que se terminó de compactar las tres capas y se niveló el recipiente con los dedos, después se procedió a pesar el recipiente con el agregado, todo este proceso se repitió tres veces, y se obtuvieron los siguientes datos, ver tabla 17.

Tabla 17. Determinación de masa volumétrica, fuente propia.

Masa de las muestras de agregado grueso	
DATOS	Masa en kg
Peso neto del agregado (muestra 1)	7.94 kg
Peso neto del agregado (muestra 2)	7.93 kg
Peso neto del agregado (muestra 3)	7.935 kg
Promedio del peso neto	7.92 kg

A continuación, se calculó la masa volumétrica del agregado, mediante la fórmula, usando el factor F determinado en el punto 17.3.

$$M_v = m_n \times F$$

$$M_v = (7.935\text{ kg}) \times (200.95\text{ m}^3)$$

$$M_v = 1594.53\text{ kg/m}^3$$

18.2.2 DETERMINACIÓN DE LA MASA VOLUMÉTRICA SUELTA

Se utilizó la misma muestra del punto anterior, un recipiente metálico de 10 dm³, primero se llenó el recipiente con el agregado usando un cucharón metálico, dejando caer las partículas a una altura de 50 mm sobre el borde del recipiente y distribuyéndolo uniformemente, después se enrazó, quitando y poniendo las partículas sobresalientes del recipiente, finalmente se pesó la masa neta del agregado usando la báscula TORREY, el proceso se realizó tres veces y se obtuvieron los siguientes datos, ver tabla 18.

Tabla 18. Masa volumétrica suelta, fuente propia.

Masa de las muestras de agregado grueso	
DATOS	Masa
Peso neto del agregado (muestra 1)	7.445 kg
Peso neto del agregado (muestra 2)	7.46 kg
Peso neto del agregado (muestra 3)	7.45 kg
Peso neto promedio	7.45 kg

Para determinar la masa volumétrica se utilizó la siguiente formula y el factor determinado en el punto 17.3.

$$M_v = m_n \times F$$

$$M_v = (7.445 \text{ kg}) \times (200.95 \text{ m}^3) = 1496.07 \text{ kg/m}^3$$

18.3. CÁLCULO DEL PORCENTAJE DE ABSORCIÓN

Para determinar este porcentaje se basó en la norma (NMX-C-164 - Densidad relativa y absorción del agregado grueso).

Preparación de la muestra

Se utilizó una muestra representativa con un tamaño máximo nominal de 19 mm, el cual se obtuvo en el punto 18.1, después se lavó y se sometió a un proceso de secado

Se pesó tres kg de la muestra en la báscula de 30 kg marca TORREY, después se introdujo este agregado en un recipiente de 20 litros con agua limpia durante un periodo de 24 horas. Transcurrido este tiempo se procedió a extraer el agregado grueso y con una

tela húmeda se secó la muestra hasta que la superficie perdió el brillo acuoso con lo que el material se considera saturado y superficialmente seco, ver fig. 32.



a) Lavado



b) Secado



c) Inmersión en agua



c) Secado superficial

Fig. 32. Preparación del agregado grueso, fuente propia.

Después se procedió a pesar la muestra, se obtuvieron los siguientes datos ver tabla 19.

Tabla 19. Porcentaje de humedad, fuente propia.

Porcentaje de humada del agregado grueso	
Datos	Masa
Peso de la muestra seca	4.00 kg
Peso de la muestra superficialmente seca	4.87 kg

Para el cálculo del porcentaje de absorción se utilizó la siguiente formula.

$$A_{ag} = \frac{M_{agss} - M_s}{M_s} \times 100$$

$$A_{ag} = \frac{3.87 - 3}{3} \times 100 = 1.2 \%$$

Donde:

A_{ag} : es la absorción expresada hasta décimo, en %.

M_{agss} : es la masa de la muestra saturada, en kg.

M_s : es la masa de la muestra seca, en kg.

18.4. DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE DE HUMEDAD

Para este procedimiento se basó en la norma (NMX-C-166-ONNCCE-2006 - Contenido de agua.).

Se utilizó una muestra representativa, de tres kilogramos, dicha muestra se pesó con una balanza analítica marca RHINO, después la muestra se puso a secar en un horno de convección marca Fisher scientific, durante 24 horas a una temperatura de $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$. Terminado el tiempo de secado se extrajo la muestra y se dejó enfriar a temperatura ambiente durante 30 minutos después se volvió a pesar la muestra en la balanza analítica, el proceso se realizó con tres muestras, ver tabla 20.

