

EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN, FLEXIÓN Y TRACCIÓN DE LOS CEMENTOS A BASE DE ESCORIA DE ALTO HORNO Y ARENA SILICEA, ACTIVADOS CON HIDRÓXIDO DE SODIO Y SILICATO DE SODIO SEGÚN LA NORMA NTC 220



UNIVERSIDAD
La Gran Colombia

**UNIVERSIDAD LA GRAN COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**

**ASESOR DISCIPLINAR:
ARNOLD GUTIERREZ**

**ASESOR METODOLÓGICO:
BIBIANA GOMEZ**

**ANDRES DAVID RAMIREZ CASTRO
JUAN DAVID ESCOBAR RODRIGUEZ**

**BOGOTA D.C
2017**

CONTENIDO

1. INTRODUCCION.....	9
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	10
3. OBJETIVOS.....	12
3.1 OBJETIVO GENERAL.....	12
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	12
4. JUSTIFICACIÓN.....	13
5. ANTECEDENTES.....	15
6. MARCOS REFERENCIALES	22
6.1 MARCO CONCEPTUAL.....	22
6.1.1 Concreto.....	22
6.1.2 Relación agua cemento.....	22
6.1.3 Silicato de Sodio.....	23
6.1.4 Hidróxido de sodio.....	23
6.1.5 Cemento Portland	23
6.1.6 Caracterización del material	24
7. DISEÑO METODOLÓGICO.....	29
7.1 ENFOQUE DE INVESTIGACIÓN.....	29
7.2 TIPO DE INVESTIGACIÓN	29
7.3.1 Fase I. Experimentación con mortero activado alcalinamente	30
7.3.2 Fase II. Análisis del comportamiento mecánico y de durabilidad del mortero activado alcalinamente.....	30
7.3.3 Tamaño de la muestra.....	31
7.4 INSTRUMENTOS.....	31
7.4.1 Pesas y equipos de pesaje.....	31
7.4.3 Moldes.....	32
7.4.4 Palustre	33
7.4.5 Máquina de ensayo	34

7.6 MATRIZ DE ENSAYOS A TRABAJAR	35
8. CÁLCULOS INICIALES	36
8.1 CÁLCULOS CANTIDADES A UTILIZAR PARA MEZCLA DE MORTEROS	36
8.1.1 Cálculo de concentración de 6% y 8% en el Hidróxido de Sodio	36
8.1.2 Cálculos cantidades para morteros de Hidróxido de Sodio	38
8.1.3 Cálculos cantidades para morteros de Silicato de Sodio.....	38
9. RESULTADOS Y ANÁLISIS	40
9.1 MORTEROS HIDRÓXIDO DE SODIO A COMPRESIÓN	40
9.1.1 Morteros no curados Hidróxido de Sodio con concentración de 6% de NaO.....	40
9.1.2 Morteros no curados Hidróxido de Sodio con concentración de 8% de NaO.....	43
9.1.3 Morteros curados en agua Hidróxido de Sodio con concentración de 6% de NaO.....	45
9.1.4 Morteros curados en agua Hidróxido de Sodio con concentración de 8% de NaO.....	47
9.2 MORTEROS SILICATO DE SODIO A COMPRESIÓN	49
9.2.1 Morteros no curados Silicato de Sodio Concentración de 5%.....	49
9.2.2 Morteros curados al medio ambiente Silicato de Sodio Concentración de 7%	50
9.2.3 Morteros curados en agua Silicato de Sodio Concentración de 5%..	53
9.2.4 Morteros curados en agua Silicato de Sodio Concentración de 7%..	54
9.3 MORTEROS SILICATO DE SODIO A FLEXIÓN.....	56
9.4 MORTEROS SILICATO DE SODIO A TRACCIÓN	60
10. ANALISIS DE RESULTADOS.....	65
10.1 MORTEROS CURADOS AL MEDIO AMBIENTE A COMPRESION	65
10.1.1 Morteros de hidróxido de Sodio.....	65
10.1.2 Morteros de Silicato de Sodio.....	66
10.1.3 Comparación morteros Hidróxido de Sodio y Silicato de Sodio	67
10.2 MORTEROS CURADOS EN AGUA A COMPRESION	68
10.2.1 Morteros de hidróxido de sodio	68

10.2.2 Morteros de silicato de sodio	69
10.3 COMPARACIÓN MORTEROS CURADOS Y NO CURADOS	70
10.4 MORTEROS DE SILICATO AL 7% A FLEXION.....	71
10.5 MORTEROS DE SILICATO AL 7% A TRACCION	71
11. CONCLUSIONES	75
12. RECOMENDACIONES	77
13. BIBLIOGRAFÍA	78

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 : Marco Legal de normas utilizadas en la elaboración de mezclas y ensayos.	28
Tabla 2 : Fase I de investigación. Experimentación con mortero activado alcalinamente.....	30
Tabla 3 : Fase II de Investigaciones. Análisis del comportamiento mecánico y de durabilidad del mortero activado alcalinamente.	30
Tabla 4 : Operacionalización de las variables.....	34
Tabla 6 : Fallas a los 3 días de las muestras de NaOH con concentración de 6% no curados.....	40
Tabla 7 : Fallas a los 7 días de las muestras de NaOH con concentración de 6% no curados.....	41
Tabla 8 : Fallas a los 28 días de las muestras de NaOH con concentración de 6% no curados.....	41
Tabla 9: Resistencia de las muestras de NaOH con concentración de 6% no curados.....	42
Tabla 10; Resistencia de las muestras de NaOH con concentración de 8% no curados.....	43
Tabla 11: Resistencia de las muestras de NaOH con concentración de 6% curados.....	46
Tabla 12: Resistencia de las muestras de NaOH con concentración de 8% curados.....	48
Tabla 13: Resistencia de las muestras de Na ₂ SiO ₃ con concentración de 5% no curados.....	50
Tabla 14: Resistencia de las muestras de Na ₂ SiO ₃ con concentración de 7% no curados.....	51
Tabla 15: Resistencia de las muestras de Na ₂ SiO ₃ con concentración de 5% curados.....	53
Tabla 16: Tabla 16: Resistencia de las muestras de Na ₂ SiO ₃ con concentración de 7% curados.....	55

Tabla 17: Fallas a los 3 días de las muestras de Na ₂ SiO ₃ con concentración de 7% no curados en flexión.....	57
Tabla 18: Fallas a los 7 días de las muestras de Na ₂ SiO ₃ con concentración de 7% no curados en flexión.....	57
Tabla 19: Fallas a los 28 días de las muestras de Na ₂ SiO ₃ con concentración de 7% no curados en flexión.....	58
Tabla 20: Resistencia de las muestras de Na ₂ SiO ₃ con concentración de 7% no curados a flexión.....	59
Tabla 21: Fallas a los 7 días de las muestras de Na ₂ SiO ₃ con concentración de 7% no curados a tracción.	61
Tabla 22: Fallas a los 14 días de las muestras de Na ₂ SiO ₃ con concentración de 7% no curados a tracción.....	61
Tabla 23: Fallas a los 28 días de las muestras de Na ₂ SiO ₃ con concentración de 7% no curados a tracción.....	62
Tabla 24: Resistencia de las muestras de Na ₂ SiO ₃ con concentración de 7% no curados a tracción.....	63

LISTA DE GRAFICAS

Gráfica 1: Resistencia de los morteros de NaOH con concentración del 6% curados al ambiente.....	42
Gráfica 2: Resistencia de los morteros de NaOH con concentración del 8% curados al ambiente.....	44
Gráfica 3: Resistencia de morteros NaOH con concentración de 6% curados en el agua.	47
Gráfica 4: Resistencia de morteros NaOH con concentración de 8% curados al agua.	48
Gráfica 5: Resistencia de las muestras de Na ₂ SiO ₃ con concentración de 5% curados al ambiente.....	50
Gráfica 6: Resistencia de las muestras de Na ₂ SiO ₃ con concentración de 7% curados al ambiente.....	52
Gráfica 7 Resistencia de morteros de Na ₂ SiO ₂ curados al agua al 5%	54
Gráfica 8 Resistencia de morteros de Na ₂ SiO ₃ curados al agua al 7%	55
Gráfica 9: Comparación resistencia final de morteros a compresión curados al ambiente y agua.	56
Gráfica 10: Resistencia a la flexión en morteros de silicato al 7%	59
Gráfica 11: Resistencia a la flexión en morteros de silicato al 7%	59

LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Pesa calibrada	32
Ilustración 2: Moldes para probetas a compresión.....	33
Ilustración 3: Moldes para probetas flexión.....	33
Ilustración 4: Moldes para probetas tensión	33
Ilustración 5: Mezcla del hidróxido de sodio	37
Ilustración 6: Materiales para la elaboración del hidróxido de sodio líquido	37
Ilustración 7: Morteros Hidróxido de Sodio concentración 6% NaO a los 7 días	44
Ilustración 8: Morteros Hidróxido de Sodio concentración 8% NaO a los 7 días	44
Ilustración 9: Morteros Hidróxido de Sodio concentración 6% NaO a los 28 días	45
Ilustración 10: Morteros Hidróxido de Sodio concentración 8% NaO a los 28 días	45
Ilustración 11: Morteros de hidróxido de sodio después de la falla.....	49
Ilustración 12: Morteros de Silicato de Sodio concentración de 5% a los 28 días.	52
Ilustración 13: Morteros de Silicato de Sodio concentración de 7% a los 28 días.	52
Ilustración 14: Morteros de silicato de sodio antes de la falla	56
Ilustración 15: Falla de morteros a flexión	60
Ilustración 16: Probetas de flexión después de la falla	60
Ilustración 17: Ensayo de tracción	64
Ilustración 18: Probetas para el ensayo de tracción	64

1. INTRODUCCION

La economía colombiana en su gran mayoría, se sustenta gracias a la industria de la construcción, generando de esta manera importantes ingresos que permiten el avance económico y social de la nación, pero a la vez genera un impacto ambiental importante, puesto que este sector es uno de los que más insumos o recursos naturales consume, siendo el que genere mayor cantidad de residuos y desperdicios como cenizas volantes, escoria de alto horno, escoria negra, escombros, entre otros. Partiendo de lo anterior la idea de reutilizar los residuos que provienen de los procesos de fabricación del acero, como materia prima para el desarrollo de morteros, se hace factible, para este caso el hecho de la reutilización de la escoria de alto horno activada alcalinamente (con hidróxido de sodio y silicato de sodio) como material cementante, de manera que se alcance a reemplazar o sustituir el uso del cemento convencional. En esta investigación se utilizarán mezclas de morteros con hidróxido de sodio y con silicato de sodio, con concentraciones pre establecidas de NaOH para cada uno de los casos, sometiendo cada una de las muestras a ensayos de compresión, tracción y flexión que permitan evaluar las propiedades mecánicas del material en estudio.

La base de este proyecto es la elaboración de un mortero de cemento activado alcalinamente que logre reemplazar el mortero de cemento convencional, cumpliendo con todas las especificaciones y requerimientos establecidos por las normas técnicas colombianas (NTC). Se realizarán mezclas con escoria de alto horno, activadas con hidróxido de sodio y con silicato de sodio, en diferentes proporciones para cada uno de los casos, evaluando las propiedades mecánicas que permitan avanzar en la implementación de cementos que tenga menos afectación al medio ambiente.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Actualmente el cemento tipo Portland es el material más utilizado en la industria de la construcción por sus óptimas características y los resultados que ha dado a través de los años, características como lo son su alta resistencia a la compresión, flexión, tracción y el rendimiento económico que este brinda en una obra. Al pasar de los años las industrias cementeras han contribuido a la alta contaminación del medio ambiente, ya que producir este tipo de cementos requiere de calcinación de materia prima y del uso de combustible, uno de los aportes de Villa¹ estos procesos liberan aproximadamente 900 kg de dióxido de carbono por cada 1000 kg de cemento producido. Así mismo dicha cantidad de cemento demanda el uso de 1693 kg de agua y 4798 MJ en recursos energéticos.

Por esta razón el gasto innecesario de recursos, hizo que surgiera la necesidad de estudiar la composición óptima de un cemento alcalino, que tuviera un rendimiento igual o mejor al del cemento portland pero que a la vez redujera los impactos ambientales que su fabricación genera, según lo anterior se tomó como referencia los cementos activados alcalinamente compuestos principalmente de escoria como material cementante e Hidróxido de sodio y Silicato de sodio como activante alcalino.

Si bien estos cementos activados alcalinamente funcionan de manera muy similar al cemento Portland, no se conoce a detalle su comportamiento mecánico, en ensayos de compresión, flexión y tracción. Por esto se vio necesario realizar una evaluación a la reacción mecánica de estos elementos funcionando como cemento en diferentes comportamientos a lo que se ve afectado en su uso en la construcción; debido a la carencia de una norma técnica para cemento alcalino se utilizó la NTC 220 acerca de la determinación de la resistencia de morteros de cemento hidráulico. Por lo tanto, surgió la siguiente pregunta de investigación:

¹ VILLA.C. Geopolymer synthesis using alkaline activation of natural zeolite. Construction Building Mater. 2014. P.1

¿Cómo se comportan los cementos activados alcalinamente mediante escoria e Hidróxido de sodio y Silicato de Sodio respecto a su resistencia en cuanto a la compresión, flexión y tracción comparada con las propiedades del cemento Portland?

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar la resistencia a compresión, flexión y tracción, de los cementos a base de escoria de alto horno y arena silícea, activados con hidróxido de sodio y silicato de sodio, elaborados según la norma NTC 220.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Definir las resistencias de los cementos activados alcalinamente mediante los ensayos de compresión, tracción y flexión.
2. Comparar los resultados de las resistencias de los cementos activados alcalinamente con el cemento Portland.
3. Proponer una mezcla de cemento alcalino con óptimo comportamiento, según los ensayos realizados, para utilizar en obras ingenieriles.

4. JUSTIFICACIÓN

A lo largo de la historia y en la actualidad la industria de la construcción ha tenido un papel vital e importante en el desarrollo mismo de las civilizaciones, en la mayoría de los casos los avances de una civilización se evidencian en los índices de infraestructura que estas tienen, como menciona Avila² en su documento, la Revolución Industrial fue el inicio y punto de partida del crecimiento económico basado en los procesos tecnificados de producción. Esto causó, el auge económico, científico y técnico, de esta manera aumento el uso intensivo, extensivo e irracional de los recursos naturales en busca de modelos de crecimiento económico acelerado. Por lo cual se puede afirmar que el aporte de la construcción a la contaminación ambiental es de los más altos debido a que los procesos de construcción y producción son los que generan un mayor consumo de materiales, recursos naturales y consumo energético.

Por otro lado se vio la necesidad de investigar sobre este tipo de cementos puesto que hoy en día la contaminación ambiental y los índices de dióxido de carbono van en un desmesurado aumento, como dice Enseñat³ en su artículo “Las partículas sólidas constituyen el principal contaminante emitido a la atmósfera por la industria del cemento que aunque no son realmente nocivas por su ausencia de toxicidad, son frecuentemente causa de molestias para la población circundante y puede producir perjuicios en la agricultura al cubrir las hojas de las plantas de una finísima capa de polvo”. Por lo tanto utilizando este tipo de partículas se afecta el medio ambiente desde diferentes perspectivas, por esta razón la necesidad de un cambio, así con la utilización de estos cementos podemos contribuir a un mejor ambiente, por lo cual sería apropiado empezar a manejar los cementos alcalinos dentro de la industria de la construcción sustituyendo el uso del cemento Portland.

