



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL



Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería Zacatecas

**“ANÁLISIS DEL POTENCIAL DE REUTILIZACIÓN
DE RELAVES COMO AGREGADOS PARA LA
CONSTRUCCIÓN”**

**Trabajo escrito correspondiente a la opción de
titulación curricular**

**Que para obtener el título de Licenciatura en Ingeniería
Metalúrgica**

PRESENTA:

C. Luis Francisco Díaz Juárez

ASESORES:

M. en S.A. Erik Saúl Ramírez Ramírez

Dr. Luis Ramón Arellano Piña

M. en I. Rafael Flores Pinedo

Zacatecas, Zac; febrero 2020

Autorización de uso de obra

Instituto Politécnico Nacional

P r e s e n t e

Bajo protesta de decir verdad el que suscribe Luis Francisco Díaz Juárez, estudiante del programa de Ingeniería Metalúrgica, con numero de boleta 2016670104, adscrito a la Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería campus Zacatecas; manifiesto ser autor y titular de los derechos morales y patrimoniales de la obra titulada "Análisis del potencial de reutilización de relaves como agregados para la construcción" en adelante "El Trabajo de Titulación" y de la cual se adjunta copia, por lo que por medio del presente y con fundamento en el artículo 27 fracción II, inciso b) de la Ley Federal del Derecho de Autor, otorgo a el Instituto Politécnico Nacional, en adelante El IPN, autorización no exclusiva para comunicar y exhibir públicamente total o parcialmente en medios digitales "El Trabajo de Titulación" por un periodo indefinido contado a partir de la fecha de la presente autorización, dicho periodo se renovará automáticamente en caso de no dar aviso expreso a "El IPN" de su terminación.

En virtud de lo anterior, "El IPN" deberá reconocer en todo momento mi calidad de autor de "El Trabajo de Titulación".

Adicionalmente, y en mi calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales de "El Trabajo de Titulación", manifiesto que la misma es original y que la presente autorización no contraviene ninguna otorgada por el suscrito respecto de "El Trabajo de Titulación", por lo que deslindo de toda responsabilidad a El IPN en caso de que el contenido de "El Trabajo de Titulación" o la autorización concedida afecte o viole derechos autorales, industriales, secretos industriales, convenios o contratos de confidencialidad o en general cualquier derecho de propiedad intelectual de terceros y asumo las consecuencias legales y económicas de cualquier demanda o reclamación que puedan derivarse del caso.

Zacatecas, Zac., a 21 de Febrero del 2020.

Atentamente


Luis Francisco Díaz Juárez



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL



UNIDAD PROFESIONAL INTERDISCIPLINARIA DE INGENIERÍA ZACATECAS

LICENCIATURA EN INGENIERÍA METALÚRGICA



CIUDAD DE ZACATECAS, ZACATECAS
PRIMAVERA DEL JUEVES 23 DE MAYO DE 2019

CARTA DE APROBACIÓN

LOS QUE SE SUSCRIBEN EN EL PRESENTE OFICIO, HACEMOS DEL CONOCIMIENTO, QUE DESPUÉS DE HABER REVISADO EL BORRADOR DEL **TRABAJO ESCRITO** ELABORADO POR EL ALUMNO **LUIS FRANCISCO DÍAZ JUÁREZ**, INSCRITO EN EL OCTAVO PERIODO DE LA **LICENCIATURA EN INGENIERÍA METALÚRGICA** CON NÚMERO DE BOLETA **2016670104**, QUE PRESENTA CON EL FIN DE CUMPLIR LOS REQUERIMIENTOS SOLICITADOS PARA REALIZAR SU PRESENTACIÓN FINAL Y ACREDITAR LA **UNIDAD DE APRENDIZAJE PROYECTO TERMINAL** Y EL CUAL SE TITULA:

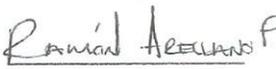
"ANÁLISIS DEL POTENCIAL DE REUTILIZACIÓN DE RELAVES COMO AGREGADOS DE CONSTRUCCIÓN"

ENCONTRAMOS QUE EL TRABAJO ESCRITO ANTES MENCIONADO, REÚNE LOS REQUISITOS NECESARIOS PARA **AUTORIZAR** LA IMPRESIÓN Y PROCEDER A LA PRESENTACIÓN FINAL DEL PROYECTO TERMINAL DEBIENDO SEGUIR LAS INDICACIONES REALIZADAS Y EFECTUANDO LAS CORRECCIONES SOLICITADAS.

ATENTAMENTE


M. EN S. B. ERIL SAUL RAMIREZ RAMIREZ
2º ASESOR


M. EN C. RAFAEL FLORES PINEDO
3º ASESOR


DR. LUIS RAMÓN ARELLANO PIÑA
2º ASESOR


DRA. ELVIA ANGÉLICA SÁNCHEZ RAMÍREZ
1º REVISOR

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE TABLAS _____	6
ÍNDICE DE GRÁFICOS _____	7
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES _____	8
SÍMBOLOS Y NOMENCLATURAS _____	9
AGRADECIMIENTOS _____	10
Dedicatoria _____	11
RESUMEN _____	12
ABSTRACT _____	13
CAPÍTULO I _____	14
1. INTRODUCCIÓN _____	15
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA _____	17
3. JUSTIFICACIÓN _____	19
4. ANTECEDENTES _____	21
5. HIPÓTESIS _____	25
6. OBJETIVOS _____	25
6.1 Objetivo General _____	25
6.2 Objetivos específicos _____	25
CAPÍTULO II _____	26
1. MARCO TEÓRICO _____	27
1.1 La industria minera-metalúrgica. _____	27
1.1.1 Panorama minero del Estado de Zacatecas. _____	27
1.1.2 Procesamiento de minerales. _____	28
a) Relaves. _____	29
b) Metales pesados y metaloides. _____	29
1.2 La industria del concreto. _____	29
1.2.1 Concreto. _____	29
a) Cemento. _____	30
Fabricación _____	31
b) Agua. _____	33
Agua de mezclado. _____	33
Agua de curado. _____	34
c) Agregados. _____	34
Agregados atípicos. _____	35
d) Aditivos. _____	35
Acelerantes. _____	36

1.3 La industria y el medio ambiente.	36
1.3.1 Sitios contaminados.	37
a) Pasivo ambiental.	38
b) Emergencia ambiental.	38
1.3.2 Residuo peligroso.	38
1.3.3 Tipos de contaminantes.	39
a) Contaminantes antropogénicos.	39
1.3.4 Elementos tóxicos.	39
1.3.5 Revalorización de residuos.	40
CAPÍTULO III	41
1. METODOLOGÍA	42
1.1 Muestreo.	42
1.1.1 Tipo de muestreo.	43
1.1.2 Método de muestreo.	44
1.1.3 Toma y manejo de muestra.	45
1.1.4 Consideraciones durante el muestreo.	47
1.2 Caracterización.	48
1.2.1 Análisis granulométrico.	48
1.2.2 Análisis elemental ICP (Geoquímica).	49
1.2.3 Análisis mineralógico de Rayos X.	50
1.3 Diseño experimental.	50
1.3.1 Determinación de la composición de especímenes.	53
1.3.2 Elaboración de especímenes.	55
a) Elaboración de cilindros de concreto para ensayo.	58
b) Elaboración de cilindros blancos para ensayo.	58
c) Elaboración de cilindros de concreto para lixiviación.	58
1.4 Ensayo de resistencia a la compresión.	58
1.5 Análisis de su estabilización-solidificación.	60
1.5.1 Ensayo de lixiviación de especímenes.	60
a) Análisis de agua lixiviada	60
b) Ensayo de toxicidad aguda con semillas de lechuga.	61
CAPÍTULO IV	62
1. RESULTADOS, ANÁLISIS Y DISCUSIÓN	63
1.1 Muestreo.	63
1.2 Caracterización.	63
1.2.1 Análisis granulométrico.	63
1.2.2 Caracterización geoquímica.	65
1.2.3 Caracterización mineralógica	66
1.3 Diseño experimental.	68
1.3.1 Elaboración de especímenes.	68
1.4 Ensayo de resistencia a la compresión.	68
1.5 Análisis de su estabilización-solidificación	85

1.5.1 Ensayo de lixiviación de especímenes de concreto	85
1.5.2 Ensayo de toxicidad aguda con semillas de lechuga	87
<i>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</i>	<i>90</i>
<i>BIBLIOGRAFIA</i>	<i>92</i>
<i>ANEXOS</i>	<i>95</i>
Anexo informativo A	95
Anexo informativo B	98
Anexo informativo C	100

ÍNDICE DE TABLAS

ID	Título	Pág.
Tabla 1	Diseño experimental y número de pruebas	50
Tabla 2	Calendarización de pruebas	53
Tabla 3	Densidad de componentes	54
Tabla 4	Análisis granulométrico del composito de muestreo	64
Tabla 5	Resultados de ensayo de muestra composito general	65
Tabla 6	Resultados de ensayo de muestras por tamaños	66
Tabla 7	Resultados de ensayo de resistencia a la compresión especímenes de concreto 1-20	69
Tabla 8	Resultados de ensayo de resistencia a la compresión especímenes blancos 1-10	71
Tabla 9	Resultados de ensayo de resistencia a la compresión especímenes de concreto 21-40	73
Tabla 10	Resultados de ensayo de resistencia a la compresión especímenes blancos 11-20	75
Tabla 11	Resultados de ensayo de resistencia a la compresión especímenes de concreto 41-60	76
Tabla 12	Resultados de ensayo de resistencia a la compresión especímenes blancos 21-30	78
Tabla 13	Resultados de análisis de lixiviados por ICP	86
Tabla 14	Resultados de ensayo de toxicidad sobre semillas	87
Tabla 15	Mejores resultados obtenidos a partir del ensayo de resistencia	90
Tabla 16	Composición de especímenes de concretos 1-20	95
Tabla 17	Composición de especímenes de concretos 21-40	96
Tabla 18	Composición de especímenes de concretos 41-60	97
Tabla 19	Composición de especímenes blancos 1-10	98
Tabla 20	Composición de especímenes blancos 11-20	98
Tabla 21	Composición de especímenes blancos 21-30	99
Tabla 22	Composición de especímenes de lixiviados 1-5	100
Tabla 23	Composición de especímenes de lixiviados 6-10	100
Tabla 24	Composición de especímenes de lixiviados 11-15	101

ÍNDICE DE GRÁFICOS

ID	Título	Pág.
Gráfico 1	Determinación de F80 de análisis granulométrico	65
Gráfico 2	Resistencia a la compresión de especímenes de concreto Cemento + Jal	70
Gráfico 3	Resistencia a la compresión de especímenes de blancos Cemento + Jal	72
Gráfico 4	Resistencia a la compresión de especímenes Cemento + Jal + Acelerante	74
Gráfico 5	Resistencia a la compresión de especímenes de blancos Cemento + Jal + Acelerante	75
Gráfico 6	Resistencia a la compresión de especímenes Cemento + Jal + Impermeabilizante	77
Gráfico 7	Resistencia a la compresión de especímenes de blancos Cemento + Jal + Impermeabilizante	78
Gráfico 8	Resistencia a la compresión de especímenes de concreto y blancos con Tratamiento 1	79
Gráfico 9	Resistencia a la compresión de especímenes de concreto y blancos con Tratamiento 2	79
Gráfico 10	Resistencia a la compresión de especímenes de concreto y blancos con Tratamiento 3	80
Gráfico 11	Resistencia a la compresión de especímenes de concreto y blancos con Tratamiento 3	80
Gráfico 12	Resistencia a la compresión de especímenes de concreto y blancos con Tratamiento 2	81
Gráfico 13	Resistencia a la compresión de especímenes de concreto y blancos con Tratamiento 3	81
Gráfico 14	Resistencia a la compresión de especímenes de concreto y blancos con Tratamiento 1	82
Gráfico 15	Resistencia a la compresión de especímenes de concreto y blancos con Tratamiento 2	82
Gráfico 16	Resistencia a la compresión de especímenes de concreto y blancos con Tratamiento 2	83
Gráfico 17	Resistencia a la compresión de especímenes de concreto y blancos con Tratamiento 2	84
Gráfico 18	Resultado de análisis instrumental de lixiviados	85
Gráfico 19	Análisis aguas lixiviadas vs NOM-001	86
Gráfico 20	Análisis aguas lixiviadas vs NOM-052	86

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

ID	Título	Pág.
Ilustración 1	Residuos mineros localizados en la zona urbanizada de Zacatecas	17
Ilustración 2	Relaves de unidad minera "El bote" y sus problemas ambientales	19
Ilustración 3	Distribución de corporativos y unidades mineras en Zacatecas	28
Ilustración 4	La industria del concreto en México	30
Ilustración 5	Esquema de la ubicación del agua en la pasta de cemento hidratado	34
Ilustración 6	La industria y la contaminación	37
Ilustración 7	Toma aérea de relaves mina "El Bote"	42
Ilustración 8	Cuadrícula sobrepuesta a la superficie por estudiar	45
Ilustración 9	Toma de muestra	46
Ilustración 10	Etiqueta de muestra, cadena de custodia y transporte de muestras	47
Ilustración 11	Sistema de mallas para análisis granulométrico	48
Ilustración 12	Digestión ácida de muestra de relave para análisis de ICP	49
Ilustración 13	Pasta de concreto	56
Ilustración 14	Vista superior de una de las caras del espécimen No. 6	57
Ilustración 15	Cuerpo y altura de los especímenes de concreto y blancos	59
Ilustración 16	Maquina universal de ensayos	60
Ilustración 17	Ensayo de toxicidad de aguas lixiviadas	61
Ilustración 18	Muestra total resultante del muestreo	63
Ilustración 19	Análisis de difracción de rayos X	67
Ilustración 20	Ensayo de resistencia a la compresión de especímenes	69
Ilustración 21	Fin de ensayo de toxicidad para agua de Lixiviado 14, 24 y 120 hrs.	89

SÍMBOLOS Y NOMENCLATURAS

CO ₂	Dióxido de carbono
Si	Silicio
H ₂ O	Agua
CaCO ₃	Carbonato de calcio
SiO ₂	Sílice
CaSO ₄ ·2H ₂ O	Sulfato de calcio hidratado
CO	Monóxido de carbono
SO ₂	Dióxido de azufre
HNO ₃	Ácido nítrico
HCl	Ácido clorhídrico
ASTM	Sociedad Americana de ensayos a materiales
SEMARNAT	Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales
SISCO	Sistema informático de sitios contaminando
NMX	Normas Mexicanas
NOM	Normas Oficiales Mexicanas
g	Gramos
°C	Grados Celsius
m	Metros
Mm	Micrómetros
m ²	Metros cuadrados
mL	mililitros
%	Porcentaje
hr	Horas
N	Newton

AGRADECIMIENTOS

Debo especialmente agradecer de manera sincera al M. en S.A. Erick Saúl Ramírez Ramírez, por su ayuda y apoyo en todo momento, desde el inicio de este proyecto hasta el día de hoy. Ha corregido minuciosamente este trabajo y me ha dado la posibilidad de mejorarlo. Tengo que agradecer sus comentarios, direcciones y sugerencias para la elaboración de este proyecto. Su apoyo y confianza en mi trabajo, así como su capacidad para guiar mis ideas han sido un aporte invaluable, no solo en el desarrollo de este trabajo, sino también en mi formación como profesionista y persona.

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento al Dr. Luis Ramón Arellano Piña por siempre haber creído en este proyecto, además por su importante aporte y participación activa en el desarrollo del mismo. No cabe duda que su participación ha enriquecido el trabajo realizado. Agradezco también al M. en I. Rafael Flores Pinedo por todos sus conocimientos, sus enseñanzas y por todo el apoyo brindado para la realización de este proyecto. A la Dra. Elvia Angélica Sánchez Ramírez por formar parte de mi comité revisor, le agradezco de todo corazón las lecturas, revisiones y comentarios, tanto científicos como literarios, de buena parte de este proyecto, sus correcciones y su infinita paciencia. Además, su compañía y colaboración incondicional para este proyecto.

Al Ing. Luis Ramón Arellano, por todos sus comentarios científicos, por contestar a muchas dudas, comentarios e inquietudes y por ofrecerme su apoyo en todo momento. Las conversaciones que he mantenido con él han sido de gran ayuda en la realización de este proyecto. También al Ing. Gerardo Enrique Reimers Morales por en un inicio haber encaminado de la manera correcta la realización de este proyecto.

Agradezco, sin duda a todos mis maestros que durante estos cuatro años me han formado, gracias por compartir todo su conocimiento y por tratar de hacer de mi un profesionista integro.

A las unidades minero-metalúrgicas Fresnillo PLC, Cozamin y Asientos por abrirme las puertas para la realización de mis prácticas profesionales, así como por preocuparse por mi formación profesional brindándome las herramientas necesarias para competir en el mundo laboral.

A mis compañeros de clase, de los cuales tengo la fortuna de recibir su amistad. Y a aquellos amigos que han compartido conmigo experiencias en el plano personal durante la mayor parte de mi vida.

Por supuesto, el agradecimiento más profundo y sincero va para mi familia. Sin su apoyo, colaboración e inspiración habría sido imposible el culmino de esta etapa. A mis padres por su ejemplo de lucha y honestidad, pilares fundamentales para lograr mis metas. A mi hermana por su generosidad e inteligencia.

Dedicatoria

A mis padres

RESUMEN

La industria minera en Zacatecas ha sido desde siempre una de las industrias pilares en el desarrollo económico y social del Estado. El procesamiento de minerales de las industrias minero metalúrgicas ha provocado como consecuencia la producción de residuos peligrosos que a lo largo de los años dejen estragos y provoquen afectaciones en el medio ambiente, la salud humana y en el bienestar de flora y fauna.

Por otro lado, el concreto constituye uno de los materiales de construcción más importantes en varias obras de Ingeniería civil. La industria de la construcción requiere millones de toneladas de agregados (gravas, arenas) y suelos con calidad adecuada para la construcción de diferentes obras. Esto ha traído como consecuencia una fuerte degradación al medio ambiente, por la explotación de bancos de materiales; que, además, cuando dejan de ser explotados, quedan como huecos que en muchas ocasiones son rellenados con basura o con materiales que pueden ser peligrosos.

El presente proyecto busca dar solución a los problemas generados por las industrias mencionadas anteriormente, utilizando estrategias de remediación ambientales que buscan revalorizar los residuos potencialmente tóxicos.

Se presenta a continuación un estudio realizado a los relaves denominados pasivos ambientales y contaminantes antropogénicos provenientes de la unidad minera metalúrgica "El Bote" ubicados en la zona urbanizada de la capital zacatecana, en el que se estudia la viabilidad de su uso como agregados para la construcción.

La calidad del concreto resultante se basa en la evaluación de las propiedades mecánicas adquiridas por los relaves una vez que fueron agregados para la fabricación de concretos a diferentes composiciones para ser comparadas con los concretos comerciales y también la estabilización fisicoquímica del concreto para asegurar sea amigable al para el ambiente.

Palabras clave: Industria minera, Industria de la construcción, Relave, Concreto, Pasivo ambiental, Revalorización de residuos

ABSTRACT

The mining industry in Zacatecas has always been one of the pillar industries in the economic and social development of the State. The processing of minerals from the metallurgical mining industries has resulted in the production of hazardous waste that, over the years, wreaks havoc and causes damage to the environment, human health and the wellbeing of flora and fauna.

On the other hand, concrete is one of the most important building materials in several civil engineering works. The construction industry requires millions of tons of aggregates (gravel, sand) and soils of adequate quality for the construction of different works. This has brought about a strong degradation to the environment, due to the exploitation of material banks; that, in addition, when they stop being exploited, they remain as holes that in many occasions are filled with garbage or with materials that can be dangerous.

The present project seeks to solve the problems generated by the industries mentioned above, using environmental remediation strategies that seek to revalue potentially toxic waste.

The following is a study carried out on tailings called environmental liabilities and anthropogenic pollutants from the metallurgical mining unit "El Bote" located in the urbanized area of the capital of Zacatecas, where the viability of its use as aggregates for the building.

The quality of the resulting concrete is based on the evaluation of the mechanical properties acquired by the tailings once they were added for the manufacture of concrete to different compositions to be compared with the commercial concretes and also the physicochemical stabilization of the concrete to ensure it is friendly to the for the environment.

Key words: Mining industry, Construction industry, Tailings, Concrete, Environmental passive, Revaluation of waste

CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN

La minería es una actividad económica que ha impulsado el desarrollo de muchos países, México no es excepción y Zacatecas, es una de las entidades federativas que mayor impacto económico ha recibido por parte de la industria minera, y como consecuencia un impacto ambiental, debido a que a lo largo de cientos de años se han abandonado sin control sitios de desecho de residuos mineros que en la actualidad ya son sitios muy cercanos o incluso forman parte de la urbanización (Flores, 2018).

El desarrollo del proceso de industrialización sin la existencia de un marco normativo específico que regulara el manejo y derrame de materiales y residuos peligrosos generó una gran cantidad de suelo contaminado en nuestro país (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT], 2017).

La empresa Desarrollo Monarca S.A. de C.V. fundada en 1970 por iniciativa del empresario Norteamericano Daniel K. Ludwig inicialmente se dedicó a la creación de infraestructura en el país, para posteriormente adquirir otras divisiones entre las que se destaca la minera, en la división minera se extrajeron y beneficiaron alrededor de 16 unidades mineras. Una de ellas fue la unidad minera "El Bote" ubicada en la zona urbanizada de la capital del estado de Zacatecas quien según registros de la empresa Desarrollo Monarca S.A. de C.V. estuvo a su cargo del año de 1994 al 2000 cuando esta cerró sus puertas (Subsecretaría de Minería, s.f.).

El procesamiento de minerales en la unidad "El Bote" produjeron residuos conocidos como jales o relaves, los cuales ocupan actualmente un área aproximada de 115,467.71 m² y un perímetro cercano a los 1,253.7 m. Dichos subproductos fueron generados del beneficio de minerales, que se procesaron para la obtención de concentrados de oro, plata, plomo, cobre y zinc.

Por lo cual se hace relevante estudiar dichos sitios, para generar una estrategia que permita la contención en la distribución de los contaminantes presentes y tratamiento de sus residuos.

Por otro lado, el concreto constituye uno de los materiales de construcción más importantes en varias obras de Ingeniería civil; por ejemplo, edificios, presas, carreteras, etc. La industria de la construcción requiere millones de toneladas de agregados (gravas, arenas) y suelos con calidad adecuada para la construcción de diferentes obras. Esto ha traído como

consecuencia una fuerte degradación al medio ambiente, por la explotación de bancos de materiales; que, además, cuando dejan de ser explotados, quedan como huecos que en muchas ocasiones son rellenados con basura o con materiales que pueden ser peligrosos (Pérez, Garnica y Rivera, 2018).

Países de la Unión Europea (como Dinamarca, Suecia, Finlandia, Bélgica, entre otros) reutilizan un porcentaje importante de sus residuos; dichos países en el área de carreteras, ya están utilizando los agregados de concreto reciclado para ser colocados como base o subbase, sin embargo, naciones como México aún no reutilizan la mayor parte de sus residuos, por la escasez de investigación sobre el tema.

