



---

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MEXICO**

**FACULTAD DE QUÍMICA**

**TESIS**

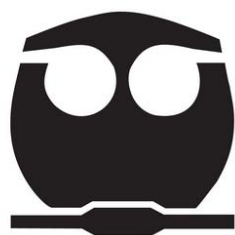
**“EVALUACIÓN DE RESIDUOS MINEROS PROVENIENTES DE LA  
EXTRACCIÓN DE HIERRO, PARA SU POSIBLE USO EN  
ELABORACIÓN DE CONCRETOS.”**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE**

**INGENIERA QUÍMICA**

**PRESENTA**

**CLAUDIA ANAID OJEDA REYES**



**MEXICO, D.F.**

**2015**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## **JURADO ASIGNADO:**

**PRESIDENTE:** Profesor: Águeda Elena Ceniceros Gómez

**VOCAL:** Profesor: Alfonso Durán Moreno

**SECRETARIO:** Profesor: Silvia Citlalli Gama González

**1er. SUPLENTE:** Profesor: José Agustín García Reynoso

**2° SUPLENTE:** Profesor: Luis Gerardo Martínez Jardines

**SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA: LABORATORIO DE BIOGEOQUÍMICA  
AMBIENTAL, FACULTAD DE QUÍMICA.**

**ASESOR DEL TEMA: DRA. ÁGUEDA ELENA CENICEROS GÓMEZ**

(nombre y firma)

**SUPERVISOR TÉCNICO: M. EN C. LUIS GERARDO MARTÍNEZ JARDINES**

(nombre y firma)

**SUSTENTANTE (S): CLAUDIA ANAID OJEDA REYES**

(nombre (s) y firma (s) )

# Tabla de Contenido

<b>RESUMEN.....</b>	<b>8</b>
<b>INTRODUCCION.....</b>	<b>9</b>
<b>1. ANTECEDENTES.....</b>	<b>12</b>
1.1. Panorama General.....	12
1.2. Ubicación y geología de la zona de estudio.....	13
1.3. La extracción de hierro y sus residuos.....	17
1.4. Los residuos mineros y su peligrosidad.....	19
1.5. Normatividad Ambiental.....	22
1.6. Usos de residuos como materiales para la construcción.....	24
1.7. El concreto y sus componentes.....	25
<b>1.7.1. El Cemento.....</b>	<b>26</b>
<b>1.7.2. Agregados.....</b>	<b>30</b>
<b>1.7.3. Agua de mezcla.....</b>	<b>31</b>
<b>1.7.4. Aditivos.....</b>	<b>31</b>
1.8. La hidratación del cemento.....	32
1.9. Tipos de Concreto.....	34
<b>1.9.1. Concreto Hidráulico.....</b>	<b>34</b>
<b>1.9.2. Concreto Celular.....</b>	<b>35</b>
<b>1.9.3. Concreto Permeable.....</b>	<b>36</b>
1.10. Calidad en el concreto.....	38
1.11. Estabilidad química de concreto.....	39
<b>1.11.1. Formación de etringita (<math>3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{CaSO}_4\cdot 32\text{H}_2\text{O}</math>).....</b>	<b>39</b>
<b>1.11.2. Reacciones álcali-agregado (ASR).....</b>	<b>41</b>
<b>2. OBJETIVO GENERAL.....</b>	<b>44</b>
OBJETIVOS PARTICULARES.....	44
<b>3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.....</b>	<b>45</b>
3.1. Muestras de residuos mineros.....	45
<b>3.1.1. Preparación de residuos.....</b>	<b>45</b>
<b>3.1.2. Caracterización física de los residuos.....</b>	<b>46</b>
<b>3.1.3. Caracterización química de los residuos.....</b>	<b>49</b>
3.2. Cemento.....	52
3.3. Elaboración de los concretos.....	52

3.3.1. Concreto hidráulico.....	54
3.3.2. Concreto celular.....	55
3.3.3. Concreto permeable.....	56
3.4. Evaluación de los concretos.....	57
3.3.1. Resistencia a la compresión.....	57
3.3.2. Oxidación acelerada.....	58
3.3.3. Microscopia Electrónica de Barrido acoplada a Espectrometría de rayos x por Energía Dispersa (MEB-EDS).....	59
3.4.4. Difracción de Rayos X.....	59
<b>4. RESULTADOS y DISCUSION.....</b>	<b>61</b>
4.1. Muestras de residuos mineros.....	61
4.1.1. Caracterización física de los residuos.....	61
4.1.2. Caracterización química de los residuos.....	67
4.2. Cementos.....	77
4.2.1. Determinación de pH en cementos.....	77
4.2.2. Determinación de elementos totales.....	78
4.2.3. Geodisponibilidad en cementos.....	79
4.2.4. Prueba de Balance Ácido – Base en cementos.....	80
4.3. Elaboración de los concretos.....	82
4.3.1. Concreto hidráulico.....	82
4.3.2 Concreto celular.....	84
4.3.3 Concreto permeable.....	85
4.4. Evaluación de los concretos.....	86
4.4.2. Resistencia a la compresión.....	86
4.4.3. Oxidación acelerada.....	90
4.4.4. Microscopia Electrónica de barrido Acoplada a Espectrometría de Rayos X por Energía Dispersa (MEB-EDS) y Difracción de Rayos x en muestras de concretos.....	95
Concreto hidráulico.....	95
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>104</b>
<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>106</b>
<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>107</b>
<b>ANEXO A.....</b>	<b>110</b>

Determinación de pH.....	110
Determinación de elementos totales (Fluorescencia de rayos x).....	112
Oxidación Acelerada.....	120
Microscopia Electrónica de barrido Acoplada a Espectrometría de Rayos X por Energía Dispersa (MEB-EDS). ....	121
<b>ANEXO B.....</b>	<b>124</b>

## Índice de Cuadros

<i>Cuadro I. Composición geológica.</i> .....	16
<i>Cuadro II Proporción típica de los compuestos principales del cemento portland para un cemento ordinario.</i> .....	53
<i>Cuadro III. Mezcla para concreto hidráulico.</i> .....	54
<i>Cuadro IV. Mezcla para concreto celular.</i> .....	55
<i>Cuadro V. Mezcla para concreto Permeable.</i> .....	56
<i>Cuadro VI. Determinación de densidad.</i> .....	62
<i>Cuadro VII. Contenido de humedad en residuos mineros.</i> .....	62
<i>Cuadro VIII. Granulometría SUCS para muestra de jal</i> .....	63
<i>Cuadro IX Granulometría SUCS para muestra de arena.</i> .....	65
<i>Cuadro X Determinación de textura por el método de la pipeta.</i> .....	66
<i>Cuadro XI. Determinación de pH de los residuos.</i> .....	67
<i>Cuadro XII. Contenido de elementos totales en residuos.</i> .....	68
<i>Cuadro XIII Concentración total soluble medida por ICP-OES de residuos.</i> .....	70
<i>Cuadro XIV. Comparación de contenido de elementos normados con los límites máximos permisibles.</i> --	71
<i>Cuadro XV. Potencial de neutralización de residuos.</i> .....	73
<i>Cuadro XVI. Contenido de azufre total de residuos.</i> .....	74
<i>Cuadro XVII. Contenido de sulfatos de residuos.</i> .....	74
<i>Cuadro XVIII. Potencial de acidez de residuos.</i> .....	75
<i>Cuadro XIX. Potencial de neutralización neto de residuos.</i> .....	75
<i>Cuadro XX. Mineralogía de los residuos mineros obtenida por DRX.</i> .....	76
<i>Cuadro XXI. Determinación de pH en cementos.</i> .....	77
<i>Cuadro XXII. Contenido de elementos totales en cementos.</i> .....	78
<i>Cuadro XXIII. Concentración total soluble medida por ICP-OES en cementos.</i> .....	79
<i>Cuadro XXIV. Potencial de neutralización en cementos.</i> .....	80
<i>Cuadro XXV. Contenido de azufre total en cementos.</i> .....	81
<i>Cuadro XXVI. Contenido de sulfatos en cementos.</i> .....	81
<i>Cuadro XXVII. Potencial de acidez en cementos.</i> .....	82

Cuadro XXVIII. Potencial de neutralización neto en cementos. -----	82
Cuadro XXIX. Resistencia a la compresión de concreto hidráulico. -----	87
Cuadro XXX. Resistencia a la compresión de concreto celular. -----	89
Cuadro XXXI. pH del lixiviado del concreto hidráulico oxidado. -----	91
Cuadro XXXII. Resistencia a la compresión después del proceso de oxidación (concreto hidráulico). -----	91
Cuadro XXXIII. pH de residuos de oxidación para concreto celular. -----	93
Cuadro XXXIV. Resistencia a la compresión después del proceso de oxidación (concreto celular). -----	94
Cuadro XXXV. Composición elemental y fases mineralógicas del concreto hidráulico sin oxidar. -----	96
Cuadro XXXVI Composición elemental y fases mineralógicas del concreto hidráulico oxidado. -----	98
Cuadro XXXVII Composición elemental y fases mineralógicas de concreto celular sin oxidar. -----	100
Cuadro XXXVIII Composición elemental y fases mineralógicas de concreto celular oxidado. -----	101

## Índice de Figuras

Figura I Localización general de la zona de estudio. Zona sur del estado de Michoacán, México. Modificado de Panorama Minero del estado de Michoacán, Servicio Geológico Mexicano, 2013. ....	13
Figura II Geología de la zona de estudio. Tomado y modificado de Carta geológica-minera de Lázaro cárdenas, Michoacán. ( E13-6-9).....	15
Figura III Diagrama simplificado de proceso de extracción de hierro y la generación de residuos (colas de proceso). ....	18
Figura IV. Ejemplo de contaminación por Drenaje Ácido Minero (DAM). ....	20
Figura V Componentes del concreto. ....	26
Figura VI. Estructura de la arcilla. ....	27
Figura VII. Principales componentes del Clinker. a) Película delgada donde muestra cristales de $C_3S$ (cristales angulosos) y de $C_2S$ (cristales oscuros y redondeados), b) Micrografía de cristales de alita. Imágenes tomadas y modificadas de la Asociación de Cemento Portland. ....	28
Figura VIII. Estructura propuesta de los hidratos del silicato y aluminatos cálcicos componentes del cemento. (Imágenes tomadas del Laboratorio de Ecomateriales de la universidad de Hokkaido). <a href="http://saikou-main-sw.eng.hokudai.ac.jp/e-res1.html">http://saikou-main-sw.eng.hokudai.ac.jp/e-res1.html</a> ). ....	34
Figura IX. Concreto celular. ....	36
Figura X. Concreto permeable. ....	37
Figura XI. Ensayo de resistencia a la compresión. ....	38
Figura XII. Fotografía de microscopia SEM donde se observan fisuras debidas a la formación de etringita. Imagen tomada de "Evolución mineralógica del cemento portland durante el proceso de hidratación". Giraldo M.; Tobón J. (2006). ....	41
Figura XIII .Triangulo de texturas. ....	49
Figura XIV Gráfica de relación A/C vs resistencia a la compresión. ....	54

<i>Figura XV. Curva de distribución granulométrica para jal (SUCS).</i> .....	64
<i>Figura XVI .Curva de distribución granulométrica arena (método SUCS)</i> .....	65
<i>Figura XVII Prueba cualitativa de carbonatos. Visualización de la efervescencia moderada.</i> .....	72
<i>Figura XVIII. Potencial de neutralización para muestras de terrero.</i> .....	73
<i>Figura XIX. Mezcla de los componentes para concreto hidráulico</i> .....	83
<i>Figura XX. Cilindros de concreto hidráulico fresco y seco después del fraguado.</i> .....	83
<i>Figura XXI. Mezcladora de motor a gasolina para la fabricación de concreto celular.</i> .....	84
<i>Figura XXII Cilindros de concreto fresco de concreto celular.</i> .....	84
<i>Figura XXIII. Pieza de concreto permeable fabricada con terrero.</i> .....	85
<i>Figura XXIV. Cilindro de concreto con cabeceo de mortero y prueba de resistencia a la compresión.</i> .....	87
<i>Figura XXV Resistencia en función del tiempo para el concreto hidráulico.</i> .....	88
<i>Figura XXVI. Resistencia en función del tiempo para el concreto celular.</i> .....	89
<i>Figura XXVII. Muestras de concreto hidráulico (sin oxidar y oxidado)</i> .....	90
<i>Figura XXVIII. Muestras de concreto celular (sin oxidar y oxidado)</i> .....	93
<i>Figura XXIX. Concreto Celular expuesto a oxidación.</i> .....	93
<i>Figura XXX Micrografía y espectro de concreto hidráulico sin oxidar.</i> .....	97
<i>Figura XXXI Microscopia y espectro de concreto hidráulico sin oxidar.</i> .....	97
<i>Figura XXXII. Micrografía y espectro de concreto hidráulico expuesto a oxidación acelerada.</i> .....	98
<i>Figura XXXIII Micrografía y espectro de concreto hidráulico expuesto a oxidación acelerada.</i> .....	99
<i>Figura XXXIV Micrografía y espectro de concreto celular sin oxidar.</i> .....	100
<i>Figura XXXV Micrografía y espectro de concreto celular sin oxidar.</i> .....	101
<i>Figura XXXVI Micrografía y espectro de concreto celular expuesto a oxidación acelerada.</i> .....	102
<i>Figura XXXVII Micrografía y espectro de concreto celular expuesto a oxidación acelerada expuesto a oxidación acelerada.</i> .....	102
<i>Figura XXXVIII Difractograma de concreto celular oxidado, donde los picos característicos aparecen en 9.7 y 15.7 (2-Theta). Etringita(ETT), cuarzo (C),carbonato de calcio(CA).</i> .....	103



## **RESUMEN**

La industria minera ha llegado a formar parte importante de la sociedad actual, no obstante, esta actividad genera toneladas de residuos que afectan al ambiente y la salud pública. El presente trabajo evalúa el reúso de tres residuos derivados de la explotación de hierro, jal, arena y terrero para la fabricación de concretos ambientalmente seguros que mostraron propiedades físicas adecuadas al uso propuesto. Los resultados abren la posibilidad de poder ayudar a mejorar las condiciones ambientales y de la población, obteniéndose además un beneficio económico para las empresas mineras al poder comercializar sus residuos para la fabricación de materiales de construcción. Lo que lleva a mejorar el aprovechamiento de los recursos naturales.