² AVILA. JOSÉ Contaminación atmosférica en las empresas cementeras en el marco de la responsabilidad social ante las comunidades adyacentes. Universidad Rafael Belloso Chacín. P

³ ENSEÑAT. ALFONSO. La industria del cemento dentro de la problemática de la contaminación atmosférica. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. P 221

La presente investigación estableció una alternativa a los cementos Portland debido a la necesidad de disminuir los índices de contaminación ambiental que genera el proceso de fabricación de este cemento. De esta manera se evaluaron las propiedades de resistencia a compresión, flexión y tracción en diferentes escenarios de los cementos activados alcalinamente, fabricados a partir de escoria de alto horno como material cementante e hidróxido de Sodio y Silicato de Sodio, como activante debido a que estas soluciones aceleran la reacción química, producen una formación de una estructura compacta y se consiguen a muy bajo costo con un fácil acceso. Por esto se encontró la cantidad óptima de material cementante-activante alcalino que se debe utilizar para lograr un cemento de mejores o iguales características que cumpla con las expectativas de la industria de la construcción. Además, se realizó una comparación del cemento encontrado y el convencional, de acuerdo con la necesidad de una construcción, de esta manera se logró disminuir gastos innecesarios en obras, y que la eficiencia en obras ingenieriles sea mayor, comparando su resistencia que es la que determina la vida útil del material.

5. ANTECEDENTES

Se hizo un análisis detallado y a la vez exhaustivo de la información que se tiene disponible sobre el tema a investigar, encontrando como principales antecedentes:

El estudio de Parra⁴ ve la necesidad de sustituir el cemento Portland, puesto a su alto índice de contaminación ambiental en todas las etapas de su proceso de producción. Lo que incluye necesariamente contaminación del aire por emisiones en forma de polvo, emisiones de gases debido a la calcinación de materias primas y combustibles fósiles. Pero destaca que el problema ambiental más grande es la emisión de los gases de efecto invernadero como las dioxinas y material particulado.

Su investigación radica entonces en la fabricación de una alternativa de cemento a partir de la zeolita, y que sea activado alcalinamente. Realizando para esto una cantidad de ensayos de mortero con diferentes cantidades de zeolita y activante alcalino (hidróxido de sodio) que le permitieran caracterizar de una manera óptima el material de estudio, y así poderlo comparar con el tradicional cemento Portland.

A partir de ensayos a compresión, pudo conocer la propiedad de resistencia de este cemento a base de zeolita logrando como resultado que se obtuvieran para los morteros de zeolita activados con una proporción zeolita-activador de 75-25%, pero aún esta resistencia no es comparable a la de los morteros de cemento tipo IP curados durante 7 días en húmedo. Por ello, el proceso puede ser optimizado en base a la obtención de muestras, activación alcalina y condiciones de curado, para alcanzar mayores resistencias mecánicas.

En conclusión Parra dice o recomienda que para posteriores investigaciones se deben hacer proporciones con menos de 25% de solución alcalina para los

⁴ PARRA. C. Cementos alcalinamente activados a base de zeolitas naturales. Escuela Superior Politécnica del Litoral Ecuador. P 2

morteros de zeolita. Esta medida también podría hacer que los morteros se solidifiquen lo suficiente para desmoldarlos en menos tiempo, es decir disminuir el tiempo de pre-curado, que en estos casos llegaba a ser mayor de 10 días.

Por otra parte en la ciudad de Egipto, Abdel Moied⁵ en su investigación acerca del comportamiento de los geopolímeros activados alcalinamente a partir de escoria de metal de alto horno, busca una alternativa para el cemento tradicional Portland, debido a la necesidad de hacer un material que no impacte de una manera negativa al ambiente, como si lo hace el cemento tradicional. Así a partir de esa necesidad se empieza el estudio y la investigación acerca de una nueva alternativa de cemento activado alcalinamente con hidróxido de sodio y escoria de alto horno.

El geopolímero obtenido en los dos casos de estudio presenta una estructura homogénea y apretada, pero que a la vez es amorfa es decir que no tiene una forma definida, así como una alta resistencia a la compresión superior a la que se obtiene de mortero convencional. En la prueba de la respuesta hacia temperaturas elevadas, se ha encontrado que el geopolímero formado por la utilización de 3% de NH +% NS como activador revela una alta estabilidad y resistencia al fuego en el que retiene valores de alta resistencia incluso tras la exposición a temperaturas de hasta 500 ° C. Los resultados aclaran, también, que el geopolímero posee la estabilidad y la resistencia al fuego más altas que las del cemento convencional.

Lo que le permitió conocer y de una manera acertada concluir lo factible que puede llegar a ser la utilización de estos geopolímero como una capa resistente al fuego, para sustituir la capa de hormigón armado de paneles de poliestireno ligeros utilizados para las paredes, techos y tabiques en las obras de construcción. Dicha capa introducida ofrece las siguientes ventajas relativas a la capa de hormigón armado: menor densidad, mayor resistencia a la

⁵ ABDEK. MOIED. Geopolymer synthesis by the alkali-activation of blastfurnace steel slag and its fire-resistance. Faculty of Science, Cairo University. Egypt. 2016. P 1

compresión, mayor resistencia al fuego, libre de refuerzo de malla de acero y un costo reducido.

Los resultados de la presente investigación permitieron considerar que la geopolimerización podría ser una tecnología viable para la conversión de subproductos industriales, que tienen una composición de aluminosilicato en materiales de construcción, que generen una mayor resistencia a la compresión y una mayor resistencia al fuego, es importante tener en cuenta los niveles y las cantidades de activante óptimas obtenidas para la realización de geopolímeros más efectivos duraderos y resistentes.

Complementando un poco lo anterior en otra investigación, Provis⁶ resalta al igual que los anteriores autores la importancia de ayudar al medio ambiente creando o dando una nueva alternativa al cemento tipo Portland, destacando los elevados índices de contaminación que la producción de estos genera, resaltando que por cada tonelada de cemento Portland producido se genera una tonelada de contaminantes como el CO₂; contaminante principal que genera la producción de este cemento.

En su investigación Provis utiliza como materiales alternativos al cemento tradicional la escoria de alto horno como material cementante y el carbonato de sodio (Na₂CO₃) como activante alcalino, entendiendo que la escoria de alto horno no se activa ni funciona al ser mezclada con agua pues sus propiedades son distintas al cemento Portland.

El objetivo era acelerar la cinética de reacción de estos cementos, que de otro modo reaccionan y se endurecen muy lentamente. La inclusión de hidróxidos dobles estratificados calcinados, en estos cementos Na₂CO₃-activador acelera la reacción, y promueve el endurecimiento dentro de 24 horas. El contenido de MgO de la escoria también define la cinética de reacción, asociados con la formación de tipo hidrotalcita como producto de reacción. La eficacia del hidróxido doble estratificado calcinado (CLDH por sus siglas en inglés) se asocia

⁶ PROVIS. JOHN. Controlling the reaction kinetics of sodium carbonate-activated slag cements using calcined layered double hydroxides. The University of Sheffield. P. 1

con la eliminación de CO_2 disuelto - desde el cemento fresco, produciendo un aumento significativo en el pH, y también los posibles efectos de la siembra.

El factor clave que controla la cinética de reacción de los cementos de escoria activados con Na_2CO_3 es el grupo funcional activador, y por lo tanto estos cementos puede ser diseñado para reaccionar más rápidamente mediante el control de la química de la escoria y / o la inclusión de aditivos reactivos.

También se encuentra que los cementos alcalinos en el caso de la activación con ceniza volante, se han tenido excelentes resultados al compararlos con cementos tipo Portland, vemos en el artículo acerca de las propiedades y aplicaciones de estos, lo siguiente: “En lo que respecta a sus propiedades tecnológicas los hormigones, morteros y pastas de ceniza volante activada alcalinamente presentan en general unas propiedades tecnológicas mejores que las de un hormigón de cemento Portland convencional, destacando el rápido desarrollo de resistencias mecánicas iniciales, muy bajas retracciones al secado, y un excelente comportamiento frente a la adherencia matriz / acero”⁷. Esto nos deja ver un aspecto muy importante el cual es el comportamiento mecánico de estos materiales, ya que este nos permite ver cómo será la actuación de estos cementos en las construcciones en episodios de movimientos sísmicos, lo cual es muy común en la actualidad y por lo que se trabaja en crear cementos más resistentes y que consecuentemente creen edificaciones más sólidas, que eviten tragedias en momentos futuros, al encontrar un mejor comportamiento mecánico se pueden disponer a diferentes fuerzas los elementos creados con este cemento, lo que nos genera una mayor confiabilidad a la hora de construir, teniendo en cuenta que la adherencia al acero que es muy influyente al momento de reforzar el concreto en el caso de las vigas y columnas, va a ser óptima lo que genera cada vez un mejor uso de los materiales para la creación de hormigón.

⁷ JIMENEZ. ANA. Propiedades y aplicaciones de los cementos alcalinos. Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja (CSIC) Madrid, ESPAÑA. Revista Ingeniería de Construcción Vol. 24 N°3, Diciembre de 2009 PAG. 213-232

De igual manera García⁸ en su investigación hace una gran diferenciación entre el cemento portland y el cemento a base de escoria, encontró que los cementos a base de escoria son altamente resistentes a los ataques químicos como a las cargas que se le puedan llegar a colocar “sus características eran muy apreciadas y valoradas en obras marítimas y subterráneas, en donde competía con el cemento portland por su buen comportamiento en ambientes químicamente agresivos.”, además de eso encontró que la resistencia se ve ligada principalmente a la cantidad de escoria que tenga el cemento, “Las resistencias a compresión a edades tempranas disminuyen en función de la cantidad de escoria añadida, debido a que el proceso de hidratación de las escorias se desarrolla más lentamente que el del clinker de cemento portland. Por el contrario, a edades normales (28 días) las resistencias son similares o incluso más altas, conservando potencial de crecimiento a edades a largo plazo (60 días).”, esta investigación permite comprender el comportamiento del cemento a base de escoria sabiendo que sus resistencias a edades tempranas son bajas pero al pasar del tiempo son muy altas; incluso más altas que las del cemento convencional. Teniendo en cuenta los resultados obtenidos por García se puede decir que los cementos a base de escoria son ideales para obras que se encuentren cerca del mar, pues estas resisten mejor los ataques físicos químicos como el agua de mar, los sulfatos y la carbonatación.

Consecuente a esto se encuentra el estudio de Maldonado⁹ realizado en la Universidad del Valle Cali cuyo objetivo fue medir la resistencia química al ataque de sulfatos y agua de mar a las escorias activadas alcalinamente encontrando que “las escorias vítreas también pueden ser utilizadas en la preparación de cementos alternativos a los tradicionales cementos Portland. Estos cementos se obtienen por la activación alcalina de las escorias vítreas, y se caracterizan por presentar elevadas prestaciones mecánicas y obtenerse mediante un proceso

⁸ GARCIA. REINO. Experiencia de Holcim con cementos con escorias de alto horno altamente adicionados. Valencia. España. Patología de cimentaciones, estructuras y hormigones. Mayo de 2013. pg 1-7

⁹ J. MALDONADO. Morteros de cementos alcalinos. Resistencia química al ataque por sulfatos y al agua de mar. Universidad del Valle, Cali, Colombia. Mayo de 2002. Pg 2

más ecológico y con un menor consumo energético”. Lo que permite concluir que este tipo de materiales aumentan las propiedades mecánicas y en este caso esto se va a comprobar para el caso de la compresión, flexión y tracción, los cuales son los más relevantes en el caso de la construcción de edificaciones y lo que abre un buen camino al estudio de estos materiales en reemplazo del cemento convencional y del cuidado que se le debe dar al medio ambiente al dejar la fabricación del cemento convencional el cual obliga a los hornos a llegar a temperaturas superiores a 1450° C que son extremadamente altas las cuales puede que en un futuro dejen daños al planeta Tierra irreversibles y que en este momento se pueden evitar utilizando otro tipo de cementos alcalinos.

Y por último se puede analizar el estudio en donde se encuentra Rodríguez¹⁰ que se basa en el modelamiento de la resistencia a la compresión de concretos alternativos, que en este caso son alcalinos activados con mezclas binarias de una escoria siderúrgica (GBFS) y un metacaolín (MK) de alta pureza, a edades de curado de 7, 28, 90 y 180 días y en donde se usó como activante alcalino una solución de waterglass que contiene $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O} + \text{NaOH}$, en donde los resultados permitieron observar que “existe un incremento en la resistencia a la compresión a mayores tiempos de curado, cabe anotar que todas las mezclas evaluadas exhibieron resistencia a la compresión hasta de 60 MPa a tan solo 7 días de curado, lo que muestra el elevado desarrollo resistente de estos concretos a edades tempranas de curado y permite catalogarlos como concretos de altas prestaciones mecánicas”.

Esto permite entender que este tipo de cementos alcalinos llega a resistencias mecánicas más altas que el cemento convencional en menores tiempos de curado, lo que es sobresaliente y proporciona la idea de que hay que esperar menores tiempos a los 28 días, que es el tiempo convencional para determinar la resistencia final de un concreto, para usar estos cementos en obras ingenieriles que reduzcan el tiempo de resistencia final del concreto y aceleren las construcciones con este tipo de cemento que afecta de manera positiva el

¹⁰ RODRIGUEZ. ERICH. Modelamiento de la resistencia a la compresión de concretos alternativos, usando la metodología de superficie de respuesta. Universidad del Valle, Cali, Colombia. Mayo de 2009. Pg. 6

tiempo y el costo del material que más se utiliza en la construcción que es el cemento.

6. MARCOS REFERENCIALES

6.1 MARCO CONCEPTUAL

6.1.1 Concreto

El concreto es la mezcla del cemento, agregados inertes (arena y grava) y agua, la cual se endurece después de cierto tiempo formando una piedra artificial. Los elementos activos del concreto son el agua y el cemento de los cuales ocurre una reacción química que después de fraguar alcanza un estado de gran solidez, y los elementos inertes, que son la arena y la grava cuya función es formar el esqueleto de la mezcla, ocupando un gran porcentaje del volumen final del producto, reduciendo costos y disminuyendo los efectos de la reacción química de la “lechada”. Este puede ser moldeado para dar una gran variedad de formas y tamaños gracias a la trabajabilidad de la mezcla.¹¹

6.1.2 Relación agua cemento

La relación agua cemento constituye un parámetro importante de la composición del hormigón. Tiene influencia sobre la resistencia, la durabilidad y la retracción del hormigón. La relación agua cemento (a/c) es el valor característico más importante de la tecnología del hormigón. De ella dependen la resistencia y la durabilidad, así como los coeficientes de retracción y de fluencia. También determina la estructura interna de la pasta de cemento endurecida. La relación agua cemento es el cociente entre las cantidades de agua y de cemento existentes en el hormigón fresco.¹²

¹¹ KUMAR MEHTA, y PAULO MONTEIRO. Concreto. Estructura, propiedades y materiales. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C. Págs. 1 y 2.