Es entendible entonces que los constructores se muestren escépticos cuando alguien les propone utilizar elementos reciclados como materia prima de construcción; puesto que es desconocido su comportamiento, tanto en campo como en laboratorio (Pérez et al., 2018).

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Debido a que en aquellos años no existía legislación que obligara a las empresas minero metalúrgicas a llevar a cabo un cierre integral donde se diera disposición final a los residuos y se restaurara el sitio una vez que fuesen terminadas las operaciones, los jales producidos por la unidad minera "El Bote" nunca fueron procesados para su tratamiento por lo que desde el año 2000 permanecen expuestos al medio ambiente.

Los jales son contaminantes antropogénicos por su origen y contenido, que se catalogan como residuos peligrosos (NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004) debido a la característica tóxica que le da su composición alta en metales pesados, los cuales generan estragos en el medio ambiente, la salud humana y en el bienestar de flora y fauna. Son también categorizados como un pasivo ambiental por el tiempo de exposición al ambiente y a la causa por la que se encuentran en ese lugar.



Ilustración 1. Residuos mineros localizados en la zona urbanizada de Zacatecas

La condición en que se encuentran los relaves, les permite interactuar con el agua, el suelo, el aire y la flora y fauna, lo que ha provocado:

- A. su movilización a otras áreas empleando como transporte las escorrentías y el arrastre del viento.
- B. La contaminación de las aguas superficiales y subterráneas al mezclarse con el agua y filtrarse al subsuelo.
- C. Su dispersión a la atmosfera a través del arrastre de los vientos.

- D. La pérdida de la fertilidad del suelo al incorporarse a él, propiciando su salinización y erosión.
- E. Su biodisponibilidad y la bioabsorción de metales pesados por la flora y fauna y su incorporación a las cadenas tróficas.

Aunado a lo anterior, los recientes eventos de derrames de sustancias tóxicas por falla en presas de jales en México ponen en evidencia los graves riesgos de eventos catastróficos en empresas mineras debido a sus procesos. En los últimos años cada vez son más frecuentes y peores los problemas provocados por las presas de jales, el grado de peligrosidad potencial de contaminación ocasionado por derrames de las presas de jales depende principalmente de tres factores: la toxicidad del residuo, el volumen almacenado y su ubicación geoespacial dentro de la cuenca. Las afectaciones por derrames en presas de jales pueden ser entre muchas otras: daño ecológico, económico, de salud pública, pérdida de negocio y prestigio de la empresa entre otros.

Dichos sucesos indica que hay mucho por hacer en materia de regulación y análisis de la industria minera a nivel mundial. Aunado a eso, se hace prioritario la búsqueda de tecnologías para el tratamiento de los relaves que funjan como posibles soluciones presentadas en un plan de manejo ambiental, que de manera detallada establezca las acciones que se requieren para mitigar, controlar y corregir los posibles efectos o impactos ambientales negativos causados por la actividad minera.

3. JUSTIFICACIÓN

Derivado de siglos de actividad minera en el país, se ha dejado como herencia grandes cantidades de residuos mineros que no han sido confinados. Entre estos residuos, los más importantes son los jales, en diversas zonas urbanizadas de la ciudad de Zacatecas se han encontrado sitios con jales que presentan elevado contenido en elementos potencialmente tóxicos y altas concentraciones de metales y metaloides. Este tipo de residuos representan pasivos ambientales que requieren propuestas de estabilización de bajo costo, que se pueden lograr utilizando estrategias de tratamiento de residuos, para así poder reducir su dispersión al ambiente.

El principal problema ambiental asociado a estos residuos peligrosos derivados de la actividad minera son las reacciones de oxidación de sulfuros que están limitadas a ocurrir principalmente en horizontes arcillosos en los jales, que pueden retener mayor humedad; estas condiciones promueven una migración de metales vía capilar hacia superficie depositando sales solubles o eflorescencias en la superficie y laderas de los jales. Los intensos procesos de erosión en jales representan dos principales riesgos: la estabilidad de los taludes de las presas inactivas de jales se afecta seriamente por erosión hídrica que puede resultar en el colapso de las estructuras y el polvo derivado de la erosión eólica de los jales puede contener niveles importantes de metales. En este tipo de zonas la afectación principal es a la atmósfera.



Ilustración 2. Relaves de unidad minera "El bote" y sus problemas ambientales

Debido a las altas precipitaciones pluviales que se generan actualmente en la zona, otro problema ambiental es la producción de drenaje ácido de mina (DAM) y su dispersión al ambiente a partir de sus lixiviados que se forman como parte de la oxidación de sulfuros metálicos reactivos cuando entran en contacto con agua y aire, formando lixiviados que se caracterizan por pH bajos y concentraciones elevadas de elementos potencialmente tóxicos. Entonces otra afectación sucede en cuerpos de agua superficiales o subterráneos, así como suelos y sedimentos.

Actualmente en México, ya existe una legislación en materia ecológica, fundamentalmente exige se tenga el cuidado necesario para evitar que los desechos de un proceso productivo sean peligrosos al medio ambiente en que sean depositados. La NOM-141-SEMARNAT-2003 establece el procedimiento para caracterizar los jales, así como los criterios para la selección del sitio, diseño, construcción, operación y pos operación de una presa de jales.

Por otro lado, el cemento es la tercera industria de mayor impacto ambiental del mundo, después de los combustibles fósiles y de la explotación de la tierra. El cemento sigue siendo en mayor o menor grado similar al usado hace más de 200 años, debido a que no se ha podido lograr desarrollar fuentes renovables. Además, continúa teniendo una alta demanda a nivel mundial, que irá creciendo hasta el año 2050. La producción de una tonelada métrica de cemento conlleva la emisión de casi una tonelada de dióxido de carbono (CO_2). Esta huella es uno de los principales factores en la búsqueda de nuevos materiales y métodos de construcción. La presente investigación buscará reducir el impacto medioambiental de la producción de cemento y de los residuos de la actividad minera.

4. ANTECEDENTES

La industria mexicana dedicada a la producción y comercialización de cemento y agregados para la fabricación de concretos, realizan varios estudios de calidad de sus productos para poder asegurar un buen producto y de características adecuadas. En particular los productos son evaluados con los métodos y especificaciones establecidos en la NMX-C-111-ONNCCE, para asegurar el control de calidad en todas las operaciones de agregados.

Las principales empresas dedicadas a la producción de agregados en el país en general cuentan con un laboratorio especializado en donde se realizan pruebas de calidad a los agregados comerciales basándose principalmente en las normas mexicas del Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y la Edificación, S.C. (ONNCCE) y en el Instituto Mexicano del Cemento y el Concreto, A. C. A continuación, se presentan algunas de las pruebas que se realizan y su norma correspondiente para la determinación de la calidad de los agregados: Muestreo (NMX-C-170), granulometría (NMX-C-077), contenido de agua por secado (NMXC-166), densidad (NMX-C-164 y NMX-C-165), porcentaje de absorción (NMX-C-165 y NMX-C-165), masa volumétrica (NMX-C-073), pérdida por lavado (NMX-C-084), intemperismo acelerado (NMX-C-075), abrasión de Los Ángeles (NMX-C-196), impacto del agregado (BS-812), equivalente de arena (N-CMT-4-05-003), contenido de materia orgánica (NMXC-088), plasticidad y contracción lineal (NMXC-416), factor de forma grava (ASTM D 4791), terrones de arcilla y partículas deleznable (NMX-C-071), resistencia al paso del Ion Cloruro de Concreto Endurecido (ASTM C 1202 2005).

Asimismo, el laboratorio de Agregados cuenta con un área para el análisis petrográfico que sirve para evaluar, además de las características de los agregados, las estructuras de concreto endurecido. Esta herramienta es útil para evaluar la calidad de los agregados y para analizar las fallas del concreto endurecido. Los análisis petrográficos se basan en las guías: Practice for Petrographic Examination of Hardened Concrete (ASTM C 856 2004) y Análisis Petrográficos de Agregado para Concreto NMX-C-265-ONNCCE (CEMEX, s.f.).

Por otro lado, la constante necesidad de la utilización de energías y materiales alternos como estrategias de tratamiento de residuos para la producción del concreto ha llevado a diversas instituciones gubernamentales a realizar investigación sobre el tema. La Secretaria de Comunicaciones y Transportes en coordinación con el Instituto Mexicano del Transporte

presentaron en el año 2018 un artículo titulado "Evaluación de las propiedades físicas y químicas de un agregado de concreto reciclado" el cual se destaca lo siguiente.

En esta investigación fueron determinadas las propiedades físicas y mecánicas de un agregado de concreto reciclado proveniente de construcciones, que cumple con granulometría de base. Los resultados fueron comparados con las propiedades de un agregado tradicional de base, para determinar la factibilidad de usar el agregado de concreto reciclado como material de construcción en carreteras. Los resultados mostraron que el agregado de concreto reciclado cumple con los requisitos de calidad de base, de acuerdo con la normativa de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes; excepto el parámetro de desgaste de Los Ángeles, corroborando así lo mostrado en la literatura.

En cuanto a pruebas mecánicas, se determinaron módulos de resiliencia, los parámetros de resistencia al esfuerzo cortante y también las pruebas de deformación permanente a 20 000 y 250 000 ciclos.

Respecto a las propiedades mecánicas, los resultados de módulo de resiliencia indican valores mayores para el agregado de concreto reciclado. Asimismo, las muestras de agregado de concreto reciclado soportan niveles de esfuerzos más altos. Las pruebas de deformación permanente a 20 000 ciclos de carga, indicaron que el agregado de concreto reciclado acumula una deformación permanente de aproximadamente 0.58%, mientras que el agregado natural indicó 0.4%. Las pruebas de deformación a 250 000 ciclos indican que después de 20,000 ciclos de carga, la deformación permanente continúa acumulándose, se observó que el concreto reciclado muestra deformación resiliente menor que el agregado tradicional, lo que se traduce en módulos de resiliencia mayores. De las pruebas de resistencia al esfuerzo cortante se observó que el agregado de concreto reciclado presenta un ángulo de fricción interna mayor que el de agregado tradicional. La cohesión es similar en ambos agregados, se ve modificada ligeramente con el tiempo de curado en muestras de agregado de concreto reciclado (Pérez et al., 2018).

En Lima, Perú en julio de 2010 investigadores de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos presentaron el trabajo "Reúso de relaves mineros como insumo para la elaboración de agregados de construcción para fabricar ladrillos y baldosas". En el que se expone la

obtención de un agregado de construcción a partir de relaves mineros polimetálicos para fabricar ladrillos o baldosas.

Para la obtención del agregado se realizó una técnica de fijación y micro encapsulación de los metales pesados en los relaves mineros. La encapsulación, conocido también como compactación química, es un proceso a través del cual se inmoviliza e insolubiliza a los metales pesados, este efecto se logra a través de una reacción química entre los componentes de los metales pesados en la matriz del relave, los sistemas más comunes de solidificación involucran a los aglomerantes o cemento. La micro encapsulación con sílice es un proceso de tratamiento para metales pesados y contaminantes orgánicos, que trata en forma efectiva efluentes, aguas y otros líquidos y también residuos sólidos, suelos, sedimentos y relaves contaminados. Convierte los metales pesados a una forma inerte segura mediante el recubrimiento con sílice y es particularmente efectivo para arsénico, cadmio, mercurio, cobre, plomo, zinc y cromo.

Estas técnicas tuvieron como propósito estabilizar a los metales peligrosos y contaminantes que se encuentran en los relaves, anulando el proceso natural de disponibilidad y movilidad de los metales pesados que se caracterizan por causar contaminación cuando están en estado inestable y por lo tanto migran hacia el medio físico (suelo y agua).

Cuando se mezcla el cemento con H_2O los silicatos y aluminatos se hidratan, dando lugar una masa rígida y clara conocida con el nombre de cemento endurecido. Este proceso convierte los metales pesados a una forma inerte segura mediante el recubrimiento con sílice y es particularmente efectivo para arsénico, cadmio, mercurio, cobre, plomo, zinc y cromo.

La calidad del agregado de construcción se determinó mediante diversas pruebas de toxicología dando como resultado final la factibilidad de su uso debido a su nula contaminación. Esta característica se comprobó debido a la estabilidad fisicoquímica que se logró mediante la técnica de la micro encapsulación de los metales pesados en la matriz del agregado obtenido, luego del proceso del tratamiento del relave polimetálico con silicato di y tricálcico de los cementos portland tipo I, tipo II, tipo V (Romero y Flores, 2010).

Por su parte, la Universidad Católica de Chile realizó una investigación sobre el desarrollo de un nuevo material suplementario en la fabricación de concreto a partir de colas de cobre en el que evaluó su rendimiento y características mecánicas.

El uso de residuos como agregados para la construcción ya se ha estudiado previamente. Los residuos que se han utilizado previamente son relaves mineros a los cuales no se les realiza ningún tratamiento previo dando como resultados una baja capacidad de cemento, permitiendo niveles de reemplazo bajos de cemento (por debajo de 15%). Esta investigación estudio ocho colas de cobre para determinar qué residuos son más susceptibles a mejorar la capacidad del cemento como agregado para concreto, mediante el uso de tratamientos térmicos y mecánicos. En la primera etapa, donde se exploró la capacidad de los residuos para someterse a transformaciones químicas a través de un tratamiento térmico de hasta 1000°C y transformación física a través de la molienda de baja energía para un máximo de 180 minutos. También se observó que debido a la naturaleza del procesamiento de roca antes de la extracción mineral, el tamaño de partícula fue capaz de ser reducido en un 50% después de 60 minutos de molienda. Con estos resultados, se propuso un diseño compuesto central utilizando temperaturas de tratamiento térmico entre 600°C y 800°C y la molienda con un punto central en 30 minutos. Los resultados muestran que el comportamiento mecánico de las mezclas se puede mejorar hasta un 40% en 90 días en comparación con los residuos no tratados (Vargas y López, 2018).

5. HIPÓTESIS

Los relaves presentarán propiedades mecánicas similares a las mostradas por un agregado de construcción y al ser adicionados en la elaboración de un concreto podrán igualar o mejorarán sus propiedades y características.

6. OBJETIVOS

6.1 Objetivo General

Analizar el potencial de reutilización de relaves como agregado en el concreto para la construcción.

6.2 Objetivos específicos

1. Realizar una caracterización geoquímica y mineralógica de los relaves.
2. Evaluar las propiedades mecánicas efectuando pruebas de resistencia a la compresión en concretos elaborados con relaves y evaluar la viabilidad de su utilización.
3. Analizar su estabilización-solidificación realizando pruebas de lixiviación y determinar su toxicidad.

CAPÍTULO II

1. MARCO TEÓRICO

1.1 La industria minera-metalúrgica.

La actividad minera ha sido desde tiempos prehispánicos una de las principales actividades productivas en nuestro país, su importancia creció durante la Colonia, época en la cual conoció una de sus etapas de mayor bonanza. El subsuelo del territorio mexicano es rico en yacimientos minerales, cuya explotación genera hasta el día de hoy importantes riquezas.

Actualmente la industria minera contribuye con el 1.5% del PIB de la nación. Se destaca especialmente la producción de plata, bismuto, plomo, oro, cobre y zinc, metales en los cuales ocupa los primeros lugares en la producción mundial. México se ha convertido en uno de los destinos más atractivos para la actividad minera, no sólo por las riquezas naturales que alberga, sino también por las facilidades para el desarrollo de la industria (Cámara de Diputados, Centro de Estudios de las Finanzas Públicas, 2008; Espinosa, 2013).

1.1.1 Panorama minero del Estado de Zacatecas.

La minería es por mucho una de las actividades económicas más antiguas realizadas en Zacatecas, así como una de las más importantes. Zacatecas es tradicionalmente minero desde la época de la colonia, a partir de la cual, se han venido explotando importantes yacimientos minerales, que regionalmente se pueden enmarcar dentro 17 regiones mineras, que se han agrupado de acuerdo al tipo de mineralización y su ubicación. En el Estado se presentan manifestaciones de mineralización, prácticamente en todo su territorio, aunque el área de incidencia es mayor en algunas áreas, donde los eventos metalogénéticos se concentraron con mayor intensidad, formando yacimientos minerales económicos, algunos de ellos trabajados desde tiempo prehispánicos.

La minería en el estado de Zacatecas ha sido el pilar en el desarrollo económico, debido a ello se fundaron los centros de población de importantes ciudades actualmente. Se presenta una gran diversidad de tipos de yacimientos minerales, que apoyan al desarrollo industrial y como consecuencia del incremento en la cotización de los metales ha sido un factor importante para el aumento de la actividad minera (Secretaría de Economía, 2017).



Ilustración 3. Distribución de corporativos y unidades mineras en Zacatecas.

1.1.2 Procesamiento de minerales.

Las rocas del subsuelo en el que se encuentra el mineral que contiene valores de metales pesados, son extraídas utilizando dos métodos probados internacionalmente por medio de minería de superficie, o tajo abierto, y minería subterránea. En general el método de minería zacatecana es subterráneo o cielo abierto. El mineral que es extraído contiene grandes cantidades de sustancias estériles (ganga), y es llevado a la superficie a través de rampas de producción, en la mayoría de los casos se debe someter a un tratamiento previo de separación. El mineral se transporta en camiones a trituradoras y se procesa a través de una planta trituradora, el material resultante es almacenando previo al circuito de molienda, donde se reduce su tamaño y luego se envía a la flotación para iniciar su separación. Los pasos de flotación implican la flotación de cobre, seguido de zinc y plomo. Todos los productos pasan por varias etapas de limpieza en el circuito de flotación que termina con un concentrado de cobre rico en plata, un concentrado de zinc y un concentrado de plomo rico en plata además de un relave o cola. Estas operaciones previas por lo general no producen alteraciones en la identidad del mineral. (Capstone Mining Corp, 2017; Delgado, 2015).

a) Relaves.

Según el ministerio de minería de Chile un relave corresponde al residuo, mezcla de mineral molido con agua y otros compuestos, que queda como resultado de haber extraído los minerales sulfurados en el proceso de flotación que, generalmente, contienen metales en formas insolubles, sales básicas o acidad y vestigios solubles de elementos derivados de la oxidación de jales. Este residuo, también conocido como cola, es transportado mediante canaletas o cañerías hasta lugares especialmente habilitados o tranques, donde el agua es recuperada o evaporada para quedar dispuesto finalmente como un depósito estratificado de materiales finos (arenas y limos). Los relaves dependiendo del mineral extraído pueden contener metales pesados como: arsénico, plomo, cadmio, zinc, mercurio, entre otros. (Ministro de Minería, s.f.).

b) Metales pesados y metaloides.

Los metales son elementos químicos que poseen tres propiedades generales: son buenos conductores del calor y la electricidad; pueden formar cationes, y se combinan con compuestos no metálicos a través de enlaces iónicos.

Los metaloides son elementos químicos con propiedades intermedias entre los metales y no metales. Aunque no existe una definición precisa, los metaloides tienden a poseer dos propiedades generales: son semiconductores de la electricidad y forman óxidos anfóteros (Tintinalli et al., 2013).

1.2 La industria del concreto.

Durante el presente siglo, el concreto se ha convertido en el material de construcción más ampliamente utilizado en todo el mundo debido a su extraordinaria versatilidad en cuanto a forma, función y economía, ya que la tecnología desarrollada a su alrededor hace posible su competencia no solo con las construcciones de piedra y madera, sino también con las de acero (Sánchez, 2001, p. 19).

1.2.1 Concreto.

El concreto es un material que se ha utilizado en construcción desde hace siglos. El concreto para la construcción está compuesto por un material aglutinante, por agregados y aditivos. La

mezcla aglutinante es, en la mayoría de los casos, cemento con agua, aunque existen tipos particulares de concreto que se componen por un material aglutinante distinto. Los agregados son materiales triturados, como grava o arena, que sirven para reforzar la mezcla cementante del concreto. Y los aditivos tienen como función modificar las propiedades intrínsecas a los materiales conglomerantes, como pueden ser la permeabilidad, el tiempo de fraguado o la inclusión de burbujas de aire. Por su constitución molecular, el concreto para la construcción es un material óptimo para resistir la compresión (CEMEX, s.f.).

En términos generales, el concreto u hormigón puede definirse como la mezcla de un aglutinante (Cemento portland hidráulico), un material de relleno (agregados áridos), agua y eventualmente aditivos, que al endurecerse forma un todo compacto (piedra artificial) y después de cierto tiempo es capaz de soportar grandes esfuerzos de compresión (Sánchez, 2001, p. 19).



Ilustración 4. La industria del concreto en México

a) Cemento.

El cemento es una de las materias primas de la construcción más populares y hoy en día más indispensables. La palabra cemento indica un material aglomerante que tiene propiedades de adherencia y cohesión, las cuales le permiten unir fragmentos minerales entre sí, para formar un todo compacto con resistencia y durabilidad adecuadas. Es un polvo fino que se obtiene de la calcinación a $1,450^{\circ}\text{C}$ de una mezcla de piedra caliza, arcilla y mineral de hierro. El

producto del proceso de calcinación es el Clinker, que se muele finamente con yeso y otros aditivos químicos para producir cemento.

En general el cemento portland hidráulico, tiene entonces propiedades tanto adhesivas como cohesivas, que le dan capacidad de aglutinar los agregados o áridos para conformar el concreto. Estas propiedades dependen de su composición química, el grado de hidratación, la finura de las partículas la velocidad de fraguado, el calor de hidratación y la resistencia mecánica que es capaz de desarrollar (Sánchez, 2001, p. 19).

Fabricación

El cemento se fabrica generalmente a partir de materiales minerales, tales como la caliza, y por alúmina y sílice, que se encuentran como arcilla en la naturaleza. En ocasiones es necesario agregar otros productos para mejorar la composición química de las materias primas principales; el más común es el óxido de hierro.

Las calizas, que afortunadamente se presentan con frecuencia en la naturaleza, están compuestas en un alto porcentaje (más del 60%) de carbonato de calcio (CaCO_3), e impurezas tales como arcillas, sílice y dolomita, entre otras. Existen diferentes tipos de calizas y prácticamente todas pueden servir para la producción del cemento con la condición de que no tengan cantidades muy grandes de magnesio, pues si el cemento contiene más cantidad del límite permitido, el concreto producido con él aumenta de volumen con el tiempo, generando fisuras y por lo tanto pérdidas de resistencia.

La arcilla que se emplea en la fabricación del cemento está constituida principalmente por un silicato hidratado complejo de aluminio, con porcentajes menores de hierro y otros elementos. La arcilla aporta el proceso los óxidos de sílice (SiO_2), hierro (Fe_2O_3) y aluminio (Al_2O_3). El yeso, sulfato de calcio hidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) es un producto que se agrega al final del proceso de producción, con el fin de controlar el tiempo de fraguado del cemento (Sánchez, 2001, p. 29).

El proceso de fabricación del cemento comprende las siguientes etapas principales:

- Explotación de materias primas. 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.

- Transporte de materias primas. Una vez que las grandes masas de piedra han sido fragmentadas, se transportan a la planta en camiones o bandas.
- 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.
- Pre homogenización. La pre homogenización es la mezcla proporcional de los diferentes tipos de arcilla, caliza o cualquier otro material que lo requiera.
- Almacenamiento de materias primas. Cada una de las materias primas es transportada por separado a silos en donde son dosificadas para la producción de diferentes tipos de cemento.
- 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 material.
- 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.
- 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.
- 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. (CEMEX, 2017).

b) Agua.