## **INTRODUCCION**

Históricamente las actividades antropogénicas han tenido como consecuencia la afectación al ambiente y a los ecosistemas, ya que una de las principales características de las actividades humanas es la modificación de su entorno acompañada de la generación de diferentes tipos de residuos.

Actualmente, una de las actividades antropogénicas de mayor preocupación ambiental a nivel mundial es la minería, ya que esta industria no solo genera grandes cantidades de residuos, sino que por sus características físicas y químicas comúnmente tienden a ser peligrosos.

A pesar de que existen diferentes tipos de explotación minera, el impacto y la generación de residuos comienzan con la necesidad de remover grandes volúmenes de roca de los yacimientos con el fin de obtener los minerales de importancia económica y posteriormente realizar el beneficio para la obtención de los productos preciosos o de interés económico.

Comúnmente, la mayor cantidad de residuos se genera durante las etapas de explotación y beneficio, resultando en cientos a miles de toneladas de terreros y jales mineros.

A pesar de que actualmente México cuenta con regulaciones para las actividades mineras y el tratamiento de residuos, dichas regulaciones son relativamente recientes en comparación con la larga historia minera de México, por lo cual, la cantidad de residuos generados hasta el presente rebasa por mucho las capacidades de tratamiento y confinamiento de dichos residuos. Lo anterior ha tenido como consecuencia que muchas veces la industria minera deje abandonados o inadecuadamente confinados altos volúmenes de

residuos, siendo vulnerables a la dispersión e intemperismo por el medio ambiente (ya sea por acción del viento o las lluvias) pudiendo afectar al ecosistema y a la población, y al final, convertirse en un problema de salud pública. Dicha preocupación, conlleva a buscar alternativas para atender la problemática de las grandes cantidades de residuos de la industria minera.

En México aún no se ha incursionado lo suficiente en el desarrollo de aplicaciones que utilicen residuos mineros en la fabricación, por ejemplo, de materiales para la construcción, lo cual además de la aportación de reutilizar un residuo, pueda abrir otra posibilidad para atender la problemática del tratamiento de los residuos mineros.

En el estado de Michoacán, se han extraído minerales de hierro, con lo cual se han generado cantidades considerables de terreros, arenas y jales. Debido a sus características (como densidad, granulometría, propiedades físicas, químicas y baja peligrosidad), se ha considerado que este tipo de materiales podrían ser utilizados en la fabricación de materiales para la industria de la construcción.

De tal forma, el objetivo de este trabajo fue explorar una alternativa para el aprovechamiento de los residuos mineros (jales, arenas y terreros) derivados de la explotación de hierro en la zona sur del estado de Michoacán.

Con esta visión, se realizó una caracterización física, química y mineralógica de los residuos mineros así como la evaluación de su posible peligrosidad con base en el contenido de elementos potencialmente tóxicos y el balance ácido base.

Se evaluó la fabricación de 3 tipos de concretos, celular, hidráulico y permeable utilizando jal, arena y/o terreros en las proporciones granulométricas apropiadas. Además de la detallada caracterización y las pruebas fisicoquímicas, que aseguren que estos materiales

cumplen con los requerimientos de seguridad ambientales, se evaluó la calidad física y ambiental de los concretos fabricados, la primera realizando la prueba de resistencia a la compresión, mientras que la segunda se evaluó determinando las posibles afectaciones debidas al intemperismo sometiendo los concretos a un proceso de oxidación acelerada.

Como resultado de este trabajo se propone la posible fabricación de tres tipos de concreto diferentes, en ningún caso se presentan elementos potencialmente tóxicos que pudieran ser expuestos al ambiente, así mismo, a pesar de contener sulfuros y uno de ellos (el jal específicamente) ser un potencial generador de drenaje ácido, los concretos fabricados tuvieron la capacidad de neutralizar los posibles lixiviados ácidos derivados del intemperismo. Por lo anterior, estos no representarían un peligro ambiental ni a la salud.

Del mismo modo, al ser evaluada la calidad física de los concretos fabricados, se obtuvo que estos son capaces de generar una alta resistencia, alcanzando y hasta superando los valores de diseño. Sin embargo, fue detectada la formación de sulfoaluminato de calcio (etringita) en poca proporción en uno de los concretos evaluados, la cual es una afectación común en los concretos, sin que esto afecte la calidad de los mismos.

De esta manera, con este proyecto se abre la posibilidad de poder ayudar a mejorar las condiciones ambientales y de la población reutilizando los residuos de la industria minera. Además, poder vislumbrar la posibilidad de generar un beneficio económico para las empresas solucionando el problema de sus residuos y que estos puedan ser aprovechados por la población, es una gran recompensa, ya que armonizando el desarrollo económico y social con el ambiente hará que en el futuro podamos tener una sociedad basada en el manejo adecuado de los recursos naturales.

# **1. ANTECEDENTES.**

## **1.1. Panorama General.**

Una mina es el conjunto de labores necesarias para explotar un yacimiento y, en algunos casos, las plantas necesarias para el tratamiento del mineral extraído. Las minas, pueden ser divididas siguiendo varios criterios, sin embargo, el más amplio tiene en cuenta si las labores se desarrollan por encima o por debajo de la superficie terrestre, dividiéndolas en minas a cielo abierto y en minas subterráneas, respectivamente.

Las minas a cielo abierto, o minas a tajo abierto, son aquellas cuyo proceso extractivo se realiza en la superficie del terreno, y con maquinarias mineras de gran tamaño. Mientras que la minería subterránea desarrolla su actividad por debajo de la superficie.

En México la producción minera ha sido de gran importancia y Michoacán es un estado que tiene diversas minas productivas. A mediados del siglo XVII, se iniciaron los primeros trabajos de exploración minera en el estado y al paso del tiempo ésta fue creciendo. En 1980 se inició la explotación de los yacimientos de hierro en el municipio de Lázaro Cárdenas, con la inauguración de la Siderúrgica Lázaro Cárdenas (Servicio Geológico Mexicano, 2013). Actualmente, la zona sur del estado de Michoacán se caracteriza por la producción y exportación de hierro a nivel mundial.

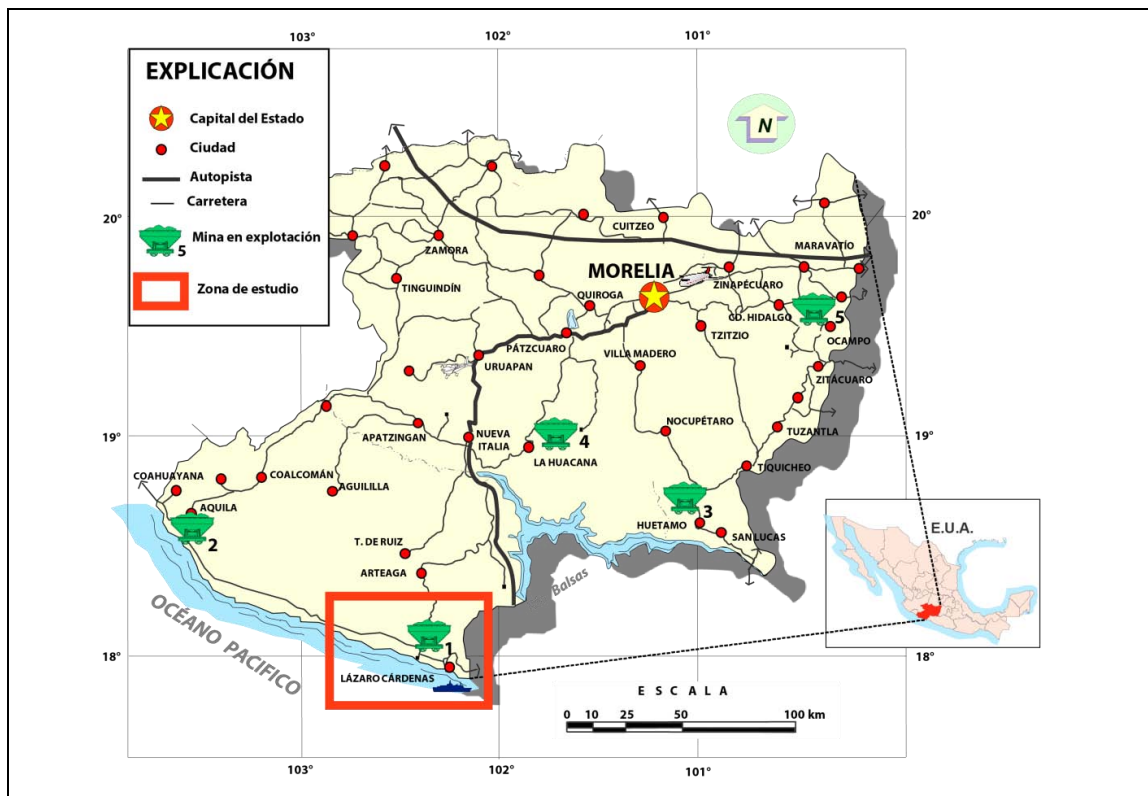
Con base en los últimos datos reportados del INEGI, el volumen de producción nacional de hierro es de **18 839 574** toneladas y de estas **7 585 529** (el 40% del total) son producidas en Michoacán.

Según datos del Servicio Geológico Mexicano, la localidad de Lázaro Cárdenas tiene una producción de hierro de 10,000 ton/día (Servicio Geológico Mexicano. Julio 2013).

Es inherente a esta actividad la generación de grandes volúmenes de residuos y algunos de ellos de naturaleza peligrosa y han tenido como consecuencia la afectación al ambiente. A nivel estatal, en la última década se presentaron alrededor de 384 quejas por año en materia ambiental, de las cuales en promedio anual 20 son hechas en Lázaro Cárdenas (INEGI, 2013). Debido a esto es importante mejorar el manejo de los residuos generados en industria y más específicamente en esta zona.

## 1.2. Ubicación y geología de la zona de estudio.

El estado de Michoacán colinda con los estados de Colima, Jalisco, Guerrero y el Estado de México. El distrito Minero Las Truchas (Figura I), se ubica al sur del estado de Michoacán entre las coordenadas geográficas  $18^{\circ}00'36''$ - $18^{\circ}04'12''$  latitud Norte y  $102^{\circ}20'12''$ - $102^{\circ}25'12''$  longitud Oeste, en el municipio de Lázaro Cárdenas, Michoacán.



**Figura I Localización general de la zona de estudio. Zona sur del estado de Michoacán, México. Modificado de Panorama Minero del estado de Michoacán, Servicio Geológico Mexicano, 2013.**

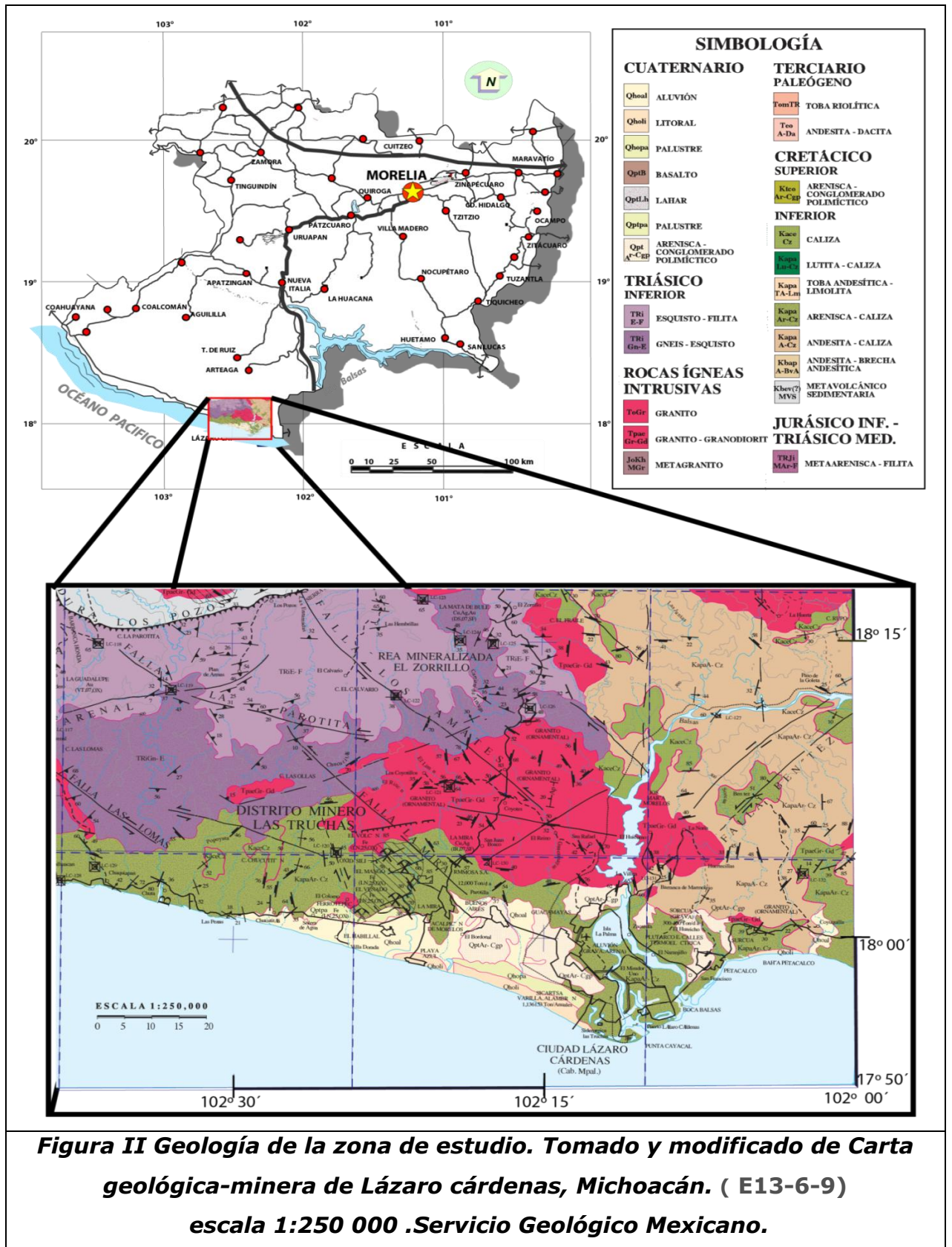
Por otro lado, la geología de la zona de estudio (Figura II) se encuentra conformada por una secuencia de rocas sedimentarias, ígneas intrusivas, extrusivas y metamórficas. Las rocas sedimentarias están representadas por calizas del Cretácico Inferior, la unidad se encuentra afectada por intrusivos graníticos, por lo que la mayoría de los remanentes de caliza están muy alterados por fenómenos metamórficos, mientras que la caliza no alterada es masiva, compacta y de color gris claro a gris oscuro. El conjunto de sedimentos marinos están representados por conglomerados, areniscas calcáreas y coquinas.