¹² Traducción del Bulletin du Ciment N° 7 – Julio 1978 – Suiza

6.1.3 Silicato de Sodio

Los silicatos de sodio tienen muchas propiedades útiles que no comparten otras sales alcalinas. Esto, junto con el hecho de que tienen bajo costo, da como resultado un amplio campo de uso en diferentes industrias. Son utilizados en la industria como adhesivos, detergentes, ingredientes en compuestos de limpieza, cementos, ligantes (binders), capas protectoras y peculiares, ayuda coagulante, anticorrosivos, bases de catalizadores, defloculadores, insumos químicos, zeolitas, etc. Las diferentes propiedades y características funcionales de los silicatos solubles pueden ser utilizadas para resolver eficiente y económicamente muchos problemas que surgen en procesos industriales y químicos.¹³

6.1.4 Hidróxido de sodio

El hidróxido de sodio es un sólido blanco e industrialmente se utiliza como disolución al 50% por su facilidad de manejo. Es soluble en agua, desprendiéndose calor. Absorbe humedad y dióxido de carbono del aire y es corrosivo de metales y tejidos. Es usado, en síntesis, en el tratamiento de celulosa para hacer rayón y celofán, en la elaboración de plásticos, jabones y otros productos de limpieza, entre otros usos. Se obtiene, principalmente por electrólisis de cloruro de sodio, por reacción de hidróxido de calcio y carbonato de sodio y al tratar sodio metálico con vapor de agua a bajas temperaturas.¹⁴

6.1.5 Cemento Portland

En el campo de la construcción es el aglomerante más utilizado. Cuando se hace referencia al concreto, siempre se piensa en cemento Portland, su versatilidad y adherencia lo hacen indispensable. Los cementos Portland son cementos hidráulicos compuestos principalmente de silicatos de calcio los cuales reaccionan químicamente con el agua. En esta reacción, denominada hidratación, el cemento se combina con el agua y forman una pasta, y cuando

¹³ Extraído de: <https://www.quiminet.com/articulos/usos-y-aplicaciones-del-silicato-de-sodio-liquido-y-solido-27872.htm> el 21/06/2017 siendo las 14:20.

¹⁴ UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO. Hoja de seguridad II <<http://www.quimica.unam.mx/IMG/pdf/2hsnaoh.pdf>> (citado el 12 de octubre 2016, 14:51)

le son agregadas arena y grava, se forma lo que se conoce como concreto. El tipo de materias primas y sus proporciones se diseñan con base al tipo de cemento deseado.¹⁵

6.1.6 Caracterización del material

Escoria de alto horno

La escoria de alto horno es un producto que se produce durante la obtención del arrabio¹⁶, en cantidades proporcionales a la producción. Los constituyentes son similares a los del Clinker¹⁷, pero en proporciones aleatorias como consecuencia de los materiales con que se carga el alto horno para obtención del metal. Es interesante considerar la aplicación de la escoria a la elaboración del cemento desde tres aspectos importantes: tecnológico (mejora propiedades del cemento y del hormigón), ambiental (menor contaminación) y económico (ahorro de combustible no renovable, aumenta la capacidad de fabricación de cemento). El cemento elaborado con escoria se aplica a la construcción de obras en general desde más de 100 años, contándose con resultados del hormigón fresco (trabajabilidad) y propiedades en estado endurecido, en particular de su resistencia mecánica y química. La influencia de esta adición en las características de los cementos resultantes está vinculada con la composición de la escoria, tamaño y distribución de partículas, el porcentaje utilizado, tiempo de curado, (variables de temperatura y humedad), Clinker base, aditivos, ayuda molienda, etc.¹⁸

Las escorias siderúrgicas de alto horno son el resultado de la combinación de la ganga ácida "arcillosa" del material de hierro y de las cenizas de azufre del coque (igualmente de carácter ácido), con la cal y la magnesia (ambos compuestos básicos) de las calizas más o menos dolomíticas utilizadas como

¹⁵ SANCHEZ. DE GUZMAN, Diego, tecnología del concreto y del mortero, brandar editores Ltda., Santafé de Bogotá DC, 2000, pág. 27

¹⁶ Arrabio:Producto obtenido de la primera fusión del hierro en los altos hornos que contienen más carbono que el acero o que el hierro forjado y se rompe con mayor facilidad.

¹⁷ Clinker:El clinker se forma tras calcinar caliza y arcilla a una temperatura que está entre 1350 y 1450 °C. El clinker es el producto del horno que se muele para fabricar el cemento Portland

¹⁸ O. RBATIC, J.D. SOTA, D.FALCONE: Influencia de la incorporación de escoria en las características de los cementos resultantes. La Plata, 2006, p.1

fundentes. La combinación de los óxidos ácidos (SiO_2 y Al_2O_3) y óxidos básicos (CaO y MgO), y la formación de los constituyentes de la escoria tiene lugar por fusión a alta temperatura ($\approx 1.600^\circ\text{C}$), y enfriamiento del magma fluido desde 1.400°C hasta temperatura ambiente.

Estos subproductos industriales están constituidos, tanto por fases vítreas como cristalinas. Las escorias con altos contenidos en material vítreo son de naturaleza más ácida. Existen diferentes procesos de granulación ó peletización que tienen como objetivo conseguir una escoria con una elevada proporción de fase vítrea. Una escoria granulada normal tiene un contenido en materia vítrea entre el 85-95 % en peso. La composición química de las escorias de alto horno varía entre los siguientes límites:

SiO_2	= 27-40 %.
Al_2O_3	= 5-33 %.
CaO	= 30-50 %.
MgO	= 1-21 %.
Fe_2O_3	= < 1 %.
S	= < 3 %.
Cr_2O_3	= 0,003-0,007 %.
Cl	= 0,19-0,26 %.
TiO_2	= < 3 %.
F	= 0,09-0,23 %.
MnO_2	= < 2 %.
P_2O_5	= 0,02-0,09 %.
$\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$	= 1-3 %.

La variación en la composición química de las escorias depende del proceso siderúrgico aplicado y del tipo de acero refundido. Sin embargo, para un mismo acero, las composiciones químicas de las escorias de alto horno son bastantes similares. Los coeficientes de variación del SiO_2 , CaO y Al_2O_3 son inferiores al 2 %. Para el MgO alcanza valores del 6,5 % y para el $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ está alrededor del 20 %. En general, las mayores desviaciones se obtienen para los elementos que están presentes como trazas.¹⁹

¹⁹ F. PUERTAS. Escorias de alto horno: composición y comportamiento hidráulico. ESPAÑA. 1993 P.2-3

Se presenta en la siguiente tabla los diferentes procesos del material cementante usado en la actualidad y el propuesto:

CEMENTO PORTLAND²⁰	ESCORIA DE ALTO HORNO²¹
Explotación de materiales: De las canteras de piedra se extrae la caliza y la arcilla a través de barrenación y detonación con explosivos, cuyo impacto es mínimo gracias a la moderna tecnología empleada.	Granulación: Enfriamiento brusco de la escoria líquida, dejándola caer sobre un potente chorro de agua fría de forma que expando y sirviendo el chorro de agua como transporte a las balsas de decantación
Transporte de materias primas: Una vez que las grandes masas de piedra han sido fragmentadas, se transportan a la planta en camiones o bandas.	Secado: Las escorias se secan al llegar a fábrica en tambores rotatorios
Trituración: El material de la cantera es fragmentado en los trituradores, cuya tolva recibe las materias primas, que por efecto de impacto y/o presión son reducidas a un tamaño máximo de una y media pulgadas.	Molienda: se realiza en molinos de bolas, prensas de rodillos o con un sistema combinado de molino y prensa, el molino de bolas consiste en un tambor de acero, horizontal y giratorio que contiene una carga muy importante de bolas de acero con un tamaño entre 25 y 50 mm
Molienda de materia prima: Se realiza por medio de un molino vertical de acero, que muele el material mediante la presión que ejercen tres rodillos cónicos al rodar sobre una mesa giratoria de molienda. Se utilizan también para esta fase molinos horizontales, en cuyo interior el material es pulverizado por medio de bolas de acero.	
Homogenización de harina cruda: Se realiza en los silos equipados para lograr una mezcla homogénea del materia	

²⁰ Extraído de: CEMEX. Como hacemos cemento. <<http://archive.cemex.com/ES/ProductosServicios/ComoHacemosCemento.aspx>> Citado el 21 de Junio de 2017

²¹ Extraído de: UNESID. Castello. <<http://www.cedex.es/NR/rdonlyres/BFF81F23-BDB7-4B5B-85A5-A7ABD2974A42/119856/ESCORIASDEHORNOALTO.pdf>> citado el 21 de junio de 2017

<p>Calcinación: La calcinación es la parte medular del proceso, donde se emplean grandes hornos rotatorios en cuyo interior, a 1400°C la harina se transforma en clinker, que son pequeños módulos gris oscuros de 3 a 4 cm.</p>
<p>Molienda de cemento: El clinker es molido a través de bolas de acero de diferentes tamaños a su paso por las dos cámaras del molino, agregando el yeso para alargar el tiempo de fraguado del cemento.</p>
<p>Envase y embarque del cemento: El cemento es enviado a los silos de almacenamiento; de los que se extrae por sistemas neumáticos o mecánicos, siendo transportado a donde será envasado en sacos de papel, o surtido directamente a granel. En ambos casos se puede despachar en camiones, tolvas de ferrocarril o barcos</p>

En la anterior tabla, se evidencia la diferencia que tienen los procesos de fabricación del material cementante, por un lado el cemento tradicional viene de trabajo de exploración de materias primas y todo un proceso de calcinación y molienda; como se describe en sus diferentes pasos, mientras que en la escoria de alto horno se desarrolla un proceso de reutilización del desperdicio en la producción del acero.

6.2 MARCO LEGAL

Se utilizaron las siguientes normas para toda la fase experimental y análisis de datos realizados en este trabajo.

Tabla 1 : Marco Legal de normas utilizadas en la elaboración de mezclas y ensayos.

No.	NORMA	DESCRIPCION
1	NSR 10	Reglamento colombiano de construcción sismo resistente 2010
2	NTC 220	Determinación de la resistencia de morteros de cemento hidráulico utilizando cubos de 50 mm o 50,8 mm de lado
3	NTG 41017-h15	Método de ensayo. Determinación de la resistencia a tracción indirecta de especímenes cilíndricos de concreto
4	UNE-EN 196-1	Método de ensayo de cementos, determinación de resistencia mecánica
5	I.N.V. E – 323 – 07	Resistencias a la compresión de morteros de cemento hidráulico
6	I.N.V. E – 324 – 07	Resistencia a la flexión de morteros de cemento hidráulico
7	NTC 121	Especificación de desempeño para cemento hidráulico
8	NTC 4073	Cementos. Masa de referencia y equipos para determinación de masa y volumen usados en los ensayos físicos de cementos hidráulicos
9	I.N.V. E – 327 – 07	Resistencia a la tensión de morteros de cemento hidráulico

10	NTC 112	Mezcla mecánica y de pastas de cemento hidráulico y morteros de consistencia plástica
11	NTC 2017	Adoquines de concreto para pavimentos

7. DISEÑO METODOLÓGICO

7.1 ENFOQUE DE INVESTIGACIÓN

En esta investigación se va a utilizar un enfoque de tipo cuantitativo, debido a que las variables que vamos a determinar son valores numéricos los cuales se van a determinar de manera experimental, como la relación agua cemento la cual es uno de los valores más importantes que se van a encontrar mediante los laboratorios que se van a realizar, obteniendo valores de este tipo para encontrar las medidas más óptimas, que son el objetivo primordial de esta investigación.

7.2 TIPO DE INVESTIGACIÓN

El tipo de investigación que se utilizó en este trabajo experimental comparativo, debido a que se va a analizar el cemento alcalino respecto al cemento tipo Portland mediante los ensayos de resistencia mecánica, evaluando su compresión, flexión y tracción, para determinar los valores más cercanos al cemento tipo Portland, encontrando las cantidades semejantes al tipo de cemento buscado que proporcionen las condiciones buscadas en la fabricación del mismo.

7.3 FASES DE INVESTIGACIÓN

7.3.1 Fase I. Experimentación con mortero activado alcalinamente

Tabla 2 : Fase I de investigación. Experimentación con mortero activado alcalinamente.

Actividad 1	Revisión bibliográfica o generar una búsqueda acerca del comportamiento de los cementos a partir de escoria de alto horno y el marco teórico que fundamenta su comportamiento
Actividad 2	Generar un complemento teórico con base al estudio anterior a el proyecto con el comportamiento mecánico y durabilidad con cementos alcalinos y el estado del arte actual de manera que en esta fase el complemento teórico para explicar el comportamiento mecánico del cemento alcalino
Actividad 3	Recolección del material necesario para la elaboración del mortero, así como los permisos necesarios para la utilización del hidróxido de sodio, para posterior empezar la experimentación en el laboratorio de la facultad de ingeniería Civil.
Actividad 4	Realización de las primeras mezclas de cemento a base de escoria de alto horno con diferentes cantidades de activante alcalino, según la norma de morteros de cemento convencional
Actividad 5	Obtención de las primeras muestras para establecer las concentraciones del material mas adecuadas.

7.3.2 Fase II. Análisis del comportamiento mecánico y de durabilidad del mortero activado alcalinamente

Tabla 3 : Fase II de Investigaciones. Análisis del comportamiento mecánico y de durabilidad del mortero activado alcalinamente.

Actividad 6	Ejecución de los ensayos necesarios tales como el ensayo de compresión, flexión y tracción, de las muestras elegidas.
Actividad 7	Obtención y verificación de resultados, aquí se recopilan todos los datos que fueron obtenidos de los ensayos realizados a las muestras.
Actividad 8	Presentación de los datos obtenidos del cemento alcalino ensayado, y determinación de las propiedades mecánicas establecidas del material.

Actividad 9	Comparar las propiedades de compresión, flexión y tracción con las ya establecidas del mortero convencional.
Actividad 10	De acuerdo al análisis ya realizado generar conclusiones y recomendaciones para futuras investigaciones

7.3.3 Tamaño de la muestra

Se utilizaron los procedimientos realizados para el estudio del mortero activado alcalinamente, según las medidas exactas expuestas en la norma NTC 220 para que las mezclas realizadas puedan cumplir con los estándares establecidos. Donde se especifica que las mezclas se deben realizar para 9 o 12 cubos según las cantidades que se especifican, estos se usaron para la mezcla de tipo para 9 cubos, lo que se usaron de a 3 para fallarlos a los 3, 7 y 28 días. Los ensayos experimentales que se indican en las normas técnicas colombianas para determinar la resistencia a la compresión, tracción y flexión de los morteros indican los tipos de materiales que se deben hacer para de esta manera garantizar la calidad de los resultados y por ende la calidad de los ensayos, con el fin de obtener los datos necesarios del mortero activado alcalinamente para poderlo implementar como material alternativo al cemento convencional Portland. El ajuste de los datos no se vio necesario debido a que la muestra a promediar fue de 3 datos los cuales eran bastantes cercanos y no tuvieron la necesidad de ser corregidos por algún método.

7.4 INSTRUMENTOS

7.4.1 Pesas y equipos de pesaje

Deben cumplir con lo establecido en la NTC 4073 (ASTM C 1005). Los equipos de pesaje deben ser evaluados para determinar la precisión y el sesgo con una carga total de 2000 g.

Ilustración 1: Pesa calibrada



Fuente Propia

7.4.2 Probetas graduadas

Deben tener, preferentemente, una capacidad que permita medir y entregar completamente el agua de amasado en una sola operación. La variación admisible no debe ser mayor de ± 2 ml a 20 °C. Deben estar graduadas por lo menos cada 5 ml y la graduación puede empezar a partir de 10 ml para las de 250 ml y a partir de 25 ml para las de 500 ml. Las líneas principales de graduación deben ser circulares y deben estar numeradas. Las líneas menores deben extenderse por lo menos un séptimo de la circunferencia completa y las líneas intermedias, por lo menos un quinto de ella.

7.4.3 Moldes

Los moldes para ensayos de compresión deben ser cúbicas de 5 cm de ancho x 5 cm de alto x 5 cm de largo, estos se utilizaran con diferentes compartimientos, de 9 espacios. Los moldes para ensayos de flexión deben ser rectangulares de 4 cm de ancho x 4 cm de alto x 16 cm de largo, los que se utilizaran con diferentes compartimientos, de 3 espacios. Estos deben estar dotados de dispositivos que aseguren una perfecta y rígida unión. Deben ser fabricados de acrílico duro no atacable por las mezclas de cemento. Las caras interiores de los moldes deben ser planas y cumplir con las tolerancias. Los

ensayos de tracción se realizaron con moldes que estarán contruidos con un metal no atacable por los morteros de cemento, y con espesor suficiente para evitar deformaciones al verter el mortero, las medidas se especifican en la norma I.N.V. E – 327 – 07.