El agua se puede definir como aquel componente del concreto en virtud del cual, el cemento experimenta reacciones químicas que le dan la propiedad de fraguar y endurecer para formar un sólido único con los agregados. El agua ocupa además un papel preponderante en las reacciones del cemento durante el estado plástico, el proceso de fraguado y el estado endurecido de un concreto o mortero (Sánchez, 2001).

Agua de mezclado.

El agua de mezclado está definida como la cantidad de agua por volumen unitario de concreto que requiere el cemento, contenido en ese volumen unitario, para producir una pasta eficientemente hidratada con una fluidez tal, que permita una lubricación adecuada de los agregados cuando la mezcla se encuentra en estado plástico. Conforme se produce la hidratación del cemento, va adquiriendo una nueva estructura, que es la formación del llamado gel de cemento, en esta estructura el agua se encuentra en dos formas evaporables y no evaporable (Sánchez, 2001).

❖ Agua de hidratación.

El agua de hidratación es aquella parte del agua original de mezclado que reacciona químicamente con el cemento para pasar a formar parte de la fase sólida del gel. Es también llamada no evaporable.

El agua que el cemento necesita para su completa hidratación representa, como término medio aproximado, un 23% de su peso. Aunque las relaciones agua/cemento que suelen emplearse en las mezclas de concreto exceden este valor por mucho (Sánchez, 2001).

❖ Agua evaporable.

El agua restante que existe en la pasta, es agua que puede evaporarse a 0% de humedad relativa del ambiente y 110°C de temperatura. Pero no se encuentra libre en su totalidad. Esta agua puede estar en tres condiciones distintas de acuerdo con su proximidad a la superficie del gel:

- Agua de adsorción. Esta es una capa molecular de agua que se halla fuertemente adherida a la superficie del gel por fuerzas intermoleculares de atracción.
- Agua capilar. Es el agua que ocupa los poros capilares de la pasta, de manera que parte de ella está sujeta (aunque débilmente) a la influencia de las fuerzas de superficie del gel.
- Agua libre. Es el agua que se encuentra fuera de la influencia de las fuerzas de superficie de tal manera que tiene completa movilidad y puede evaporarse con facilidad. (Sánchez, 2001).

Agua de curado.

El curado puede definirse como el conjunto de condiciones necesarias para que la hidratación de la pasta evolucione sin interrupción hasta que todo el cemento se hidrate y el concreto alcance sus propiedades potenciales. Estas condiciones se refieren básicamente a la humedad y la temperatura. Por lo tanto, el agua de curado constituye el suministro adicional de agua para hidratar eficientemente el cemento (Sánchez, 2001).

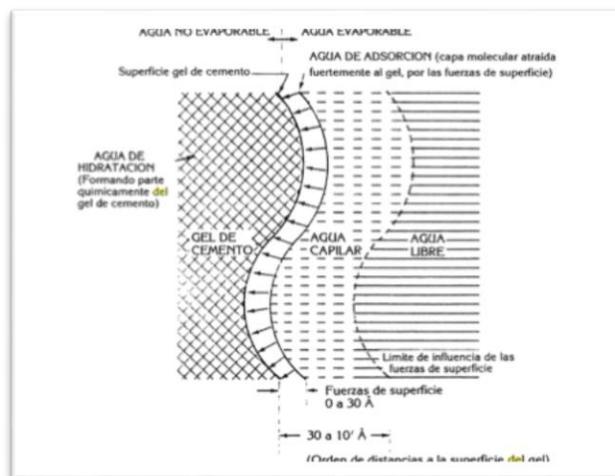


Ilustración 5. Esquema de la ubicación del agua en la pasta de cemento hidratado

c) Agregados.

Los agregados, también llamados áridos, son aquellos materiales inertes, de forma granular, naturales o artificiales, que aglomerados por el cemento portland en presencia de agua conforman un todo compacto (piedra artificial) conocido como concreto u hormigón.

Como agregado para concreto se puede considerar todos aquellos materiales que teniendo una resistencia propia suficiente (resistencia de grano), no perturba ni afecta las propiedades y características del concreto y garantiza una adherencia suficiente con la pasta endurecida de cemento portland. En general la mayoría son materiales inertes, es decir que no desarrollan ningún tipo de reacciones con los demás constituyentes del concreto (Sánchez, 2001).

Agregados atípicos.

Sin embargo, hay algunos agregados cuya fracción más fina presenta una actividad en virtud de sus propiedades hidráulicas, colaborando con el desarrollo de la resistencia mecánica característica del concreto, tales como las escorias de alto horno de las siderúrgicas, los materiales de origen volcánico en que hay sílice activa y el ladrillo triturado entre otros. Pero hay algunos otros que presentan elementos nocivos o eventualmente inconvenientes que reaccionan afectando la estructura interna del concreto y su durabilidad, por ejemplo, los que presentan elementos sulfurados, los que contienen partículas pulverulentas más finas o aquellos que se encuentran en descomposición latente como algunas pizarras (Sánchez, 2001).

d) Aditivos.

Aditivo es una sustancia química, generalmente dosificada por debajo del 5% de la masa del cemento, distinta del agua, los agregados, el cemento y los refuerzos de fibra, que se emplea como ingrediente de la pasta, del mortero o del concreto, y se agrega al conjunto antes o durante el proceso de mezclado, con el fin de modificar alguna o algunas de sus propiedades físicas, de tal manera que el material se adapte de una mejor forma a las características de la obra o las necesidades del constructor.

Los aditivos se emplean cada vez en mayor escala en la fabricación de morteros y hormigones, para la elaboración de productos de calidad, en procura de mejorar las características del producto final. No se trata en ningún modo de aditivos del cemento, pues la misión del aditivo no consiste en mejorar el cemento, sino permitir la transformación o modificación de ciertos caracteres o propiedades de un producto acabado.

Acelerantes.

Son aditivos químicos generalmente líquidos, que permiten acelerar el fraguado y tener resistencias iniciales y finales más altas. La mayor parte de los acelerantes comúnmente usados producen un aumento de la contracción que sufre el concreto al secarse. Frecuentemente se dosifican estos aditivos entre 1.5 y 5% de la masa del cemento en la mezcla. Son fabricados comúnmente utilizando como base cloruros o nitratos (Sánchez, 2001).

1.3 La industria y el medio ambiente.

El impacto ambiental que las industrias tienen sobre el medio ambiente y los recursos naturales ha sido considerable, no tan sólo como resultado del crecimiento de la producción sino también gracias a que dicho crecimiento se concentró en sectores de alto impacto ambiental.

Tal impacto es derivado no sólo de la actividad industrial misma y de los residuos que genera, sino también de la posición que se tenga acerca de que el cuidado ambiental no es un lujo sino una fuente de competitividad y ahorro. La industria mexicana en materia de su preocupación ambiental se divide en dos, en una, un segmento de empresas, en general altamente exportadoras, que tienen una alta preocupación por innovar procesos y buscar cumplir con su responsabilidad ambiental más allá incluso de lo que la normatividad les exige; un segundo segmento, en general de grandes empresas orientadas al mercado interno, que busca aprovechar las oportunidades de ahorro y negocios que les plantea el cuidado ambiental; un tercer segmento de empresas generalmente medianas y altamente exportadoras, que busca tener un desempeño ambiental que no merme su competitividad internacional, pero frecuentemente enfrentan problemas de índole financiera; un cuarto segmento de empresas, tanto grandes como medianas, en general orientadas al mercado interno o a bienes básicos, que reconocen oportunidades de ahorro y eficiencia a través de inversiones que conllevan mejoría ambiental, pero también frecuentemente no tienen condiciones de acceso a recursos para hacerlo; y un quinto segmento que carece de interés o de recursos, que fundamentalmente está integrado por pequeñas y microempresas, aunque no faltan empresas grandes o medianas. Las empresas de este último segmento representan la mayoría de las empresas del país, al menos en número, aunque cabe destacar que este

comportamiento no es generalizable a todas las pequeñas y microempresas ya que en muchos casos se presenta un comportamiento ambiental bastante positivo (SEMARNAT, 2010).



Ilustración 6. La industria y la contaminación

1.3.1 Sitios contaminados.

El desarrollo del proceso de industrialización sin la existencia de un marco normativo específico que regulará el manejo y derrame de materiales y residuos peligrosos generó una gran cantidad de suelo contaminado por tales materiales, pues era una práctica común su disposición indiscriminada, principalmente porque la única consideración que se tenía era realizarla al menor costo posible.

De acuerdo con la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR, Art. 5, fracc. XL), un sitio contaminado es un lugar, espacio, suelo, cuerpo de agua, instalación o cualquier combinación de éstos que ha sido contaminado con materiales o residuos que, por sus cantidades y características, pueden representar un riesgo para la salud humana, a los organismos vivos y el aprovechamiento de los bienes o propiedades de las personas.

En la gestión que atiende la SEMARNAT respecto del tema, los sitios contaminados se clasifican en emergencias ambientales y pasivos ambientales, según sea las causas y antigüedad de la contaminación.

a) Pasivo ambiental.

Según el artículo 132, capítulo II, sección I del reglamento de la ley general para la prevención y gestión integral de los residuos publicado en el diario oficial de la federación en noviembre 2006 se considera pasivo ambiental a aquellos sitios contaminados por la liberación de materiales o residuos peligrosos, que no fueron remediados oportunamente para impedir la dispersión de contaminantes, pero que implican una obligación de remediación. Entonces por pasivo ambiental se entenderá la suma de los daños no compensados producidos por una empresa al medio ambiente a lo largo de su historia.

Con el objeto de conocer a nivel nacional los sitios contaminados considerados pasivos ambientales, la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales durante el 2002 implemento el Sistema Informático de Sitios Contaminados (SISCO; SEMARNAT 2002). Hasta el año 2015, el SISCO registró 625 sitios considerados pasivos ambientales en el territorio nacional, de los cuales 9 se encuentran ubicados en el estado de Zacatecas y solo uno de ellos se encuentra en el programa de remediación de sitios contaminados que dirige SEMARNAT.

b) Emergencia ambiental.

Existe una emergencia ambiental cuando la contaminación del sitio derive de una circunstancia o evento, indeseado o inesperado, que ocurra repentinamente y que traiga como resultado la liberación no controlada, incendio o explosión de uno o varios materiales o residuos peligrosos que afecten la salud humana o el medio ambiente, de manera inmediata (SEMARNAT, 2010).

1.3.2 Residuo peligroso.

Se considera como peligroso aquellos residuos que se encuentren dentro de las características que presenta la NOM-052-ECOL-1993 que establece las características de los residuos peligrosos, e listado de los mismos y los límites que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente.

1.3.3 Tipos de contaminantes.

Los contaminantes primarios son los que se emiten directamente a la atmósfera: CO, SO₂, NO_x proceden de fuentes varias, como son el tráfico, las calderas, las industrias, los procesos de fabricación y se pueden prevenir poniendo medidas de control en la fuente de origen de la contaminación: filtros, quemadores con bajas emisiones de NO_x, combustibles con bajos contenidos en azufre.

Los contaminantes secundarios son aquellos que se forman mediante procesos físico-químicos que se dan en la atmósfera. Normalmente se forman a partir de contaminantes primarios, por lo que la medida de prevención y corrección más adecuada para los contaminantes secundarios es el control de los primarios en la fuente de origen. Entre otros, el ozono troposférico (formado mediante reacción fotoquímica en presencia de NO_x y compuestos orgánicos volátiles) y el ácido sulfúrico (de la reacción entre el agua de lluvia y el azufre que se desprende en combustiones de carbón y fuel) son contaminantes secundarios. (Gobierno de la Roja, 2016).

a) Contaminantes antropogénicos.

La Contaminación antropogénica es aquella producida por los humanos, algunas de las más importantes son Industriales. Según el tipo de industria se producen distintos tipos de residuos, las más peligrosas son las que producen contaminantes más peligrosos, como metales tóxicos (Reyes, s.f.).

1.3.4 Elementos tóxicos.

La posición y clasificación de los elementos químicos en el clásico sistema periódico (tabla) de los elementos, no se encuentra ordenada y no muestra cuales de esos elementos son necesarios para el funcionamiento de los organismos, ni cuales pueden generar toxicidad crónica a organismos vivos. Esto debido a que el factor que ordena el sistema periódico solo considera factores fisicoquímicos de los elementos (Flores, 2018).

Muchos de estos elementos son micronutrientes necesarios para la vida de los seres vivos y deben ser absorbidos por las raíces de las plantas o formar parte de la dieta de los animales.

Pero cuando por motivos naturales o por la acción del hombre se acumulan en los suelos, las aguas o los seres vivos en concentraciones altas se convierten en tóxicos peligrosos.

1.3.5 Revalorización de residuos.

Son el conjunto de acciones cuyo objetivo es recuperar el valor económico de los residuos mediante la utilización de una de las estrategias de tratamiento de residuos

CAPÍTULO III

1. METODOLOGÍA

1.1 Muestreo.

Se muestrearon los residuos de la mina “El Bote”, ubicada en las coordenadas $22^{\circ}47'13''$ N y $102^{\circ}36'31''$ W con un área aproximada de $115,467.71 \text{ m}^2$ y un perímetro cercano a los $1,253.7 \text{ m}$.

El muestreo se realizó con base en la norma NMX-AA-132-SCFI-2016 en la cual se establecen las especificaciones técnicas para la obtención y manejo de muestras que permitan la caracterización de suelos del área de estudio, a través de la identificación y cuantificación de metales y metaloides.

Inicialmente se estableció un plan de muestreo que contenía entre otras cosas, la información necesaria sobre la realización de la actividad, como el objetivo y las especificaciones técnicas del muestreo.



Ilustración 7. Toma aérea de relaves mina “El Bote”

1.1.1 Tipo de muestreo.

Se seleccionó un muestreo exploratorio que tiene por objetivo obtener las muestras de suelo representativas para establecer la presencia de contaminación y, en su caso, la distribución horizontal de la misma, y valorar su posible migración vertical.

El muestreo exploratorio se realizó en dos fases. En la primera, se tomó muestras de suelo superficial y en la segunda, se tomó muestras en perfiles de suelo (muestreo vertical).

Para el muestreo superficial se tomó una muestra simple, en cada punto de muestreo, la profundidad del muestreo tuvo un intervalo de 0 a 5 cm a partir de la superficie y el número mínimo de puntos de muestreo fue determinado de la manera siguiente:

$$n = 11.71 A^{0.3} \quad \text{Ec. 1}$$

Dónde:

n = Número mínimo de puntos de muestreo

A = Superficie del suelo del área de estudio expresada en hectáreas

$$n = 11.71 (11.54Ha)^{0.3} = 24 \text{ puntos}$$

Aplicando la Ec. 1 el número mínimo de puntos superficiales que se obtiene como resultado son 24.

Para el muestreo vertical se realizó a través de pozos que permitan describir el perfil del suelo y obtener muestras a la profundidad proyectada de aproximadamente 30 cm

Se tomó una muestra simple para cada intervalo y punto de muestreo el número mínimo de pozos de muestreo se determinó de la siguiente manera:

$$n = 2.26 A^{0.31} \quad \text{Ec. 2}$$

Dónde:

n = Número mínimo de puntos de muestreo

A = Superficie del suelo del área de estudio expresada en hectáreas

$$n = 2.26 (11.54Ha)^{0.31} = 5 \text{ puntos}$$

Aplicando la Ec. 2 el número mínimo de puntos verticales que se obtienen como resultado son 5.

1.1.2 Método de muestreo.

Una vez que se determinó el número de puntos de muestreo de acuerdo al tipo de muestreo que se realizó, estos puntos de muestreo se distribuyeron eligiendo algún método de muestreo.

Se seleccionó un método de muestreo sistemático, ya que se basa en un patrón geométrico específico donde las muestras son tomadas a intervalos regulares a lo largo de este patrón. Útil para cubrir en forma fácil y uniforme un sitio, de forma que la población de muestras esté representada en la muestra.

El muestreo se realizó por medio de una cuadrícula sobrepuesta a toda la superficie por estudiar y el tamaño de los cuadros es función del número de puntos de muestreo y de la superficie de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$l = \left(\frac{A}{n_{min}}\right)^{0.5} \quad \text{Ec. 3}$$

Dónde:

l = Es la longitud de los lados de cada una de las figuras geométricas utilizadas de igual tamaño, en m.

A = Superficie del suelo del área de estudio expresada en m^2 .

n_{min} = Es el número de puntos de muestreo de acuerdo con la Ecuación 1 y 2 según el caso.

$$l = \left(\frac{115437.71}{24}\right)^{0.5} = 69.36 \text{ m}$$

La longitud de los cuadros se redondeó hacia abajo, aun cuando el número de puntos de muestreo haya aumentado. Las muestras fueron tomadas en las intersecciones de la retícula de la cuadrícula.

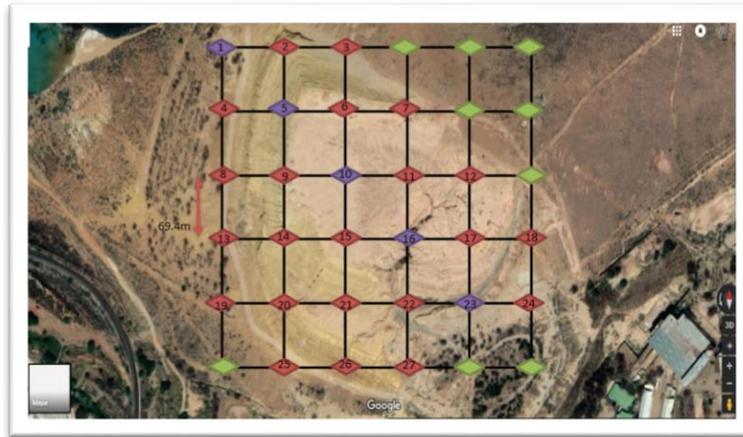


Ilustración 8. Cuadrícula sobrepuesta a la superficie por estudiar

Al inicio del muestreo fueron considerados solo los puntos marcados con color rojo y morado debido a que los residuos mineros no cuentan con una estructura uniforme las puntas de las cuadrículas no se encontraban dentro del área a estudiar, debido a lo anterior, los puntos verdes fueron removidos como puntos de muestreo desde un inicio. Los puntos de muestreo marcados con color morado representan las dos tomas de muestra, las muestras superficiales y los 5 puntos de muestras verticales. Los puntos 25, 26 y 27 al final del muestro fueron eliminados debido a su difícil acceso para la toma de muestra.

1.1.3 Toma y manejo de muestra.

Una vez decidido el tipo y método de muestreo que se realizaría se procedió a la toma de muestras. Como herramienta para la colecta de muestras de suelo en campo, se utilizó un muestreador de suelo con una altura de 30 cm y una pala de dimensiones pequeñas con características de resistencia al desgaste, fácil de limpiar, que no contaminara las muestras con impurezas y que no alterara las características de la muestra. Se evitó que los equipos provocaran contaminación entre las diferentes muestras, para lo cual se lavó con agua antes de la toma de cada muestra. Se garantizó que la muestra obtenida sea suficiente para su preparación y la aplicación de los métodos de medición necesarios, colectando por lo menos 500 g de suelo por punto. La muestra de cada punto se confino en envases (bolsas de plástico) con capacidad para contener al menos los 500 g de suelo.

Además, se utilizó durante el muestreo bolígrafos, marcadores, etiquetas, cinta métrica o flexómetro, una cámara fotográfica, una libreta de campo. Una fotografía aérea del área de estudio, con la ubicación propuesta de los puntos de muestreo que permitió la ubicación de los puntos de muestreo. Y un contenedor que aseguro la integridad de las muestras durante su transporte.



Ilustración 9. Toma de muestra

Previo a la toma de una muestra, se retiró los materiales mayores a 2 cm, así como los restos de plantas. Se tomó fotografías del área de estudio y de los puntos de muestreo. La toma de muestras se apegó al plan de muestreo, las incidencias y desviaciones al mismo se justificaron y documentaron en la libreta de campo.

Al obtener las muestras de suelo, se registró toda la información de muestreo en la libreta de campo. Las muestras se envasaron, etiquetaron y sellaron conforme a las siguientes especificaciones.

El etiquetado y sellado de los recipientes se realizó inmediatamente después de recolectar cada una de las muestras. La etiqueta fue colocada en un lugar visible y no sobrepaso las dimensiones del envase. La etiqueta que acompañó a la muestra incluía: fecha y hora en que se tomó la muestra, lugar del muestreo o proyecto, número o clave de identificación, así como las iniciales de la persona que tomó la muestra.

Una vez que se envasaron, etiquetaron y sellaron, las muestras se llevaron al laboratorio en donde serán preparadas conforme a la naturaleza de las sustancias a medir, y sometidas a los métodos de medición correspondientes.

1.1.4 Consideraciones durante el muestreo.

Durante el traslado, se evitó el efecto de factores externos que pudieran cambiar la naturaleza de las muestras. La cadena de custodia en original debió acompañar a las muestras desde su toma, durante su traslado y hasta el ingreso al laboratorio.

La cadena de custodia contuvo la siguiente información: El nombre de la empresa y responsable del muestreo, los datos de identificación del área de estudio, la fecha y hora en que se tomó la muestra y el nombre completo y las iniciales de la persona que la tomó, el número o clave única de cada muestra, el número de folio único, el nombre del laboratorio que recibe las muestras y condiciones en las que las recibe, los métodos de medición requeridos para cada muestra y el número de envases consignados así como un apartado para observaciones.

Toda la información concerniente al muestreo en campo se anotó con tinta indeleble, en una libreta de campo. Se anotó: el nombre de la persona que realizó el muestreo, los datos de ubicación del área de estudio, la clave de identificación de cada una de las muestras tomadas y el punto de muestreo correspondiente, la ubicación de los puntos de muestreo, la fecha y hora de recolección de cada muestra.



Ilustración 10. Etiqueta de muestra, cadena custodia y transporte de muestras

Las observaciones de campo al momento del muestreo: Características del sitio, condiciones climáticas, presencia de vegetación, uso actual del suelo, edificaciones e infraestructura, actividades ajenas al proceso propio de contaminación que pudieran influir en la calidad del muestreo y presencia de residuos o materiales de relleno.

1.2 Caracterización.

1.2.1 Análisis granulométrico.

Ya instaladas las muestras en el laboratorio metalúrgico, la muestra general de sitio se homogenizó por el método de cono y cuarteo para tomar una muestra representativa de aproximadamente 500 g.

La muestra de 500g se homogenizó nuevamente y por el método del caracol se obtuvo una muestra de exactamente 200g destinada para un análisis granulométrico. La muestra se colocó en una charola y se extendió en ella para ser secada en un horno a una temperatura de 35°C con el propósito de facilitar el manejo de las muestras, mejorar la homogeneización y disminuir los cambios químicos no deseados.

Una vez seca las muestras, se obtuvo el peso seco y se disgregó. La disgregación de las muestras se realizó manualmente, con un mazo tipo rodillo de acero, teniendo cuidado de no generar más finos que los que originalmente posee la muestra.

Se deslamo por la malla 400, para eliminar la mayor cantidad de finos posibles. El -400 se filtró y seco a una temperatura aproximada de 100°C. El +400 se secó en una charola a una temperatura aproximada de 100°C.