Las rocas volcánicas cubren la mayor parte de la zona y están representadas por andesitas félsicas, andesitas porfídicas, tobas y brechas andesíticas, estando las lavas subordinadas únicamente al conjunto piroclástico. Las brechas están formadas por fragmentos angulosos de composición andesítica con dimensiones que varían de 0.5 a 5 cm, aproximadamente.

Las rocas intrusivas están representadas por granodioritas que afloran en el cerro de Tepeixtle y a lo largo del arroyo Las Truchas en forma de franja con dirección preferencial Este-Oeste.

La conformación de las rocas de la zona está compuesta como se muestra en el Cuadro I. Las rocas ígneas extrusivas se ubican al poniente del área de estudio. Las rocas sedimentarias (conglomeradas, calizas y areniscas) conforman el 19% del área de estudio y se ubican al norte y al poniente.

La zona cuenta con varios cuerpos de hierro cuyo origen es de infiltración magmática o metasomatismo de contacto. La mineralización supergénica son óxidos de hierro y manganeso. Como alteraciones se tiene oxidación y silicificación (INEGI, 2013).





**Cuadro I. Composición geológica.**

<b>Unidad estratigráfica</b>	<b>Edad</b>	<b>Composición</b>
Depósitos Aluviales	Cuaternario	Arenas que varían de finas a gruesas, arcillas y gravas
Rocas Intrusivas y rocas volcánicas	Terciario Medio (Paleoceno-Oligoceno)	Granito , Granodiorita Diorita
	Terciario Medio (Paleoceno-Oligoceno)	Andesitas, Tobas Intermedias, y Brechas volcánicas
Rocas sedimentarias (mesozoico)	Kinmeridiano-Portlandiano	Lutitas Areniscas Calizas
	Albiano-cenomaniano	Calizas
	Oligoceno Superior	Lutitas - Areniscas
	Plioceno	Areniscas y conglomerados
Rocas metamórficas	Mesozoico	Pizarras Gneis Esquistos Filitas

En el distrito minero pueden observarse estructuras en las que afloran los cuerpos de hierro representados por cerros semiredondeados y plegados, con elevaciones entre 50 a 300 metros sobre el nivel del mar (msnm).

Una de las principales características de dicha provincia es su interacción con la placa tectónica de Cocos la cual se encuentra en un

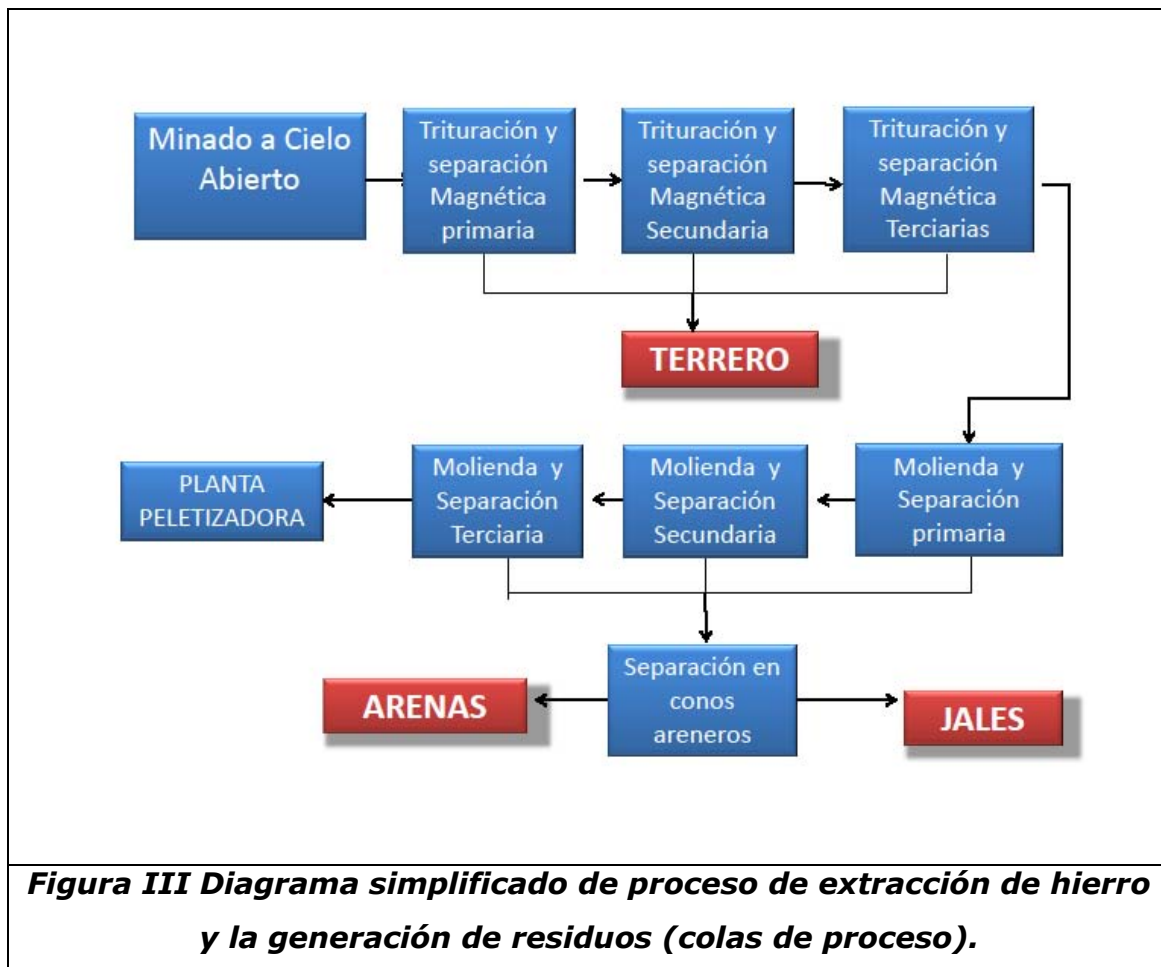
proceso de subducción. Este fenómeno, a su vez, seguramente ha ocasionado que los ejes estructurales de dicha provincia tengan una estricta orientación este-oeste tales como la depresión del Balsas, las cordilleras costeras y líneas de costas.

### **1.3. La extracción de hierro y sus residuos.**

De forma general, los diversos tipos de residuos generados por la explotación minera, dependen de la etapa del proceso en el que se forman; durante el proceso de extracción encontramos el tepetate y el terrero, mientras que los residuos provenientes del beneficio del minado son las arenas y jales.

En la zona de estudio, el proceso de extracción de mineral de hierro se realiza mediante el minado a cielo abierto, posteriormente el mineral es transportado al área de reducción de tamaño, la cual consiste en tres etapas de trituración (llamadas primaria, secundaria y terciaria), intercaladas cada una de ellas con sistemas de pre-concentración. Para una rápida visualización, el esquema simplificado de la extracción y generación de residuos se puede observar en la Figura III.

Siguiendo con el proceso de extracción, la etapa de pre-concentración se realiza mediante la eliminación de material no magnético con el uso de poleas magnéticas en seco, el material no magnético se deposita en depósitos. Los procesos de trituración y pre-concentración tienen la finalidad de iniciar la preparación física del material y seguidamente pasar a la planta concentradora.



Ya en la planta concentradora y una vez que el tamaño se ajusta a los requerimientos del proceso, el material es alimentado en dos líneas paralelas que incluyen, molienda primaria a través de un molino de barras que permite reducir el tamaño de partícula de una pulgada (1") a un milímetro (1mm) aproximadamente. En esta etapa, el material no magnético es removido del magnético contribuyendo al enriquecimiento del contenido de hierro en el concentrado. El material obtenido de esta etapa, es llevado a una segunda molienda para obtener un tamaño más fino a través de un molino de bolas, que permite reducir el tamaño de partícula de 1mm a aproximadamente 45 micras (45 $\mu$ ) requisito indispensable para una segunda separación magnética. Finalmente pasa a los tanques de almacenamiento para su bombeo y distribución a las plantas peletizadoras.

El material no magnético obtenido de la separación magnética primaria pasa a dos conos areneros donde se separan los tamaños gruesos de los finos (generando arenas de diferentes tamaños). El material fino no magnético removido tanto de las separaciones magnéticas primaria, secundaria y terciaria, son denominados colas de proceso o jales y son enviados primero a un tanque espesador para después ser trasladados a su disposición final en la presa de jales.

#### **1.4. Los residuos mineros y su peligrosidad.**

El terrero está definido como residuos conformados por apilamiento de material mineral sin valor comercial o mineral de baja ley, mientras que los jales son residuos de granulometría fina que generalmente contienen sulfuros metálicos residuales, como pirita ( $\text{FeS}_2$ ), pirrotita ( $\text{Fe}_{1-x}\text{S}$ ), galena ( $\text{PbS}$ ), esfalerita ( $\text{ZnS}$ ), calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ) y arsenopirita ( $\text{FeAsS}$ ) y que pueden ser la fuente de elementos potencialmente tóxicos (EPT) como el As, Cd, Pb, Cu, Zn, Fe, etc. (Romero, et al., 2008).

Los sulfuros metálicos más importantes presentes en la zona de estudio, son la pirita ( $\text{FeS}_2$ ) y la pirrotita ( $\text{Fe}_{1-x}\text{S}$ ).

La peligrosidad de los residuos mineros, está asociada a su contenido de EPT, a su bio y geodisponibilidad, pero también, al potencial para generar un drenaje ácido minero (DAM).

La generación de drenaje ácido ocurre por la oxidación de los minerales sulfurados presentes en los jales mineros al estar expuestos al aire y a la humedad. El producto de la oxidación de dichos sulfuros metálicos es ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ), que si no es neutralizado por agentes básicos o alcalinos, produce un drenaje

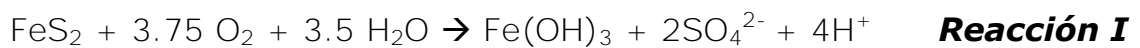
ácido con la capacidad de disolver metales y metaloides que pueden provocar problemas ambientales severos, como se puede observar en la Figura IV.

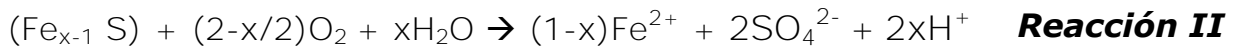
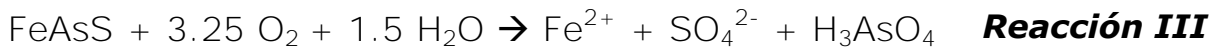
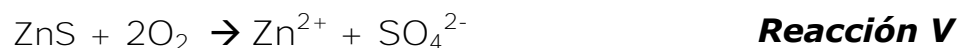


**Figura IV. Ejemplo de contaminación por Drenaje Ácido Minero (DAM).**

A continuación se presentan las reacciones de oxidación de algunos minerales asociados al fenómeno de la generación de drenaje ácido minero (Faure, 1980; Bain et al., 2000; Jenning et al., 2000; Armienta et al., 2001; Costello, 2003).

### **Pirita (FeS<sub>2</sub>)**



**Pirrotita (Fe<sub>1-x</sub> S):****Arsenopirita (FeAsS):****Galena (PbS):****Esfarelita (ZnS):**

La generación de DAM es poco común durante la operación y se desarrolla comúnmente después de que termina la acumulación de jales en el depósito y debido a la porosidad del material, ocurre la difusión de la humedad y del oxígeno atmosférico. No obstante, la oxidación de los sulfuros metálicos no siempre produce drenaje ácido, ya que la tendencia de los jales para generarlo es una función del balance entre los minerales productores de ácido (sulfuros metálicos) y los minerales con capacidad de neutralización (carbonatos, hidróxidos y aluminosilicatos). En general, cuando la capacidad de neutralización excede al potencial de generación de ácido, se consumirá toda la acidez generada y las soluciones que drenen del depósito de jales tendrán un pH cercano al neutro (Romero *et al.*, 2008). Por lo común, los jales, terreros y tepetates son almacenados en presas y lugares preparados específicamente con este propósito. No obstante, con el paso del tiempo se generan grandes cantidades de material residual y muchas veces se excede las capacidades de

almacenamiento, ocasionando que un confinamiento no siempre sea viable para el tratamiento de estos residuos, por lo cual se ha optado por explorar la posibilidad de darle otro uso a esas grandes cantidades de material.

### **1.5. Normatividad Ambiental.**

Con respecto a la normatividad ambiental, en México se tiene la Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Medio Ambiente, la cual es ley marco para ordenar el medio ambiente. Dicha ley cuenta con seis títulos: de Disposiciones Generales, de Biodiversidad, de Aprovechamiento Sustentable de los Elementos Naturales, Protección al Medio Ambiente, Participación Social e Información Ambiental, Medidas de Control, Disposiciones y Seguridad.