Ilustración 3: Moldes para probetas flexión



Fuente Propia

Ilustración 2: Moldes para probetas a compresión



Fuente Propia

Ilustración 4: Moldes para probetas tensión



Fuente Propia

7.4.4 Palustre

La hoja del palustre debe ser de acero, con una longitud de 100 mm a 150 mm debe tener los bordes rectos.

7.4.5 Máquina de ensayo

Se usó una máquina de tipo mecánica marca Versa SoilTest, modelo: AP-1015. La distancia entre sus caras superior e inferior debe ser suficiente para que permita la utilización de los aparatos de verificación. La carga aplicada al cubo se debe medir con una exactitud de $\pm 1,0$ %. Si la carga aplicada por la máquina de compresión se registra sobre un dial, este debe estar provisto de una escala graduada que pueda ser leída por lo menos 0, 1 % del mayor valor de carga en la escala dada. El dial debe poderse leer dentro del 1 % de la carga indicada para cualquier nivel de carga dado dentro del rango de carga. En ningún caso, el rango de carga de un dial se debe considerar para incluir valores inferiores de 100 veces el cambio más pequeño que pueda ser leído sobre la escala. La escala debe tener una línea de graduación igual a cero y numerada. El indicador del dial debe tener la superficie longitudinal para alcanzar las marcas de la graduación; el ancho del indicador no debe exceder la distancia libre entre las graduaciones más pequeñas. Cada dial debe estar equipado con un ajustador a cero fácilmente accesible desde el exterior de la caja del dial, así como de un dispositivo apropiado que indique la máxima carga aplicada al cubo con una precisión del 1 %.

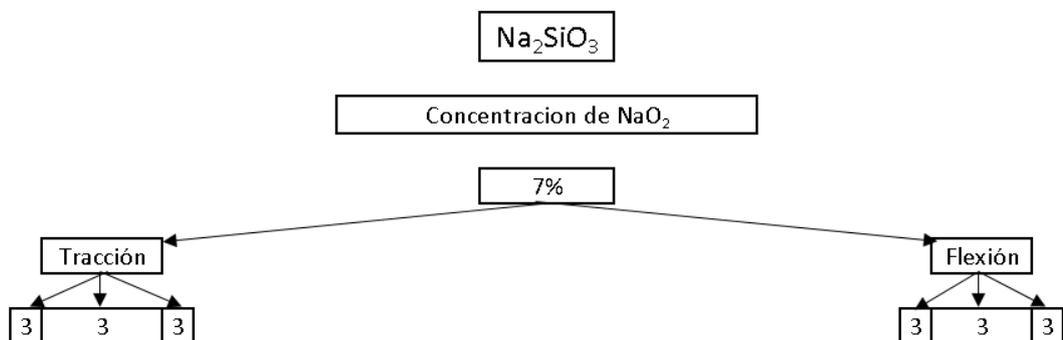
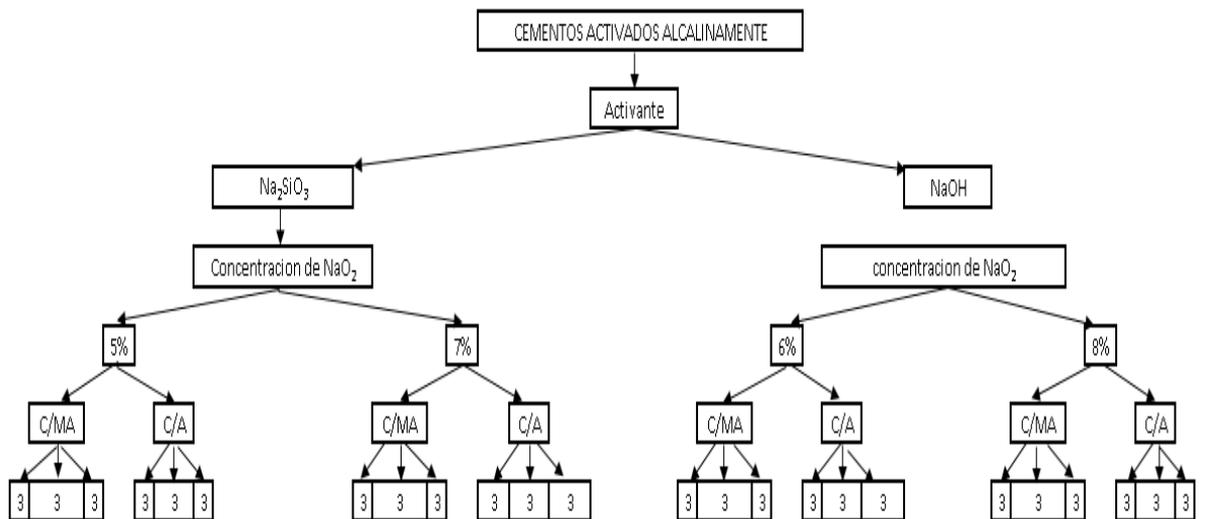
6.5 OPERACIONALIZACIÓN DE LAS VARIABLES

Tabla 4 : Operacionalización de las variables

	VARIABLE	INDICADOR	MEDICIÓN
Independientes	Incorporación de hidróxido de sodio	% de concentración	% en peso
	Incorporación de arena	Cantidad de arena	gr
	Incorporación de escoria de alto horno	cantidad de escoria	gr

Dependientes	Comportamiento mecánico del material	Resistencia a la compresión	Kg/cm ²
		Resistencia a la tracción	Kg/cm ²
		Resistencia a la flexión	Kg/cm ²

7.6 MATRIZ DE ENSAYOS A TRABAJAR



En la primera matriz de ensayos se describe la forma o cantidad de pruebas a compresión según la norma I.N.V. E – 323 – 07 de resistencias a la compresión de morteros de cemento hidráulico que se hicieron para los cementos de escoria de alto horno de la empresa Acerías paz del rio. En primer lugar se tomaron dos activantes, hidróxido de sodio y silicato de sodio, para cada uno de estos se tomaron porcentajes de óxido de sodio, 5% y 7% para el silicato, 6% y 8% para el hidróxido, esta matriz tiene los ensayos de compresión, para cada caso se hicieron muestras curadas al medio ambiente y curadas en agua, 9 muestras por ensayo según la norma NTC 220 para fallarlos a los 3, 7 y 28 días y llegar a la resistencia final a la compresión y elegir el de mejor comportamiento.

La segunda matriz parte de los resultados de los ensayos realizados a compresión, se seleccionó el activante que mejor reacciono y el porcentaje de óxido de sodio que tuvo mejor desempeño y se hicieron los ensayos de flexión y tensión, cada uno con 9 muestras, según la norma NTC 220 para realizar fallas a los 3, 7 y 28 días respectivamente y encontrar la composición más optimas en los diferentes ensayos realizados.

8. CÁLCULOS INICIALES

Cantidades iniciales de material	
Escoria de alto horno	10 Kilogramos
Arena Silícea	20 Kilogramos
Hidróxido de Sodio	5 Kilogramos
Silicato de Sodio	5 litros

8.1 CÁLCULOS CANTIDADES A UTILIZAR PARA MEZCLA DE MORTEROS

8.1.1 Cálculo de concentración de 6% y 8% en el Hidróxido de Sodio

Se utilizó dos concentraciones diferentes de NaO en el Hidróxido de Sodio, estas fueron de 6% y 8% las cuales se necesitaban en estado líquido y por lo

cual se hicieron los cálculos para realizar la mezcla ya que se tenía en estado sólido, así:

para una cantidad de 9 cubos de morteros se conoce según la norma NTC 220 que la cantidad de escoria que se utiliza es de 740 g entonces se calculó la cantidad de 6% y 8% correspondiente con respecto a la cantidad de escoria de la siguiente manera:

$$\begin{array}{l} 740 \text{ g (escoria)} \text{ -----} > 100\% \\ X \text{ g (NaOH)} \text{ -----} > 6\% \end{array}$$

$$(6\% * 740 \text{ g}) / 100\%$$

$$\text{NaOH} = 44.4 \text{ g NaOH}$$

Se hizo la relación estequiométrica de la siguiente manera:

$$44.4 \text{ g NaOH} ((39.981 * 2 \text{ g Na}_2\text{O}) / 61.997 \text{ g NaOH})$$

$$\text{Na}_2\text{O} = 57.26 \text{ g}$$

Entonces la cantidad de hidróxido de sodio que debe haber en la mezcla es de 57.26 g, de la misma manera se calculó para el 8% dando como resultado una cantidad de 76.35 g de hidróxido de sodio.

Después de estos cálculos, se realizaron las mezclas respectivas para su posterior uso.

Ilustración 6: Materiales para la elaboración del hidróxido de sodio líquido



Fuente Propia

Ilustración 5: Mezcla del hidróxido de sodio



Fuente Propia

8.1.2 Cálculos cantidades para morteros de Hidróxido de Sodio

Según lo establecido en la norma NTC 220 las cantidades para los morteros son las siguientes:

Escoria: 740 g

Arena 2035 g

Agua: 296 g

8.1.3 Cálculos cantidades para morteros de Silicato de Sodio

Se utilizaron concentraciones de 5% y 7% de Sodio en el Silicato.

Para el 5% se utiliza: 740 g de Escoria y 2035 g de Arena y una relación Arena / Escoria = 2.75

$$\begin{array}{l} 5\% \text{ NaO} \quad 740\text{g} \rightarrow 100\% \\ a/c = 0.4 \quad x(\text{g}) \leftarrow 5\% \end{array} \quad X = 37\text{g NaO}$$

$$\begin{array}{l} x(\text{g}) \text{ Silicato} \rightarrow 100\% \\ 37 \text{ g} \quad \leftarrow 12.7 \end{array}$$

$$\begin{array}{l} X = 291.33 \text{ g Silicato} \\ \text{H}_2\text{O} \rightarrow 163.436 \text{ g} \\ V = 190.87 \text{ cm}^3 = \text{ml} \end{array}$$

$$V = \frac{m}{d} = \frac{291.33\text{g}}{1.5263 \text{ g/cm}^3}$$

$$\frac{\text{H}_2\text{O Silicato} + X \text{H}_2\text{O}}{740\text{g Escoria}} = 0.4$$

$$\begin{array}{l} 163.436 \text{ g} + X \text{H}_2\text{O} = 296 \\ \text{H}_2\text{O} = 132.56 \text{ ml} \end{array}$$

Se determina entonces usar:

$$\begin{array}{l} \text{Volumen Silicato} = 132.56 \text{ ml} \\ \text{Volumen Agua} = 132.56 \text{ ml} \end{array}$$

Para el 7% se utiliza: 740 g de Escoria y 2035 g de Arena y una relación
Arena / Escoria = 2.75

$$\begin{array}{l} 7\% \text{ NaO} \quad 740\text{g} \rightarrow 100\% \quad X = 51.8 \text{ g NaO} \\ a/c = 0.4 \quad x(\text{g}) \leftarrow 7\% \end{array}$$

$$\begin{array}{l} x(\text{g}) \text{ Silicato} \rightarrow 100\% \\ 51.8 \text{ g} \quad \leftarrow 12.7 \end{array}$$

$$\begin{array}{l} X = 407.879 \text{ g Silicato} \\ \text{H}_2\text{O} \rightarrow 228.817 \text{ g} \\ V = 267.231 \text{ cm}^3 = \text{ml} \end{array}$$

$$V = \frac{m}{d} = \frac{267.231\text{g}}{1.5263 \text{ g/cm}^3}$$

$$\frac{\text{H}_2\text{O Silicato} + X\text{H}_2\text{O}}{740\text{g Escoria}} = 0.4$$

$$\begin{array}{l} 228.817\text{g} + X \text{H}_2\text{O} = 296 \\ \text{H}_2\text{O} = 67.18 \text{ ml} \end{array}$$

Se determina entonces usar:
Volumen Silicato = 267.231 ml
Volumen Agua = 67.18 ml

Para las cantidades de escoria y Arena especificadas anteriormente.

9. RESULTADOS Y ANÁLISIS

9.1 MORTEROS HIDRÓXIDO DE SODIO A COMPRESIÓN

9.1.1 Morteros no curados Hidróxido de Sodio con concentración de 6% de NaO

Se fallaron a compresión 3 días después de la mezcla los morteros realizados con una concentración de 6% de NaO no curados, se realizan 3 fallas para promediar los resultados y obtener un mejor resultado, se obtuvo lo siguiente:

Tabla 5 : Fallas a los 3 días de las muestras de NaOH con concentración de 6% no curados.

Muestra	Carga de Falla
1	22.21 KN
2	22.80 KN
3	20.55 KN

Se promediaron los 3 datos de falla así:

$$(22.21 + 22.80 + 20.55) / 3$$

Donde se obtuvo una fuerza de falla de 21.853 KN

Para obtener el esfuerzo, utilizamos la fórmula 1:

$$\delta = \frac{F}{A} \text{ (1) Siendo F: fuerza y A: Área}$$

Teniendo en cuenta el área de los morteros de 5cm x 5cm, tenemos un área de 25cm² o 0.0025 m².

$$\text{Obteniendo: } \delta = \frac{21.853 \text{ KN}}{0,0025 \text{ M}^2} = 8741.2 \text{ KN/M}^2$$

Convirtiendo el anterior valor obtenemos el esfuerzo de los morteros de hidróxido de Sodio con concentración de 6% a los 3 días de 8.74 Mpa

Se fallaron a compresión 7 días después de la mezcla los morteros realizados con una concentración de 6% de NaO no curados, se realizan 3 fallas para promediar los resultados y obtener un mejor resultado, se obtuvo lo siguiente:

Tabla 6 : Fallas a los 7 días de las muestras de NaOH con concentración de 6% no curados.

Muestra	Carga de Falla
1	28.16 KN
2	26.65 KN
3	27.09 KN

Se promediaron los 3 datos de falla, donde se obtuvo una fuerza de falla de 27.30 KN

Para obtener el esfuerzo, utilizamos la fórmula 1, teniendo en cuenta el área de los morteros de 5cm x 5cm, tenemos un área de 25cm² o 0.0025 m².

Obteniendo: $\delta = \frac{27.30 \text{ KN}}{0,0025 \text{ M}^2} = 10920.0 \text{ KN/M}^2$

Convirtiendo el anterior valor obtenemos el esfuerzo de los morteros de hidróxido de Sodio con concentración de 6% a los 7 días de 10.92 Mpa

Se fallaron a compresión 28 días después de la mezcla los morteros realizados con una concentración de 6% de NaO no curados, se realizan 3 fallas para promediar los resultados y obtener un mejor resultado, se obtuvo lo siguiente:

Tabla 7 : Fallas a los 28 días de las muestras de NaOH con concentración de 6% no curados.

Muestra	Carga de Falla
1	50.5 KN
2	44.1 KN
3	44.4 KN

Se promediaron los 3 datos de falla, donde se obtuvo una fuerza de falla de 46.3 KN

Para obtener el esfuerzo, utilizamos la fórmula 1, teniendo en cuenta el área de los morteros de 5cm x 5cm, tenemos un área de 25cm² o 0.0025 m².