Ilustración 11. Sistema de mallas para análisis granulométrico

Para el análisis granulométrico se seleccionó las siguientes mallas: 35, 50, 70, 100, 150, 200, 270, 325 y 400 para ser introducidas al ROTAP por 15 minutos y así llevar a cabo la separación por tamaños de las partículas. Trascurridos los 15 minutos, las mallas fueron extraídas del ROTAP y se procedió a pesar el contenido que fue retenido en cada una de estas.

1.2.2 Análisis elemental ICP (Geoquímica).

A partir de las muestras obtenidas del granulométrico y el compósito global del muestreo se realizó una caracterización geoquímica empleando un equipo de Plasma de acoplamiento inductivo – espectrometría de emisión óptica (ICP-OES) marca PerkinElmer modelo Optima 7300 DV.



Ilustración 12. Digestión ácida de muestra de relave para análisis de ICP

Se pesó 0.2g de muestra y se depositó en un vaso de precipitado de 100 mL. Se colocó en las campanas de extracción y se agregaron 5mL de HNO_3 y 10 mL de HCl , se tapó con un vidrio de reloj. Se colocó en una parrilla de calentamiento a una temperatura de aproximadamente 100°C y se bajaron hasta su sequedad. Se lavó el vidrio con agua destilada y agregado 20 mL de HCl y se aforo con agua destilada hasta un volumen de 50 mL. Se colocó nuevamente el vidrio de reloj en el vaso y se calentó en la parrilla hasta llegar a un volumen de 30mL. Se lavó nuevamente el vidrio de reloj y fue filtrada la solución con un filtro del número 1 en matraces

volumétricos de 100 ml. Se aforo el matraz con la solución hasta un volumen de 100 mL, agitado y depositado en tubos de ensaye para su análisis.

1.2.3 Análisis mineralógico de Rayos X.

La estructura cristalina se analizó empleando un difractómetro Bruker D8 Advance con radícula $K\alpha$ Cu (1.54\AA) empleando la configuración haces paralelos. Para las muestras se usó una velocidad de barrido de 0.9 spp y el intervalo 2θ de 10 a 100° . Esta técnica permite determinar el tamaño de cristal, la fase cristalina y la orientación preferencial (si existe).

1.3 Diseño experimental.

La siguiente tabla muestra el diseño experimental que se seleccionó para la realización de las pruebas, en la que se puede observar el número total de pruebas a realizar y las variables más importantes en cada una de ellas.

Tabla 1. Diseño experimental y número de pruebas

Composición		% de Cemento	Días de fraguado	No°
Diseño experimental	Cemento y Jal	10	7	1
			14	2
			28	3
			35	4
		20	7	5
			14	6
			28	7
			35	8
		30	7	9
			14	10
			28	11
			35	12
		40	7	13
			14	14

		28	15
		35	16
		7	17
	50	14	18
		28	19
		35	20
		7	21
	10	14	22
		28	23
		35	24
		7	25
	20	14	26
		28	27
		35	28
		7	29
Cemento,	30	14	30
Jal y		28	31
Acelerante		35	32
		7	33
	40	14	34
		28	35
		35	36
		7	37
	50	14	38
		28	39
		35	40
		7	41
	10	14	42
Cemento,		28	43
Jal y Aditivo		35	44
	20	7	45

	14	46
	28	47
	35	48
	7	49
30	14	50
	28	51
	35	52
	7	53
40	14	54
	28	55
	35	56
	7	57
50	14	58
	28	59
	35	60

En el anexo informativo A, se encuentra una descripción somera de cada una de las pruebas a realizar, señalando los elementos por los cuales se compone, así como la composición exacta de cada uno de los cilindros de concreto.

Fue necesario la realización de cilindros o especímenes de prueba que están compuestos de los materiales utilizados actualmente por la industria de la construcción, que serán llamados a partir de ahora y para efectos de este trabajo “blancos” que tendrán el mismo diseño experimental presentado para las pruebas de 28 y 35 días.

En el anexo informativo B, se encuentra una descripción somera de cada una de los Blancos a realizar, señalando los elementos por los cuales se compone, así como la composición exacta de cada uno de ellos.

En la siguiente tabla se puede observar la fecha exacta de la elaboración de los cilindros, así como la fecha en la cual la prueba se realizó, se agrega además la variable de días de fraguado.

Tabla 2. Calendarización de pruebas

Prueba	Especificación	ID ¹	Fecha de elaboración	Fecha de Prueba	Días de fraguado	Lugar y Hora		
Ensayo de resistencia	Concreto	1, 5, 9, 13, 17 21, 25, 29, 33, 37 41, 45, 49, 53, 57	Viernes 29 de Marzo	Viernes 5 de Abril	7 días	Edificio de Pesados 1, Laboratorio de CNC y tecnología de materiales 11:00 am		
		2, 6, 10, 14, 18 22, 26, 30, 34, 38 42, 46, 50, 54, 58						
		3, 7, 11, 15, 19 23, 27, 31, 35, 39 43, 47, 51, 55, 59						
		4, 8, 12, 16, 20 24, 28, 32, 36, 40 44, 48, 52, 56, 60						
		B1, B5, B9, B13, B17 B21, B25, B29, B33, B37 B41, B45, B49, B53, B57						
	Blancos	B2, B6, B10, B14, B18 B22, B26, B30, B34, B38 B42, B46, B50, B54, B58	Jueves 4 de Abril	Jueves 9 de Mayo	35 días			
		B1, B5, B9, B13, B17 B21, B25, B29, B33, B37 B41, B45, B49, B53, B57						
		Martes 9 de Abril					Martes 7 de Mayo	28 días
		Martes 2 de Abril					Martes 30 de Abril	28 días
		Martes 7 de Mayo					35 días	
Lixiviación	Concreto	L1, L2, L3, L4, L5 L6, L7, L8, L9, L10 L11, L12, L13, L14, L15	Miércoles 17 de Abril	Miércoles 8 de Mayo	28 días	Edificio de Pesados 2, Laboratorio de Metalurgia 1		

¹La composición de cada una de los concretos y blancos realizados se presenta en anexo informativo A, B y C.

1.3.1 Determinación de la composición de especímenes.

La norma ASTM C31 para la preparación y curado de probetas de concreto especifica que, los especímenes deben ser cilindros de concreto vaciado y fraguado en posición vertical, de altura igual a dos veces el diámetro. Se seleccionó un diámetro de 1.85 pulgadas lo que corresponde a 3.70 pulgadas de altura. Lo que arroja un volumen de 162.98 cm³.

La siguiente tabla muestra los datos necesarios para la determinación de la composición de los especímenes.

Tabla 3. Densidades de componentes

Elemento	Densidad (g/cm³)
Cemento	3.08
Jal	2.59
Arena	1.69
Acelerante	1.33
Aditivo	1.24
Agua	1.00

Con base en el diseño experimental planteado anteriormente, en donde se especifica el porcentaje volumen de cemento, se determinó los cm³ que pertenecerían al cemento y gracias a la densidad del cemento pudo calcularse la cantidad en g de cemento.

Una vez determinado la cantidad de cemento, fue calculado el agua de adición para mezclado que corresponde a una relación agua/cemento en masa de 0.23. Entonces para cada uno de los porcentajes volumen de cemento corresponderá una determinada cantidad de agua.

El cálculo de la adición de acelerante se realizó con base en la masa previamente calculada del cemento. Entonces la masa del aditivo corresponderá al 2% de la masa del cemento en la mezcla. Gracias a la densidad del acelerante pudo calcularse la cantidad en ml de este.

Para el cálculo de la determinación del aditivo impermeabilizante se utilizó una relación de 100L de aditivo por cada m³ de cemento utilizado. Entonces para el cálculo del aditivo se consideró una relación de aditivo/cemento de 0.1.

En resumen, sobre las relaciones:

ID	Relación
agua/cemento	0.23
acelerante/cemento	0.02
impermeabilizante/cemento	0.1

El jal y la arena adicionada se calcularon haciendo la resta del volumen total necesario menos el volumen total gastado por los componentes del espécimen. Gracias a la densidad del jal y la arena pudo calcularse la cantidad en g de estos componentes.

La composición específica de cada una de los concretos y blancos realizados se presenta en anexo informativo A y B.

1.3.2 Elaboración de especímenes.

La elaboración de los especímenes se basó en la norma ASTM C31 que lleva por nombre "ELABORACION Y CURADO EN OBRA DE ESPECÍMENES DE CONCRETO PARA PRUEBAS DE COMPRESIÓN" Esta norma establece las especificaciones técnicas necesarios para elaborar y curar muestras cilíndricas y vigas de hormigón en obra para proyectos de construcción, que puede ser compactado mediante varillado o vibración. Además, este ensayo proporciona los estándares necesarios para la realización de curado, protección y transporte de los especímenes de ensayo del concreto bajo las condiciones de campo.

Se seleccionó un tubo de PVC como molde, debido a que se aseguraba que este no fuera absorbente ni reaccionara con el cemento, el tubo fue elegido de un diámetro de 1.85 pulgadas y se cortó a una altura de 3.70 pulgadas.

Para la elaboración de los especímenes correspondientes al tratamiento 1, se pesó y añadió a una bolsa de plástico la cantidad indicada de cemento en la tabla de composiciones más un 10% en masa en exceso, se agregó la cantidad indicada del agregado utilizado más un 10% en masa en exceso. La bolsa se cerró para poder hacer una mezcla lo más homogénea posible de estos dos componentes. Una vez que se encontrara lo suficientemente homogénea se depositó en un recipiente de plástico y se agregó la cantidad indicada de agua con ayuda de una jeringa. Para después mezclar con una barra de madera lo suficiente hasta que se formó una pasta.

Para los especímenes correspondientes al tratamiento 2, en los que era necesario la adición de acelerante, se pesó y añadió a una bolsa de plástico la cantidad indicada de cemento en la tabla de composiciones más un 10% en masa en exceso, se agregó la cantidad indicada de agregado más un 10% en masa en exceso. La bolsa se cerró para poder hacer una mezcla

lo más homogénea posible de estos dos componentes. Una vez que se encontrara lo suficientemente homogénea, se colocó la cantidad indicada de agua en un recipiente de plástico y se agregó los ml necesarios del acelerante lo anterior con la ayuda de una jeringa, se agitó la solución hasta homogenizar. La mezcla solida fue agregada al recipiente de plástico y se procedió a mezclar con una barra de madera lo suficiente hasta que se formó una pasta.

Para los especímenes correspondientes al tratamiento 3, en los que era necesario la adición del aditivo impermeabilizante, se pesó y añadió a una bolsa de plástico la cantidad indicada de cemento en la tabla de composiciones más un 10% en masa en exceso, se agregó la cantidad indicada de agregado más un 10% en masa en exceso. La bolsa se cerró para poder hacer una mezcla lo más homogénea posible de estos dos componentes. Una vez que se encontrara lo suficientemente homogénea, con ayuda de una jeringa se colocó la cantidad indicada de agua en un recipiente de plástico y se agregó los g necesarios del aditivo impermeabilizante lo anterior con la ayuda de una espátula, posteriormente se agito la solución hasta homogenizar. La mezcla solida se agregó al recipiente de plástico y se procedió a mezclar con una barra de madera lo suficiente hasta que se formó una pasta.



Ilustración 13. Pasta de concreto

Antes de usarse, los moldes se cubrieron ligeramente con aceite mineral que fungió como agente separador de encofrado no reactivo. El molde se colocó sobre una superficie rígida, horizontal, nivelada y libre de vibración.

Se colocó el concreto mezclado en el interior del molde, depositándolo con cuidado alrededor del borde para asegurar la correcta distribución del concreto y una segregación mínima. El molde fue llenado en tres capas de igual volumen. En la última capa se agregó la cantidad de concreto suficiente para que el molde quede lleno después de la compactación.

Se ajustó el sobrante o faltante de concreto con una porción de mezcla y completar el número de golpes faltantes. Cada capa se compacto con ayuda de una varilla, haciendo aproximadamente 25 penetraciones, distribuyéndolas uniformemente en forma de espiral y terminando en el centro.

Después de compactar cada capa, se golpeó a los lados del molde ligeramente de 10 a 15 veces con ayuda de un mazo de goma para liberar las burbujas de aire que puedan estar atrapadas.

Se enrasó el exceso de concreto con la varilla de compactación, debe darse el menor número de pasadas para obtener una superficie lisa y acabada.

Después de elaboradas las probetas se transportarán al lugar de almacenamiento donde deberán permanecer sin ser perturbados durante el periodo de curado inicial. Las probetas se retiraron de los moldes entre las 18 y 24 hrs. después de ser elaboradas. Hecho esto se marcarán en la cara circular de la probeta las anotaciones correctas respecto al tipo de mezcla o ID.



Ilustración 14. Vista superior de una de las caras del espécimen No. 6

Para la curación de los especímenes, después de desmoldar las probetas y antes de que transcurran 30 minutos después de haber removido los moldes, se almacenaron las probetas en condiciones adecuadas de humedad.

El método de curado utilizado fue el siguiente: las probetas se cubrieron por agua a 25°C durante un periodo de tiempo de 40 minutos dos veces al día, por los primeros 7 días de fraguado.

Antes de realizar el ensayo se dejó constancia del peso y dimensiones de las probetas, así como de la fecha y hora del ensayo.

a) Elaboración de cilindros de concreto para ensayo.

Para la elaboración de los especímenes de concreto para ensayo se siguió los pasos anteriores, cumpliendo las especificaciones de la norma ASTM C31. Se utilizó como agregado el relave y se basó en la composición de los concretos presentada en anexo informativo A.

b) Elaboración de cilindros blancos para ensayo.

Para la elaboración de los especímenes blancos para ensayo se siguió los pasos anteriores y se cumplieron las especificaciones de la norma ASTM C31. Se utilizó como agregado la arena y se basó en la composición de los blancos presentada en anexo informativo B.

c) Elaboración de cilindros de concreto para lixiviación.

Para la elaboración de los especímenes de concreto para lixiviación se siguió los pasos anteriores y se cumplieron las especificaciones de la norma ASTM C31. Se utilizó la composición de los concretos presentada en anexo informativo C.

1.4 Ensayo de resistencia a la compresión.

Previo al ensayo de resistencia a la compresión, cada uno de los especímenes se preparó al ser pasado por papel abrasivo para agua del número 80 con el objetivo de eliminar las irregularidades de cada una de las caras de estos.

La altura y el diámetro de cada uno de los cilindros se midieron en dos sitios, y se promedió para calcular el área de la sección.



Ilustración 15. Cuerpo y altura de los especímenes de concreto y blanco

Los ensayos de resistencia a la compresión se basaron en la norma ASTM C39 que lleva por nombre "MÉTODO DE ENSAYO NORMALIZADO PARA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE ESPECÍMENES CILÍNDRICOS DE CONCRETO". Este ensayo permite la determinación de la resistencia a la compresión (f_c) de los especímenes cilíndricos de concretos moldeados en laboratorio, en campo u obtenidos por medio de la extracción de núcleos.

Los extremos de las probetas no deben presentar desviación con respecto a la perpendicularidad del eje del cilindro, y los extremos deben de hallarse planos. Los cilindros se deben centrar en la máquina de ensayo de compresión y cargados hasta completar la ruptura.

Este método de ensayo consistió en la aplicación de una carga de compresión axial a los cilindros moldeados o núcleos, en una máquina universal de ensayos marca SHIMADZU, a una velocidad de carga especificada, es decir para este ensaye un avance de 0.3 mm/min.

El ensaye se terminó cuando el cilindro se fracture y la máquina detecte la falla.

La resistencia del concreto se calcula dividiendo la máxima carga soportada por la probeta para producir la fractura entre el área promedio de la sección.

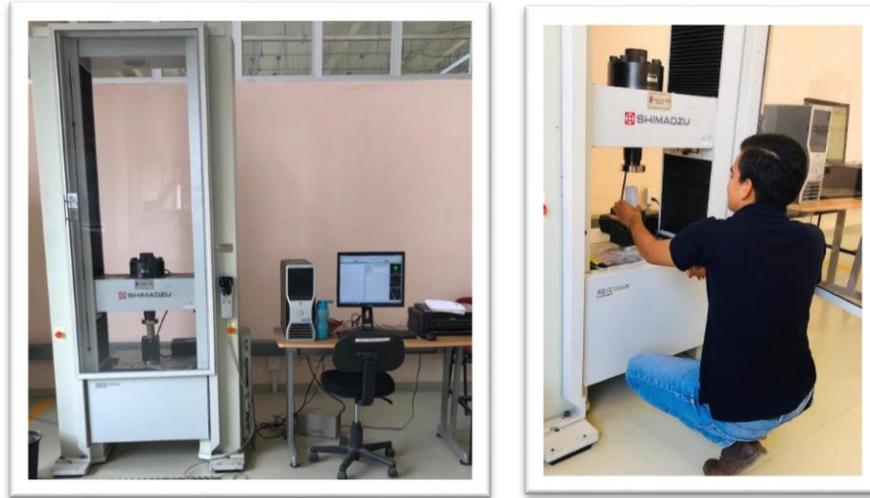


Ilustración 16. Máquina universal de ensayos

1.5 Análisis de su estabilización-solidificación.

1.5.1 Ensayo de lixiviación de especímenes.

Los ensayos de lixiviación se realizaron a partir de una modificación del trabajo “Pruebas de lixiviación como evaluación ambiental de materiales”, que presento la Secretaria de Comunicaciones y Transporte y el Instituto Mexicano del Transporte en el 2018. Que está basado en las normas NOM-053-SEMARNAT-1993 y NOM-155-SEMARNAT-2007.

El ensayo se realizó como lixiviación estática, en un recipiente se colocó el material en estudio (15 especímenes previamente elaborados para lixiviación). Una vez adentro, se agregó agua destilada, hasta su saturación. Después de 24 horas el espécimen se retiró, y se filtró el agua resultante.

La composición de los 15 especímenes lixiviados se encuentra en el apéndice informativo C.

a) Análisis de agua lixiviada

Las 5 primeras soluciones (L1-L5) obtenidas después del culmino de la prueba (eluyente) se sometieron a análisis elemental empleando un equipo de Plasma de acoplamiento inductivo – espectrometría de emisión óptica (ICP-OES) marca Perkin Elmer modelo Optima 7300 DV, para determinar concentraciones de, plata (Ag), arsénico (As), Bario (Ba), bismuto (Bi), Calcio

(Ca), cadmio (Cd), cobalto (Co), cromo (Cr), cobre (Cu), hierro (Fe), plomo (Pb), selenio (Se) y zinc (Zn) ya que así lo permite el análisis.

b) Ensayo de toxicidad aguda con semillas de lechuga.

Este ensayo fue realizado para las 15 aguas resultantes del ensayo de lixiviación y para un blanco que contenía como solución agua destilada estéril.

Se colocó en una caja Petri un disco de papel de filtro. Se marcó correctamente cada caja con el ID correspondiente, así como la fecha y hora de inicio y termino del bioensayo. Se saturó el papel de filtro con 5 ml de la solución evitando que se formaran bolsas de aire. Con la ayuda de una pinza, se colocó cuidadosamente 20 semillas de lechuga (*Lactuca Sativa L.*), dejando espacio suficiente entre las semillas para permitir la elongación de las raíces.

Se taparon las cajas para evitar la pérdida de humedad. Dado que algunas variedades de semillas de lechuga requieren oscuridad para que se produzca la germinación (semillas fotoblasticas negativas), las cajas de Petri se cubrieron de la luz inmediatamente después de colocarlas las semillas en su interior y durante el periodo de ensayo se incubó por 120 horas (5 días) a una temperatura de $22^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$.



Ilustración 17. Ensayo de toxicidad de aguas lixiviadas

Después de las primeras 24 horas de incubación, se realizó un primer conteo de las semillas germinadas de cada una de las cajas Petri. Terminado el periodo de exposición (120 horas), se procede a cuantificar el efecto en la germinación en la elongación de la radícula y del hipocotíleo.

CAPÍTULO IV

1. RESULTADOS, ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

1.1 Muestreo.

Como resultado entonces del muestreo se obtuvieron, 24 muestras superficiales, 5 muestras de perfil vertical y aproximadamente 24.5 kg de muestra tomadas como composito de los 24 puntos de muestra superficial.



Ilustración 18. Muestra total resultante del muestreo

1.2 Caracterización.

1.2.1 Análisis granulométrico.

Una vez obtenida la muestra seca para el granulométrico, fue pesada, arrojando un valor de 193.9g de muestra, que contra un peso inicial de 200g de la misma muestra nos arrojaría entonces un resultado de humedad de 3.45%.

Los resultados obtenidos a partir del análisis granulométrico son los siguientes:

Tabla 4. Análisis granulométrico del composito de muestreo

Malla	Tamaño (Mm)	Peso (g)	Peso (%)	A(+)	A(-)
35	500	2.700	1.398	1.398	98.602
50	297	14.700	7.613	9.011	90.989
70	210	25.500	13.206	22.216	77.784
100	149	27.100	14.034	36.251	63.749
150	104	31.600	16.365	52.615	47.385
200	74	8.000	4.143	56.758	43.242
270	53	37.300	19.316	76.075	23.925
325	44	8.000	4.143	80.218	19.782
400	37	4.300	2.227	82.444	17.556
-400	-37	33.900	17.556	100.000	0.000
	TOTAL	193.100	100.000		

Los resultados obtenidos del ensayo granulométrico de la muestra de jales se recogen en la Tabla 1, y gráficamente en el Gráfico 1. La curva granulométrica se ha dibujado representando el porcentaje de tamaño de partícula de jal que pasa por cada tamiz en ordenadas respecto al logaritmo de malla en abscisas.

Este análisis se hace importante debido a la variedad de tamaños de partículas que presentan los jales, ya que la distribución de los metales es diferente en cada fracción granulométrica. Según la bibliografía cuanto más fino son los sedimentos mayor concentración de metales acumulados, fenómeno que se atribuye a la elevada superficie específica que poseen las partículas finas favoreciendo la absorción.

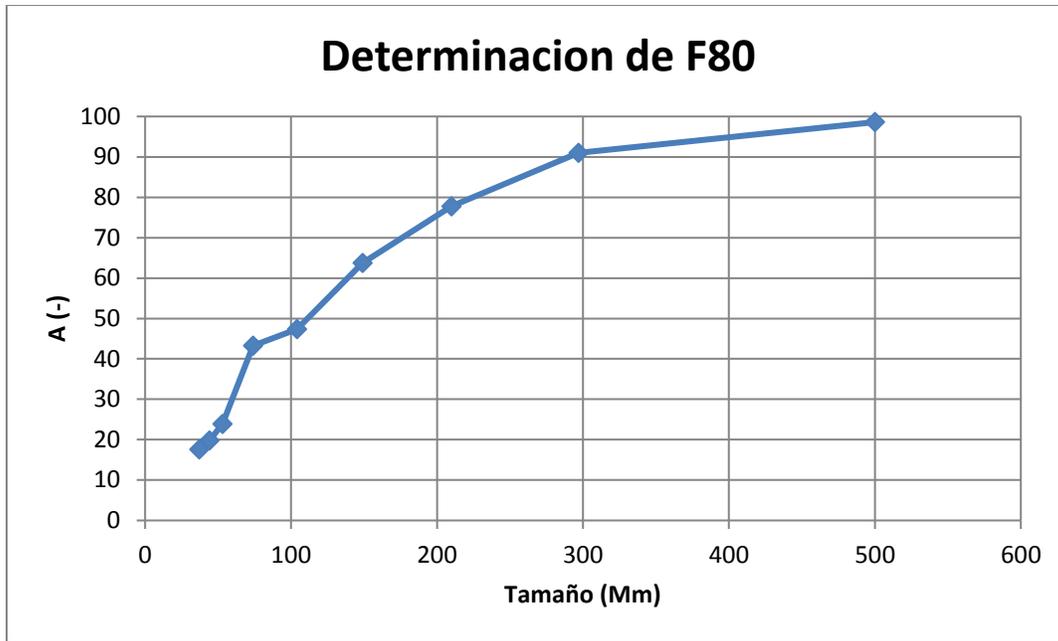


Gráfico 1. Determinación de F80 de análisis granulométrico

La curva granulométrica es una representación gráfica de los resultados del ensayo de granulometría.