Es la SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales), la institución encargada de regular los métodos de medición para determinar la concentración de contaminantes, así como los criterios concernientes a los contaminantes y los procedimientos. Ésta posee normas específicas para el buen manejo de residuos y el cuidado ambiental con el fin de proteger a la sociedad y al ambiente, anticipando la posibilidad de liberaciones accidentales de sustancias consideradas como peligrosas.

Dicha Secretaría se apoya en las Normas Oficiales Mexicanas (NOM´s), las cuales son la herramienta jurídica que obliga a cumplir las especificaciones que determina la autoridad federal.

En materia de minería las normas que aplican son:

- a) La Norma Oficial Mexicana NOM-157-SEMARNAT-2009, que establece las pruebas para determinar la peligrosidad de un

residuo minero, así como los límites máximos permisibles (LMP) para los constituyentes tóxicos y el criterio a seguir en la determinación del potencial de generación de drenaje ácido.

- b) La NOM-141-SEMARNAT-2003, que establece el procedimiento para la realización de la prueba de la extracción de metales y metaloides en jales, con agua en equilibrio con CO<sub>2</sub> y la prueba de balance ácido-base para jales que contienen sulfuros metálicos.

Por otro lado, se debe considerar en gran medida la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos, la cual establece como prioridad la revalorización de los residuos y su posible reúso, siempre y cuando esto no conlleve a una mayor contaminación y sea viable desde el punto de vista económico.

A groso modo, según la ley general para la prevención y gestión integral de los residuos (DOF, 2003), estos puede clasificarse como residuo peligroso, residuo de manejo especial y residuo sólido urbano. Un residuo peligroso es aquel que posee algunas de las características de corrosividad, reactividad, explosividad, toxicidad, inflamabilidad o que contengan agentes infecciosos que les confieran peligrosidad; así como envases, recipientes, embalajes y suelos que hayan sido contaminados cuando se transfieran a otro sitio. Por otro lado, los residuos de manejo especial son aquellos generados en los procesos productivos, que no reúnen las características para ser considerados como peligrosos o como residuos sólidos urbanos, o que son producidos por grandes generadores de residuos sólidos urbanos. Un residuo sólido urbano, es aquel que es generado en las casas habitación, que resultan de la eliminación de los materiales que utilizan en sus actividades domésticas, de los productos que consumen y de sus envases, embalajes y empaques; también los residuos que provienen de cualquier otra actividad dentro de establecimientos o en la vía pública que genere residuos con



características domiciliarias y los resultantes de la limpieza (*DOF. México. 2003*).

Finalmente, en la fabricación de los especímenes de concreto, se utilizaron las recomendaciones de la Agencia Protectora del Medio Ambiente (EPA por sus siglas en inglés) y de la Sociedad Estadounidense para Ensayos y Materiales (ASTM por sus siglas en inglés).

### **1.6. Usos de residuos como materiales para la construcción.**

Recientemente se ha comenzado a incursionar en la posibilidad de reutilizar los materiales residuales que genera la industria minera. Por ejemplo, en la india se han utilizado residuos industriales, mineros y municipales en la fabricación de materiales para la construcción, tales como ladrillos, placas, baldosas, cerámica y pintura (Pappu, et al., 2007).

En México el Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares realizó un esfuerzo para la reutilización de residuos con la elaboración de materiales de construcción a partir de residuos industriales sólidos granulares utilizando tierras diatomáceas y jales mineros (ININ 2008), el cual estuvo a cargo del Doctor Jaime Vite Torres. En este estudio, se realizaron pruebas con jales mineros combinados con diversos materiales como arcilla, caolín y tierras diatomáceas, para la formación de ladrillos. Los residuos utilizados en este trabajo contenían concentraciones de cianuros, por lo que se les aplicó un proceso en columnas termostatazadas acopladas a fin de lixiviar los metales pesados, en donde se les mezcló con agentes reductores, surfactantes y complejantes. De esta forma se condicionó a los materiales para que no ocasionaran en el futuro problemas ambientales. Finalmente se obtuvo un buen resultado, ya que los

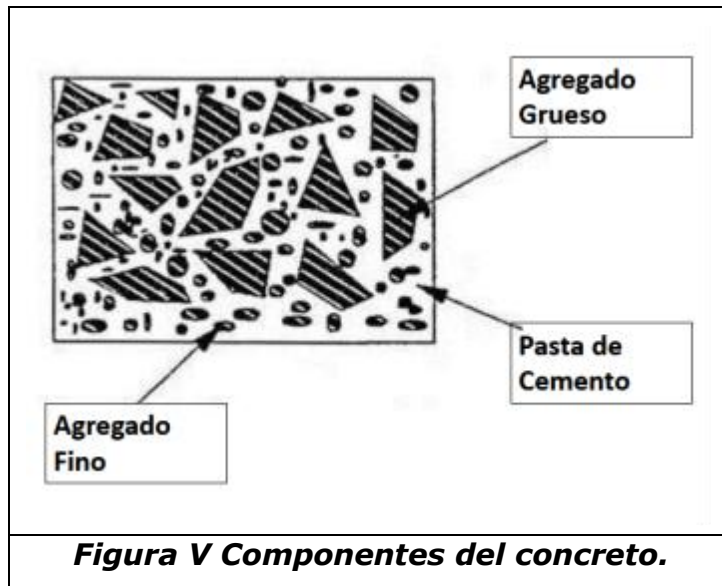
materiales presentaron buenas características para su posible uso en la industria de la construcción.

Cabe mencionar que recientemente en el Instituto de Investigaciones en Metalurgia y Materiales de la Universidad Mayor de San Andrés (UMSA), realizó un estudio donde analiza el efecto de los residuos mineros, con alto contenido de sulfatos en solución, en las estructuras de concreto como muros, diques, columnas, edificaciones, canales y tuberías de hormigón, sistemas de alcantarillado y a la red de distribución de agua potable circundante y se ha visto que estas pueden afectar su durabilidad (Montenegro, 2008).

### **1.7. El concreto y sus componentes.**

Básicamente, el concreto es un material pétreo artificial que se obtiene de la mezcla, en determinadas proporciones, de pasta y agregados minerales. La pasta se compone de cemento y agua, que al endurecerse une a los agregados formando un conglomerado semejante a una roca debido a la reacción química entre estos componentes (Figura V). Para lograr las mejores propiedades mecánicas, el concreto debe contar con un "esqueleto pétreo" empacado lo más densamente posible y con la cantidad de pasta de cemento necesaria para llenar los huecos que éste deje (Palbol, 1996).

En general, entre las características del concreto que se pueden mencionar son: la trabajabilidad (que se refiere al esfuerzo requerido para manipular concreto fresco), disgregabilidad, uniformidad, durabilidad, resistencia, impermeabilidad, entre otras. Los tipos y aplicaciones del concreto son muchos, como por ejemplo, en la construcción de edificios, casas, autopistas, calles, puentes, túneles, presas, sistemas de riego y canalización, aceras, etc.



Dependiendo del propósito para el cual se va a destinar el concreto, se toman en cuenta diversas variables para su producción y diseño, estas pueden ser el tipo de agregado mineral, la proporción agua-cemento y el tamaño del agregado, pero comúnmente también es necesaria la adición de aditivos químicos para modificar algunas de las propiedades finales.

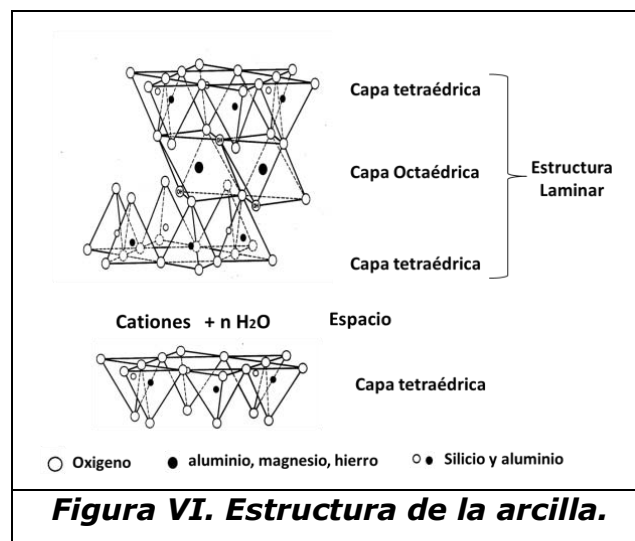
### **1.7.1. El Cemento.**

La palabra cemento aplicada en obras de construcción viene de la época de los romanos que llamaban *opus caementitium* a estructuras de piedras pegadas con cal quemada.

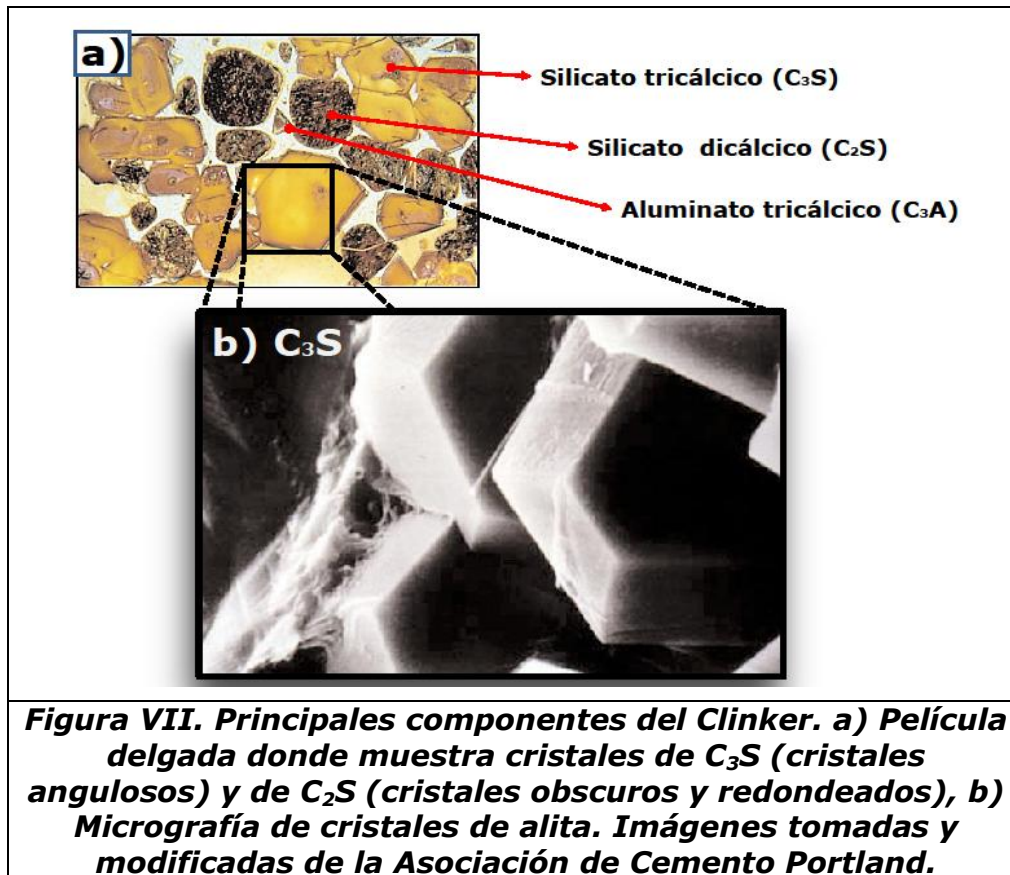
Los cementos, de origen mineral, que fraguan y endurecen con agua, son conocidos como cementos hidráulicos desde la antigüedad, pero sólo han sido empleados a partir de mediados del siglo XVIII. El término cemento portland se empleó por primera vez en 1824 por el fabricante inglés de cemento Joseph Aspdin, debido a su parecido con la piedra de portland, que era muy utilizada para la construcción en Inglaterra (Miranda, 2002).

El primer cemento portland moderno, hecho de piedra caliza y arcillas o pizarras, calentadas hasta convertirse en escoria o clínquer y después trituradas, fue producido en Gran Bretaña en 1845. El cemento portland se emplea hoy en la mayoría de las estructuras de concreto.

El cemento como principal componente del concreto, es producido mediante la **"clínquerización"** (producto de la calcinación a 1400 y 1500°C de la caliza (como  $\text{CaCO}_3$ ) y la arcilla (la cual está compuesta principalmente de aluminatos ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) y silicatos ( $\text{SiO}_4$ )), el ejemplo de las capas de una arcilla se puede observar en la Figura VI. En donde se observa la capa tetraédrica de silicio, y la capa octaédrica de los aluminatos y el espacio entre las capas donde el agua (o cationes solvatados en agua) pueden intercalarse, expandiendo la estructura de la arcilla.



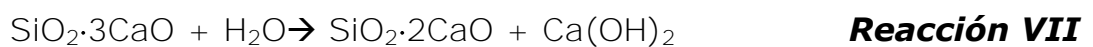
Resultado de la calcinación de la arcilla con el carbonato, produce soluciones sólidas de aluminatos y silicatos, dichas soluciones sólidas son: silicato tricálcico ( $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ) (Figura VII) también conocido como alita, silicato dicálcico ( $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ) conocido como belita (Figura VII) aluminato tricálcico ( $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ ) (Figura VII) y aluminoferrito tetracálcico ( $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) (Neville, 1999).



El **silicato tricálcico** ( $C_3S$ ) forma entre el 40% y el 60% del cemento. Al momento de fraguado se caracteriza por una elevada velocidad de hidratación y una elevada capacidad exotérmica. Este se forma debido a la alta relación de caliza/sílice presente, ya que el silicato dicálcico reacciona con la cal libre produciendo silicato tricálcico (Reacción VI):

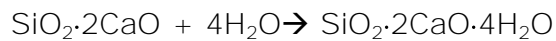


Sin embargo, su principal inconveniente es la generación de cantidades de hidróxido de calcio al momento del fraguado, lo cual conlleva a cambios en el volumen de las moléculas debido a la hidratación (Reacción VII).