Obteniendo: $\delta = \frac{46.3 \text{ KN}}{0,0025 \text{ M}^2} = 18520.0 \text{ KN/M}^2$

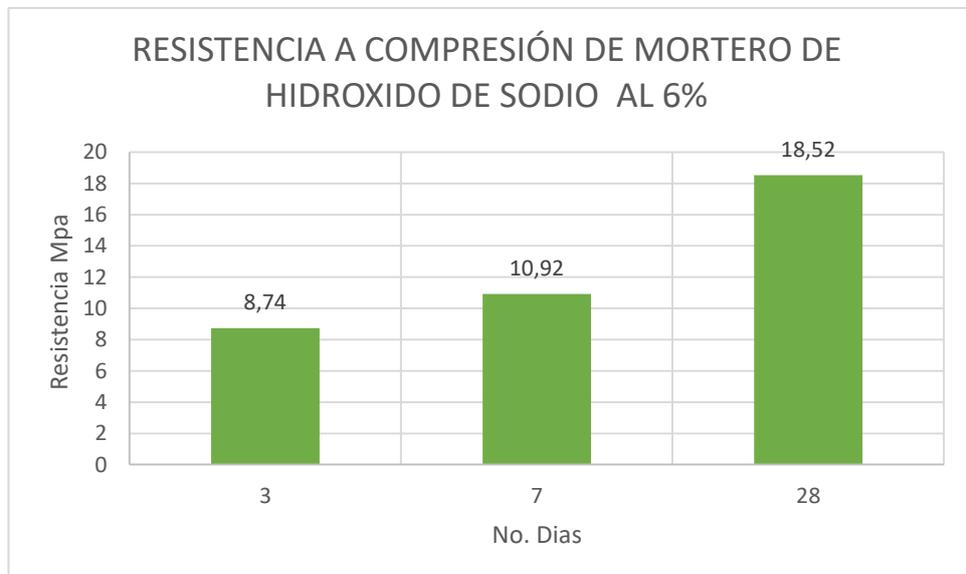
Convirtiendo el anterior valor obtenemos el esfuerzo de los morteros de hidróxido de Sodio con concentración de 6% a los 28 días de 18.52 Mpa

Entonces los datos de resistencia fueron los siguientes:

Tabla 8: Resistencia de las muestras de NaOH con concentración de 6% no curados.

Días	Resistencia (MPa)
3	8.74
7	10.92
28	18.52

Gráfica 1: Resistencia a compresión de los morteros de NaOH con concentración del 6% curados al ambiente



9.1.2 Morteros no curados Hidróxido de Sodio con concentración de 8% de NaO

Se fallaron a compresión 3 días después de la mezcla los morteros realizados con una concentración de 8% de NaO curados al medio ambiente, se realizan 3 fallas y se promediaron los 3 datos de falla, donde se obtuvo una fuerza de falla de 14.80 KN, con esto se obtuvo el esfuerzo de los morteros de hidróxido de Sodio con concentración de 8% a los 3 días de 5.92 Mpa.

Se fallaron a compresión 7 días después de la mezcla los morteros realizados con una concentración de 8% de NaO curados al medio ambiente, se realizan 3 fallas y se promediaron los 3 datos de falla, donde se obtuvo el esfuerzo de los morteros de hidróxido de Sodio con concentración de 8% a los 7 días de 8.51 Mpa.

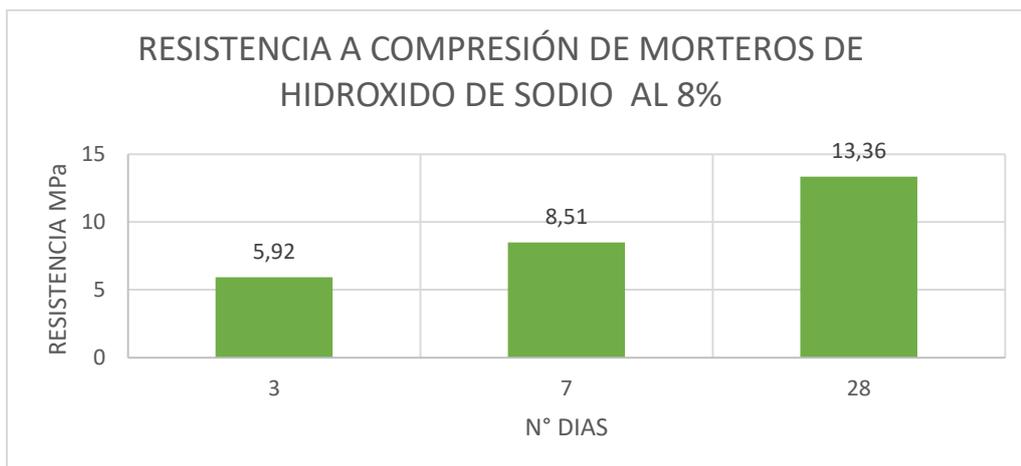
Se fallaron a compresión 28 días después de la mezcla los morteros realizados con una concentración de 8% de NaO curados al medio ambiente, se realizan 3 fallas y se promediaron los 3 datos de falla, donde se obtuvo el esfuerzo de los morteros de hidróxido de Sodio con concentración de 8% a los 28 días de 13.36 Mpa.

Por lo tanto, los datos de resistencia obtenidos fueron los siguientes:

Tabla 9; Resistencia de las muestras de NaOH con concentración de 8% no curados.

Dias	Resistencia (MPa)
3	5.92
7	8.51
28	13.36

Gráfica 2: Resistencia a compresión de los morteros de NaOH concentración del 8% curados al ambiente.



Las fallas de los morteros se observan en las siguientes fotografías:

Ilustración 7: Morteros Hidróxido de Sodio concentración 6% NaO a los 7 días



Ilustración 8: Morteros Hidróxido de Sodio concentración 8% NaO a los 7 días



Ilustración 9: Morteros Hidróxido de Sodio concentración 6% NaO a los 28 días



Fuente Propia

Ilustración 10: Morteros Hidróxido de Sodio concentración 8% NaO a los 28 días



Fuente Propia

9.1.3 Morteros curados en agua Hidróxido de Sodio con concentración de 6% de NaO

Se fallaron a compresión 7 días después de la mezcla los morteros realizados con una concentración de 6% de NaO curados en agua, se realizan 3 fallas y se promediaron los 3 datos de falla, donde se obtuvo el esfuerzo de los morteros de hidróxido de Sodio con concentración de 6% a los 7 días de 5.83 Mpa

Se fallaron a compresión 14 días después de la mezcla los morteros realizados con una concentración de 6% de NaO curados en agua, se realizan 3 fallas y se promediaron los 3 datos de falla, donde se obtuvo el esfuerzo de los morteros de hidróxido de Sodio con concentración de 6% a los 14 días de 10.61 Mpa

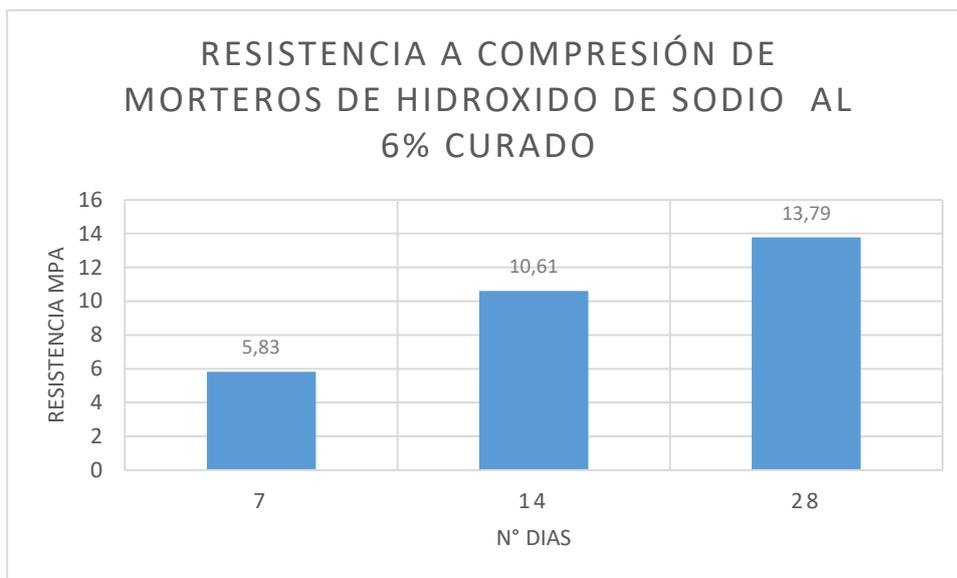
Se fallaron a compresión 28 días después de la mezcla los morteros realizados con una concentración de 6% de NaO curados en agua, se realizan 3 fallas y se promediaron los 3 datos de falla, donde se obtuvo el esfuerzo de los morteros de hidróxido de Sodio con concentración de 6% a los 28 días de 13.79 Mpa

Entonces los datos de resistencia fueron los siguientes:

Tabla 10: Resistencia de las muestras de NaOH con concentración de 6% curados.

Dias	Resistencia (MPa)
7	5.83
14	10.61
28	13.79

Gráfica 3: Resistencia a compresión de morteros NaOH con concentración de 6% curados en el agua.



9.1.4 Morteros curados en agua Hidróxido de Sodio con concentración de 8% de NaO

Se fallaron a compresión 7 días después de la mezcla los morteros realizados con una concentración de 8% de NaO curados en agua, se realizan 3 fallas y se promediaron los 3 datos de falla, donde se el esfuerzo de los morteros de hidróxido de Sodio con concentración de 8% a los 7 días de 3.24 Mpa

Se fallaron a compresión 14 días después de la mezcla los morteros realizados con una concentración de 8% de NaO curados en agua, se realizan 3 y se promediaron los 3 datos de falla, donde se obtuvo el esfuerzo de los morteros de hidróxido de Sodio con concentración de 8% a los 14 días de 8.55 Mpa

Se fallaron a compresión 28 días después de la mezcla los morteros realizados con una concentración de 8% de NaO curados en agua, se realizan 3 fallas y se promediaron los 3 datos de falla, donde se el esfuerzo de los morteros de hidróxido de Sodio con concentración de 8% a los 28 días de 11.11 Mpa

Entonces los datos de resistencia fueron los siguientes:

Tabla 11: Resistencia de las muestras de NaOH con concentración de 8% curados.

Dias	Resistencia (MPa)
7	3.24
14	8.55
28	11.11

Gráfica 4: Resistencia a compresión de morteros NaOH con concentración de 8% curados al agua.

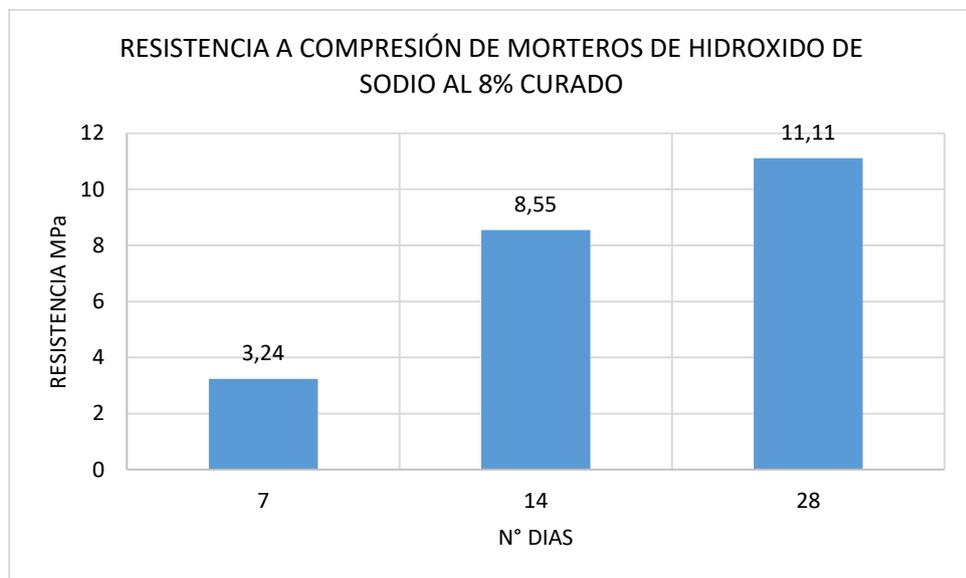


Ilustración 11: Morteros de hidróxido de sodio después de la falla



Fuente Propia

9.2 MORTEROS SILICATO DE SODIO A COMPRESIÓN

Estos morteros después de mezclados se ingresaron al horno de secado a una temperatura de 80° Celsius por un tiempo de 24 horas.

9.2.1 Morteros no curados Silicato de Sodio Concentración de 5%

Se fallaron a compresión 3 días después de la mezcla los morteros realizados con una concentración de 5% de NaO curados al medio ambiente, se realizan 3 fallas y se promediaron los 3 datos de falla, donde se obtuvo el esfuerzo de los morteros de Silicato de Sodio con concentración de 5% a los 3 días de 17.5 Mpa.

Se fallaron a compresión 7 días después de la mezcla los morteros realizados con una concentración de 5% de NaO curados al medio ambiente, se realizan 3 fallas y se promediaron los 3 datos de falla, donde se obtuvo el esfuerzo de los morteros de Silicato de Sodio con concentración de 5% a los 7 días de 32.3 Mpa.

Se fallaron a compresión 28 días después de la mezcla los morteros realizados con una concentración de 5% de NaO curados al medio ambiente, se realizan

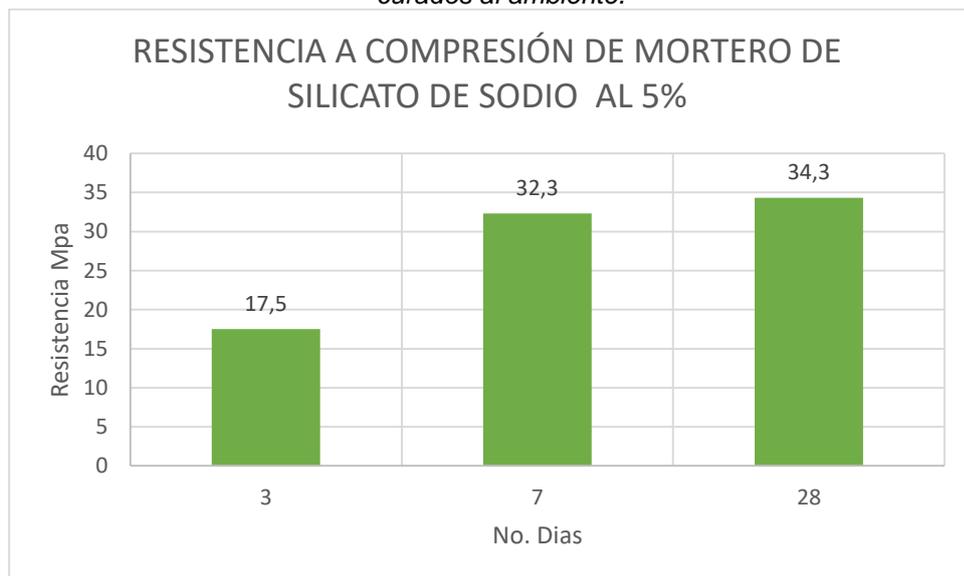
3 fallas y se promediaron los 3 datos de falla, donde se obtuvo el esfuerzo de los morteros de Silicato de Sodio con concentración de 5% a los 28 días de 34.3 Mpa.

Posteriormente los datos de resistencia fueron los siguientes:

Tabla 12: Resistencia de las muestras de Na_2SiO_3 con concentración de 5% no curados.

Días	Resistencia (MPa)
3	17.5
7	32.3
28	34.3

Gráfica 5: Resistencia a compresión de las muestras de Na_2SiO_3 con concentración de 5% curados al ambiente.



9.2.2 Morteros curados al medio ambiente Silicato de Sodio Concentración de 7%

Se fallaron a compresión 3 días después de la mezcla los morteros realizados con una concentración de 7% de NaO curados al medio ambiente, se realizan 3 fallas y se promediaron los 3 datos de falla, donde se obtuvo el esfuerzo de los morteros de Silicato de Sodio con concentración de 7% a los 3 días de 27.8 Mpa.