A partir de los resultados mostrados en el gráfico 1 es posible determinar el F80 que nos indicara el tamaño de tamiz que deja pasar 80% de las partículas de la alimentación del circuito. El cual nos da un valor aproximado de 245.66Mm que corresponde a la malla 60.

1.2.2 Caracterización geoquímica.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos del ensayo a la muestra de composito global:

Tabla 5. Resultados de ensayo de muestra composito general.

No.	Descripción	Ag	Pb	Zn	Cu	As	Fe
		gr/t	%	%	%	%	%
1	Muestra global	11.000	0.190	0.005	0.040	0.000	4.940

En la tabla 6 se presentan los resultados obtenidos del ensaye químico a las muestras obtenidas del ensayo granulométrico para así poder obtener un análisis valorado.

Tabla 6. Resultados de ensaye de muestras por tamaños

No.	Descripción	Ag	Pb	Zn	Cu	As	Fe
		gr/t	%	%	%	%	%
1	Muestra malla 35	0	0.04	-	-	-	2.63
2	Muestra malla 50	-	0.03	-	-	-	2.62
3	Muestra malla 70	-	0.03	-	-	-	2.92
4	Muestra malla 100	-	0.04	-	-	-	3.11
5	Muestra malla 150	-	0.05	-	-	-	3.36
6	Muestra malla 200	-	0.05	-	-	-	3.71
7	Muestra malla 270	-	0.09	0.03	0.01	-	4.64
8	Muestra malla 325	0.3	0.13	0.07	0.20	-	4.9
9	Muestra malla 400	40	0.30	0.36	0.20	0.02	7.94
10	Muestra malla -400	14	0.09	0.04	-	-	4.44

Se puede observar que debido a los estándares colocados y la finalidad del ensaye en ICP en el lugar donde fue realizado algunos valores no fueron alcanzados a medir por la curva de calibración.

1.2.3 Caracterización mineralógica

La siguiente ilustración muestra los resultados de la caracterización por difracción de rayos x realizada a una muestra representativa del relave utilizado.

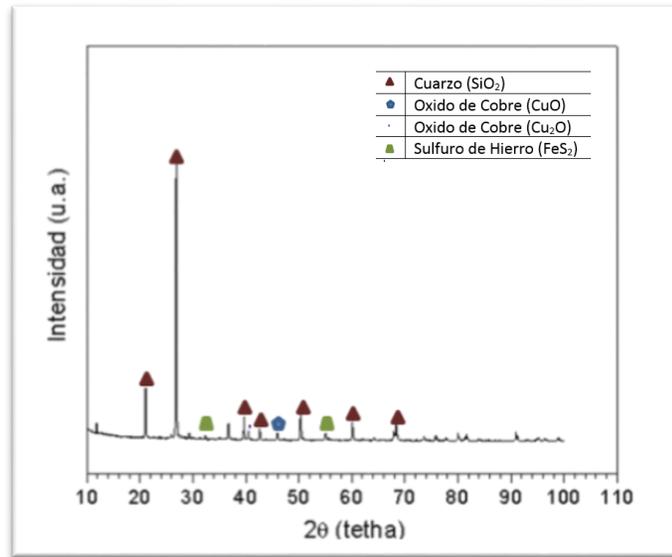


Ilustración 19. Análisis de difracción de rayos X

Los resultados revelan la presencia en mayor porcentaje de sílice en forma de cuarzo (SiO₂). Lo anterior es posible visualizar debido los picos generados de mayor intensidad, favorecidos en los planos (100) y (101), que corresponden a la fase alfa con una estructura cristalina romboédrica. Sin embargo, existe de igual manera la presencia de otros elementos, solo que, en cantidades menores, los cuales no son muy significativos respecto al porcentaje presente en la muestra analizada, dichos compuestos corresponden principalmente a óxidos de cobre y sulfuro de hierro. Cabe mencionar que posiblemente exista trazas de elementos como plomo y zinc en forma de sulfuros y óxidos, pero en cantidades mínimas, corroborando así los resultados arrojados por el análisis de ICP.

1.3 Diseño experimental.

1.3.1 Elaboración de especímenes.

Como resultado entonces de la elaboración de los especímenes para ensayos, se tienen entonces 60 especímenes de concretos (para ensayar su resistencia a la compresión) de diferente composición, 30 especímenes de blancos (para ensayar su resistencia a la compresión y 15 especímenes de concretos (para análisis de su estabilidad-solidificación). La composición puede observarse con detalla en los apéndices informativos A, B y C respectivamente.

1.4 Ensayo de resistencia a la compresión.

A continuación, se presentan tablas con los resultados arrojados por el ensayo de resistencia a la compresión de los especímenes y blancos indicados.

Una vez iniciado el ensayo cuando la máquina detecta la primera fractura en la pieza, registra ese valor de carga en kN (PSF_Carga), si el ensayo se deja correr por los siguientes minutos y la carga sigue aumentando hasta que la pieza se fractura completamente, la máquina registra también el valor máximo de carga aplicado a la pieza en kN antes del término del ensayo (Max Carga). El esfuerzo es un valor que arroja la máquina y que es calculado dividiendo la carga en N entre el área de la pieza en mm², el PSF_Esfuerzo es entonces el esfuerzo que calcula la máquina al realizarse la primera fractura de la pieza, y el Max esfuerzo es el esfuerzo calculado por la máquina que indica el valor máximo en N/mm² que se registra antes del culmino del ensayo. En ocasiones la máquina universal de ensaye no detecta la primera fractura de la pieza y por lo tanto no registra dicho valor de carga, como el valor de carga no es registrado no realiza el cálculo de esfuerzo.

La resistencia a la compresión en los concretos es medida normalmente en Kg/cm², este valor no es proporcionado por los resultados del ensaye, sin embargo, es calculado de la siguiente ecuación.

$$\left(\frac{N}{mm^2}\right)\left(\frac{1kgf}{9.81 N}\right)\left(\frac{10mm}{1cm}\right)^2 = \frac{kg}{cm^2} \quad Ec.4$$



Ilustración 20. Ensayo de resistencia a la compresión de especímenes

La siguiente tabla muestra los resultados del ensayo de resistencia a la compresión de los especímenes de concretos compuestos por cemento, jal y agua. En donde se puede observar la carga máxima (kN) el esfuerzo máximo (N/mm²) y la resistencia calculada (kg/cm²).

Tabla 7. Resultados ensayo de resistencia a la compresión especímenes de concreto 1-20

No	Fraguado	Peso	Diámetro	Altura	PSF_Carga	Max Carga	PSF_Esfuerzo	Max Esfuerzo	Resistencia
	Días	g	mm	mm	kN	kN	N/mm ²	N/mm ²	Kg/cm ²
1	7	289.96	46.5	93.01	-	2.867	-	1.688	17.207
2	14	291.26	46.5	93.04	3.687	3.844	2.171	2.263	23.072
3	28	290.36	46.5	94.83	-	10.172	-	5.990	61.057
4	35	290.61	46.5	91.77	-	7.773	-	4.577	46.660
5	7	296.91	46.5	91.93	-	18.781	-	11.059	112.731
6	14	298.21	46.5	93.05	21.031	23.680	12.384	13.944	142.138
7	28	297.31	46.5	93.71	-	22.445	-	13.217	134.728
8	35	297.56	46.5	93.23	4.328	18.711	2.549	11.018	112.312
9	7	312.02	46.5	92.00	6.078	17.758	3.579	10.457	106.591
10	14	313.32	46.5	92.90	20.531	21.672	12.090	12.762	130.091
11	28	312.42	46.5	93.51	19.883	23.820	11.708	14.027	142.986
12	35	312.67	46.5	92.42	14.359	24.719	8.456	14.556	148.378
13	7	306.56	46.5	91.30	18.508	16.859	8.193	9.928	101.198
14	14	307.86	46.5	92.15	28.156	20.266	16.480	11.933	121.640
15	28	306.96	46.5	92.04	7.555	31.953	4.449	18.816	191.799
16	35	307.21	46.5	91.72	21.961	39.234	12.932	23.103	235.504
17	7	315.55	46.5	93.00	18.508	35.360	10.898	20.821	212.245
18	14	316.85	46.5	91.98	47.023	50.500	27.690	29.737	303.127
19	28	315.95	46.5	91.89	15.484	24.711	9.118	14.551	148.327
20	35	316.2	46.5	91.19	-	7.867	-	4.633	47.223

La Tabla 7 muestra los resultados obtenidos, a partir del ensayo de resistencia a la compresión para los especímenes que contienen únicamente: cemento, jal y agua (Ir a anexo informativo A, para ver composición exacta). Se puede observar que para distintos porcentajes en volumen de cemento puede destacar una resistencia mayor que es marcada con rojo. Siendo 61.057, 142.138, 142.986, 235.504 y 303.127 kg/cm² la resistencia mayor obtenida para los tratamientos de 10, 20, 30, 40 y 50% en volumen de cemento respectivamente.

Esta resistencia, contrario a lo que la teoría dice no siempre es obtenida a los 28 días de fraguado, sino a los 14 días para el caso de los especímenes No. 6 y 18 que corresponden a 20 y 50% en volumen de cemento respectivamente. Para el caso específico de del espécimen No. 16 en el que su resistencia máxima se encuentra a los 35 días de fraguado corresponde un 40% en volumen de cemento.

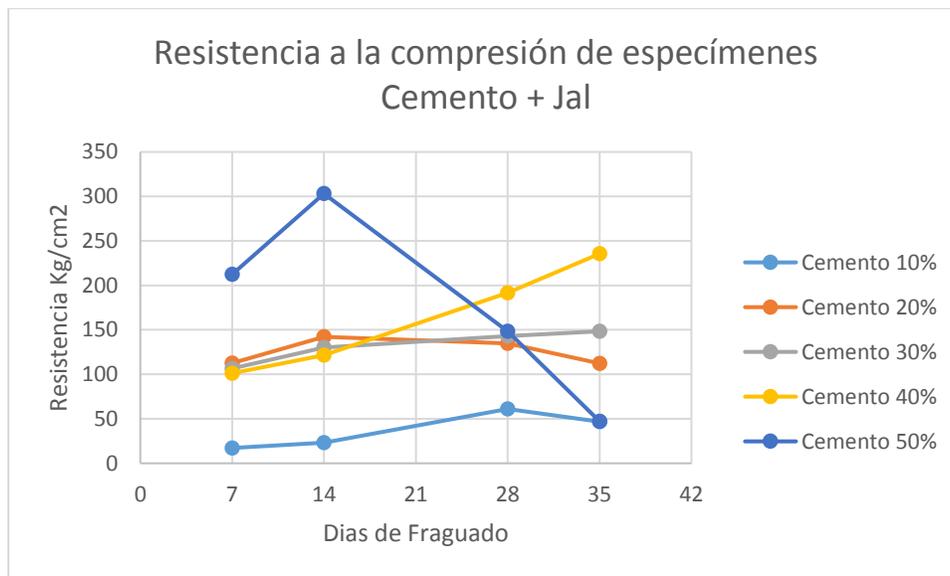


Gráfico 2. Resistencia a la compresión de especímenes de concreto Cemento+Jal

En el Gráfico 2 se observa un resumen de las resistencias obtenidas para cada uno de los ensayos de compresión, el gráfico muestra el comportamiento de la resistencia calculada, de cada una de las composiciones de los concretos al incrementar los días de fraguado.

Para los especímenes de concretos que les corresponde una composición de 10, 20, 30, y 40% de cemento se muestra una tendencia un tanto ideal al incrementar los días de fraguada, se puede observar en la gráfica que para los concretos con composición de 50% en volumen de cemento la tendencia es que al aumentar los días de fraguado la resistencia disminuye

considerablemente, incluso presenta un valor final de resistencia a los 35 días de 47.223 kg/cm² que es mucho menor al presentado en un inicio de 212.245 kg/cm² que corresponde a los 7 días de fraguado, para esta misma línea se observa el punto más alto registrado para la resistencia a los 14 días con un valor 303.127 kg/cm².

En la Tabla siguiente se observa los resultados obtenidos a partir de los ensayos de resistencia a la compresión de los especímenes denominados blancos, se puede observar en las pruebas marcadas con rojo, que para los especímenes a los cuales les corresponde una composición de 10, 20 y 30% en volumen de cemento la resistencia máxima se obtiene a los 35 días. Mientras que para los especímenes a los cuales les corresponde una composición de 40 y 50% en volumen de cemento la resistencia máxima se obtiene a los 28 días de fraguado.

Tabla 8. Resultados ensayo de resistencia a la compresión especímenes de blancos 1-10

No	Fraguado	Diámetro	Altura	PSF_Carga	Max Carga	PSF_Esfuerzo	Max Esfuerzo	Resistencia
	Días	mm	mm	kN	kN	N/mm ²	N/mm ²	Kg/cm ²
1	28	46.5	94.55	-	7.320	-	4.405	44.901
2	35	46.5	92.81	-	10.375	-	6.109	62.276
3	28	46.5	96.43	26.344	27.797	15.852	16.726	170.497
4	35	46.5	92.84	13.875	33.617	8.170	19.796	201.787
5	28	46.5	95.95	14.781	23.117	8.894	13.910	141.794
6	35	46.5	89.87	33.219	35.664	19.561	21.001	214.074
7	28	46.5	93.03	8.852	23.563	5.326	14.178	144.525
8	35	46.5	91.02	13.813	15.961	8.133	9.399	95.805
9	28	46.5	92.98	29.148	35.352	17.539	21.272	216.835
10	35	46.5	92.68	6.102	29.484	3.593	17.362	176.980

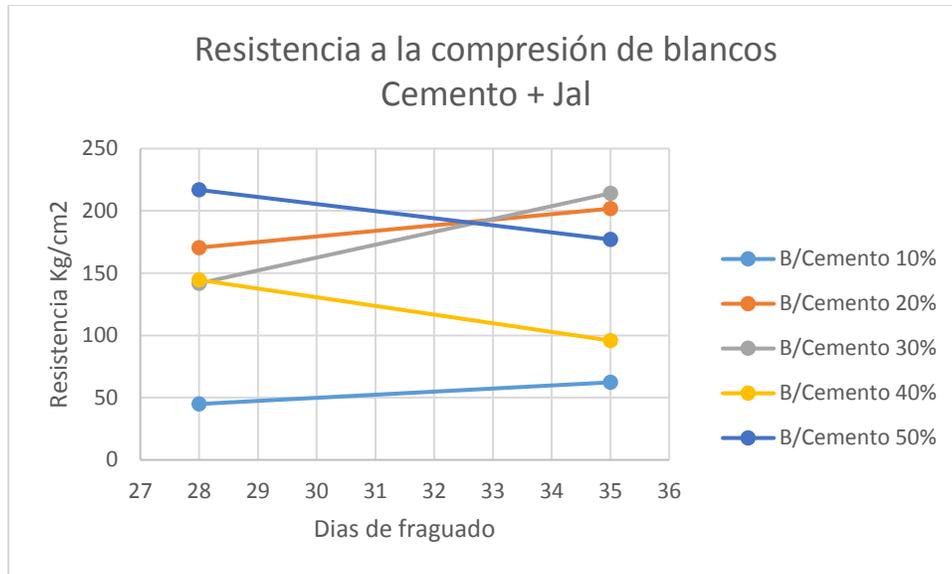


Gráfico 3. Resistencia a la compresión de especímenes de blancos Cemento+Jal

En el Gráfico 3 muestra la tendencia de resistencia que cada una de las composiciones de los especímenes blancos presenta al aumentar los días de fraguado. Para el caso de las composiciones con 10, 20 y 30% en volumen de cemento la tendencia mostrada en la gráfica, si bien no es la ideal, si representa un comportamiento esperado. Sin embargo, para las composiciones de 40 y 50% en volumen de cemento la tendencia no es ideal ni esperada, pues se puede observar una tendencia a disminuir la resistencia conforme los días de fraguado aumentan.

La siguiente tabla muestra los resultados del ensayo de resistencia a la compresión de los especímenes de concretos compuestos por cemento, jal, acelerante y agua. En donde se puede observar la carga máxima (kN) el esfuerzo máximo (N/mm²) y la resistencia calculada (kg/cm²)

Tabla 9. Resultados ensayo de resistencia a la compresión especímenes de concreto 21-40

No	Fraguado	Peso	Diámetro	Altura	PSF_Carga	Max Carga	PSF_Esfuerzo	Max Esfuerzo	Resistencia
	Días	g	mm	mm	kN	kN	N/mm ²	N/mm ²	Kg/cm ²
21	7	287.66	46.5	91.50	-	2.391	-	1.407	14.342
22	14	288.96	46.5	92.91	-	7.891	-	4.646	47.363
23	28	288.06	46.5	91.36	-	10.898	-	6.418	65.418
24	35	288.31	46.5	93.20	-	10.492	-	6.178	62.979
25	7	298.7	46.5	91.50	-	16.750	-	9.863	100.539
26	14	300	46.5	91.94	-	29.742	-	17.514	178.528
27	28	299.1	46.5	89.93	16.070	22.539	9.463	13.272	135.290
28	35	299.35	46.5	92.28	15.633	20.070	9.205	11.818	120.472
29	7	309.67	46.5	91.80	11.523	21.805	6.786	12.840	130.883
30	14	310.97	46.5	90.64	18.273	19.734	10.760	11.621	118.456
31	28	310.07	46.5	90.21	-	30.203	-	17.785	181.294
32	35	310.32	46.5	90.08	42.500	46.094	25.026	27.142	276.678
33	7	302.66	46.5	92.50	-	23.094	-	13.599	138.620
34	14	303.96	46.5	92.94	-	34.195	-	20.136	205.257
35	28	303.06	46.5	92.08	56.648	58.773	33.357	34.609	352.787
36	35	303.31	46.5	92.07	38.555	42.469	22.703	25.008	254.918
37	7	296.89	46.5	91.00	10.227	32.711	6.022	19.262	196.347
38	14	298.19	46.5	90.89	13.601	20.516	8.009	12.081	123.145
39	28	297.29	46.5	91.38	14.523	28.414	8.552	16.732	170.555
40	35	297.54	46.5	93.89	13.992	42.648	8.239	25.114	255.997

La Tabla 9 muestra los resultados obtenidos, a partir del ensayo de resistencia a la compresión para los especímenes que contienen cemento, jal, acelerante y agua (Ir a anexo informativo A, para ver composición exacta).

Se destaca que, para cada una de las composiciones realizadas y evaluadas a diferentes días, existe una resistencia. Destacan las marcadas con color rojo en donde las composiciones que contienen 10% en volumen de cemento esta resistencia es presentada a los 28 días con un valor de 65.418 kg/cm², para los especímenes que contienen un 20% en volumen de cemento la resistencia mayor es registrada a los 14 días de fraguado con un valor de 178.528 kg/cm², mientras que para los elaborados con 30% en volumen de cemento la resistencia mayor es de 276.678 kg/cm² que es presentada a los 35 días de fraguado, y para las composiciones elaboradas con 40 y 50% en volumen de cemento la resistencia mayor resultantes es registrada en los días 28 y 35 respectivamente, adquiriendo un valor de 352.787 y 255.997 kg/cm²

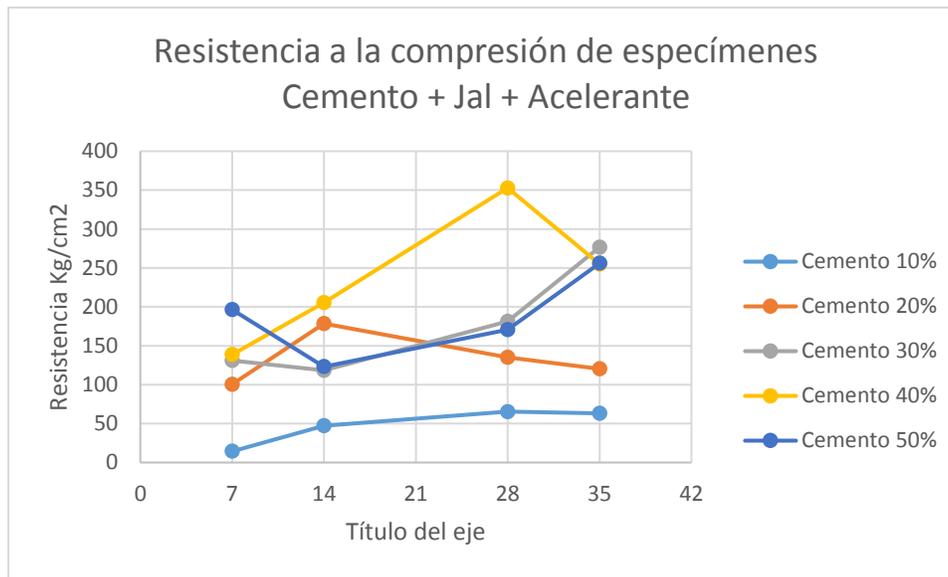


Gráfico 4. Resistencia a la compresión de especímenes Cemento + Jal + Acelerante

En la Gráfico 4 se puede analizar la tendencia que presenta la resistencia de cada una de las composiciones de los especímenes elaborados con cemento, jal, acelerante y agua con respecto a los días de fraguado.

Destaca un comportamiento esperado para los especímenes de 10 y 30% en volumen de cemento, para los especímenes de 50% en volumen de cemento se observa una caída de la resistencia a los 14 días y un aumento de ella en los días 28 y 35. Sin embargo para los elaborados con 40 y 20% en volumen de cemento se observa una tendencia a disminuir su resistencia a partir de los días 14 y 35 respectivamente.

En la tabla siguiente se observa los resultados más relevantes marcados con rojo, obtenidos a partir de los ensayos de resistencia a la compresión de los especímenes denominados blancos, se puede observar que para los especímenes a los cuales les corresponde una composición de 10, 20 y 30 y 40% en volumen de cemento la resistencia máxima se obtiene a los 35 días. Contrario a lo anterior, para los especímenes a los cuales les corresponde una composición de 50% en volumen de cemento la resistencia máxima se obtiene a los 28 días de fraguado.