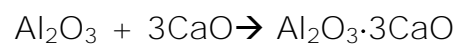
El **silicato dicálcico** ( $C_2S$ ) (20%-30% del cemento) durante el fraguado, se hidrata y endurece lentamente, la reacción es menos

exotérmica en comparación con el anterior silicato (Reacción VIII).



**Reacción VIII**

El **aluminato tricálcico** ( $\text{C}_3\text{A}$ ) (7% -14% del cemento), este se forma al reaccionar el carbonato de calcio con el aluminato (Reacción IX).



**Reacción IX**

Este aluminato contribuye en el desarrollo de la resistencia temprana, sin embargo, su presencia hace al concreto más susceptible de sufrir daño ya que como el fraguado no se completa inmediatamente al 100% quedan trazas de cemento residual que no han reaccionado, por lo cual este componente ( $\text{C}_3\text{A}$ ) puede reaccionar con sulfatos para dar sulfo aluminato de calcio hidratado (etringita), cuya formación es acompañada de expansiones que lo desintegran paulatinamente causando fracturas en el concreto (lo cual se verá con mayor detalle en el capítulo 1.11).

El **aluminoferrito tetracálcico** ( $\text{C}_4\text{AF}$ ) también componente del cemento, en poca proporción, proviene de la reacción del óxido de hierro con los óxidos de aluminio y de calcio para formar aluminoferrito tetracálcico.



**Reacción X**

### **1.7.2. Agregados.**

Los "agregados" son materiales de relleno que pueden ser naturales (como arena y grava), manufacturados (arena manufacturada y concreto reciclado) y mixtos, que se mezclan junto con el cemento, para dar volumen y una estructura al concreto. Estos conforman por lo menos tres cuartas partes del volumen total.

Originalmente, los agregados se consideraban como un material inerte, que se repartía por toda la pasta del cemento, básicamente por razones económicas. Sin embargo, es posible asumir desde un punto de vista opuesto y pensar que los agregados son un material de construcción unido a un todo cohesivo por medio de la pasta de cemento. De tal manera, los agregados no son realmente inertes y sus propiedades físicas, térmicas y químicas influyen en el comportamiento final del concreto (Neville, 1999).

En el artículo de Chan y coautores (2003), se habla de las características físicas y químicas de los agregados y de cómo estas influyen en las características de los concretos. Con lo cual, características como la textura, el tamaño, la porosidad, la densidad, la adherencia, la resistencia, son importantes a la hora de escoger que tipo de agregado se va a utilizar.

Existen diversos tipos de agregados, como los agregados minerales, los cuales varían en su origen geológico, es decir, según la roca que los origina. Estos pueden clasificarse como ígneos, sedimentarios y metamórficos.

Desde el punto de vista de tamaño, estas se pueden de clasificar en gravas y arenas. La primera es un agregado grueso que va desde 5 mm a 125 mm, mientras que los agregados finos se encuentran comprendidos entre los 60  $\mu$ m a 5 mm (Neville, 1999).

Como se mencionó anteriormente, el uso de residuos mineros como agregados minerales ha sido explorado recientemente, Sin embargo, debido a que la composición de los residuos puede variar de acuerdo con la mineralogía del yacimiento y el proceso de beneficio utilizado, es necesario realizar una caracterización detallada para identificar su peligrosidad, de tal manera que al ser utilizados para constituir un concreto, se considere cualquier elemento que pudiera generar un riesgo a la salud y al ambiente.

### **1.7.3. Agua de mezcla.**

Otro aspecto que influye en las características finales de un concreto es la calidad del agua, ya que las impurezas que pueda contener no solo pueden interferir con el fraguado del cemento y afectar la resistencia del concreto o producir manchas en la superficie. El agua utilizada comúnmente para la realizar la mezcla debe ser potable (Neville, 1999).

Por ejemplo, el agua que contiene grandes cantidades de cloruro tiende a causar humedad persistente, y se ha observado que cuando el cloruro no es más de 500 ppm o el  $\text{SO}_4^{2-}$  no es más de 1000ppm, el agua no causa daños al concreto (Neville, 1999).

### **1.7.4. Aditivos.**

Los aditivos son sustancias químicas que se agregan al concreto en la etapa de mezclado para modificar algunas de las propiedades de la mezcla como por ejemplo:

- Reducir el contenido de agua, sin cambiar la trabajabilidad.
- Ajustar el tiempo de fraguado.
- Acelerar la tasa de desarrollo de resistencia a edades tempranas.



- Incrementar la resistencia.
- Mejorar la durabilidad
- Reducir la permeabilidad.

En el caso del presente trabajo son de especial interés dos tipos de aditivos, los reductores de agua y los inclusores de aire. Los primeros son sustancias que se concentran en la superficie de contacto entre dos caras, alterando las fuerzas fisicoquímicas que actúan entre ellas. Las sustancias se integra a las partículas de cemento dándoles una carga negativa, lo que produce una repulsión entre las partículas que estabiliza su dispersión; además, esa carga, causa la formación de una película de moléculas orientadas de agua alrededor de cada partícula, lo que impide el acercamiento estrecho entre ellas. Por lo tanto, las partículas tienen más movilidad, y el agua liberada de las restricciones del sistema floculado lubrica la mezcla, aumentando así la trabajabilidad. Mientras los segundos, se utilizan para retener pequeñas burbujas de aire distribuidas uniformemente en el concreto, esto mejora la durabilidad de los concretos que estén expuestos a la humedad, también se ve mejorada de manera importante la trabajabilidad del concreto fresco, y la segregación (Neville, 1999).

Finalmente, cabe mencionar que los aditivos deben ser adicionados durante el proceso de mezclado junto con la última porción de agua, de esta forma se procura que éstos se dispersen uniformemente dentro de la mezcla (IMCYC, julio 2006).

### **1.8. La hidratación del cemento**

La reacción mediante la cual el cemento se convierte en un agente de enlace, se produce durante la hidratación. En esta etapa, se mezclan el clínquer, los agregados y agua para formar una pasta. A grandes rasgos, se puede decir que en presencia de agua el silicato dicálcico

(C<sub>2</sub>S), el silicato tricálcico (C<sub>3</sub>S) y aluminato tricálcico (C<sub>3</sub>A) forman productos de hidratación, los cuales con el paso del tiempo, producen una pasta firme y endurecida (Neville, 1999).

Los dos silicatos de calcio son los principales componentes cementantes del cemento, y el comportamiento físico del cemento durante la hidratación es semejante al de ambos compuestos por separado (Neville, 1999). Las reacciones de hidratación de los componentes son:

**Silicato tricálcico:**



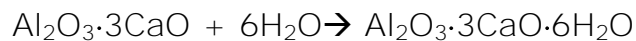
***Reacción XI***

**Silicato dicálcico:**



***Reacción XII***

**Aluminato tricálcico:**



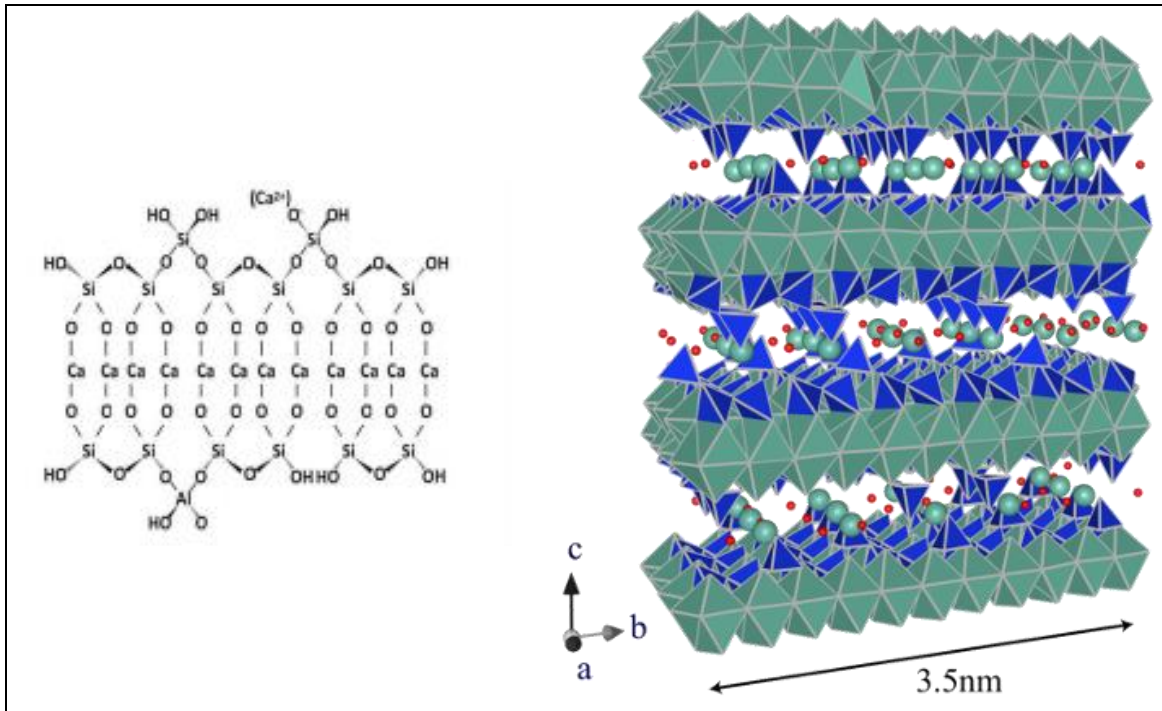
***Reacción XIII***

**Aluminoferrito tetracálcico:**



***Reacción XIV***

De la misma forma, la estructura del principal producto de hidratación (C<sub>3</sub>SH<sub>3</sub>) se puede visualizar en la Figura VIII.



***Figura VIII. Estructura propuesta de los hidratos del silicato y aluminatos cálcicos componentes del cemento. (Imágenes tomadas del Laboratorio de Ecomateriales de la universidad de Hokkaido). <http://saikou-main-sw.eng.hokudai.ac.jp/e-res1.html>).***

## **1.9. Tipos de Concreto.**

### **1.9.1. Concreto Hidráulico.**

El concreto hidráulico es la forma más utilizada del concreto, se obtiene al mezclar los componentes esenciales (agregados, agua y cemento) y se logra una masa plástica que al paso del tiempo endurece.

Este tipo de cementos fraguan y endurecen al reaccionar químicamente con el agua, aun estando inmersos en ella. Las características de este concreto, dependen principalmente de las propiedades del cemento utilizado, la relación agua-cemento (A/C) y la calidad de los agregados (Neville, 1999).

### **1.9.2. Concreto Celular.**

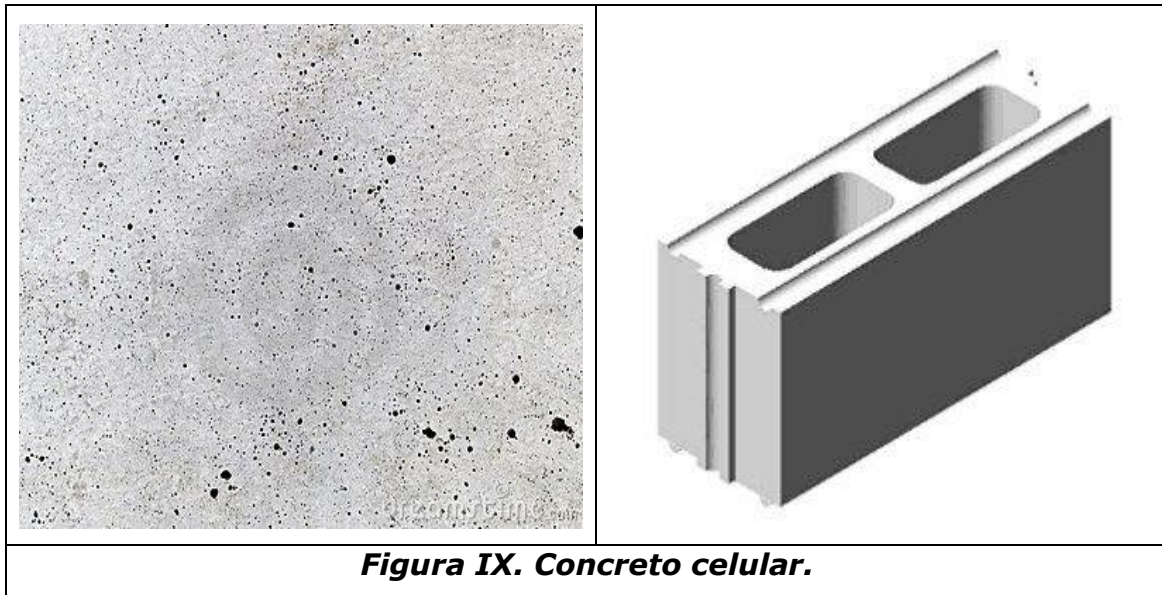
Otro tipo de concreto son los llamados ligeros, estos se ha utilizado por más de 50 años y se caracterizan por tener densidades menores a las de los concretos comunes.

Un tipo de concreto ligero es el concreto celular, el cual, a grandes rasgos, se obtiene al introducir burbujas de gas dentro de la mezcla fluida del cemento y arena, para producir un material de estructura celular, lo cual , provoca un gran número de espacios vacíos y como consecuencia una baja densidad (IMCYC,2009).

Existen dos tipos básicos de concreto celular, el concreto gasificado y el concreto espumoso. El primero se obtiene de una reacción química que genera gas en el mortero fresco, de manera que la fraguar contiene ya un gran número de burbujas de gas. Mientras que el concreto espumoso, se produce por la adición de un agente espumante a la mezcla (por lo general alguna forma de proteína hidrolizada o jabón de resina) que introduce y estabiliza las burbujas de aire durante el mezclado a alta velocidad (Neville 1999).

Las mezclas más comunes de componentes para producir un concreto celular, tienen densidades entre 500 y 1100 kg/m<sup>3</sup>, y generalmente se obtienen concretos de una densidad entre 350 kg/m<sup>3</sup> y 900 kg/m<sup>3</sup>.