Se fallaron a compresión 7 días después de la mezcla los morteros realizados con una concentración de 7% de NaO curados al medio ambiente, se realizan 3 fallas y se promediaron los 3 datos de falla, donde se obtuvo el esfuerzo de los morteros de Silicato de Sodio con concentración de 7% a los 7 días de 45.2 Mpa.

Se fallaron a compresión 28 días después de la mezcla los morteros realizados con una concentración de 7% de NaO curados al medio ambiente, se realizan 3 fallas y se promediaron los 3 datos de falla, donde se obtuvo el esfuerzo de los morteros de Silicato de Sodio con concentración de 7% a los 28 días de 44.0 Mpa.

Entonces los datos de resistencia fueron los siguientes:

Tabla 13: Resistencia de las muestras de Na₂SiO₃ con concentración de 7% no curados.

Dias	Resistencia (MPa)
3	27.8
7	45.2
28	44

Gráfica 6: Resistencia a compresión de las muestras de Na_2SiO_3 con concentración de 7% curados al ambiente.

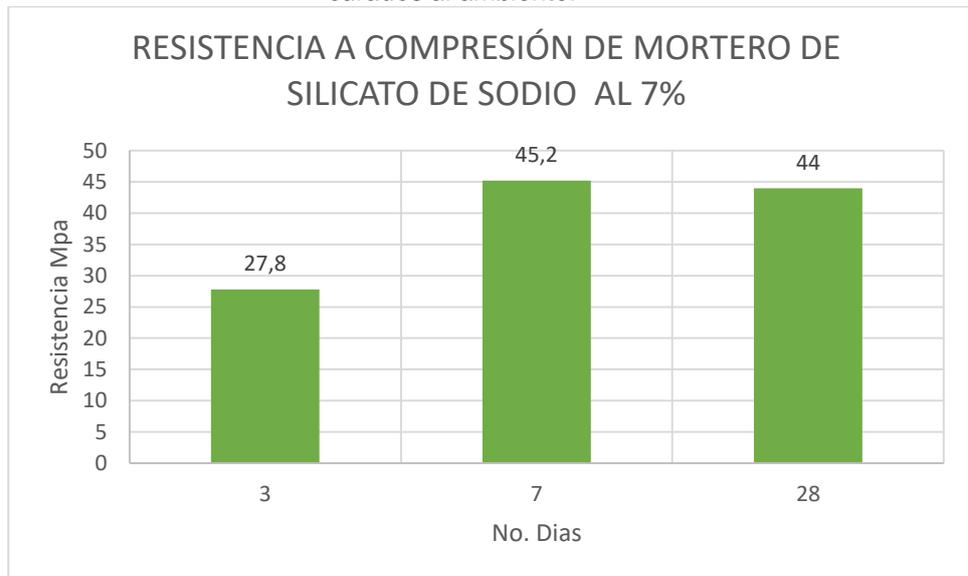


Ilustración 12: Morteros de Silicato de Sodio concentración de 5% a los 28 días.



Fuente Propia

Ilustración 13: Morteros de Silicato de Sodio concentración de 7% a los 28 días.



Fuente Propia

9.2.3 Morteros curados en agua Silicato de Sodio Concentración de 5%

Se fallaron a compresión 7 días después de la mezcla los morteros realizados con una concentración de 5% de NaO curados en agua, se realizan 3 fallas y se promediaron los 3 datos de falla, donde se obtuvo el esfuerzo de los morteros de Silicato de Sodio con concentración de 5% a los 7 días de 13.3 Mpa.

Se fallaron a compresión 14 días después de la mezcla los morteros realizados con una concentración de 5% de NaO curados en agua, se realizan 3 fallas y se promediaron los 3 datos de falla, donde se obtuvo el esfuerzo de los morteros de Silicato de Sodio con concentración de 5% a los 14 días de 18.63 Mpa.

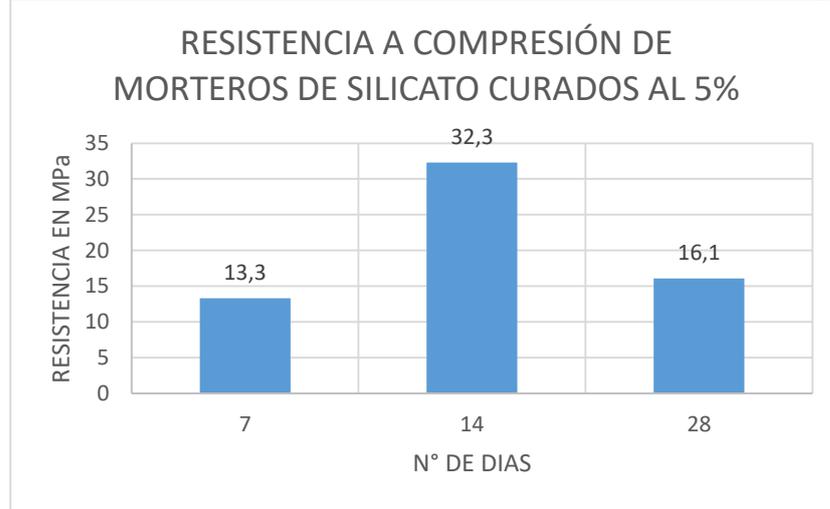
Se fallaron a compresión 28 días después de la mezcla los morteros realizados con una concentración de 5% de NaO curados en agua, se realizan 3 y se promediaron los 3 datos de falla, donde se obtuvo el esfuerzo de los morteros de Silicato de Sodio con concentración de 5% a los 28 días de 16.1 Mpa.

Entonces los datos de resistencia fueron los siguientes:

Tabla 14: Resistencia de las muestras de Na_2SiO_3 con concentración de 5% curados.

Días	Resistencia (MPa)
7	13.3
14	32.3
28	16.1

Gráfica 7 Resistencia a compresión de morteros de Na₂SiO₂ curados al agua al 5%



9.2.4 Morteros curados en agua Silicato de Sodio Concentración de 7%

Se fallaron a compresión 7 días después de la mezcla los morteros realizados con una concentración de 7% de NaO curados en agua, se realizan 3 fallas y se promediaron los 3 datos de falla, donde se obtuvo el esfuerzo de los morteros de Silicato de Sodio con concentración de 7% a los 7 días de 15.8 Mpa.

Se fallaron a compresión 14 días después de la mezcla los morteros realizados con una concentración de 7% de NaO curados en agua, se realizan 3 y se promediaron los 3 datos de falla, donde se obtuvo el esfuerzo de los morteros de Silicato de Sodio con concentración de 7% a los 14 días de 22.2 Mpa.

Se fallaron a compresión 28 días después de la mezcla los morteros realizados con una concentración de 7% de NaO curados en agua, se realizan 3 fallas y se promediaron los 3 datos de falla, donde se obtuvo el esfuerzo de los morteros de Silicato de Sodio con concentración de 7% a los 28 días de 18.4 Mpa.

Entonces los datos de resistencia fueron los siguientes:

Tabla 15: Resistencia de las muestras de Na_2SiO_3 con concentración de 7% curados

Días	Resistencia (MPa)
7	15.8
14	22.2
28	18.4

Gráfica 8 Resistencia a compresión de morteros de Na_2SiO_3 curados al agua al 7%

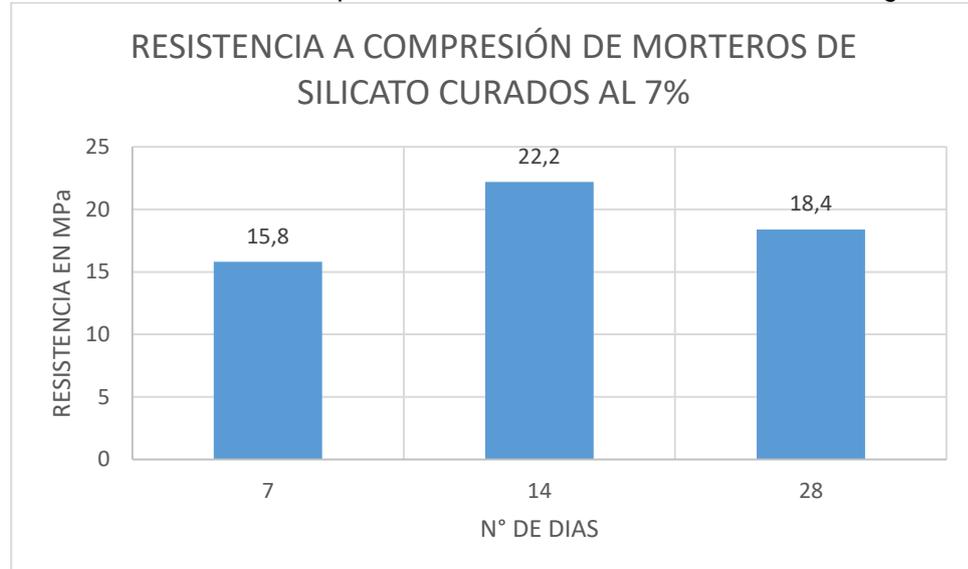
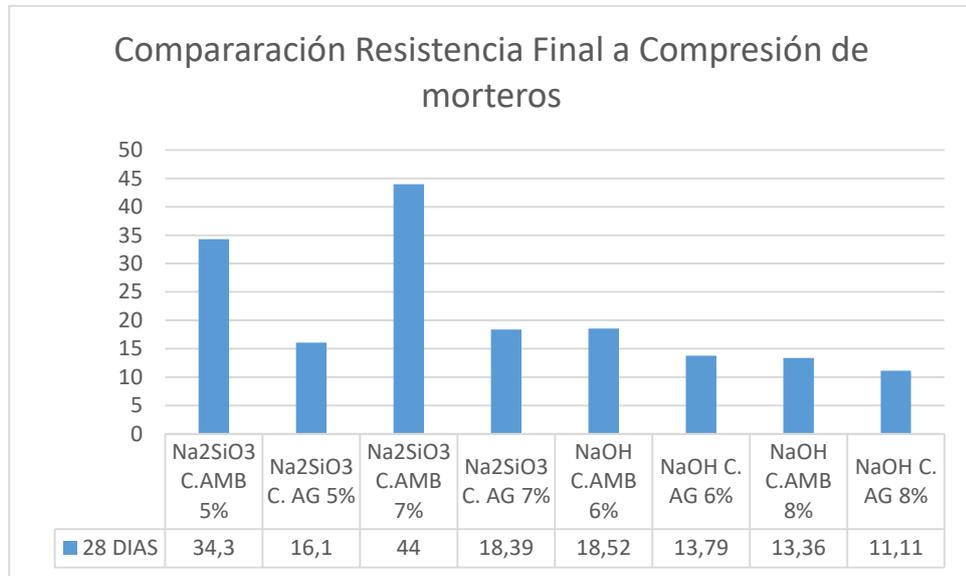


Ilustración 14: Morteros de silicato de sodio antes de la falla



Fuente Propia

Gráfica 9: Comparación resistencia final de morteros a compresión curados al ambiente y agua.



Se tiene en cuenta que la sigla C.AMB, significa curados al ambiente y la sigla C.AG, significa curados al agua

9.3 MORTEROS SILICATO DE SODIO A FLEXIÓN

Se utilizó la mezcla a compresión más óptima con las condiciones utilizadas inicialmente.

Se fallaron a flexión 3 días después de la mezcla los morteros realizados con una concentración de 7% de NaO no curados en agua, se realizan 3 fallas para promediar los resultados y obtener un mejor resultado, se obtuvo lo siguiente:

Tabla 16: Fallas a los 3 días de las muestras de Na₂SiO₃ con concentración de 7% no curados en flexión.

Muestra	Carga de Falla (KN)	Carga de Falla (N)
1	3.20	3200
2	4.12	4120
3	3.63	3630

Se promediaron los 3 datos de falla, donde se obtuvo una fuerza de falla de 3650 N

Para obtener el esfuerzo, utilizamos la fórmula 2 establecida en la norma I.N.V.E -324 - 07:

$S_f = 0.0028 P$ Dónde: S_f es la resistencia a la flexión Mpa, y P es la carga máxima total en N

$$S_f = 0.0028 * 3650 = 10.22 \text{ MPa}$$

Convirtiendo el anterior valor obtenemos el esfuerzo de los morteros de Silicato de Sodio con concentración de 7% a los 3 días de 10.22 Mpa.

Se fallaron a flexión 7 días después de la mezcla los morteros realizados con una concentración de 7% de NaO no curados en agua, se realizan 3 fallas para promediar los resultados y obtener un mejor resultado, se obtuvo lo siguiente:

Tabla 17: Fallas a los 7 días de las muestras de Na₂SiO₃ con concentración de 7% no curados en flexión.

Muestra	Carga de Falla (KN)	Carga de Falla en N
1	2.29 KN	2290
2	1.91 KN	1910
3	2.34 KN	2340

Se promediaron los 3 datos de falla, donde se obtuvo una fuerza de falla de 2180 KN

Para obtener el esfuerzo, utilizamos la fórmula 2:

$$Sf = 0.0028 * 2180 = 6.104 MPa$$

Convirtiendo el anterior valor obtenemos el esfuerzo de los morteros de Silicato de Sodio con concentración de 7% a los 7 días de 6.104 Mpa.

Se fallaron a flexión 28 días después de la mezcla los morteros realizados con una concentración de 7% de NaO no curados en agua, se realizan 3 fallas para promediar los resultados y obtener un mejor resultado, se obtuvo lo siguiente:

Tabla 18: Fallas a los 28 días de las muestras de Na₂SiO₃ con concentración de 7% no curados en flexión.

Muestra	Carga de Falla en (KN)	Carga de Falla en (N)
1	1.43 KN	1430
2	1.42 KN	1420
3	1.25 KN	1250

Se promediaron los 3 datos de falla, donde se obtuvo una fuerza de falla de 1360 KN

Para obtener el esfuerzo, utilizamos la fórmula 2:

$$Sf = 0.0028 * 1360 = 3.808 MPa$$

Convirtiendo el anterior valor obtenemos el esfuerzo de los morteros de Silicato de Sodio con concentración de 7% a los 28 días de 3.808 Mpa.

Entonces los datos de resistencia fueron los siguientes:

Tabla 19: Resistencia de las muestras de Na_2SiO_3 con concentración de 7% no curados a flexión.

Días	Resistencia (MPa)
3	10.22
7	6.104
28	3.808

Gráfica 10: Resistencia a la flexión en morteros de silicato al 7%

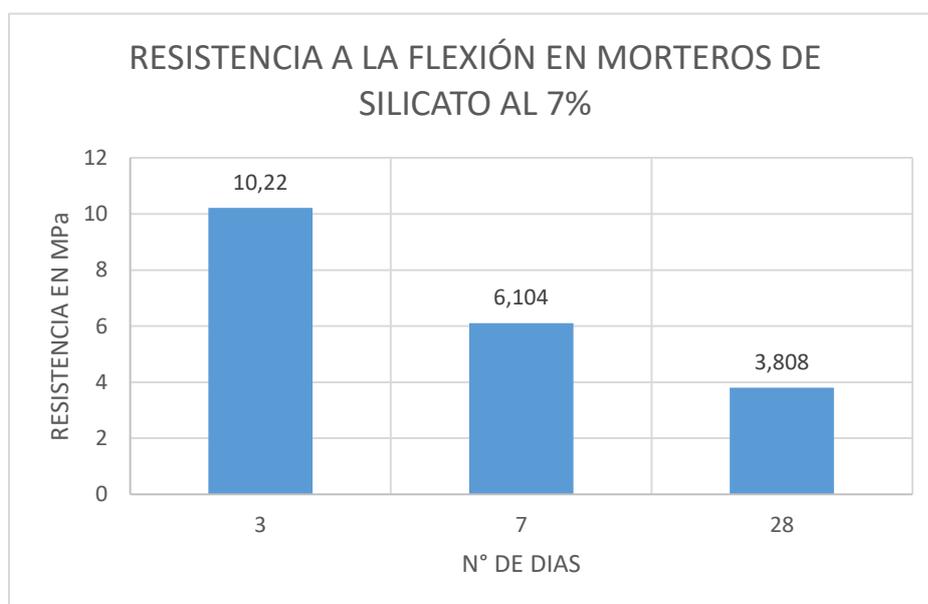


Ilustración 15: Falla de morteros a flexión



Fuente Propia

Ilustración 16: Probetas de flexión después de la falla



Fuente Propia

9.4 MORTEROS SILICATO DE SODIO A TRACCIÓN

Se utilizó la mezcla a compresión más óptima con las condiciones utilizadas inicialmente.