Tabla 20. Porcentaje de humedad, fuente propia.

Muestra	Masa inicial	Masa final	% de humedad
1	3000 g	2990 g	0.33%
2	3001 g	2992 g	0.30%
3	3000 g	2991 g	0.30%
% de humedad promedio			0.31%

El porcentaje de humedad se calculó mediante la siguiente formula.

$$H = \frac{Mn - Ms}{Ms} \times 100$$

Donde:

H: es el contenido de agua en %

Mn: es la masa de la muestra húmeda

Ms: es la masa de muestra seca.

18.5. INFORMACIÓN DE LOS MATERIALES

A continuación, se muestra un atabla donde se concentran los datos obtenidos en los puntos 17 y 18 a, ver tabla 21. Para los pesos específicos se basó en los datos conforme a su composición Además, se consideró el peso específico del agua con un valor de 1000 kg/cm² y del cemento con un valor de 0.03 kg/cm² (Neville, 1999).

Tabla 21. Datos del diseño de mezcla, fuente propia.

Datos para el diseño de mezcla		
	Agregado fino	Agregado grueso
Peso unitario suelto (kg/m ³)	1539.68	1496.07
Peso unitario compactado (kg/m ³)	1658.40	1594.53
Peso específico	2.59	2.63
Módulo de finura	2.8	----
Tamaño máximo de agregado	---	3/4"
%Absorción	1.1	1.2
% Humedad	0.91	0.31

19. DISEÑO DE MEZCLA SEGÚN LA NORMA ACI 211.1

Para elaborar un diseño de mezclas se siguió los pasos establecidos en la norma, a continuación se van enumerando y desarrollando para obtener los datos necesarios para la dosificación de dicha mezcla (ACI 211 diseño de mezclas, 2011).

1. Selección de la resistencia promedio

Para elaborar el diseño de mezcla se realizaron los siguientes pasos, como no se contaba con registros de ensayos previos de concretos similares, se procedió como lo indica la norma se usó la tabla 22 para obtener la resistencia promedio requerida. Considerando que la resistencia a compresión del concreto es de 250 kg/cm².

Tabla 22. Selección de la resistencia a compresión requerida.

Resistencia a compresión	Resistencia a compresión
Menos de 210 kg/cm ²	f'c + 70
210 a 350 kg/cm ²	f'c + 85
Más de 350 kg/cm ²	1.1f'c + 50

Fuente (Laura Huanca, 1934).

Entonces:

$$f'_{cr} = f'_c + 85 = f'_{cr} = 250 \text{ Kg/cm}^2 + 85 = f'_c = 335 \text{ kg/cm}^2$$

2. Selección del revenimiento

Se eligió el revenimiento de acuerdo a la consistencia requerida, en base al tipo de estructura en donde se colocará el concreto, ver tabla 23.

Tabla 23. Selección de revenimiento, fuente (Huanca, 1934).

Tipo de construcción	Máxima	Mínima
Zapatas y muros de cimentación armados	3"	1"
Cimentaciones simples, cajones y subestructuras de muros	3"	1"
Vigas y muros armados	4"	1"
Columnas de edificios	4"	1"
Losas y pavimentos	3"	1"

Por lo tanto, se requiere de un revenimiento de 4", con consistencia plástica.

3. Selección de volumen unitario del agua de diseño

Para determinar la cantidad de agua necesaria, se basó en la tabla 24, el cual relaciona el revenimiento que se busca con el tamaño máximo de agregado, conforme establece la norma ACI 211.

Tabla 24. Selección del volumen unitario de agua.

Revenimiento	Agua, en v/m^3 , para los tamaños máx. nominales de agregado grueso y consistencia indicados.							
	3/8"	1/2"	3/4"	1"	1 1/2"	2"	3"	6"
Concretos sin aire incorporado								
1" a 2"	207	199	190	179	166	154	130	113
3" a 4"	228	216	205	193	181	169	145	124
6" a 7"	243	228	216	202	190	178	160	---
Concretos con aire incorporado								
1" a 2"	181	175	168	160	150	142	122	107
3" a 4"	202	193	184	175	165	157	133	119

Fuente (Huanca, 1934)

4. Selección del contenido de aire.

El porcentaje de aire atrapado se determina en función del tamaño máximo del agregado grueso, ver tabla 25.