Por su baja conductividad térmica, el concreto celular se utiliza principalmente como muros divisorios con fines de aislamiento térmico y muros para protección contra el fuego, ya que ofrece mayor resistencia a este agente que el concreto normal. Estructuralmente, se emplea mucho en forma de bloques o elementos prefabricados curados con vapor de alta presión (Figura IX), pero también puede usarse en la construcción de pisos (Neville, 1999).



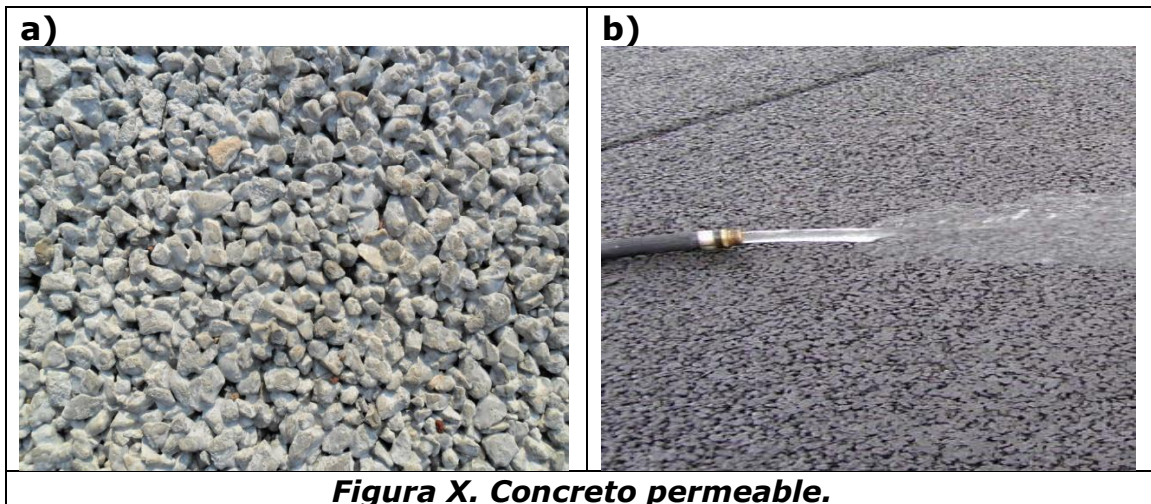
**Figura IX. Concreto celular.**

### **1.9.3. Concreto Permeable.**

Otro tipo de concreto, es el llamado permeable. Este es un concreto sin agregados finos, el cual puede verse como un aglomerado de partículas gruesas, rodeadas por un recubrimiento de pasta de cemento, el cual al secar deja una superficie con grandes poros que son la causa de su baja resistencia al paso del agua (Figura X, b)).

Para que un concreto sea permeable, la porosidad de las superficies debe ser mayor al 15%(Figura X, a)). Por lo cual, su criterio de aceptación es diferente con respecto al concreto común, ya que no está basado en la resistencia a compresión, sino en la porosidad y la permeabilidad.

Por sus características, este tipo de concreto es considerado sustentable, ya que permite la disminución e incluso la eliminación de los drenajes pluviales al permitir la libre filtración del agua a los sistemas de alcantarillado (Figura X, b)).



**Figura X. Concreto permeable.**

La densidad del concreto permeable, depende principalmente de la granulometría del agregado, por lo cual, el tamaño de estos debe ser de 9.5 a 19 mm (3/8 a 3/4 de pulgada) y se permite un 5% de tamaño mayor y un 10% de tamaño menor (Neville, 1999).

Otra característica de este tipo de concretos, es la resistencia a la compresión, la cual puede variar entre 14 y 141 kg/cm<sup>2</sup>, dependiendo de su densidad (Neville, 1999).

El uso de este tipo de concretos es en vialidades de bajo tráfico, áreas de estacionamientos, senderos y caminos para peatones o ciclistas. Sin embargo, en los últimos años el concreto permeable se ha usado como una alternativa a la típica solución de construir pozos para retención o almacenamiento de aguas pluviales. En general, ha tenido éxito en la construcción de áreas de estacionamiento con pavimentos de concreto permeable que permiten la filtración del agua al subsuelo, reduciendo el escurrimiento superficial, evitando la contaminación, el encharcamiento y la erosión de áreas aledañas (IMCYC ,2011).

### **1.10. Calidad en el concreto.**

Para que un concreto pueda ser usado en la industria de la construcción debe de cubrir una serie de pruebas (ya sean físicas o químicas). Una de las pruebas más comunes, es el ensayo de resistencia a la compresión, la cual, se utiliza para fines de control de calidad y aceptación del concreto.

La resistencia a la compresión se define como el esfuerzo máximo que presenta un material a la compresión sin romperse y el ensayo se realiza tronando probetas cilíndricas de concreto en, una máquina de ensayos de compresión, como se puede observar en la Figura XI. Esta resistencia depende principalmente de la proporción de agua cemento, pero también de las resistencias de los agregados y la pasta de cemento, así como la adherencia entre estos.



**Figura XI. Ensayo de resistencia a la compresión.**

Otra de las características de gran importancia al hablar de la calidad de un concreto es la durabilidad, la cual se define como (ACI 201): *"la habilidad para resistir la acción del tiempo, ataque químico, abrasión o cualquier otro proceso de deterioro. Un concreto durable mantendrá su forma, calidad y condiciones de servicio originales, cuando se exponen a su ambiente"*.

Entre las afectaciones que pueden darse en el concreto son la corrosión, fisuras o grietas, etc. Por ello, es de gran importancia evaluar los posibles daños que este pudieran darse con el paso del tiempo.

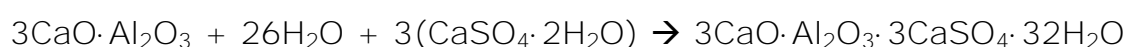
### **1.11. Estabilidad química de concreto.**

La estabilidad química, y por tanto, la calidad del concreto, dependen de diversos factores, por ejemplo, del tipo de agregados y de los componentes del cemento, ya que las diversas reacciones y procesos que se puedan dar entre éstos, afectarán también el desempeño del concreto. Aunque algunas reacciones en el concreto pueden ser benéficas (como las que contribuyen a la adhesión del agregado con la pasta), algunas otras pueden ser perjudiciales, debido a que pueden generar expansiones internas que pudieran afectar la cohesión del cemento.

Para verificar la estabilidad química del concreto, solo una pequeña parte del producto es utilizado en la práctica, el cual básicamente se expone a graves ataques químicos para estudiar dichas afectaciones.

#### **1.11.1. Formación de etringita ( $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{CaSO}_4\cdot 32\text{H}_2\text{O}$ ).**

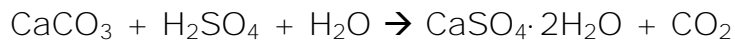
La etringita es un sulfoaluminato de calcio que se forma por la reacción entre el aluminato tricálcico (componente del cemento) y el sulfato de calcio que puede provenir de diversas fuentes. La reacción de formación de la etringita es:



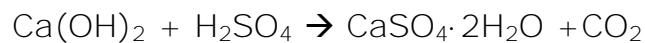
#### ***Reacción XV***



La fuente más importante de sulfato de calcio se genera cuando se utilizan agregados que contienen sulfuros (como pirita, pirrotita, marcasita (FeS<sub>2</sub>) o calcopirita (CuFeS<sub>2</sub>) los cuales al oxidarse (en presencia de oxígeno y humedad), pueden generar ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>). El ácido sulfúrico reacciona con los constituyentes alcalinos (como carbonato de calcio e hidróxido de calcio provenientes de la hidratación del cemento) (Reacción XVI y Reacción XVII) (para producir una serie de sulfatos, principalmente sulfato de calcio, el cual es la materia prima para la formación de la etringita.



#### **Reacción XVI**



#### **Reacción XVII**

Otra fuente de sulfato de calcio es el yeso (CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O) que se añade durante la fabricación del cemento para controlar el fraguado.

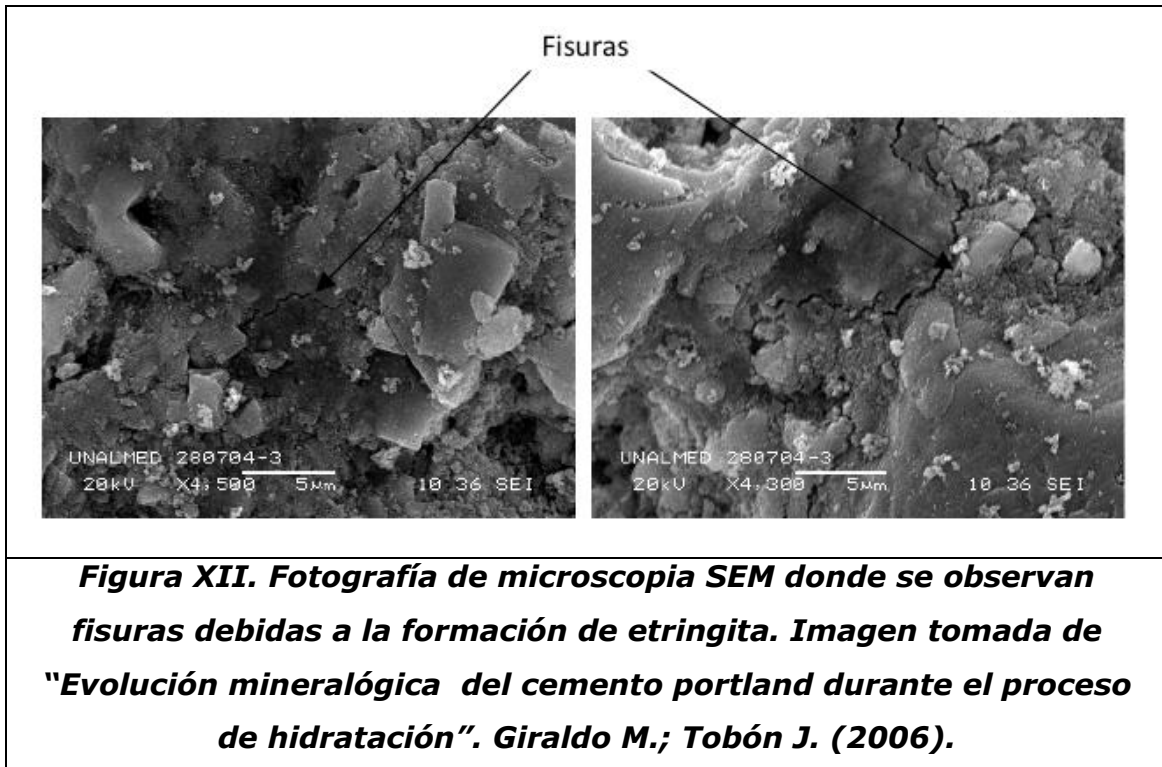
Otra fuente de sulfato de calcio puede ser la reacción entre el hidróxido de calcio (resultado de la hidratación del C<sub>3</sub>S y C<sub>2</sub>S) y el sulfato de sodio (presente en los agregados, o bien, en el agua. (IMCYC 2006), según la reacción:



#### **Reacción XVIII**

De tal forma, la principal afectación derivada de la formación de la etringita se debe al incremento del volumen de la superficie del agregado dentro del concreto, en donde las tensiones internas pueden superar la resistencia del material y causar fisuras o grietas. Un ejemplo de un concreto afectado por la formación de la etringita

se puede ver en la Figura XII , en donde se muestra una fotografía de microscopía electrónica y se observan las fisuras ocasionadas por la formación de este mineral.



### **1.11.2. Reacciones álcali-agregado (ASR).**

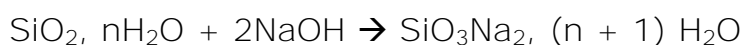
Como se mencionó en el capítulo anterior, existen reacciones adversas que pueden ocurrir en el concreto con el paso del tiempo y así afectar su durabilidad y resistencia, tales reacciones son conocidas como reacciones álcali-agregado (álcali-sílice y álcali-carbonato) estas son perjudiciales debido a que pueden generar fisuras o grietas en el concreto.

#### **Reacción álcali-sílice.**

La reacción álcali-sílice (ASR) ocurre cuando se utilizan agregados con minerales silicatados. Básicamente, se produce cuando la

disolución alcalina de los poros del hormigón, reacciona con los minerales silicatados de los agregados, formando un gel, que puede absorber agua y aumentar su volumen. Ya que el gel está confinado por la pasta de cemento circundante, se presentan presiones internas que podrán causar expansión, agrietamiento y ruptura de la pasta de cemento (Neville, 1999).

Para que se dé la reacción ASR, es necesaria la presencia de compuestos alcalinos de sodio y potasio, sílice y agua (del ambiente) y depende de factores como, la composición mineralógica, el tamaño de las partículas de agregados, el tipo de cemento, la concentración de Na, K y Ca, el pH, el grado de humedad, la temperatura del ambiente, el tiempo transcurrido, la porosidad, etc. (ACI 221.1R-9; P.E. Grattan-Bellew). A continuación se presentan un ejemplo de la reacción ASR probable (Reacción XIX):



### **Reacción XIX**

Se ha observado (Neville, 1999) que la velocidad de la reacción ASR, depende de la estructura del mineral, es decir, ésta será más rápida en tanto más desordenada sea su estructura, ya que los iones hidroxilos, sodio y/o potasio entrarán en el interior del mineral, en cambio, si la forma del sílice está bien cristalizada el ataque será superficial.

### **Reacción álcali-carbonato.**

Esta ocurre entre algunos agregados con alto contenido de carbonato (p. Ej. Caliza, Dolomita) y los compuestos alcalinos del cemento ( $\text{Na}_2\text{O}$  y  $\text{K}_2\text{O}$ ). En condiciones de humedad se presenta una expansión

de las superficies del agregado del concreto similar a la del álcali-sílice. Con ello, se desarrollan grietas que forman redes de agrietamiento y ocasionan pérdida de adherencia entre el agregado y la pasta de cemento.

Las reacciones que intervienen en este proceso son muy similares a la que se presenta con la reacción álcali-sílice.