Tabla 10. Resultados ensayo de resistencia a la compresión especímenes de blancos 11-20

No	Fraguado	Diámetro	Altura	PSF_Carga	Max Carga	PSF_Esfuerzo	Max Esfuerzo	Resistencia
	Días	mm	mm	kN	kN	N/mm ²	N/mm ²	Kg/cm ²
11	28	46.5	93.37	-	7.570	-	4.555	46.434
12	35	46.5	92.24	-	12.484	-	7.351	74.937
13	28	46.5	94.89	13.750	20.633	8.274	12.415	126.556
14	35	46.5	94.36	32.070	40.953	18.885	24.115	245.821
15	28	46.5	92.49	11.117	11.422	6.689	6.873	70.058
16	35	46.5	93.85	11.125	38.087	6.551	22.422	228.564
17	28	46.5	93.66	10.000	23.906	6.017	14.385	146.634
18	35	46.5	91.47	-	39.656	-	23.352	238.037
19	28	46.5	94.39	10.352	24.555	6.229	14.775	150.611
20	35	46.5	95.19	15.422	19.117	9.081	11.257	114.750

En el gráfico siguiente se muestra la tendencia de resistencia que cada una de las composiciones de los especímenes blancos presenta al aumentar los días de fraguado. Para el caso de las composiciones con 10, 20, 30 y 40% en volumen de cemento la tendencia mostrada en la gráfica, si bien no es la ideal, si representa un comportamiento esperado.

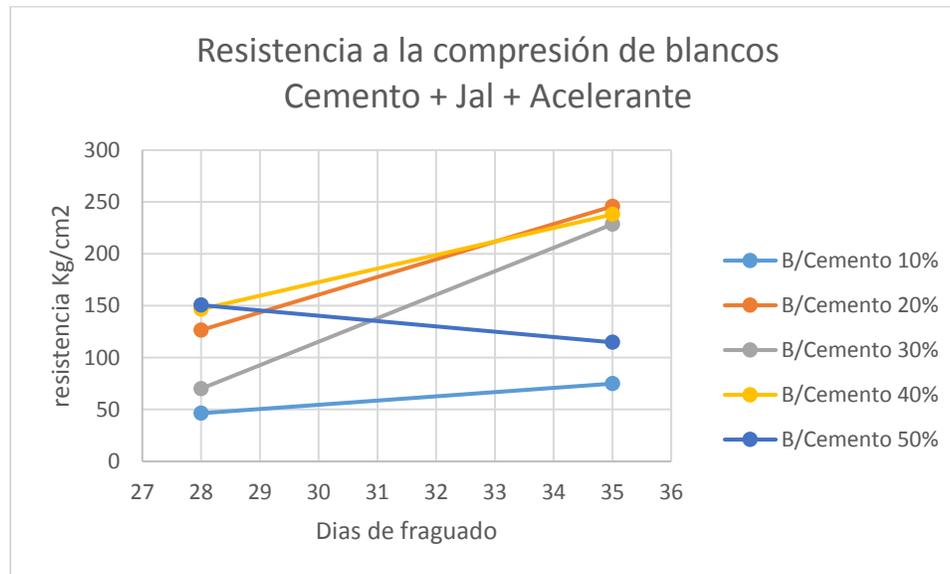


Gráfico 5. Resistencia a la compresión de especímenes de blancos Cemento+Jal+Acelerante

La siguiente tabla muestra los resultados del ensayo de resistencia a la compresión de los especímenes de concretos compuestos por cemento, jal, impermeabilizante y agua. En donde se puede observar la carga máxima (kN) el esfuerzo máximo (N/mm²) y la resistencia calculada (kg/cm²).

Tabla 11. Resultados ensayo de resistencia a la compresión especímenes de concreto 41-60

No	Fraguado	Peso	Diámetro	Altura	PSF_Carga	Max Carga	PSF_Esfuerzo	Max Esfuerzo	Resistencia
	Días	g	mm	mm	kN	kN	N/mm ²	N/mm ²	Kg/cm ²
41	7	280.44	46.5	92.50	-	2.742	-	1.614	16.452
42	14	281.74	46.5	91.93	5.617	5.773	3.308	3.400	34.654
43	28	280.84	46.5	92.71	-	8.023	-	4.725	48.161
44	35	281.09	46.5	95.94	-	10.172	-	5.990	61.057
45	7	289.67	46.5	91.00	-	12.875	-	7.581	77.282
46	14	290.97	46.5	93.20	-	18.156	-	10.691	108.983
47	28	290.07	46.5	91.52	8.914	20.133	5.249	11.855	120.847
48	35	290.32	46.5	93.85	-	26.414	-	15.554	158.550
49	7	297.84	46.5	90.00	9.773	23.625	5.755	13.911	141.803
50	14	299.14	46.5	93.16	-	29.867	-	17.587	179.278
51	28	298.24	46.5	90.72	17.867	28.531	10.521	16.801	171.259
52	35	298.49	46.5	93.37	-	23.039	-	13.567	138.291
53	7	297.84	46.5	90.00	-	19.992	-	11.772	120.003
54	14	299.14	46.5	92.99	23.179	23.945	13.649	14.100	143.730
55	28	298.24	46.5	92.77	8.906	28.109	5.244	16.552	168.727
56	35	298.49	46.5	91.59	31.161	31.406	18.351	18.494	188.516
57	7	302.94	46.5	93.30	17.344	23.281	10.213	13.709	139.744
58	14	304.24	46.5	94.07	6.351	18.922	3.740	11.142	113.578
59	28	303.34	46.5	92.34	18.570	27.617	10.935	16.262	165.772
60	35	303.59	46.5	93.17	16.969	29.828	9.992	17.564	179.043

En la Tabla 11 se pueden observar marcados los valores de resistencia a la compresión más altos que presentaron cada una de las composiciones de los especímenes con cemento, jal impermeabilizante y agua. Destacan entonces que para los días 35, los valores más altos presentados son los de 10, 20 y 40% de cemento con un valor de 61.057, 158.550 y 188.516 kg/cm² respectivamente. Para los especímenes elaborados con 30% en volumen de cemento el valor de resistencia máxima adquirida es de 179.278 kg/cm² que es el valor presentado a los 14 días de fraguado. Por ultimo para los especímenes elaborados con 50% en volumen de cemento la resistencia máxima se registró a los 28 días con un valor de 165.772 kg/cm² (marcadas con rojo).

En el siguiente gráfico se puede analizar la tendencia que presenta la resistencia de cada una de las composiciones de los especímenes elaborados con cemento, jal, impermeabilizante y agua con respecto a los días de fraguado.

Contrario a las gráficas anteriores se muestra una disminución considerable en los valores resultantes de las resistencias, lo cual puede ser a la influencia del tipo de aditivo utilizado. Sin embargo, se observa un comportamiento favorable para los concretos elaborados con 10, 20 y 40% en volumen de cemento.

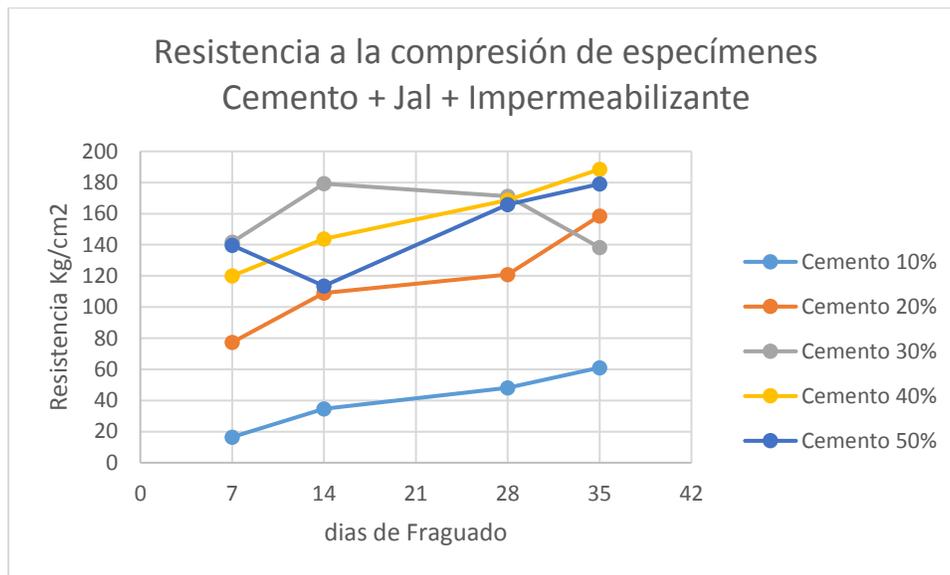


Gráfico 6. Resistencia a la compresión de especímenes Cemento + Jal + Impermeabilizante

En la tabla siguiente se muestran los resultados obtenidos a partir de los ensayos de resistencia a la compresión de los especímenes denominados blancos, se puede observar que existe una tendencia a aparecer la resistencia máxima a los 28 días de fraguado, debido a que solo aparece la resistencia máxima a los 35 días para los especímenes elaborados con 30% de cemento.

Tabla 12. Resultados ensayo de resistencia a la compresión especímenes blancos 21-30

No	Fraguado	Diámetro	Altura	PSF_Carga	Max Carga	PSF_Esfuerzo	Max Esfuerzo	Resistencia
	Días	mm	mm	kN	kN	N/mm ²	N/mm ²	Kg/cm ²
21	28	46.5	91.97	-	10.523	-	6.332	64.548
22	35	46.5	93.51	-	7.195	-	4.237	43.190
23	28	46.5	92.85	-	29.023	-	17.464	178.021
24	35	46.5	92.66	15.148	18.898	8.920	11.128	113.437
25	28	46.5	91.42	6.852	15.664	4.123	9.425	96.079
26	35	46.5	90.19	3.078	27.430	1.813	16.152	164.647
27	28	46.5	91.37	11.219	36.570	6.751	22.005	224.311
28	35	46.5	91.82	22.070	24.125	12.996	14.206	144.810
29	28	46.5	92.95	27.359	43.961	16.463	26.452	269.643
30	35	46.5	92.08	21.531	25.227	12.679	14.933	152.220

La tendencia descrita anteriormente es corroborada en el gráfico siguiente, que muestra a diferencia de los otros blancos, una resistencia máxima adquirida a los 28 días de fraguado.

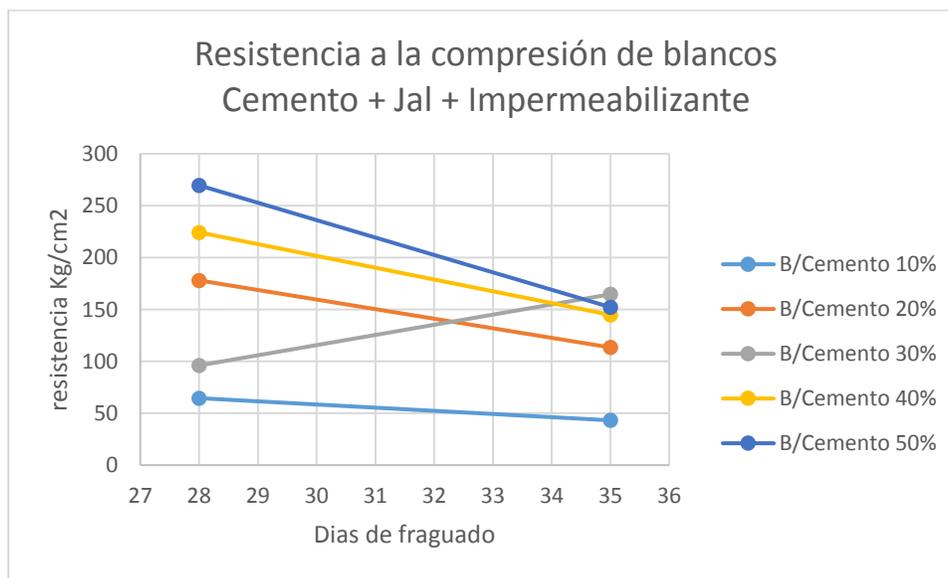


Gráfico 7. Resistencia a la compresión de especímenes de blancos Cemento+Jal+Impermeabilizante

A continuación, se hará un pequeño análisis de comparación entre los especímenes de concreto y los blancos que fueron elaborados bajo las mismas condiciones y composición.

Los siguientes gráficos muestran la comparación de la tendencia entre los especímenes de concreto y los blancos que fueron elaborados con 10% en volumen de cementos para los tres tratamientos.

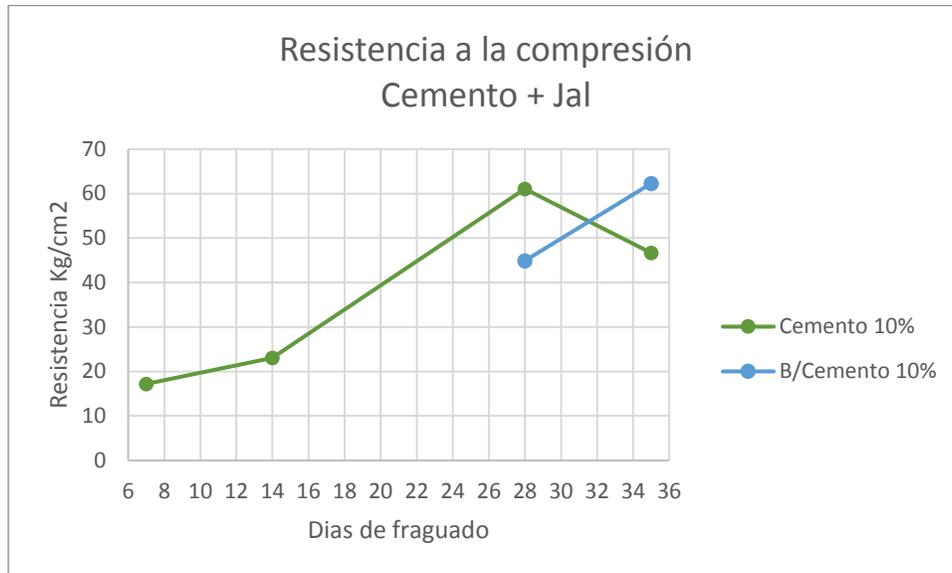


Gráfico 8. Resistencia a la compresión de especímenes de concreto y blancos con Tratamiento 1

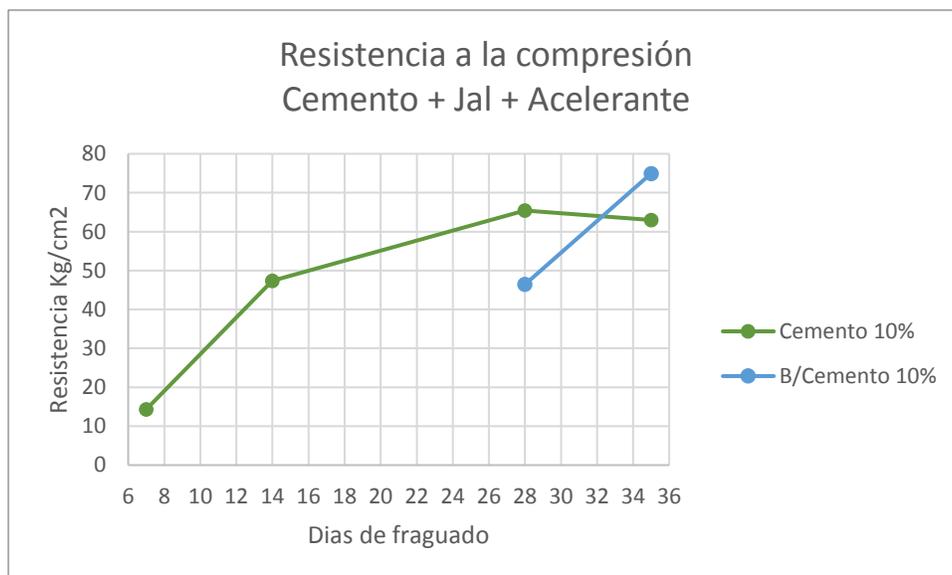


Gráfico 9. Resistencia a la compresión de especímenes de concreto y blancos con Tratamiento 2

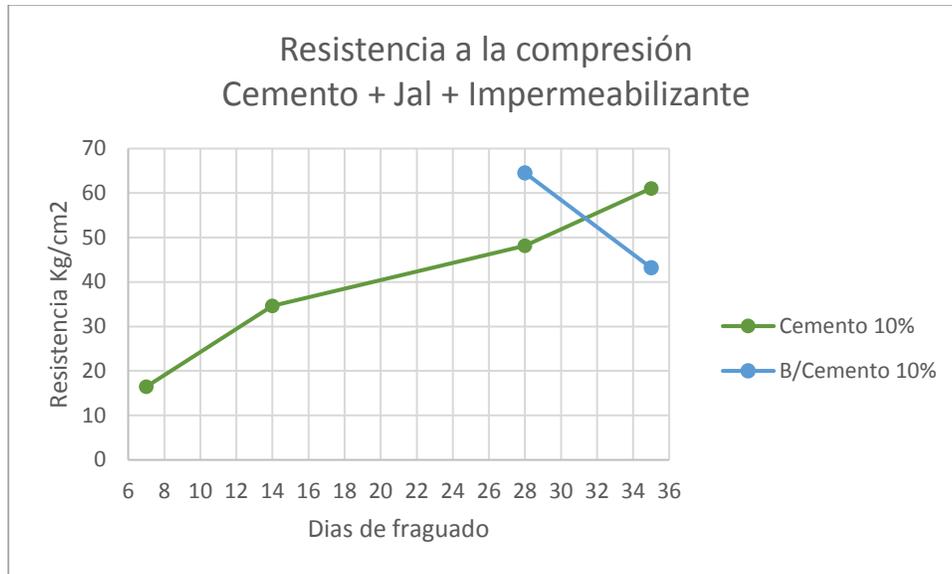


Gráfico 10. Resistencia a la compresión de especímenes de concreto y blancos con Tratamiento 3

Los Gráficos 8, 9 y 10 muestran la tendencia de la resistencia al incrementar los días de fraguado. En el Gráfico 8 y 9 se puede observar como la resistencia adquirida a los 28 días por los especímenes de concreto es superada por la adquirida por los especímenes blancos.

El siguiente gráfico muestran la comparación de la tendencia entre los especímenes de concreto y los blancos que fueron elaborados con 20% en volumen de cementos para el tercer tratamiento.

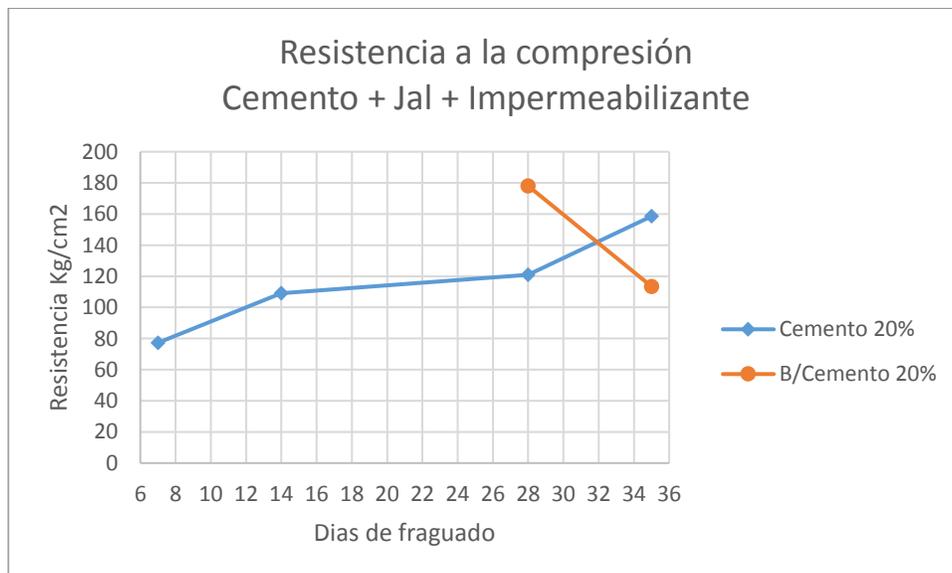


Gráfico 11. Resistencia a la compresión de especímenes de concreto y blancos con Tratamiento 3

En el Gráfico 11 es posible observar como el espécimen de concreto rebasa la resistencia del espécimen blanco a los 35 días de fraguado.

Los siguientes gráficos muestran la comparación de la tendencia entre los especímenes de concreto y los blancos que fueron elaborados con 30% en volumen de cementos para el segundo y tercer tratamiento.

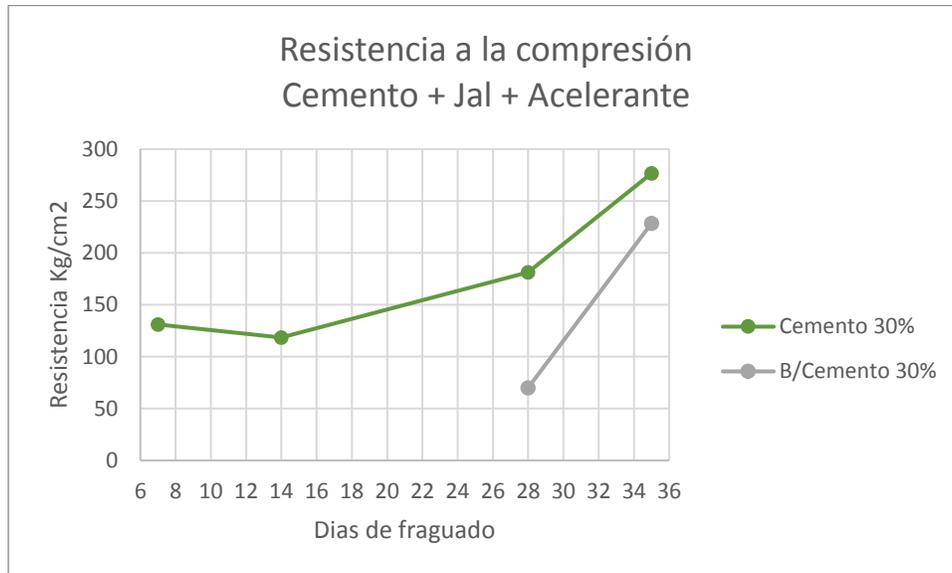


Gráfico 12. Resistencia a la compresión de especímenes de concreto y blancos con Tratamiento 2

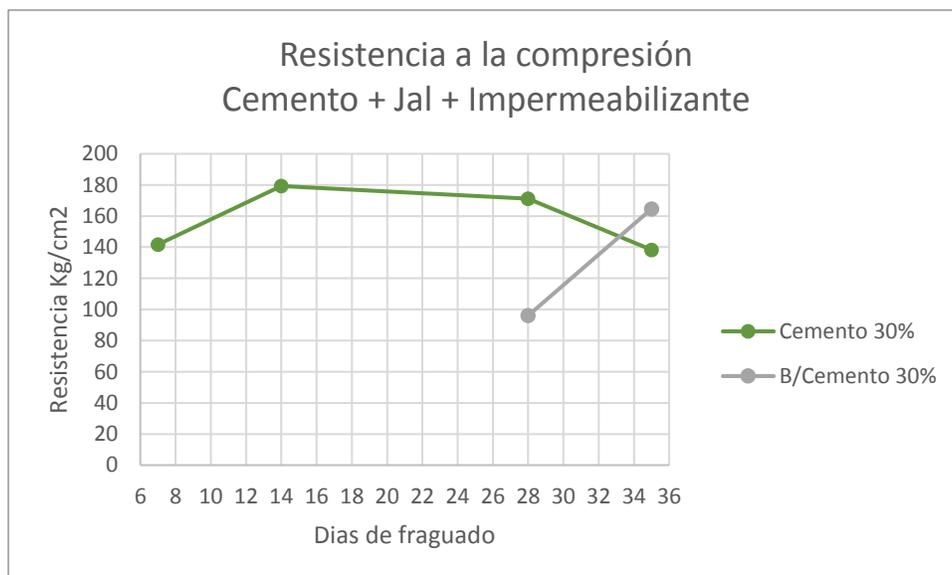


Gráfico 13. Resistencia a la compresión de especímenes de concreto y blancos con Tratamiento 3

Es posible observar en el Gráfico 12 que la tendencia de la resistencia del espécimen de concreto supera en ambos puntos de la gráfica a la presentada por el espécimen blanco. Formando así una de las mejores composiciones ensayadas debido a este resultado. Mientras que en el Gráfico 13, se observa una tendencia a disminuir después de los 28 días de fraguado, pero aun así superando a los 28 días a él espécimen blanco.