Tabla 25. Selección del contenido de aire atrapado.

Tamaño Máximo Nominal	Aire Atrapado
3/8"	3.0 %
1/2"	2.5 %
3/4"	2.0 %
1"	1.5 %
1 1/2"	1.0 %

Fuente (Huanca, 1934)

5.Determinación del peso seco del agregado fino.

$$\text{Peso agregado fino} \left(\frac{kg}{m^3} \right) = \text{vol. a. fino} \times \text{peso específico a. fino}$$

$$\text{Peso agregado fino} \left(\frac{kg}{m^3} \right) = 0.269 \times (2.59 \times 1000 \frac{kg}{m^3})$$

$$\text{Peso agregado fino} \left(\frac{kg}{m^3} \right) = 696.71 \text{ kg/m}^3$$

6. Selección de la relación a/c

La relación de agua está en función de la resistencia deseada, para este caso en el que la resistencia de 335 kg/cm² como no se encuentra en la tabla se tomó el valor menor y un valor mayor para poder realizar una interpolación, ver tabla 26.

Tabla 26. Selección de la relación a/c por resistencia.

f'c a (28 días)	Relación agua/cemento de diseño en peso	
	Concretos sin aire	Concretos con aire
200	0.70	0.61
250	0.62	0.53
300	0.55	0.46
350	0.58	0.40
400	0.43	-----

Fuente (Huanca, 1934)

Con los dos valores obtenidos, se realizó una interpolación con la siguiente ecuación:

$$\frac{y_2 - y_1}{y_3 - y_1} = \frac{x_2 - x_1}{x_3 - x_1}$$

$$y_2 - y_1 = \left(\frac{x_2 - x_1}{x_3 - x_1} \right) x(y_3 - y_1)$$

$$y_2 - y_1 + \left(\frac{x_2 - x_1}{x_3 - x_1} \right) x(y_3 - y_1)$$

A continuación, se muestran los datos a considerar, ver tabla 27.

Tabla 27. Interpolación de los datos, fuente propia.

X1= 350	Y1= 0.48
X2= 335	Y2= Relación a/c para f' c de 335 en kg/cm ²
X3= 300	Y3= 0.55

Se realizó la siguiente sustitución y se obtuvo la relación a/c.

$$Relacion \frac{A}{c} \text{ para } f'cr \ 335 \frac{kg}{cm^2} = 0.48 + \left(\frac{335 - 350}{300 - 350} \right) x(0.55 - 0.48)$$

$$Relacion \frac{A}{C} \text{ para } f'cr \ 335 \frac{kg}{cm^2} = 0.50$$

7.Determinación del Factor Cemento

Para determinar del factor cemento se utilizó la siguiente formula

$$Factor \ cemento = \frac{volumen \ unitario \ de \ agua}{Relacion \ agua \ /cemento}$$

$$Factor \ cemento = \frac{205 \text{ lt} / m^3}{0.50}$$

$$Factor \ cemento = 410.50 \text{ kg/m}^3$$

8.Determinación del contenido de agregado grueso.

Para determinar el contenido del agregado grueso se utilizó la tabla 24 con los datos del tamaño máximo del agregado grueso y el módulo de finura del agregado fino, obteniendo un coeficiente b/b_o, ver tabla 28.

Tabla 28. Selección del a. grueso por unidad de volumen del concreto.

T.M.N del agregado grueso	Volumen del agregado grueso, seco y compactado, por unidad de volumen de concreto, para diversos módulos de finura de agregado fino b/b _o			
	mf: 2.4	mf: 2.60	mf: 2.80	mf:3.00
3/8"	0.50	0.48	0.46	0.44
1/2"	0.59	0.57	0.55	0.53
3/4"	0.66	0.64	0.62	0.60
1"	0.71	0.69	0.67	0.65
1 1/2"	0.75	0.73	0.71	0.69

Fuente (Huanca, 1934).