## **2. OBJETIVO GENERAL.**

- ✓ El objetivo del presente trabajo es la evaluación de los tres diferentes tipos de residuos mineros (terrero, arena, jal), derivados del beneficio del hierro provenientes de la zona sur del estado de Michoacán para su posible uso en la fabricación de concretos ambientalmente seguros.

### **OBJETIVOS PARTICULARES**

- ✓ Caracterizar física, química y mineralógicamente los residuos mineros provenientes de la explotación y el beneficio del hierro en el distrito Lázaro Cárdenas, Michoacán.
- ✓ Evaluar la posible peligrosidad de los diferentes residuos con base en el contenido de elementos potencialmente tóxicos y el balance ácido base (ABA).
- ✓ Utilizar los diferentes tipos de residuos como agregados para fabricar concreto hidráulico, celular y permeable.
- ✓ Evaluar la calidad física de los concretos fabricados realizando la prueba de resistencia a la compresión, y determinar si cumplen con la característica requerida de resistencia para ser utilizados en la construcción.
- ✓ Evaluar la calidad ambiental de los concretos fabricados, una vez sometidos a un proceso de oxidación acelerada.

## **3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL**

### **3.1. Muestras de residuos mineros.**

Se realizó un muestreo de los depósitos residuales actualmente ubicados en el distrito minero Lázaro Cárdenas. Para tal efecto, se seleccionaron los tres tipos de residuos mineros derivados de la explotación y el beneficio de minerales de hierro (arenas, terreros y jales). De cada tipo de residuo, se recolectaron 50 kilogramos en cubetas y fueron trasladados al Laboratorio de Biogeoquímica Ambiental para su posterior manejo.

#### **3.1.1. Preparación de residuos.**

Con el propósito que los muestras de residuos fueran uniformes y representativas, estas fueron homogeneizadas por cuarteo, el cual, se realizó colocando la muestra original sobre una superficie lisa y limpia procurando que no hubiera posibilidad de pérdida de material o contaminación accidental con material extraño. El material se mezcló completamente, revolviendo la totalidad de la muestra en repetidas ocasiones. Cuando el material se tuvo bien mezclado, se distribuye cuidadosamente sobre la superficie y se divide en cuatro partes iguales. Después se mezclan los dos cuartos diagonalmente opuestos. El proceso se repitió hasta que la muestra tuvo la cantidad necesaria para los análisis (aproximadamente 3 kilogramos). La fracción de residuo obtenida por cuarteo fue secada con un horno de secado (marca: J.M. Ortiz) durante 24 horas. Mientras que el resto del residuo se destinó a la fabricación de los concretos.

### **3.1.2. Caracterización física de los residuos.**

La caracterización física de los residuos mineros, se contempló tres propiedades: la densidad, la humedad y la granulometría. A continuación se describe brevemente las pruebas realizadas para la determinación de cada una de estas propiedades.

#### **3.1.2.1. Densidad de los residuos mineros.**

El procedimiento para la determinación de la densidad de los residuos se realizó siguiendo el procedimiento señalado en el “Manual de Procedimientos Analíticos” (Delgadillo Flores, 2010). Ya que la densidad está definida como la masa total de los sólidos dividida por el volumen total de ellos. Se calculó la densidad con la siguiente expresión:

$$\rho = \frac{\rho_w * (W_s - W_a)}{W_s - W_a - (W_{sw} - W_w)} \quad \text{Ecuación I}$$

Dónde:

$\rho$ = Densidad del agua a la temperatura observada.

$W_s$  = Peso del picnómetro con la muestra corregida a 105 °C.

$W_a$ = Peso del picnómetro con aire.

$W_{sw}$ = Peso del picnómetro llenado con residuo y agua.

$W_w$ = Peso del picnómetro llenado con agua a la temperatura observada.

Dicho procedimiento fue realizado para cada uno de los residuos, estos fueron previamente pesados (10 gramos) y tamizados por

malla de 2 milímetros. Y después sometidos a un baño ultrasónico durante 10 minutos a temperatura ambiente (marca: Branson 3510; modelo 3510R-MTH), para retirar el aire atrapado en el residuo.

### **3.1.2.2. Humedad.**

En forma independiente, se determinó el contenido de humedad de los residuos mineros por diferencia de peso. El procedimiento fue: pesando la muestra a condiciones normales ( $P_1$ ), secando cada muestra de suelo a  $105^{\circ}\text{C}$ , en una estufa (marca: j. m. Ortiz) por 48 horas y dejado enfriar dentro de un desecador y registrando el peso una vez que se alcanzó la temperatura ambiente ( $P_2$ ). Se repitió el procedimiento anterior hasta que la diferencia en peso ( $P_2 - P_1$ ) fue menor al 2%, de esta forma se consideró que las muestras de residuos llegaron a peso constante. Finalmente se realizó el cálculo de la humedad de la siguiente forma:

$$\% \text{ Humedad} = \frac{P_1 - P_2}{P_2} * 100$$

***Ecuación II***

### **3.1.2.3. Análisis granulométrico.**

Existen diversos métodos para la determinación de la granulometría de un material, no obstante, en este estudio se utilizaron dos: el sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS) y el método de la pipeta.

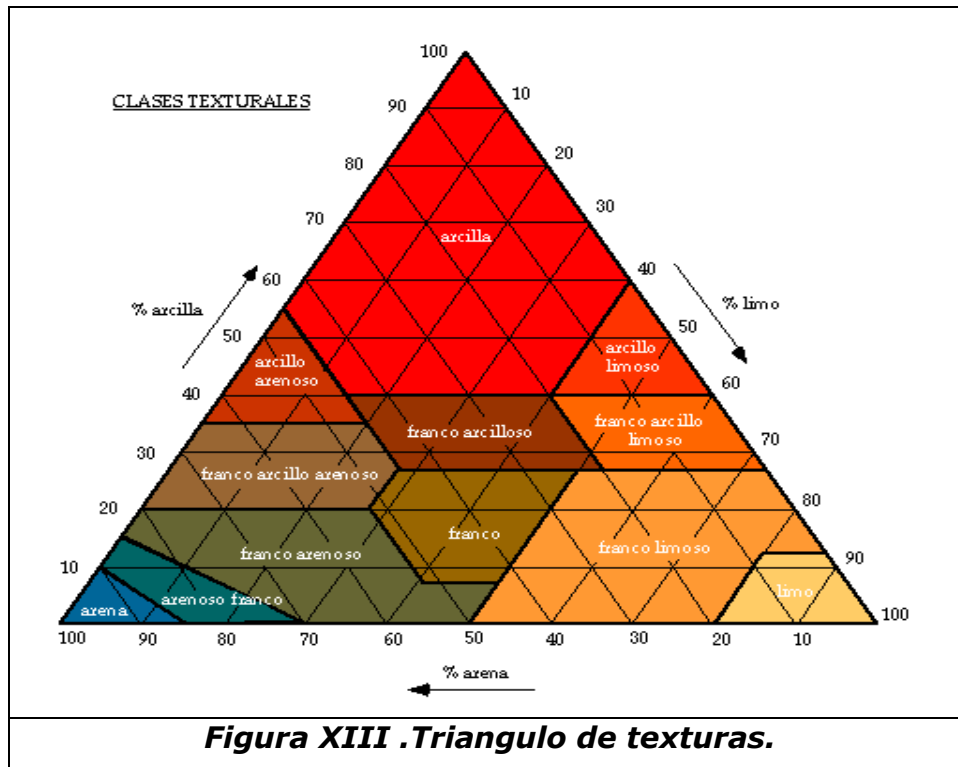
Cabe mencionar que en este estudio se utilizaron ambos métodos porque el análisis granulométrico SUCS por debajo de malla 200 no



diferencia entre las partículas finas como limos y arcillas, las cuales se determinan con mayor precisión por el método de la pipeta.

Para determinar la granulometría por método SUCS se hizo pasar una muestra de peso conocido (a peso constante) por un juego de tamices de diversos tamaños de rejilla, se utilizaron los tamices de malla #10 (2 mm), #20 (0.84 mm), #40 (0.42 mm), #60 (0.25 mm), #100 (0.149mm) y #200 (0.074mm). Se tamizó cada residuo durante 5 minutos y se separaron los diferentes tamaños de partículas en bolsas previamente pesadas. Obteniendo los porcentajes de grava, de arena, de limo y de arcilla, así como los coeficientes de uniformidad.

Para la determinación de las partículas por debajo de la malla #200 se utilizó el método de la pipeta el cual consistió en la separación y cuantificación en porcentaje de las partículas de arena, limo y arcilla de las muestras de residuos. Este procedimiento se realizó siguiendo el Método de la pipeta de acuerdo al **"Manual de Procedimientos Analíticos"** (Delgadillo Flores, 2010), donde 100 gramos de residuo secados previamente fueron lavados y tamizados a través de malla #200, donde la parte arenosa (la fracción retenida se seca y se pesa) mientras que el lavado (fracción que pasa de agua y finos), se transfieren a una probeta y se deja reposar. Posteriormente se tomaron muestras de los lavados, se secaron en estufa (marca: j. m. Ortiz) y se pesaron. Finalmente se consultó el triángulo de texturas (Figura XIII) para obtener la clase textural del mismo



### 3.1.3. Caracterización química de los residuos.

Las pruebas realizadas se encuentran basadas en la NOM-141-SEMARNAT-2003 y LA NOM-157-SEMARNAT-2009 y en el método EPA 65000. Las cuales son: la determinación de pH, determinación de elementos totales, la geodisponibilidad de elementos tóxicos y la prueba de balance ácido – base (ABA).

#### 3.1.3.1. Determinación de pH.

La determinación del pH se realizó conforme al procedimiento EPA 9045. Se prepararon las muestras de residuos en una relación 1:3 de residuo:agua, las cuales se agitaron a 250 rpm durante 5 minutos en un agitador orbital (marca: Heidolph; modelo: Unimax 2010), estas se dejaron reposar durante 1 hora y se realizó la medición en un potenciómetro (marca: Beckman; modelo: 720).

### **3.1.3.2. Determinación de elementos totales.**

De acuerdo a la NOM-157-SEMARNAT-2009 se realizó la medición del contenido de elementos totales en los residuos mineros, esto se cuantificó utilizando un equipo de fluorescencia de Rayos X (marca: Thermo Niton FXL modelo: compacto) adaptando el método EPA 6200.

Los elementos analizados fueron los siguientes, aluminio(Al), antimonio (Sb), arsénico (As), azufre(S), bario (Ba), bismuto(Bi), cadmio (Cd), calcio(Ca), cesio (Cs), cobalto (Co), cobre (Cu), cromo(Cr), escandio(Sc), estaño (Sn), estroncio (Sr), hierro (Fe), manganeso (Mn), mercurio (Hg), molibdeno (Mo), níquel (Ni), oro (Au), paladio (Pd), plata (Ag), plomo (Pb), potasio(K), rubidio (Rb), selenio (Se), silicio (Si), sodio (Na), talio (Tl), telurio (Te), titanio (Ti), torio (Th), uranio(U), vanadio(V), wolframio (W), zinc(Zn), zirconio (Zr).

### **3.1.3.3. Geodisponibilidad en residuos.**

Para la prueba de geodisponibilidad o extracción de metales y metaloides, con agua en equilibrio con CO<sub>2</sub>, se colocaron 5 gramos de muestras de residuos en 100 mililitros de agua desionizada (pH=5.5) en envases de plástico, los cuales se agitaron durante 18 horas en un lixiviador axial (marca: Fisher Scientific; modelo: N/A), se filtraron por membranas de 0.45 micrómetros con ayuda de portafiltros swinnex y jeringas (aproximadamente 50 mililitros) y se acidificaron con 0.5 mililitros de ácido nítrico concentrado.

Finalmente las muestras de residuos fueron analizadas mediante espectroscopia óptica de emisión atómica con plasma inductivamente acoplado (ICP-OES) en un equipo Iris Intrepid II, para los elementos:

aluminio, antimonio, arsénico, azufre, bario, berilio, Berilio, Boro, cadmio, calcio, cobalto, cobre, cromo, hierro, magnesio, manganeso, mercurio, molibdeno, níquel, plata, plomo, potasio, selenio, silicio, sodio, talio, titanio, vanadio, y zinc.

#### **3.1.3.4. Prueba de Balance Acido – Base**

El potencial de generación de drenaje ácido se determinó aplicando la Prueba Modificada de balance Acido-Base (PM-ABA). (Lawrence y Wang, 1997). Se calculó el valor del potencial de neutralización (PN), así como del potencial de acidez (PA) de los residuos. De esta manera finalmente se calculó el potencial de neutralización neto (PNN).

Para el potencial de neutralización se realizó una medición cualitativa de carbonatos adicionando unas gotas de ácido clorhídrico y observando la efervescencia producida.

La determinación cuantitativa se determinó por medio de la valoración inversa de ácido en exceso en una muestra preparada según la NOM-141-SEMARNAT-2003 con una solución de hidróxido de sodio 0.1 N (normalizada) hasta un pH final de 8.3 o mayor y de esta forma se encontró el punto de equivalencia y el cálculo del contenido de materiales alcalinos, expresado en kg de CaCO<sub>3</sub>/tonelada de material.

Por otra parte, el potencial de acidez tiene como objetivo determinar la capacidad del material para producir acidez (representado como el azufre que se encuentra en forma de sulfuros). Dicho porcentaje se multiplicó por 31.25 (valor que se obtiene de la reacción de neutralización de sulfuros con carbonato). Según la siguiente expresión:

$$PA = [\%S^{2-}] \times 31.25$$

**Reacción III**

El contenido de azufre total se cuantificó utilizando un equipo de fluorescencia de Rayos X (marca: Thermo Niton FXL modelo: compacto) adaptando el método EPA 6200.

La determinación del contenido de azufre como sulfato se determinó siguiendo el método turbidimétrico EPA 375.4. Para este método las muestras de residuos se pesaron, agitaron y filtraron conforme al procedimiento de geodisponibilidad antes mencionado; posteriormente, se adicionó cloruro de bario a las muestras líquidas para formar una suspensión de sulfato de bario. La turbidez resultante de la suspensión se midió utilizando un espectrofotómetro UV visible (modelo: Cary 3E; marca: Varian) y la respuesta se comparó con una curva estándar de sulfato.