Se fallaron a tracción 7 días después de la mezcla los morteros realizados con una concentración de 7% de NaO no curados en agua, se realizan 3 fallas para promediar los resultados y obtener un mejor resultado, se obtuvo lo siguiente:

Tabla 20: Fallas a los 7 días de las muestras de Na₂SiO₃ con concentración de 7% no curados a tracción.

Muestra	Carga de Falla (KN)
1	1.04
2	1.14
3	1.18

Se promediaron los 3 datos de falla, donde se obtuvo una fuerza de falla de 1.12 KN

Sabiendo que la sección transversal para la cual se sacan los cálculos es de 2" cuadradas y se sabe que estas equivalen a 0.00129 metros cuadrados, área aferente para el cálculo de la resistencia, entonces se calculó el esfuerzo con la ecuación N° 1:

$$\text{Obteniendo: } \delta = \frac{1.12 \text{ KN}}{0,00129 \text{ M}^2} = 868.21 \text{ KN/M}^2$$

Es decir que la resistencia a la tracción del material en estudio es de 0.868 MPa

Se fallaron a tracción 14 días después de la mezcla los morteros realizados con una concentración de 7% de NaO no curados en agua, se realizan 3 fallas para promediar los resultados y obtener un mejor resultado, se obtuvo lo siguiente:

Tabla 21: Fallas a los 14 días de las muestras de Na₂SiO₃ con concentración de 7% no curados a tracción.

Muestra	Carga de Falla
1	1.28 KN
2	1.13 KN
3	1.30 KN

Se promediaron los 3 datos de falla, donde se obtuvo una fuerza de falla de 1.24 KN

Sabiendo que la sección transversal para la cual se sacan los cálculos es de 2" cuadradas y se sabe que estas equivalen a 0.00129 metros cuadrados, área aferente para el cálculo de la resistencia, entonces se calculó el esfuerzo con la ecuación N° 1:

$$\text{Obteniendo: } \delta = \frac{1.24 \text{ KN}}{0,00129 \text{ M}^2} = 961.24 \text{ KN/M}^2$$

Es decir que la resistencia a la tracción del material en estudio es de 0.961 MPa
Se fallaron a tracción 28 días después de la mezcla los morteros realizados con una concentración de 7% de NaO no curados en agua, se realizan 3 fallas para promediar los resultados y obtener un mejor resultado, se obtuvo lo siguiente:

Tabla 22: Fallas a los 28 días de las muestras de Na2SiO3 con concentración de 7% no curados a tracción.

Muestra	Carga de Falla
1	1.95 KN
2	1.56 KN
3	1.87 KN

Se promediaron los 3 datos de falla, donde se obtuvo una fuerza de falla de 1.79 KN

Sabiendo que la sección transversal para la cual se sacan los cálculos es de 2" cuadradas y se sabe que estas equivalen a 0.00129 metros cuadrados, área aferente para el cálculo de la resistencia, entonces se calculó el esfuerzo con la ecuación N° 1:

$$\text{Obteniendo: } \delta = \frac{1.79 \text{ KN}}{0,00129 \text{ M}^2} = 1390 \text{ KN/M}^2$$

Es decir que la resistencia a la tracción del material en estudio es de 1.39 MPa
En resumen la resistencia a la tracción se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 23: Resistencia de las muestras de Na₂SiO₃ con concentración de 7% no curados a tracción.

Días	Resistencia (MPa)
3	0.868
7	0.961
28	1.39

Gráfica 11: Resistencia a la tracción de morteros de Na₂SiO₃ con concentración de 7% curados al medio ambiente

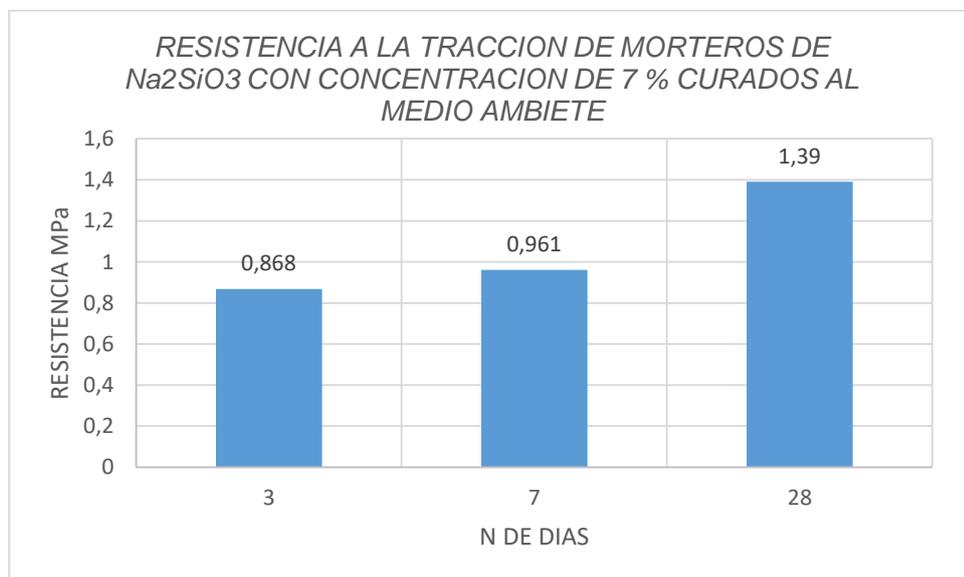


Ilustración 17: Ensayo de tracción



Fuente Propia

Ilustración 18: Probetas para el ensayo de tracción



Fuente Propia

Se observan las muestras para el ensayo de tracción una evidente porosidad que pueden tener su causa en el proceso de llenado de las probetas y en que estos no se curaron en agua y se ingresaron en el horno 24 horas a una temperatura de 80° C para su secado, por ser hechos con Silicato de Sodio que necesita este proceso para una resistencia a compresión, flexión y tracción mayor.

10. ANALISIS DE RESULTADOS

10.1 MORTEROS CURADOS AL MEDIO AMBIENTE A COMPRESION

10.1.1 Morteros de hidróxido de Sodio

Se cuenta con las gráficas 1 y 2, para realizar el análisis del comportamiento final a compresión de las muestras realizadas de concentración de 6% y 8% respectivamente, las cuales dejaron ver que la resistencia de estos morteros aumenta de la forma esperada en los dos casos con el tiempo esperado. Para el caso de la concentración del 6% se encuentra una resistencia máxima de 18,52 Mpa a los 28 días, lo cual es un buen valor teniendo en cuenta que los morteros convencionales tienen resistencias cercanas a los 16 Mpa en el mismo tiempo y vale la pena resaltar el rápido aumento de resistencia que se logra con cortos periodos de tiempo al ver como en 7 días se llega a tener 8,74 Mpa de resistencia.

Al ver la concentración del 8% se encontraron datos con buenas resistencias, pero menores a la del 6%, a pesar de que se llega a 13,36 Mpa a los 28 días no se supera la concentración del 6%, lo que nos permite concluir que se llega a mejores resistencias a compresión a través del tiempo con concentraciones del 6%. Se debe tener en cuenta que se pensaría que a mayor concentración de NaO la resistencia de los morteros seria mayor, lo que se desmiente al ver que con menores concentraciones se logra valores de falla a la compresión más altos en menos días, como se pudo observar, también se debe tener en cuenta que todos los cubos de morteros de NaOH fallaron a compresión por los lados, en donde en todos los casos el núcleo de estos cubos quedaba en perfecto estado después de la resistencia máxima. Seguido de esto se ve el color de los cubos de 6% y 8% a los 7 días donde se mantiene igual al día que se realizó la mezcla, pero en el caso de los 28 días y la resistencia máxima se puede ver que la concentración de 6% continua con el mismo color, pero a la concentración de 8% se crea una capa de polvo color blanco conocido como sulfatación, que cubre las zonas del cubo expuestas al medio ambiente, esto no afectó la resistencia final de los morteros que se estudiaron. Con esto se

concluye que con una mayor concentración de NaO existe mayor riesgo de que se presente sulfatación en los morteros.

Tabla 24 Resistencia máxima a compresión morteros de hidróxido de sodio con concentración del 6% y 8% curados al medio ambiente

MATERIAL	HIDROXIDO DE SODIO 6%	HIDROXIDO DE SODIO 8%	PORTLAND
RESISTENCIA MAXIMA (Mpa)	18,52	13,36	16

10.1.2 Morteros de Silicato de Sodio

Se cuenta con las gráficas 5 y 6, para realizar el análisis del comportamiento final a compresión de las muestras realizadas de concentración de 5% y 7% respectivamente, en donde se obtuvieron resistencias considerablemente más altas a las del NaOH, teniendo en cuenta el cambio de activante y el uso de secado por horno a 80° C por 24 horas, debido al uso del Silicato de Sodio. Primero se analiza la concentración del 5% con resistencias a los 28 días de 34,3 Mpa lo cual es más alto de lo esperado y vale la pena tener en cuenta que la variación de la resistencia de los 7 a los 28 días fue mínima, esto deja ver que a los 7 días se llega a las resistencias máximas de esta mezcla, lo que permite ver que se llega a resistencias finales en un tiempo 70% menor al de los morteros convencionales.

Cuando se compara con la concentración del 7% se denota un aumento considerable en las resistencias, de aproximadamente un 30% mayor al de concentración del 5%. Se obtiene resistencias máximas de 44 Mpa a los 28 días, se debe tener en cuenta que la resistencia a los 7 días fue de 45,2 Mpa lo que muestra que disminuyo de manera muy baja la resistencia, lo que en este caso deja ver que se tiene la resistencia final de los morteros en solo 7 días. El color de estos morteros a los 28 días se mantuvo igual que desde el momento de la mezcla para las dos concentraciones, pero se presentaron

mayores vacíos superficiales que se pueden evidenciar en las fotos, los cuales no afectan el comportamiento de la compresión de la mezcla.

En este caso se evidencia que, a mayor concentración de NaO en los morteros de Silicato, se llegan a mejores resistencias finales en menores cantidades de tiempo y el hecho de que se lleguen a resistencia tan altas se deben al hecho de ingresar en el horno las mezclas, para lograr un secado a una velocidad mayor lo que se demuestra en los resultados finales.

Tabla 25 Resistencia máxima a compresión morteros de silicato de sodio con concentración del 5% y 7% curados al medio ambiente

MATERIAL	SILICATO DE SODIO 5%	SILICATO DE SODIO 7%
RESISTENCIA MAXIMA (Mpa)	18,52	13,36

10.1.3 Comparación morteros Hidróxido de Sodio y Silicato de Sodio

Al realizar la comparación entre los dos materiales que se utilizaron como químicos activantes, se deduce que a pesar de que los resultados del NaOH son aceptables, se tiene en cuenta que las resistencias promedio de morteros usados para cementos Portland son de 16 Mpa. Con esto se logró con materiales diferentes a los usados convencionalmente como lo fueron en este caso la Escoria y el Hidróxido de Sodio, en el caso de la concentración del 8% que fue la menor resistencia final que se obtuvo, a la cual le faltan 2.7 Mpa para alcanzar promedio, deja ver que es un buen resultado, pero no alcanza para superar el promedio, por lo cual esta se descarta para continuar analizándola. En el caso de la concentración de 6% se llegó a la resistencia final de 18.57 Mpa superando el promedio, lo cual indica que se podría utilizar para reemplazar el mortero convencional a compresión, pero no supera los datos que se obtuvieron con el Silicato de Sodio que en la concentración de 5% se llegó a resistencias finales de 34.3 Mpa, lo que prácticamente dobla el valor de la mezcla de NaOH concentrado al 6% y lo que demuestra que es superior y tendrá un mejor desempeño a la compresión, finalmente al analizar la mejor

mezcla que se comporta se llega al Silicato de Sodio concentrado al 7% que demuestra altos niveles de resistencia a los 28 días aumentando en un 200% la resistencia convencional, lo que permite concluir que se usará esta combinación para realizar los ensayos de flexión y tracción de los materiales.

Tabla 26 Comparación comportamiento de los mejores resultados a compresión curados al medio ambiente

MATERIAL	HIDROXIDO DE SODIO 6%	SILICATO DE SODIO 5%	SILICATO DE SODIO 7%
RESISTENCIA MAXIMA (Mpa)	18,52	18,52	13,36

10.2 MORTEROS CURADOS EN AGUA A COMPRESION

10.2.1 Morteros de hidróxido de sodio

Según los ensayos realizados y los datos obtenidos que están plasmados en las gráficas 3 y 4, se observó un comportamiento diferencial del material, se evidencio que la resistencia es baja, conociéndose entonces el daño que hace el curar el material en agua, es importante resaltar que el mortero convencional necesita ser curado para tomar valores de resistencia mucho más altos, pero en este caso ese proceso genero una reducción significativa de la resistencia, tanto así que el material queda por debajo de las resistencias que la norma establece para los morteros convencionales, además de esto también se observó que el aumento de la resistencia es normal pero con valores bajos, entre el día 7 y el día 14 su aumento de resistencia es aproximadamente de un 67% y entre el día 14 y el 28 su aumento es de aproximadamente 33%. Aunque hay una notable disminución de la resistencia el mortero que tiene menor concentración de NaO; es decir el del 6% es el que tiene un mejor comportamiento en su resistencia a la compresión dando una resistencia por encima de un 24% con respecto al mortero con concentración del 8%, rectificando así que es mejor el mortero que tiene menor concentración de NaO.

10.2.2 Morteros de silicato de sodio

La Grafica 7 y 8 son los resultados de resistencia de los morteros de 5% y 7% respectivamente, en los dos casos la reducción de la resistencia es alta con respecto a la de los morteros de silicato sin curar, lo que nos permitió establecer que el agua viene siendo un problema o generando una afectación a la resistencia del mortero, pero se evidencio un problema aun mayor con el curar el material, se vio como inicialmente tomó rápidamente resistencia pero para los 28 días su resistencia en vez de aumentar tuvo una disminución significativa, esto genero una preocupación aun mayor por el efecto de curar el material, pues no es bueno tener un material que su resistencia a través del tiempo disminuye, a pesar de estos resultados se sigue obteniendo que para este caso el material que tiene más NaO es aquel que presenta una mejor resistencia, es decir que el que tiene una concentración del 7% tiene mejor resistencia que el del 5%. Aunque tenemos una reducción en la resistencia a los 18 días se alcanzan a tener valores parecidos al mortero convencional, como se evidencia en la tabla 33 y tabla 37

De igual manera es importante resaltar la diferencia tan significativa en las resistencias en los morteros de silicato curado y no curado, para el caso del mortero que no fue curado en agua se obtuvieron resistencias a la compresión realmente altas (tabla 25 y tabla 29), para este caso se encontraron resistencias de cerca de 34.3 MPa para concentraciones del 5% y 44.0 MPa para concentraciones del 7%, resistencias que vienen siendo aún mayor que el mismo concreto convencional que alcanza resistencias de 21 MPa. Pero por el otro lado los que fueron curados en agua tuvieron un problema en su resistencia pues alcanzaron resistencias bajas en comparación con los no curados (tabla 33 y 37), con el problema de la reducción de su resistencia alcanzan resistencias parecidas al del mortero convencional, de esta manera se pudo afirmar que no es prudente ni pertinente curar el material, sino que es mejor que el material este al medio ambiente durante el proceso de endurecimiento para que sus resultados sean realmente buenos.