Después se calculó el peso del agregado grueso, mediante el producto del peso unitario compactado del agregado grueso con el valor obtenido al relacionar el módulo de finura del agregado fino y del grueso.

$$\text{Peso seco del agregado grueso} \left(\frac{kg}{m^3} \right) = \frac{b}{b_o} \times \text{peso unitario compactado del A. G.}$$

$$\text{Peso seco del agregado grueso} \left(\frac{kg}{m^3} \right) = 0.62 \times 1594.53 \text{ kg/m}^3$$

9.Determinación de los volúmenes absolutos

A continuación, se enlista el cálculo de los volúmenes absolutos mediante la siguiente formula.

$$\text{Volumen del material en } m^3 = \frac{\text{peso del material}}{\text{peso específico (1000)}}$$

Para el agregado grueso:

$$\text{Volumen del agregado grueso } m^3 = \frac{\text{peso seco del a. grueso}}{\text{peso específico del a. grueso}}$$

$$\text{Volumen del agregado grueso } m^3 = \frac{998.607 \text{ kg/m}^3}{2.65 * 1000 \text{ kg/m}^3}$$

$$\text{Volumen del agregado grueso } m^3 = 0.376 \text{ kg/m}^3$$

Para el cemento:

$$\text{Volumen del cemento } m^3 = \frac{410.50 \text{ kg}/m^3}{3.15 * 1000 \text{ kg}/m^3}$$

$$\text{Volumen del cemento } (m^3) = 0.130 \text{ m}^3$$

Para el aire:

$$\text{Volumen aire } (m^3) = 2 \% = 0.02 \text{ m}^3$$

Para el agua:

$$\text{Volumen de agua } (m^3) = \frac{205 \text{ kg}/m^3}{(1)1000 \text{ kg}/m^3}$$

$$\text{Volumen del agua} = 0.205 \text{ kg}/m^3$$

A partir del cálculo de los volúmenes absolutos de cada uno de los materiales se procedió a determinar el volumen del agregado fino necesario para elaborar un m^3 de concreto.

$$\begin{aligned} \text{vol. agregado fino } (m^3) &= 1 - (\text{vol. agua} + \text{vol. aire} + \text{vol. cemento} + \text{vol. agregado grueso}) \\ \text{volumen. agregado fino } (m^3) &= 1 - (0.205 \text{ m}^3) + 0.020 \text{ m}^3 + 0.130 \text{ m}^3 + 0.376 \text{ m}^3 \\ \text{vol. agregado fino } (m^3) &= 0.269 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

10. Corrección de los valores de diseño por humedad del agregado.

Para corregir las proporciones de los materiales en función a las condiciones de humedad de los agregados se utilizaron las siguientes formulas:

$$\text{Peso A. grueso humedad (kg)} = (\text{peso A. grueso seco}) \times \left(1 + \frac{\%wf}{100}\right)$$

$$\text{Peso A. grueso humedad (kg)} = (998.607 \text{ kg}) \times \left(1 + \frac{0.31}{100}\right)$$

$$\text{Peso A. grueso humedad (kg)} = 1001.70 \text{ kg}/m^3$$

$$\text{Peso A. fino humedad (kg)} = (\text{peso A. fino seco}) \times \left(1 + \frac{\%wf}{100}\right)$$

$$\text{Peso A. fino humedad (kg)} = (696.71 \text{ kg}) \times \left(1 + \frac{0.91}{100}\right)$$

$$\text{Peso A. fino humedad (kg)} = 703.05 \text{ kg}/m^3$$

Donde:

$\%wg$: contenido de humedad del agregado grueso

$\%wf$: contenido de humedad del agregado fino

$\%ag$: porcentaje de absorción del agregado grueso

$\%a$: porcentaje de absorción del agregado fino

11. Humedad superficial del agregado.

$$\text{Humedad superficial del agregado } \% = +(\%w - \%a)$$

$$\text{Humedad superficial del agregado fino } \% = +(0.91 - 1.1) = -0.19\%$$

$$\text{Humedad superficial del agregado grueso } \% = +(0.31 - 1.2) = -0.89\%$$

12. Aporte de humedad del agregado grueso y fino

Agregado grueso:

$$A.H. \text{ Agregado grueso } \left(\frac{lt}{m^3} \right) = (\text{peso de A. grueso seco}) \times \frac{(\%wg - \%ag)}{100} = x$$

$$A.H. \text{ Agregado grueso } \left(\frac{lt}{m^3} \right) = (998.607) \times \frac{(0.89)}{100} = x$$

$$A.H. \text{ Agregado grueso } \left(\frac{lt}{m^3} \right) = (8.887) = x$$

Agregado fino:

$$A.H. \text{ Agregado fino } \left(\frac{lt}{m^3} \right) = (\text{peso de A. fino seco}) \times \frac{(\%wf - \%af)}{100} = y$$

$$A.H. \text{ Agregado fino } \left(\frac{lt}{m^3} \right) = (696.71 \text{ kg}) \times \frac{(0.19)}{100} = y$$

$$A.H. \text{ Agregado fino } \left(\frac{lt}{m^3} \right) = -1.32 = y$$

11. El agua efectiva

Se determinó restando del volumen unitario de agua, menos la suma de los aportes de humedad de los agregados finos y grueso.