Los siguientes gráficos muestran la comparación de la tendencia entre los especímenes de concreto y los blancos que fueron elaborados con 40% en volumen de cementos para el primero y segundo tratamiento.

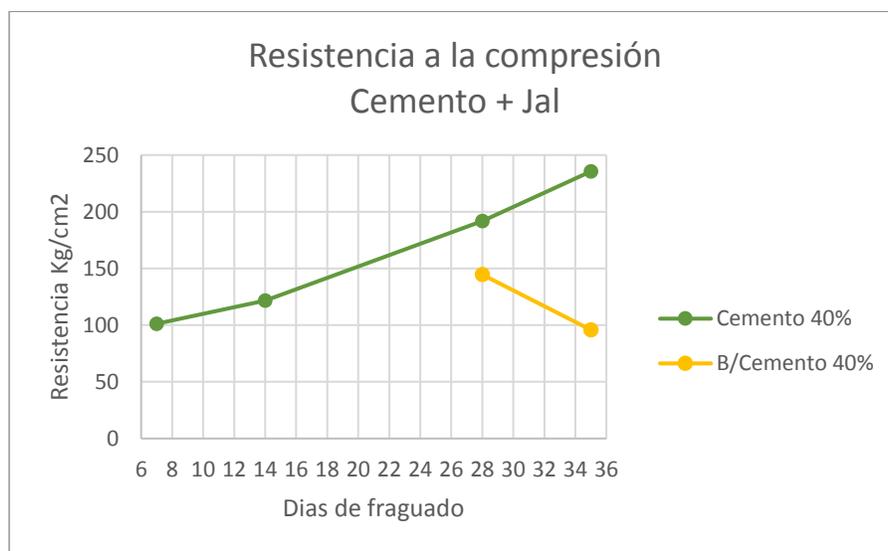


Gráfico 14. Resistencia a la compresión de especímenes de concreto y blancos con Tratamiento 1

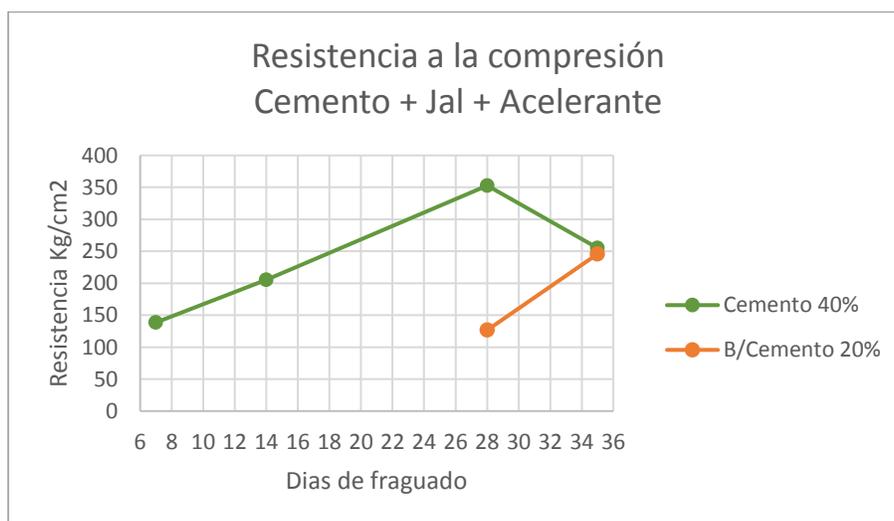


Gráfico 15. Resistencia a la compresión de especímenes de concreto y blancos con Tratamiento 2

En los gráficos 14 y 15, es posible observar como para los tratamientos 1 y 2 cuando el espécimen de concreto está elaborado con 40% en volumen de cemento, supera considerablemente la resistencia registrada para los especímenes blancos elaborados bajo las mismas características. Además, las resistencias registradas son los valores más altos de estas. Siendo estos dos tratamientos bajo estas condiciones de los más representativos y de mejores resultados.

El siguiente gráfico muestran la comparación de la tendencia entre los especímenes de concreto y los blancos que fueron elaborados con 50% en volumen de cements para el tercer tratamiento.

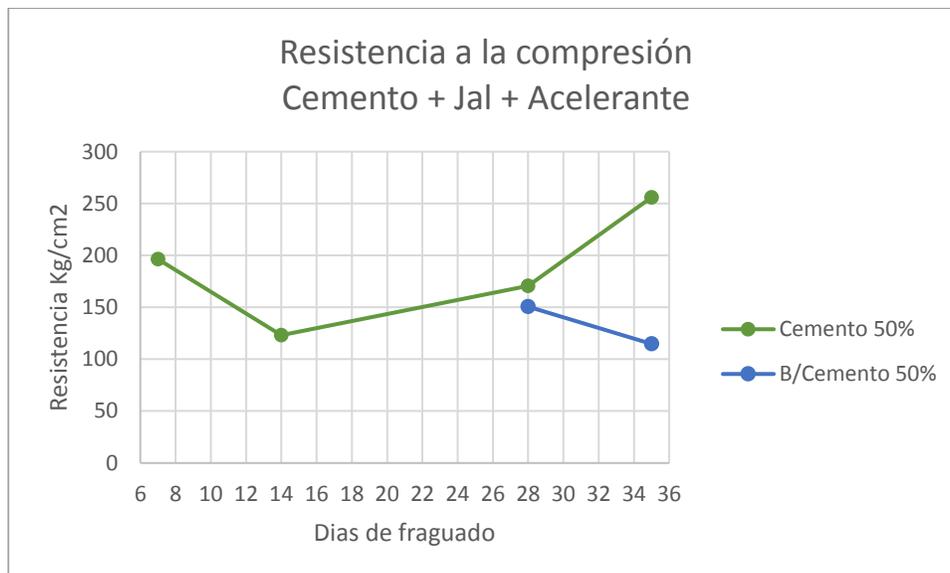


Gráfico 16. Resistencia a la compresión de especímenes de concreto y blancos con Tratamiento 2

En el Gráfico 16 es posible observar como el espécimen de concreto rebasa la resistencia del espécimen blanco a los 28 y 35 días de fraguado.

La siguiente grafica representa un resumen general de las tendencias de resistencias de los especímenes de concretos evaluadas a distintos días de fraguado. En ella se observa para cada uno de los tratamientos se observan las distintas composiciones y su tendencia.

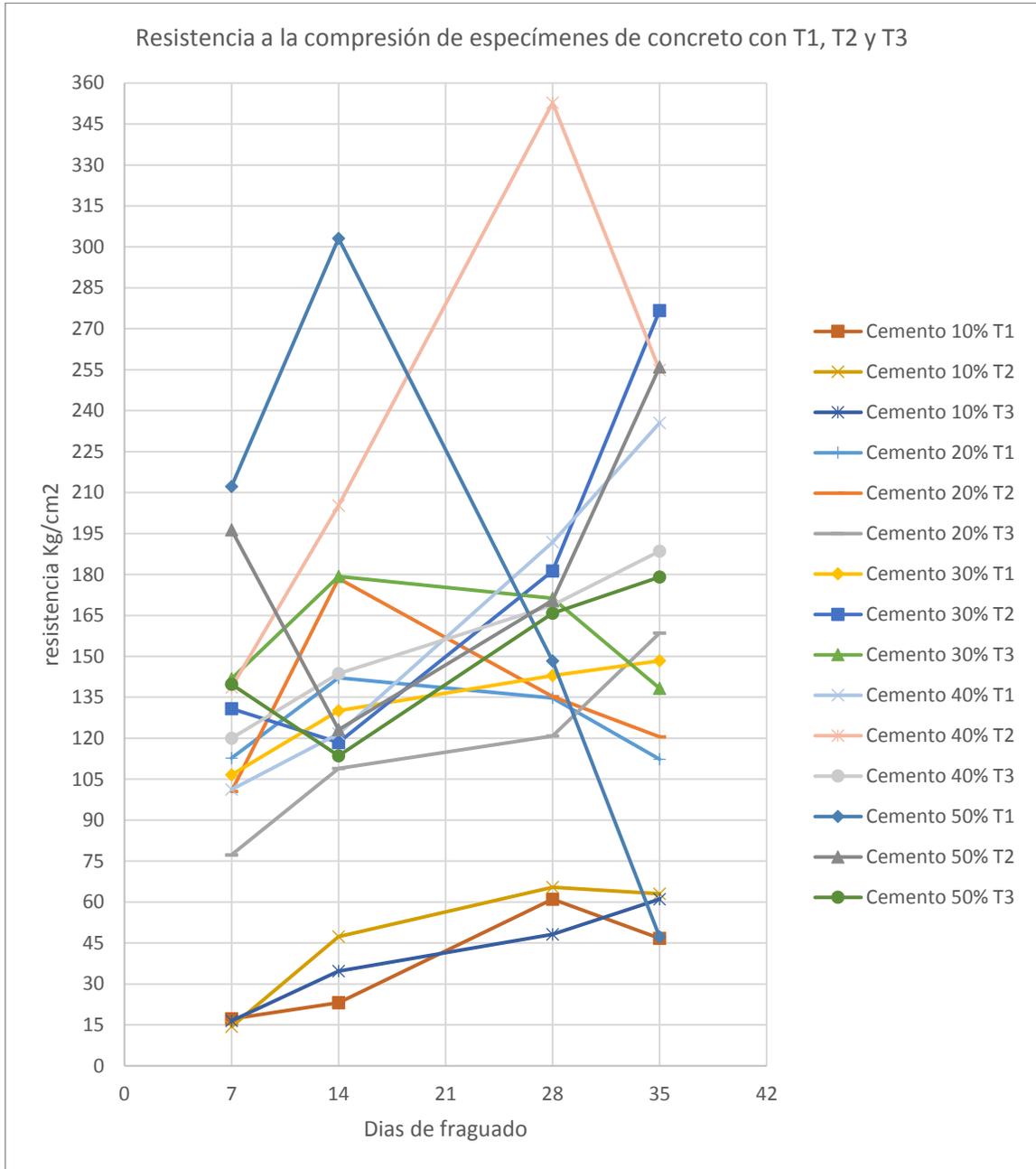


Gráfico 17. Resumen de resistencias de distintas composiciones con distintos tratamientos

1.5 Análisis de su estabilización-solidificación

1.5.1 Ensayo de lixiviación de especímenes de concreto

Los resultados de ensayo de lixiviado (líquido proveniente de los residuos, el cual se forma por reacción química, arrastre o percolación y que contiene, disueltos o en suspensión, componentes que se encuentran en los mismos residuos) son presentados en la siguiente tabla; las 2 últimas filas son los límites máximos permisibles de contaminantes como metales pesados y constituyentes inorgánicos establecidos por las normas NOM-052-ECOL-1999 y NOM-001-SEMARNAT-1996.

Tabla 13. Resultado de análisis de lixiviados por ICP

No°	Ag	As	Ba	Bi	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Pb	Se	Zn
	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
L1	0.000	0.000	0.010	0.000	0.000	0.020	0.160	0.060	0.200	0.030	0.050	0.030
L2	0.000	0.010	0.010	0.000	0.000	0.010	0.110	0.030	0.220	0.010	0.020	0.030
L3	0.000	0.040	0.020	0.000	0.000	0.010	0.110	0.010	0.150	0.050	0.040	0.040
L4	0.000	0.000	0.040	0.010	0.000	0.020	0.100	0.020	0.130	0.000	0.010	0.060
L5	0.000	0.080	0.060	0.010	0.000	0.020	0.040	0.020	0.130	0.000	0.080	0.080
NOM-052	5.000	5.000	100.000	0.100	1.000		5.000			5.000	1.000	
NOM-001		0.200			0.050		0.500	4.000		5.000		10.000

En el siguiente gráfico presenta a manera de resumen los resultados obtenidos mediante el análisis por ICP.

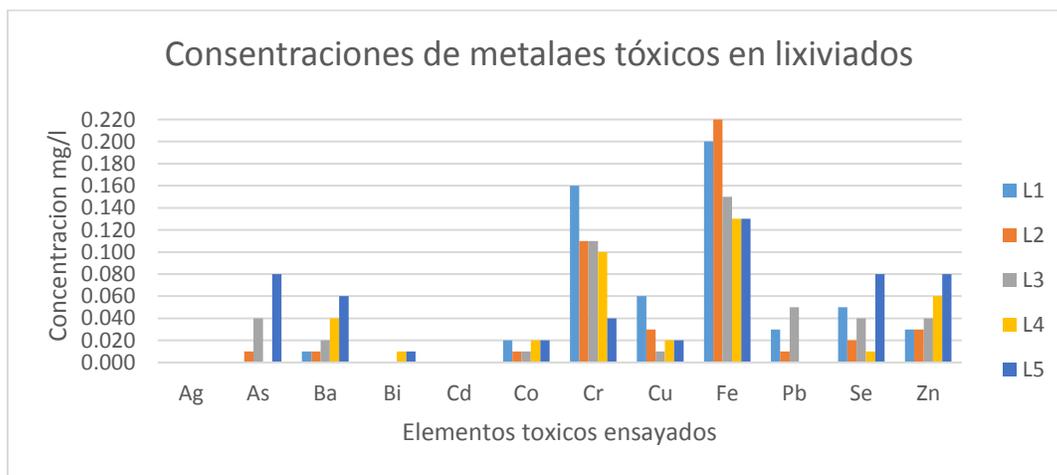


Gráfico 18. Resultado de análisis instrumental de lixiviados

Se puede observar en los siguientes gráficos que las concentraciones de metales pesados se encuentran muy por debajo de los límites permisibles de ambas nomas, sin considerar los elementos que no son tomados en cuenta por estas.

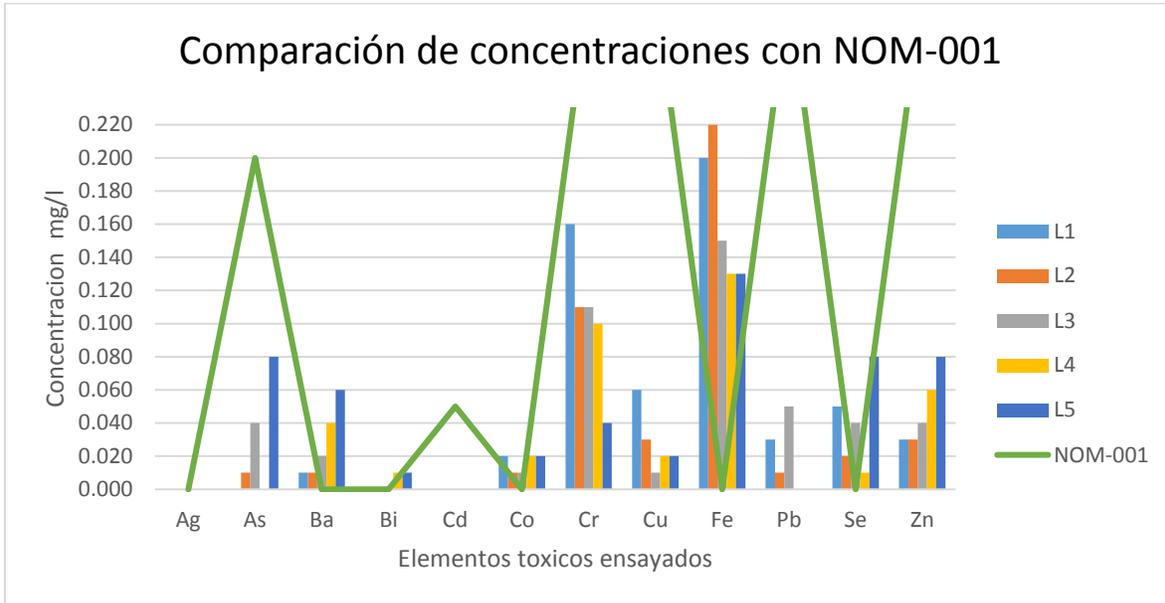


Gráfico 19. Análisis aguas lixiviadas vs NOM-001

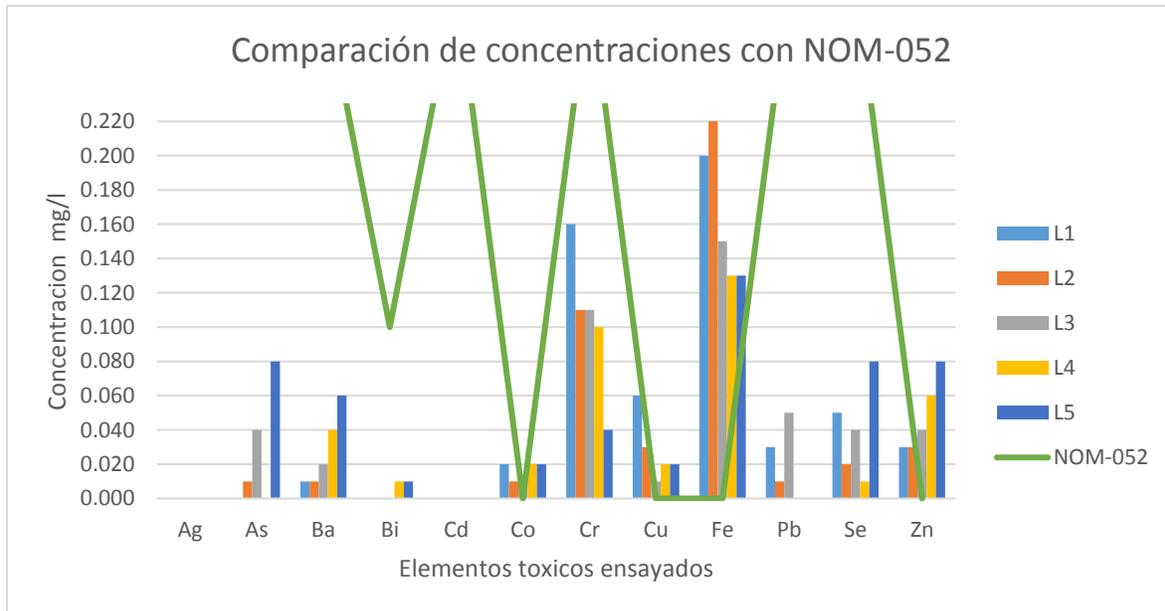


Gráfico 20. Análisis aguas lixiviadas vs NOM-052

En los Gráficos 19 y 20 las líneas verdes representan los valores establecidos por las normas como límites máximos permisibles, considerados como cero los elementos que no son considerados por la norma

Es necesario remarcar que estos datos no deben ser tomados como determinantes en el uso o no de estos materiales.

1.5.2 Ensayo de toxicidad aguda con semillas de lechuga

A continuación, se presenta una tabla donde se registró el número de semillas que germinaron en un primer lapso de 24 horas, considerando como criterio de germinación la aparición visible de la radícula.

Tabla 14. Resultados de ensayo de toxicidad sobre semillas

ID	Semillas colocadas	Semillas germinadas 24 hr.	% de germinación	Promedio de elongación de hipocotilo 120hr.	Promedio de elongación de radícula 120 hr.
L1	20	15	75.0%	4.55	1.52
L2		13	65.0%	3.93	1.50
L3		13	65.0%	3.89	1.01
L4		15	75.0%	3.96	0.94
L5		15	75.0%	4.27	1.10
L6		12	60.0%	4.15	1.42
L7		14	70.0%	4.69	1.31
L8		13	65.0%	4.34	1.35
L9		12	60.0%	3.87	1.08
L10		13	65.0%	3.67	0.78
L11		12	60.0%	4.27	1.08
L12		16	80.0%	4.24	1.34
L13		14	70.0%	3.76	0.84
L14		16	80.0%	4.31	0.97
L15		16	80.0%	4.46	1.12
Blanco	15	75.0%	3.12	1.54	

En la Tabla 14 se puede observar el % de germinación de las semillas después de las primeras 24 hr. de incubación. Lixiviados L12, L14 y L16 germinaron un porcentaje mayor que el germinado en el blanco. Para poder aseverar que en estos tratamientos (L12, L14 y L15) se promueve el crecimiento de la semilla es necesario como mínimo una repetición. Como no hay una

diferencia significativa entre el porcentaje de germinación de los lixiviados y el blanco, no existe toxicidad a corto plazo. A excepción de los lixiviados L6, L9 y L11 que si presentan diferencia significativa.

La inhibición en la germinación podría considerarse como un efecto letal siempre y cuando podamos corroborar que finalizada la exposición a una muestra las semillas no germinaron por muerte del embrión y que no existe simplemente un retraso en el proceso de germinación, manteniéndose la viabilidad de la semilla.

Otro aspecto a considerar es el mayor desarrollo en la elongación de la radícula o el hipocotilo en algunas muestras con respecto al control. La exaltación en un punto final u hormesis no debe ser interpretada como un efecto favorable o estimulante. Si bien es posible que muchos compuestos (por ejemplo, Cu y Zn) a bajas concentraciones produzcan exaltación por ser micronutrientes vegetales, esta respuesta debe ser evaluada de manera conjunta con los efectos registrados en otras pruebas.

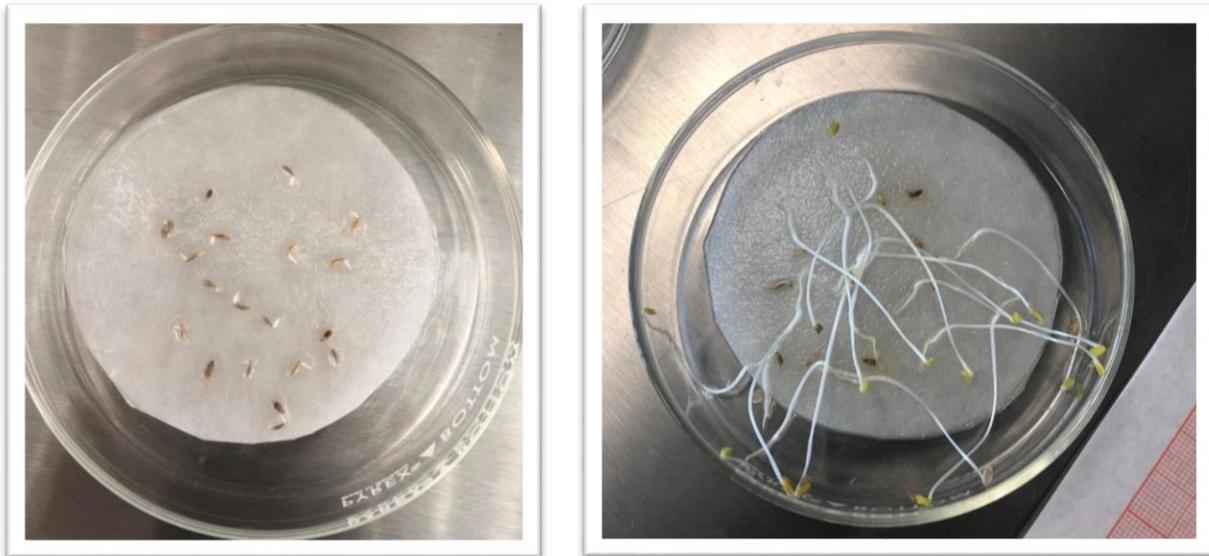


Ilustración 21. Fin de ensayo de toxicidad para agua de Lixiviado 14 a 24 y 120 hrs.