10.3 COMPARACIÓN MORTEROS CURADOS Y NO CURADOS

Al realizar la comparación entre estos dos casos, se evidenció que las resistencias bajan de manera significativa al realizar los respectivos curados a las mezclas en su proceso de secado, ya que se denota en el caso del NaOH concentrado al 6% como al curarlo baja su resistencia a los 28 días en 5 Mpa respecto al no curado, lo cual es un valor bastante alto al momento de estudiar su comportamiento y que hace que no sea una mezcla para poder reemplazar los morteros para cemento Portland, también pasa esto con la concentración del 8% que aunque baja menos respecto a las mezclas no curadas no alcanza a llegar al promedio de los morteros convencionales, por lo que no se puede trabajar en concretos tipos Portland. En el caso del Silicato de Sodio al curar la mezcla en la concentración del 5% bajó de 34.3 Mpa a 16.1 Mpa, lo que sería aproximadamente el doble de su resistencia final, razón por la que evidentemente no se puede utilizar la mezcla curada en agua, y en el caso de la concentración del 7% que es la más alta baja su resistencia más del doble pasando de 44 Mpa a 18.39 Mpa lo que deja ver el gran debilitamiento que tiene la mezcla al permanecer en el agua y lo que permite concluir que no se utilizará ninguna mezcla curada en agua para realizar los ensayos de tracción y flexión.

Tabla 27 Comparación de resistencias al curar el material en agua

	CURADOS EN AGUA	CURADOS AL MEDIO AMBIENTE
	HIDROXIDO DE SODIO AL 6%	HIDROXIDO DE SODIO AL 6%
RESISTENCIA MAXIMA	13,52	18,52
	SILICATO DE SODIO AL 7%	SILICATO DE SODIO AL 7%
RESISTENCIA MAXIMA	18,39	44

10.4 MORTEROS DE SILICATO AL 7% A FLEXION

Los morteros de silicato de sodio al 7% se caracterizaron por su alta resistencia a la compresión y su buen comportamiento mecánico, sin embargo, en los ensayos a la flexión su resistencia fue muy variable, se vió datos iniciales a los 3 días de 10.22 MPa, a los 7 días se obtuvo una resistencia de 6.104 MPa y a los 28 días 3.808 MPa; cómo se logra apreciar en la tabla 41. Se conoce que naturalmente los materiales cementantes se comportan de manera muy optima a la compresión para el caso de los cementos tradicionales y de igual manera como se evidencio, para los cementos con escoria de alto horno, sin embargo el comportamiento a la flexión no es óptimo pues las resistencias son realmente bajas, por esta razón es necesario reforzar con acero; que viene siendo el material que toma todos los esfuerzos de flexión, al mismo tiempo en el material de estudio se logró evidenciar que su comportamiento no es óptimo para resistir esfuerzos de flexión, y no cumple con los requerimientos mínimos de resistencia a la flexión de la norma NTC 2017 que menciona que la resistencia debe ser ≥ 5 MPa, dando así un resultado negativo del comportamiento del material respecto a la flexión.

Por otra parte, se evidencia un problema aún mayor, pues la resistencia a la flexión en vez de aumentar con el pasar del tiempo; como sucedió con la compresión, bajó su resistencia de una manera drástica, generando una preocupación en la manera cómo se comporta el material para este esfuerzo, puesto que en el momento de utilizarlo en elementos estructurales sometidos a flexión se generarían problemas de resistencia en el elemento mismo. Es importante también tener en cuenta que la humedad en la zona de almacenamiento es alta lo que pudo haber afectado las resistencias de las probetas realizadas.

10.5 MORTEROS DE SILICATO AL 7% A TRACCION

En la tabla 45, se puede evidenciar los valores de resistencia a la tracción del mortero de escoria de alto horno, activado con silicato de sodio y una concentración de NaO de 7%, se ve un aumento en la resistencia muy lento y mínimo, se vio que entre el día 7 y el día 14 el aumento de la resistencia apenas

fue de aproximadamente un 10% y entre el día 14 y 28 el aumento fue de un 30% aproximadamente, lo que dejó ver la lentitud del material en tomar resistencia a la tracción, puesto que a comparación con la compresión su aumento de resistencia era muy acelerado.

Por otro lado y comparando su resistencia con la del mortero convencional, está por debajo, puesto que en ensayos realizados en investigaciones relacionadas, las resistencias son de hasta 10 MPa (dependiendo del tipo de mortero), y el material que se utilizó alcanzó una resistencia final de 1.39 MPa a 28 días, lo que nos permite observar que el material no es bueno o resistente para lo relacionado con la tracción, de igual manera por investigaciones anteriores se conoce que los materiales fabricados con materiales cementantes no son óptimos para resistir fuerzas de tracción, y también para el caso de los morteros con escoria de alto horno, tampoco es un material óptimo para resistir las fuerzas de tracción.

De acuerdo con lo anterior no es recomendable utilizar este material en elementos estructurales que se encuentren en permanente afectación por fuerzas que generan tracción, por lo menos si el material no se encuentra reforzado por otro material que tome todo este esfuerzo y el mortero se encargue de tomar las fuerzas de compresión.

10.6 COMPARACIÓN CON CEMENTO PORTLAND Y USO EN OBRAS DE INFRAESTRUCTURA DE LA ACTUALIDAD.

Es de importancia resaltar el impacto ambiental que produce la producción del cemento tipo portland, pues en su producción se generan gases de combustión que contienen monóxido (CO) y dióxido de Carbono (CO₂), gases generados en los procesos del uso de los hornos giratorios, donde se elevan las temperaturas de las materias primas hasta 1400 °C, se conoce que por cada tonelada de cemento se genera una tonelada de dióxido de carbono (CO₂) una cantidad alarmante de contaminación puesto que el cemento es un material primario para la industria de la construcción, por otra parte la escoria de alto horno es un material reciclado de la fundición del acero, sin embargo esta fundición genera un impacto ambiental importante, pues hay una contribución de CO₂ al ambiente

por el uso de hornos, pero al ser un material reciclado o reutilizado de una fundición y si se reemplaza el cemento tradicional, se estaría evitando la producción de (CO_2) que genera la fabricación del cemento tipo portland, por ende el uso del cemento a partir de escoria de alto horno nos permite tener un impacto positivo para el medio ambiente disminuyendo así el aporte de dióxido de carbono a la atmosfera, obteniendo entonces un material viable en resistencia y en impacto ambiental para el uso en la industria de la construcción civil. En cuanto al impacto económico es de resaltar que al ser un material producto del residuo de la producción del acero se podría llegar a reducir los costos de producción de material cementante, produciendo una importante reducción en los gastos de la industria de la construcción civil, ya que la materia prima de toda obra es el cemento y al bajar los costos en este factor se producen grandes cambios en la economía de la construcción civil.

Lo que permite concluir que estos tipos de cemento pueden cambiar el proceso constructivo de las obras que se están realizando actualmente en el país, ya que al usar los morteros alcalinos en la creación de hormigón se reduce el tiempo de fraguado del cemento para llegar a su resistencia máxima y se beneficiaría las obras estructurales como edificios y puentes los cuales en gran parte están hechos de hormigón y en donde se debe esperar 28 días para tener una resistencia final, al utilizar estos tipos de cementos en tan solo 7 días se llegaría a la resistencia final lo que reduciría los dos factores más importantes en las obras actualmente y por los que más se falla, que son el tiempo y el costo. Al cambiar a estos tipos de cementos se reduce el tiempo respecto al cemento portland en 14 días para resistencias finales y se aumenta al doble la resistencia pasando valores superiores a los 40 Mpa, datos que dejan ver el gran impacto que se tendría en los procesos constructivos, en donde con este tipo de cementos se cumplen los estándares exigidos por las grandes industrias de la construcción y aumentando los modelos exigidos por las normas internacionales de construcción en donde al obtener la escoria como material principal en remplazo total del cemento se reducen los costos en la compra de esta materia prima en gran medida. Todo esto posibilita la creación de nuevos

materiales para la ingeniería civil que mejoren considerablemente el estado del medio ambiente, el tiempo de construcción y el costo de los materiales.

11. CONCLUSIONES

- Se definieron las propiedades mecánicas especificadas de los cementos activados alcalinamente, mediante los ensayos de compresión, flexión y tracción. Inicialmente con los ensayos de compresión se obtuvieron datos óptimos llegando a la resistencia máxima con la mezcla de Silicato de Sodio curada al medio ambiente concentrada en 7% a valores de resistencia de 44 Mpa, mientras que con el hidróxido de Sodio se llegó a la resistencia máxima con una concentración de 6% curado al medio ambiente, alcanzando valores de resistencia máxima de 18.53 Mpa, lo que permitió definir la mezcla más resistente, en este caso el Silicato no curado concentrado al 7% para trabajar los ensayos de flexión y tracción. En el caso de los ensayos de flexión se llegó a datos favorables, pero que no se mantuvieron en el tiempo, ya que a los 3 días se obtuvo la resistencia máxima de 10.22 Mpa, bajando a los 28 días un 63% aproximadamente de la resistencia, lo que está por debajo de lo esperado y por último en el caso de los ensayos de tracción se obtuvo datos de resistencia final de 1.32 Mpa lo que es relativamente bajo a comparación de otras investigaciones de materiales llevados a ensayos de tracción, también en el caso de la tracción el aumento de la resistencia con el paso de los días fue casi nulo.
- Se compararon los resultados de las resistencias a compresión de los cementos activados alcalinamente con el cemento Portland, para el caso de la mezcla con mejores características en los ensayos mecánicos, que en el cemento Portland llega a los 28 días a resistencias de 16 Mpa y con la mezcla que se realizó se obtuvo una resistencia al mismo tiempo de 44 Mpa, lo que es notoriamente superior y mejor a lo esperado, en el caso de la flexión para el cemento Portland se esperan resistencias de 5 Mpa a los 28 días lo que no se logró por que se llegó a solo 3.8 Mpa en este mismo tiempo y por último en el caso de la tracción se destaca que no hay un dato exacto de morteros sometidos a tracción, pero según trabajos ya realizados se puede llegar a 10 Mpa, en donde la mezcla

realizada solo llegó a 1.32 Mpa lo que demuestra que no es una propiedad mecánica que alcance a cumplir con el promedio.

- Se propone la mezcla de mortero de cemento alcalino de mejor comportamiento, según los ensayos, que es la del Silicato de Sodio concentrada en un 7% de NaO en peso de escoria, manteniendo una relación de agua cemento de 0.4, escoria de alto horno en reemplazo del material cementante en su totalidad y arena silícea, las mezclas de estos materiales requieren para iniciar su fraguado un tiempo en el horno de 24 horas elevado a una temperatura de 80° Celsius, todas las proporciones para la mezcla se hicieron en base a la norma NTC 220 de la resistencia de morteros de cemento.
- Se demostró que las mezclas de morteros curadas al agua después de 24 horas en el horno, bajan las resistencias a compresión de todos los morteros que se realizaron, en el caso del hidróxido de Sodio y los dos porcentajes de concentración trabajados se bajó la resistencia final en promedio un 25%, lo que reduce de manera relevante el comportamiento de la mezcla. Pero en el caso del Silicato de Sodio se bajaron las resistencias finales de forma muy significativa ya que en el caso de las concentraciones se bajó aproximadamente un 55%, lo que demuestra que el agua en el periodo de la determinación de la resistencia final afecta de manera considerable y se debe evitar para la realización de este tipo de mezclas de morteros para cementos alcalinos.

12. RECOMENDACIONES

- Para investigaciones futuras, se puede analizar la durabilidad y respuesta de agentes químicos como ataque de cloruros, sulfatos y agua de mar de los morteros a lo largo del tiempo y con los diferentes ensayos mecánicos realizados, para profundizar en el comportamiento de estos morteros en diversos escenarios que se pueden presentar en su uso en obras de ingeniería.
- Dado los resultados fluctuantes de las viguetas falladas a flexión, se puede analizar más a fondo la razón, por la cual se llega a la resistencia final en solo 3 días y por qué esta baja a la mitad a los 28 días, esto podría influir en mejorar los resultados de resistencias finales y las cantidades de material a utilizar en las mezclas.
- Para continuar con el estudio de estos tipos de cementos alcalinos, se pueden realizar las mismas pruebas con otro tipo de escoria que permita realizar una comparación con la cual se pueda analizar en iguales tiempos y con las mismas dosificaciones.
- En el caso de la mezcla del hidróxido de Sodio por porcentajes, se recomienda tener toda la protección reglamentaria en los laboratorios como guantes, gafas de protección, tapabocas y bata debido a los vapores tóxicos que se generan al momento de disolver el hidróxido de Sodio en agua, los cuales pueden tener contacto con la piel y realizar quemaduras o ser inhalados y causar daños en el sistema respiratorio.
- Se puede para el caso de la mezcla más óptima obtenida en esta investigación, buscar una temperatura de secado en el horno más baja o un tiempo de secado menor que no afecte de manera considerable, la resistencia mecánica de morteros de este tipo.

13. BIBLIOGRAFÍA

- ABDEK. MOIED. Geopolymer synthesis by the alkali-activation of blastfurnace steel slag and its fire-resistance. Faculty of Science, Cairo University. Egypt. 2016. P. 1
- AVILA. JOSÉ Contaminación atmosférica en las empresas cementeras en el marco de la responsabilidad social ante las comunidades adyacentes. Universidad Rafael Beloso Chacín. P. 4
- ENSEÑAT. ALFONSO. La industria del cemento dentro de la problemática de la contaminación atmosférica. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. P 221
- GARCIA. REINO. Experiencia de Holcim con cementos con escorias de alto horno altamente adicionados. Valencia. España. Patología de cimentaciones, estructuras y hormigones. Mayo de 2013. P 1-7
- KUMAR MEHTA, y PAULO MONTEIRO. Concreto. Estructura, propiedades y materiales. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C. P. 1 - 2.
- JIMENEZ. ANA. Propiedades y aplicaciones de los cementos alcalinos. Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja (CSIC) Madrid, ESPAÑA. Revista Ingeniería de Construcción Vol. 24 N°3, Diciembre de 2009 P. 213-232
- J. MALDONADO. Morteros de cementos alcalinos. Resistencia química al ataque por sulfatos y al agua de mar. Universidad del Valle, Cali, Colombia. Mayo de 2002. Pg 2
- O. RBATIC, J.D. SOTA, D.FALCONE: Influencia de la incorporación de escoria en las características de los cementos resultantes. La Plata, 2006, P. 1
- PARRA. C. Cementos alcalinamente activados a base de zeolitas naturales. Escuela Superior Politécnica del Litoral. P. 2
- PROVIS. JOHN. Controlling the reaction kinetics of sodium carbonate-activated slag cements using calcined layered double hydroxides. The University of Sheffield. P. 1
- RODRIGUEZ. ERICH. Modelamiento de la resistencia a la compresión de concretos alternativos, usando la metodología de superficie de respuesta. Universidad del Valle, Cali, Colombia. Mayo de 2009. Pg. 6

- SANCHEZ. DE GUZMAN, Diego, tecnología del concreto y del mortero, brandar editores Ltda., Santafé de Bogotá DC, 2000, P. 27
- UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO. Hoja de seguridad II <<http://www.quimica.unam.mx/IMG/pdf/2hsnaoh.pdf>> (citado el 12 de octubre 2016, 14:51)
- VILLA.C. Geopolymer synthesis using alkaline activation of natural zeolite. Construction Building Mater. 2014. P.1