$$\text{Agua efectiva } \left(\frac{lt}{m^3} \right) = \text{Agua de diseño} - (x + y)$$

$$\text{Agua efectiva} \left(\frac{\text{lt}}{\text{m}^3} \right) = 205 \left(\frac{\text{lt}}{\text{m}^3} \right) - (-0.19 - 0.89)$$

$$\text{Agua efectiva} \left(\frac{\text{lt}}{\text{m}^3} \right) = 205.27 \text{ lt/m}^3$$

12. Valores absolutos de los materiales a usar por 1 m³ de concreto

La dosificación de un m³ de concreto se obtiene a partir de los valores absolutos de materiales previamente calculados, ver tabla 29.

Tabla 29. Valores absolutos de los materiales, fuente propia.

Dosificación para 1 m ³ de concreto	
Cemento	410.50 kg/m ³
Agua efectiva	205.27 lt/m ³
Agregado fino húmedo	703.05 kg/m ³
Agregado grueso húmedo	1001.70 kg/m ³

A continuación, se calculó las proporciones de los materiales para la elaboración de tres probetas cilíndricas de 15 cm de base por 30 cm de altura, con un volumen de 0.005 m³, en base a los valores obtenidos en la tabla 29, además se incluyó un 10 % de desperdicio sobre el total del volumen, ver tabla 30.

Tabla 30. Dosificación para 3 cilindros de concreto, fuente propia.

Materiales	Cantidad.
Cemento CPO	7.17 kg.
Agua efectiva	3.6 lts.
Agregado fino	12.3 kg.
Agregado grueso	15.9 kg.

20. ELABORACIÓN DE PROBETAS DE CONCRETO

Se prepararon tres cilindros de concreto con las proporciones que fueron calculados, ver tabla 30, se siguió lo establecido en la norma, (NMX-C-159-ONNCCE-2016 - Elaboración de especímenes).

Se utilizaron los siguientes materiales; cemento portland ordinario, arena de río con mf de 2.8, grava con un TMA de $\frac{3}{4}$ " y agua potable. Para el equipo de trabajo se utilizó; tres moldes cilíndricos de 150 mm de diámetro por 300 mm de altura, una revolvedora de $\frac{1}{2}$ saco marca Joper, una probeta graduada de tres litros, cucharón para concreto, una báscula de 30 kg marca TORREY, tres charolas de lámina galvanizada, aceite mineral, varilla con punta redonda y un mazo de goma.

Primero se limpiaron los moldes cilíndricos, se les aplicó una capa de aceite vegetal como desmoldante, por otro lado, se pesaron todos los materiales usando la báscula, con las cantidades previamente calculados en el diseño de mezclas, después se procedió a encender la revolvedora a 125 rpm. Se inició vertiendo los materiales dentro de la revolvedora empezando por el agua, después grava, cemento y arena, se esperó a que todos los materiales se mezclaran durante cinco minutos, después se inspeccionó visualmente si ya se había homogenizado la mezcla. A continuación, se procedió a verter el concreto en una de las charolas de lámina galvanizada de 50 cm x 50 cm, después se vertió el concreto en los moldes cilíndricos. El llenando se realizó en tres capas iguales una después de otra, cada capa se compactó usando una varilla de punta redonda, dejándola caer 25 veces de forma circular en el concreto sin ejercer fuerza por cada capa. Después se dan pequeños golpes sobre la superficie externa del cilindro con un mazo de goma, para mejorar el acomodo del concreto, finalmente se enrazó y uniformizó la cara superior de las probetas con la varilla de punta redonda. Después con una película de plástico se cubrió la cara superior del cilindro y para terminar se colocó la tapa del molde, de esta manera se elaboraron las 3 probetas de concreto, ver fig. 33.



a) Preparación b) Llenado c) Compactación d) Probetas terminadas

Fig. 33. Proceso de elaboración de especímenes de concreto, fuente propia.