Los promedios de la longitud del hipocotilo, muestran una mayor longitud en los tratamientos que en el blanco, se podría adjudicar a que algunos de los elementos químicos presentes en el lixiviados aceleran sus crecimientos. Sin embargo, en el caso de las radículas el promedio de longitudes en los lixiviados es considerablemente menor que la obtenida por parte del blanco.

Es entonces necesario los micronutrientes que favorecen el crecimiento del hipocotilo y cuales inhiben el de la radícula.

Con los resultados obtenidos a partir de esta prueba se puede corroborar los obtenidos a partir del ensayo químico por ICP de los lixiviados, en los cuales se establecía que las concentraciones de elementos químicos potencialmente tóxicos no sobrepasan los límites máximos establecidos por la norma.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Con respecto a la evaluación de las propiedades mecánicas efectuando pruebas de resistencia a la compresión en los concretos elaborados con relaves se concluye lo siguiente:

- El concreto generado a partir de los relaves no siempre tiene la misma tendencia de resistencia que a la generada con los concretos elaborados con los materiales comerciales. Sin embargo, generalmente los concretos elaborados a partir de los relaves presentan una tendencia de incremento de resistencia proporcional al tiempo de fraguado.
- Los datos presentados en la Tabla 15. Muestran los resultados más favorables para las resistencias obtenidas para cada uno de los tratamientos y composiciones mostrados. Siendo los marcados en color rojo los presentados a los 28 días de fraguado.

Tabla 15. Resultados de resistencia a la compresión (kg/cm²)

Tratamiento	Tipo	Cemento 10%	Cemento 20%	Cemento 30%	Cemento 40%	Cemento 50%
Cemento + jal	Concreto	61.057			235.504	
	Blanco	44.901			95.805	
Cemento + jal + acelerante	Concreto	65.418		276.678	352.787	255.997
	Blanco	46.434		228.564	146.634	114.750
Cemento + Jal + impermeabilizante	Concreto	61.057	158.550	171.259		
	Blanco	43.190	113.437	96.079		

- El mejor de los especímenes es el presentado por el tratamiento número 2 que corresponde a la mezcla Cemento + Jal + Acelerante para un porcentaje en volumen de cemento de 40% registrando una resistencia de 352.787 kg/cm². El buen resultado de este tratamiento puede ser atribuido al tipo de aditivo empleado, el cual funciona acelerando la adquisición de resistencia conforme pasan los días de fraguado. Lo cual no quiere decir que los demás especímenes no logren una resistencia similar, sino que la logran en mayor tiempo.
- Se debe tener especial cuidado en la interpretación del significado de las determinaciones de resistencia a la compresión por el método de ensayo realizado, dado que la resistencia no es una propiedad fundamental o intrínseca del concreto hecho de materiales dados. Los valores obtenidos dependerán del tamaño y la forma

del espécimen, dosificación, procedimientos de mezclado, los métodos de muestreo, moldeo, fabricación, edad, temperatura, y las condiciones de humedad durante el curado.

- Las aplicaciones para este proyecto son muchas y variadas, el resultado favorable del ensayo de resistencia a la compresión para diversas composiciones (Tabla 15.) nos indica su posible aplicación para diversas áreas en las que es necesario una resistencia igual o menor a la obtenida con cada uno de los especímenes.

A partir del análisis de estabilización-solidificación realizado con pruebas de lixiviación y para determinar su toxicidad se puede concluir lo siguiente:

- La calidad del agregado de construcción se determina favorable gracias a diversas pruebas de toxicología dando como resultado final la factibilidad de su uso debido a su nula contaminación y promoción de la sustentabilidad ambiental. Las pruebas realizadas de toxicidad en donde se mide la concentración de elementos potencialmente tóxicos, obteniéndose como resultado concentraciones por debajo de los límites máximos permisibles, nos dan la pauta para decir que los concretos realizados con relaves no producirán estragos en el medio ambiente.
- La estabilización de los metales pesados puede ser que se lleve a cabo a través de la micro cristalización, donde los componentes del cemento logran micro cristalizar a los metales pesados presentes en el relave. Debido a la presencia de silicio (Si) en los relaves, el proceso de micro cristalización es más efectivo, pues al entrar en esta nueva estructura cristalina se van formando silicatos y carbonatos en forma de arcillas que en el tiempo favorecen la consistencia del concreto.
- Para asegurar la confiabilidad de los resultados obtenidos a partir del ensayo de toxicidad aguda con semillas de lechuga se deberá hacer por lo menos una repetición de la prueba, para así corroborar los resultados obtenidos y asegurar la presencia de micronutrientes que promuevan el crecimiento del hipocotilo.

BIBLIOGRAFÍA

- Cámara de Diputados, Centro de Estudios de las Finanzas Públicas. (2008). *Impuestos en el sector minero: Un análisis teórico-práctico* (CEFP/109/2008). Recuperado de <http://www.cefp.gob.mx/intr/edocumentos/pdf/cefp/2008/cefp1092008.pdf>
- Capstone Mining Corp. (2017). *Operations*. Recuperado de <https://capstonemining.com/operations/cozamin/operations/default.aspx>
- CEMEX. (2017). *Cómo hacemos cemento*. Recuperado de <http://www2.cemex.com/es/ProductosServicios/ComoHacemosCemento.aspx>
- CEMEX. (s.f.). *Concreto*. Recuperado de <https://www.cemexmexico.com/productos/concreto>
- CEMEX. (s.f.). *Normatividad*. Recuperado de <https://www.cemexmexico.com/productos/agregados/normatividad>
- Delgado, W. (22 de enero de 2015). *Proceso de producción: Se realiza una descripción corta de algunos procesos de producción de industria [Mensaje de un blog]*. Recuperado de <http://procesosproduccion1.blogspot.com/2015/10/metalurgia-extractiva-que-es-la.html>
- Espinosa, A. (21 de noviembre de 2013). *Panorama económico de la industria minero-metalúrgica en México. Red Mexicana de Afectados por la Minería*. Recuperado de <http://www.remamx.org/2013/11/panorama-economico-de-la-industria-minero-metalurgica-en-mexico/>
- Flores, J. (2018). *Estudio de residuos provenientes de la Mina El Bote, Zacatecas, y de las principales plantas que se han adoptado al sitio*. (Tesis doctoral, Universidad Autónoma de Aguascalientes).
- Gobierno de la Roja. (2016). *Tipos de contaminantes*. Recuperado de <https://www.larioja.org/medio-ambiente/es/atmosfera/contaminacion/problemas-contaminacion-atmosferica/tipos-contaminantes>
- Ministro de Minería. (s.f.). *Relave*. Recuperado de <http://www.minmineria.gob.cl/glosario-minero-r/relave/>

- Pérez, N., Garnica, P., y Rivera, A. (Octubre, 2018). Evaluación de las propiedades físicas y mecánicas de un agregado de concreto reciclado (Informe No. 514). México: Secretaría de Comunicaciones y Transportes. Recuperado de <https://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt514.pdf>
- Reyes, M. (s.f.). *Contaminantes antropogénicos*. Recuperado de https://www.ecured.cu/Contaminantes_antropog%C3%A9nicos
- Romero, A., y Flores, S. (julio, 2010). Reúso de relaves mineros como insumo para la elaboración de agregados de construcción para fabricar ladrillos y baldosas. *Industrial Data*, 13(2), 75-82. Recuperado de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=81619984010>
- Sánchez, D. (2001). *Tecnología del concreto y del mortero*. Colombia: Bhandar Editores Ltda. Recuperado de <https://books.google.com.mx/books?id=EWq-QPJhsRAC&printsec=frontcover&dq=TECNOLOGIA+DEL+CONCRETO+Y+DEL+MORTERO&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwi0jOTJki3hAhVMXK0KHYLAC-wQ6AEIKTAA#v=onepage&q&f=false>
- Secretaría de Economía. (2017). *Panorama minero del estado de Zacatecas*. México: Servicio Geológico Mexicano. Recuperado de <http://www.sgm.gob.mx/pdfs/ZACATECAS.pdf>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2010). *Industria y medio ambiente*. Recuperado de http://dgeiawf.semarnat.gob.mx:8080/ibi_apps/WFServlet?IBIF_ex=D2_R_INDUSTRIA01_01&IBIC_user=dgeia_mce&IBIC_pass=dgeia_mce
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2017). *Recomendación de sitios contaminados: La SEMARNAT fortalece el marco normativo y la gestión integral para el manejo de residuos peligrosos y sitios contaminados*. Recuperado de <https://www.gob.mx/semarnat/articulos/remediacion-de-sitios-contaminados>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2018). *Sitios contaminados*. Recuperado de http://dgeiawf.semarnat.gob.mx:8080/ibi_apps/WFServlet?IBIF_ex=D3_R_SITIOS01_01&IBIC_user=dgeia_mce&IBIC_pass=dgeia_mce

Subsecretaría de Minería. (s.f.) *Directorio del sector minero: Empresas del sector minero-metalúrgico*. Recuperado de

<http://www.desi.economia.gob.mx/empresas/Empresas3.asp?Clave=4>

Tintinalli, J., Stephan, J., John, O., Cline, D., Meckler, G., y Cydulka, R. (2013). *Medicina de urgencia, 7e*. España: Interamericana Editores. Recuperado de

<https://accessmedicina.mhmedical.com/content.aspx?bookid=1532§ionid=101551662>

Vargas, F., y López, M. (febrero, 2018). Development of a new supplementary cementitious material from the activation of copper tailings: Mechanical performance and analysis of factors [Desarrollo de un nuevo material de cemento suplementario de la activación de las colas de cobre: Rendimiento y análisis de factores mecánicos]. *Journal of Cleaner Production*, 182, 427-436. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.223>

ANEXOS

Anexo informativo A

La siguiente tabla presenta la composición de cada uno de los concretos elaborados con cemento y jal:

Tabla 16. Composición de especímenes de concretos 1-20

ID	Agua		Cemento		Jal		Tiempo
	cm ³ /ml	%V	cm ³	g	cm ³	g	Días
Concreto 1	11.5	10.0	16.3	50.2	135.1	350.0	7
Concreto 2	11.5	10.0	16.3	50.2	135.1	350.0	14
Concreto 3	11.5	10.0	16.3	50.2	135.1	350.0	28
Concreto 4	11.5	10.0	16.3	50.2	135.1	350.0	35
Concreto 5	23.1	20.0	32.6	100.4	107.3	277.9	7
Concreto 6	23.1	20.0	32.6	100.4	107.3	277.9	14
Concreto 7	23.1	20.0	32.6	100.4	107.3	277.9	28
Concreto 8	23.1	20.0	32.6	100.4	107.3	277.9	35
Concreto 9	34.6	30.0	48.9	150.6	79.5	205.8	7
Concreto 10	34.6	30.0	48.9	150.6	79.5	205.8	14
Concreto 11	34.6	30.0	48.9	150.6	79.5	205.8	28
Concreto 12	34.6	30.0	48.9	150.6	79.5	205.8	35
Concreto 13	46.2	40.0	65.2	200.8	51.6	133.7	7
Concreto 14	46.2	40.0	65.2	200.8	51.6	133.7	14
Concreto 15	46.2	40.0	65.2	200.8	51.6	133.7	28
Concreto 16	46.2	40.0	65.2	200.8	51.6	133.7	35
Concreto 17	57.7	50.0	81.5	251.0	23.8	61.5	7
Concreto 18	57.7	50.0	81.5	251.0	23.8	61.5	14
Concreto 19	57.7	50.0	81.5	251.0	23.8	61.5	28
Concreto 20	57.7	50.0	81.5	251.0	23.8	61.5	35
TOTAL	692.7			3011.9		4115.5	

La siguiente tabla presenta la composición de cada uno de los concretos elaborados con cemento, jal y acelerante:

Tabla 17. Composición de especímenes concretos 21-40

ID	Agua		Cemento		Acelerante		Jal		Tiempo
	cm ³ /ml	%V	cm ³	g	cm ³	g	cm ³	g	Días
Concreto 21	11.5	10.0	16.3	50.2	0.8	1.0	134.4	348.1	7
Concreto 22	11.5	10.0	16.3	50.2	0.8	1.0	134.4	348.1	14
Concreto 23	11.5	10.0	16.3	50.2	0.8	1.0	134.4	348.1	28
Concreto 24	11.5	10.0	16.3	50.2	0.8	1.0	134.4	348.1	35
Concreto 25	23.1	20.0	32.6	100.4	1.5	2.0	105.8	274.0	7
Concreto 26	23.1	20.0	32.6	100.4	1.5	2.0	105.8	274.0	14
Concreto 27	23.1	20.0	32.6	100.4	1.5	2.0	105.8	274.0	28
Concreto 28	23.1	20.0	32.6	100.4	1.5	2.0	105.8	274.0	35
Concreto 29	34.6	30.0	48.9	150.6	2.3	3.0	77.2	199.9	7
Concreto 30	34.6	30.0	48.9	150.6	2.3	3.0	77.2	199.9	14
Concreto 31	34.6	30.0	48.9	150.6	2.3	3.0	77.2	199.9	28
Concreto 32	34.6	30.0	48.9	150.6	2.3	3.0	77.2	199.9	35
Concreto 33	46.2	40.0	65.2	200.8	3.0	4.0	48.6	125.8	7
Concreto 34	46.2	40.0	65.2	200.8	3.0	4.0	48.6	125.8	14
Concreto 35	46.2	40.0	65.2	200.8	3.0	4.0	48.6	125.8	28
Concreto 36	46.2	40.0	65.2	200.8	3.0	4.0	48.6	125.8	35
Concreto 37	57.7	50.0	81.5	251.0	3.8	5.0	20.0	51.8	7
Concreto 38	57.7	50.0	81.5	251.0	3.8	5.0	20.0	51.8	14
Concreto 39	57.7	50.0	81.5	251.0	3.8	5.0	20.0	51.8	28
Concreto 40	57.7	50.0	81.5	251.0	3.8	5.0	20.0	51.8	35
TOTAL	692.7			3011.9	45.3			3998.2	

La siguiente tabla presenta la composición de cada uno de los concretos elaborados con cemento, jal y aditivo:

Tabla 18. Composición de especímenes de concreto 41-60

ID	Agua		Cemento		Aditivo		Jal		Tiempo
	cm ³ /ml	%V	cm ³	g	cm ³	g	cm ³	g	Días
Concreto 41	11.5	10.0	16.3	50.2	1.6	2.0	133.5	345.8	7
Concreto 42	11.5	10.0	16.3	50.2	1.6	2.0	133.5	345.8	14
Concreto 43	11.5	10.0	16.3	50.2	1.6	2.0	133.5	345.8	28
Concreto 44	11.5	10.0	16.3	50.2	1.6	2.0	133.5	345.8	35
Concreto 45	23.1	20.0	32.6	100.4	3.3	4.0	104.0	269.4	7
Concreto 46	23.1	20.0	32.6	100.4	3.3	4.0	104.0	269.4	14
Concreto 47	23.1	20.0	32.6	100.4	3.3	4.0	104.0	269.4	28
Concreto 48	23.1	20.0	32.6	100.4	3.3	4.0	104.0	269.4	35
Concreto 49	34.6	30.0	48.9	150.6	4.9	6.1	74.6	193.1	7
Concreto 50	34.6	30.0	48.9	150.6	4.9	6.1	74.6	193.1	14
Concreto 51	34.6	30.0	48.9	150.6	4.9	6.1	74.6	193.1	28
Concreto 52	34.6	30.0	48.9	150.6	4.9	6.1	74.6	193.1	35
Concreto 53	46.2	40.0	65.2	200.8	6.5	8.1	45.1	116.8	7
Concreto 54	46.2	40.0	65.2	200.8	6.5	8.1	45.1	116.8	14
Concreto 55	46.2	40.0	65.2	200.8	6.5	8.1	45.1	116.8	28
Concreto 56	46.2	40.0	65.2	200.8	6.5	8.1	45.1	116.8	35
Concreto 57	57.7	50.0	81.5	251.0	8.1	10.1	15.6	40.4	7
Concreto 58	57.7	50.0	81.5	251.0	8.1	10.1	15.6	40.4	14
Concreto 59	57.7	50.0	81.5	251.0	8.1	10.1	15.6	40.4	28
Concreto 60	57.7	50.0	81.5	251.0	8.1	10.1	15.6	40.4	35
TOTAL	692.7			3011.9		121.2		3862.2	

Anexo informativo B

La siguiente tabla presenta la composición de cada uno de los blancos elaborados con cemento y arena:

Tabla 19. Composición de especímenes blancos 1-10

ID	Agua		Cemento		Arena		Tiempo
	cm ³ /ml	%V	cm ³	g	cm ³	g	Días
Blanco 1	11.5	10.0	16.3	50.2	135.1	228.4	28
Blanco 2	11.5	10.0	16.3	50.2	135.1	228.4	35
Blanco 3	23.1	20.0	32.6	100.4	107.3	181.3	28
Blanco 4	23.1	20.0	32.6	100.4	107.3	181.3	35
Blanco 5	34.6	30.0	48.9	150.6	79.5	134.3	28
Blanco 6	34.6	30.0	48.9	150.6	79.5	134.3	35
Blanco 7	46.2	40.0	65.2	200.8	51.6	87.2	28
Blanco 8	46.2	40.0	65.2	200.8	51.6	87.2	35
Blanco 9	57.7	50.0	81.5	251.0	23.8	40.2	28
Blanco 10	57.7	50.0	81.5	251.0	23.8	40.2	35

La siguiente tabla presenta la composición de cada uno de los blancos elaborados con cemento, arena y acelerante:

Tabla 20. Composición de especímenes blancos 11-20

ID	Agua		Cemento		Acelerante		Arena		Tiempo
	cm ³ /ml	%V	cm ³	g	cm ³	g	cm ³	g	Días
Blanco 11	11.5	10.0	16.3	50.2	0.8	1.0	134.4	227.1	28
Blanco 12	11.5	10.0	16.3	50.2	0.8	1.0	134.4	227.1	35
Blanco 13	23.1	20.0	32.6	100.4	1.5	2.0	105.8	178.8	28
Blanco 14	23.1	20.0	32.6	100.4	1.5	2.0	105.8	178.8	35
Blanco 15	34.6	30.0	48.9	150.6	2.3	3.0	77.2	130.4	28
Blanco 16	34.6	30.0	48.9	150.6	2.3	3.0	77.2	130.4	35
Blanco 17	46.2	40.0	65.2	200.8	3.0	4.0	48.6	82.1	28
Blanco 18	46.2	40.0	65.2	200.8	3.0	4.0	48.6	82.1	35
Blanco 19	57.7	50.0	81.5	251.0	3.8	5.0	20.0	33.8	28
Blanco 20	57.7	50.0	81.5	251.0	3.8	5.0	20.0	33.8	35

La siguiente tabla presenta la composición de cada uno de los blancos elaborados con cemento, arena y aditivo:

Tabla 21. Composición de especímenes blancos 21-30

ID	Agua	Cemento		Aditivo		Arena		Tiempo	
	cm3/ml	%V	cm3	g	cm3	g	cm3	g	Días
Blanco 21	11.5	10.0	16.3	50.2	1.6	2.0	133.5	225.6	28
Blanco 22	11.5	10.0	16.3	50.2	1.6	2.0	133.5	225.6	35
Blanco 23	23.1	20.0	32.6	100.4	3.3	4.0	104.0	175.8	28
Blanco 24	23.1	20.0	32.6	100.4	3.3	4.0	104.0	175.8	35
Blanco 25	34.6	30.0	48.9	150.6	4.9	6.1	74.6	126.0	28
Blanco 26	34.6	30.0	48.9	150.6	4.9	6.1	74.6	126.0	35
Blanco 27	46.2	40.0	65.2	200.8	6.5	8.1	45.1	76.2	28
Blanco 28	46.2	40.0	65.2	200.8	6.5	8.1	45.1	76.2	35
Blanco 29	57.7	50.0	81.5	251.0	8.1	10.1	15.6	26.4	28
Blanco 30	57.7	50.0	81.5	251.0	8.1	10.1	15.6	26.4	35

Anexo informativo C

La siguiente tabla presenta la composición de cada uno de los lixiviados elaborados con cemento y jal:

Tabla 22. Composición de especímenes de lixiviados 1-5

ID	Agua		Cemento		Jal		Tiempo Días
	cm ³ /ml	%V	cm ³	g	cm ³	g	
Lixiviado 1	11.5	10.0	16.3	50.2	135.1	350.0	
Lixiviado 2	23.1	20.0	32.6	100.4	107.3	277.9	
Lixiviado 3	34.6	30.0	48.9	150.6	79.5	205.8	28
Lixiviado 4	46.2	40.0	65.2	200.8	51.6	133.7	
Lixiviado 5	57.7	50.0	81.5	251.0	23.8	61.5	

La siguiente tabla presenta la composición de cada uno de los lixiviados elaborados con cemento, jal y acelerante:

Tabla 23. Composición de especímenes de lixiviados 6-10

ID	Agua		Cemento		Acelerante		Jal		Tiempo Días
	cm ³ /ml	%V	cm ³	g	cm ³	g	cm ³	g	
Lixiviado 6	11.5	10.0	16.3	50.2	0.8	1.0	134.4	348.1	
Lixiviado 7	23.1	20.0	32.6	100.4	1.5	2.0	105.8	274.0	
Lixiviado 8	34.6	30.0	48.9	150.6	2.3	3.0	77.2	199.9	28
Lixiviado 9	46.2	40.0	65.2	200.8	3.0	4.0	48.6	125.8	
Lixiviado 10	57.7	50.0	81.5	251.0	3.8	5.0	20.0	51.8	

La siguiente tabla presenta la composición de cada uno de los lixiviados elaborados con cemento, jal y aditivo:

Tabla 24. composición de los lixiviados 11-15

ID	Agua		Cemento		Aditivo		Jal		Tiempo Días
	cm3/ml	%V	cm3	g	cm3	g	cm3	g	
Lixiviado 11	11.5	10.0	16.3	50.2	1.6	2.0	133.5	345.8	28
Lixiviado 12	23.1	20.0	32.6	100.4	3.3	4.0	104.0	269.4	
Lixiviado 13	34.6	30.0	48.9	150.6	4.9	6.1	74.6	193.1	
Lixiviado 14	46.2	40.0	65.2	200.8	6.5	8.1	45.1	116.8	
Lixiviado 15	57.7	50.0	81.5	251.0	8.1	10.1	15.6	40.4	