20.1. CURADO

Para este proceso se basó en la norma (NMX-C-148-ONNCCE-2010 - Cuarto de curado.). Este proceso se realizó con el objetivo de que las probetas de concreto alcanzaran su resistencia máxima a compresión a la edad de 28 días. Trascurrido 24 horas de haberse elaborado las probetas de concreto se procedió a desmoldar los cilindros, he inmediatamente a introducirlos dentro de un contenedor de curado, se utilizó un recipiente con una capacidad 20 litros y se preparó una solución de hidróxido de calcio de 8 g por cada litro de agua. Para evitar la lixiviación del $\text{Ca}(\text{OH})_2$ en las probetas, los cilindros permanecieron durante 28 días sumergidos en la solución.

20.2. CABECEO DE LAS PROBETAS DE CONCRETO

Para el cabeceo de las probetas de concreto se basó lo establecido en la norma (NMX-C-109-ONNCCE-2013 - Cabeceo).

Después de que concluyeron los 28 días de curado, se extrajeron las probetas del recipiente de curado. El cabeceo es para uniformizar las caras de las probetas, si existiera una cierta inclinación será corregido con el mortero de azufre, con el objetivo de que la aplicación de la carga sea uniforme durante el ensayo a compresión, se utilizó un mortero de azufre, plato metálico para cabeceo y una guía para cabeceo. Primero se limpiaron ambas caras del cilindro con un trapo seco y por otro lado, se puso a fundir la cantidad necesaria de azufre a una temperatura de 150°C durante aproximadamente cinco minutos y al plato de cabeceo se le aplicó una capa de aceite mineral como desmoldante. Después se colocó el plato de metal sobre la base de la guía para cabeceo y se vertió la cantidad suficiente de azufre fundido en el interior del plato y rápidamente se procedió a colocar el espécimen a cabecear sobre la guía y deslizando suavemente hasta tocar el fondo del plato, se dejó en esa posición aproximadamente 5 minutos tiempo en que el azufre endureció, después con ambas manos se sujetó el espécimen de concreto para poder retirarlo del plato. A continuación, se procedió a repetir todo el proceso para cabecear las caras de los 3 cilindros, ver fig. 34.



a) Colocación del espécimen



b) Resultado del cabeceo.

Fig. 34. Proceso de cabeceo, fuente propia.

20.3. ENSAYO A COMPRESIÓN

Los especímenes de concreto fueron ensayados a compresión a una edad de 28 días. Como lo indica la norma, (NMX-C-083-ONNCCE-2014 - Compresión). Los cilindros fueron previamente cabeceados, para el ensayo a compresión se utilizó una prensa marca DAVISA con una capacidad de carga de 120 toneladas. El proceso comenzó colocando el cilindro marcado con el número 1 sobre la placa base (a), centrándose con el eje del cilindro de carga mientras que la placa superior hace un contacto suave y uniforme sobre la cara superior del cilindro, b) después se reinició el equipo y se procedió a cerrar la puerta de la prensa. Se presionó el botón de inicio y el equipo comenzó con la prueba, aplicando una carga de compresión a una velocidad constante de 4 toneladas/minuto, ver fig. 35.



a) Colocación de la probeta



b) Ensayo a compresión.

Fig. 35. Ensayo a compresión, fuente propia.

La carga se aplicó de manera uniforme, después de haber transcurrido aproximadamente 10 minutos el equipo automáticamente se detuvo. Dando fin del ensayo a compresión, este proceso se repitió con los tres cilindros, también previamente de cada ensayo se tomaron las dimensiones de cada probeta como lo indica la norma, ver en la tabla 31.

Tabla 31. Resultados de ensayo, fuente propia.

Informe de los Resultados			
Numero de cilindro	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3
Edad del espécimen.	28 días	28 días	28 días
Diámetro mm	150 mm	150 mm	151 mm
Altura en mm	302 mm	301 mm	300 mm
Área de la sección transversal en cm^2	176.75 cm^2	176.71 cm^2	176.9 cm^2
Peso del espécimen kg	12.202 kg	12.310 kg	12.160 kg
Carga de ruptura del espécimen ton.	49.72 ton.	49.80 ton	51.22 ton

20.4. RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

Finalmente se calculó la resistencia a la compresión mediante la fórmula de esfuerzo axial, los resultados se pueden observar en la tabla 32.

Tabla 32. Resistencia a la compresión, fuente propia.

Resistencia a la compresión	
Probeta 1	281.8 kg/cm^2
Probeta 2	281.8 kg/cm^2
Probeta 3	289.4 kg/cm^2
Resistencia promedio	284.3 kg/cm^2