### **3.2. Cemento.**

El cemento utilizado para la fabricación de los concretos fue: Cemento portland normal y Cemento CPP 30 RRS, ambos obtenidos comercialmente. Para efectos de discusión, cabe mencionar que éste último presenta la característica de ser resistente a sulfatos.

Para las muestras de cemento se realizó la determinación de pH, determinación de elementos totales, así como geodisponibilidad y prueba de balance ácido – base, aplicado los procedimientos de los apartados 3.1.3.1, 3.1.3.2, 3.2.3.3 y 3.2.3.4.

### **3.3. Elaboración de los concretos.**

Concluida la caracterización de los residuos y de los cementos, se prosiguió con la fabricación de cilindros de concreto, con base en el

método estandarizado ASTM-C-192, la cual establece la práctica normalizada para preparación y curado de especímenes de concreto para ensayo en laboratorio.

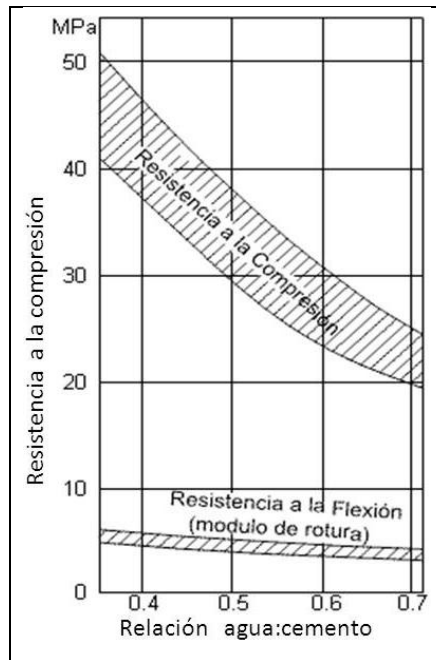
El cemento utilizado en la fabricación de los concretos (hidráulico, celular y permeable) fue un cemento portland normal, en el Cuadro II se muestra la composición típica de los principales componentes de este tipo de cemento (CEMEX, 2005).

**Cuadro II Proporción típica de los compuestos principales del cemento portland para un cemento ordinario.**

<b>Compuesto</b>	<b>%</b>
Silicato tricálcico	50
Silicato dicálcico	25
Aluminato tricálcico	12
Ferroaluminio tetracálcico	8
Yeso hidratado	3.5

Con base en esta norma los especímenes para medir la resistencia del concreto en compresión o esfuerzo de tensión deben ser cilindros de concreto colado y fraguado en posición vertical. Los moldes en forma de cilindro utilizados tuvieron una dimensión de 300 mm de largo x 200 mm de ancho.

Para determinar las proporciones de las mezclas se utilizó una curva de resistencia vs relación agua: cemento (A/C) (Figura XIV), de la cual se obtuvo la relación a utilizar y posteriormente se obtuvieron las proporciones de agregado recomendadas a partir de tablas.



**Figura XIV Gráfica de relación A/C vs resistencia a la compresión.**

### 3.3.1. Concreto hidráulico.

Para la fabricación del concreto hidráulico se utilizaron los tres tipos de residuos, en donde por su granulometría el terrero tomó el papel del agregado grueso, mientras la arena y el jal (en proporciones 4:1) fueron los agregados finos. De esta forma se buscó un balance en la granulometría del agregado. Las proporciones se muestran en el Cuadro III.

**Cuadro III. Mezcla para concreto hidráulico.**

Material	kg
Terrero	28.82
Arena	25.36
Jal	8.45
Cemento portland	7.00
Agua	3.90

La elaboración del concreto hidráulico que se destina para piso comúnmente utiliza una resistencia a la compresión de 250 kg/cm<sup>2</sup>, por lo que se realizó una mezcla, utilizando una proporción de agua/cemento de 0.5, para obtener una resistencia de tal magnitud.

Se realizó la mezcla en una revolvedora normal (sin aspas), se integraron poco a poco todos los componentes de la mezcla junto con un aditivo reductor de agua (64 mililitros), cuando se tuvo una mezcla homogénea y fluida se prosiguió al llenado de los moldes mencionados.

### **3.3.2. Concreto celular.**

El procedimiento para fabricar el concreto celular es similar al del concreto hidráulico con la diferencia que la mezcla se realiza en una revolvedora acoplada a un motor de gasolina, la cual lleva en su interior aspas en forma de malla, lo que ayuda a la inclusión de una mayor cantidad de aire.

En este caso se utilizó sólo el jal y la arena, ya que el terrero al tener una granulometría mucho mayor no es adecuado para fabricar este tipo de concreto. Las proporciones se presentan en el Cuadro IV.

***Cuadro IV. Mezcla para concreto celular.***

<b>Material</b>	<b>kg</b>
Arena	7.00
Jal	7.00
Cemento portland	10.00
Agua	5.00



Durante el mezclado se hizo la adición de dos aditivos, un reductor de agua para concreto celular y un aditivo inclusor de aire, del primero se agregaron 60 mililitros y del segundo 90 mililitros.

Se mezcló uniformemente durante quince minutos para dar paso al llenado de los moldes cilíndricos conforme al procedimiento ASTM-C-192.

### **3.3.3. Concreto permeable.**

En la fabricación del concreto permeable se utilizó sólo el terrero, debido a que este tipo de concreto requiere una materia prima con una granulometría específica y que esta se encuentre libre de agregados finos. Para cumplir con estos requerimientos el terrero fue triturado a 1/2" con ayuda de un molino de mandíbulas, para después ser tamizado por malla de 3/8 "con el objetivo de retirar la mayor cantidad de material fino, ya que estos pueden mermar la permeabilidad del material.

De manera similar a los concretos mencionados anteriormente, los componentes de la mezcla (terrero triturado, cemento y agua) son puestos en una revolvedora normal (sin aspas), en las cantidades en las que se muestran en el Cuadro V, donde se combinan hasta alcanzar una mezcla homogénea. Durante el mezclado se adicionó (288 mililitros) de aditivo para concreto permeable "ecocreto" (aditivo comercial), el cual aglomera los agregados dejando grandes poros por donde es capaz de pasar el agua.

**Cuadro V. Mezcla para concreto Permeable.**

<b>Material</b>	<b>kg</b>
Terrero	29.0
Cemento portland	7.2
Agua	2.0

Con los elementos bien integradas se llenó un molde de madera de forma cuadrada (diferente a los moldes cilíndricos anteriores) en el cual se le compacto (en lo posible) con pequeños golpes y una madera, obteniéndose un espécimen de 25x25 centímetros. El proceso comúnmente requiere de máquinas compactadoras, las cuales se utilizan en campo en el momento de colocación del concreto permeable. Sin embargo para los fines de estudiar a nivel laboratorio este tipo de concreto, la compactación realizada es funcional.

### **3.4. Evaluación de los concretos.**

Las evaluaciones sólo se realizaron al concreto hidráulico y el concreto celular, esto, debido a que ya que el concreto permeable no tenía el tamaño adecuado y tampoco se contaba con la suficiente cantidad de residuos.

Con el propósito de realizar más pruebas en los concretos, estos fueron cortados en cilindros más pequeños (5 cm x 15 cm), con los cuales se realizaron los siguientes procedimientos.

#### **3.3.1. Resistencia a la compresión.**

Después de fraguado, los concretos hidráulico y permeable, se desmoldaron a los 7, 14 y 28 días y se le realizó la prueba de resistencia a la compresión, anteriormente descrita.

Con el objetivo de distribuir uniformemente la carga aplicada es necesario el "cabecear" el espécimen, es decir, se le coloca una delgada capa de mortero de azufre de alta resistencia, en la parte superior e inferior del cilindro, ya que es sobre éste, donde se aplica la fuerza.

Para el ensayo se colocó cada uno de los cilindros de concreto en el aparato de compresión, el cual aplica lentamente una fuerza en dirección axial, hasta llegar al punto de ruptura del concreto.

La fabricación de concretos así como la prueba de resistencia a la compresión, fue posible gracias a la colaboración del Ingeniero Jaime Grau Genesis y el Ingeniero Álvaro Potrero Domínguez, en las instalaciones de la empresa Concreto Ecológico de México S.A. de C.V.

### **3.3.2. Oxidación acelerada.**

Con el propósito de simular un intemperismo los concretos fueron sometidos a un tratamiento de oxidación acelerada. El procedimiento consistió en sumergir cada pieza de concreto (hidráulico y permeable) a una exposición a peróxido de hidrogeno al 30%, el cual, se colocó a un 30% de exceso del material oxidable para asegurar que éste no fuese un reactivo limitante. Para cada tipo de concreto se dejó una pieza de concreto (previamente cordato), como testigo para las pruebas.

Después de la simulación de oxidación acelerada, las muestras se secaron a 40°C, en una estufa (marca: j. m. Ortiz) y fueron sometidas a pruebas de resistencia a la compresión (como se mencionó, para evaluar su afectación).

La prueba de resistencia a la compresión se realizó en las instalaciones del laboratorio del Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, gracias a la colaboración del Ingeniero Mario Alberto Hernández Hernández y su equipo de trabajo el Ingeniero José Manuel Cagal Ramírez y el Ingeniero Luis Gallegos Calleja. Este laboratorio se encuentra acreditado ante la Entidad Mexicana de Acreditación, A.C. (EMA) Acreditación en ensayos de acuerdo a la

NMX-EC-17025-IMNC-2006 en la rama de la construcción y ante el Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y la Edificación, S.C. (ONNCCE) en la NMX-CC-9001-IMNC-2008 / ISO 9001:2008. Además de acreditación ante CONAGUA.

Después de la simulación de oxidación acelerada, se determinó el pH a los residuos líquidos obtenidos para los dos concretos evaluados, con ayuda de un potenciómetro (marca: Beckman; modelo: 720).

### **3.3.3. Microscopia Electrónica de Barrido acoplada a Espectrometría de rayos x por Energía Dispersa (MEB-EDS).**

Se analizaron por microscopia electrónica de barrido las muestras de concreto, celular e hidráulico, obtenidos antes y después del proceso de oxidación. Esto con el objetivo de conocer la composición de los materiales y poder identificar una posible alteración en ellos debida a la oxidación.

Para cada muestra, se realizaron diversas mediciones en diferentes puntos aleatorios, con el objetivo de analizar la composición de estos.

Esta prueba se realizó en un microscopio electrónico de barrido acoplado a espectrometría de rayos x por energía dispersa (MEB-EDS) (modelo: Tabletop TM-1000; marca: Hitachi).

### **3.4.4. Difracción de Rayos X.**

Para determinar las fases mineralógicas presentes en el concreto así como detectar una posible alteración por el proceso de oxidación, se analizaron los residuos mineros (jal, arena y terrero), así como, a las

muestras de concreto hidráulico y celular obtenidos antes y posteriormente al proceso de oxidación.

Las muestras fueron molidas mediante un mortero, se homogenizaron y se analizaron en un difractómetro Shimadzu XRD-6000 equipado con filtro de Ni y tubo de cobre, utilizando un portamuestras de aluminio (fracciones no orientadas) en el intervalo **angular  $2\theta$  de  $4^\circ$  a  $70^\circ$  y velocidades de  $2^\circ/\text{minuto}$ .**

La prueba se realizó en el Laboratorio de Difracción de Rayos X, del Instituto de Geología (Departamento de Geoquímica) en la Universidad Nacional Autónoma de México.

## **4. RESULTADOS y DISCUSION.**

En el presente capítulo se muestran los resultados obtenidos de las pruebas realizadas a los residuos mineros y cementos, así como la fabricación y evaluación de los concretos.

### **4.1. Muestras de residuos mineros.**

A continuación se presenta la caracterización física y química de los residuos mineros (terrero, arena y jal).

#### **4.1.1. Caracterización física de los residuos.**

La caracterización física integra la densidad, humedad y el análisis granulométrico.

##### **4.1.1.1. Densidad.**

Como se mencionó con anterioridad, la densidad de los residuos mineros es importante porque va a permitirnos predecir qué tan pesado será el material que se va a elaborar, pues esta también es una variable en el momento de elegir el uso adecuado. De tal forma, en el Cuadro VI se presentan los resultados de las pruebas de densidad obtenidos para los tres residuos analizados, se puede observar que tienen una densidad alta en comparación con los agregados comúnmente utilizados en la industria (densidades entre 2 y 2.5), siendo la arena la de mayor densidad seguida del jal y el terrero.

**Cuadro VI. Determinación de densidad.**

<b>Muestra</b>	<b><math>\rho</math> (mg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>DPR<sup>1</sup></b>
Terrero	2.833	2.67
Arena	3.163	4.00
Jal	3.067	4.96

Se realizaron duplicados a los tres tipos de residuos y la diferencia porcentual relativa entre la muestra y su duplicado, se encuentra por debajo del 20%, este criterio se estableció como límite de aceptación de los resultados generados ya que es el que se ocupa en análisis de matrices ambientales.

Se sabe que una densidad alta de los agregados en el concreto puede proporcionar alta resistencia, sin embargo, no siempre es lo más adecuado, ya que también hace que estos sean demasiado pesados. Por lo general, los agregados que presentan alta densidad se utilizan para fabricar concretos que se utilizan en pisos, pavimentos, bloques de concreto armables, etc. Por ello una de los materiales sugeridos es el concreto hidráulico (para piso), así como también, se sugieren materiales ligeros.

#### **4.1.1.2. Humedad.**

Tras haber pesado y secado las muestras hasta peso constante, se obtuvieron los siguientes resultados de humedad para los residuos mineros

**Cuadro VII. Contenido de humedad en residuos mineros.**

<b>Muestra</b>	<b>% humedad</b>
Terrero	0.8
Arena	0.7
Jal	1.2

<sup>1</sup> DPR: Diferencia Porcentual Relativa.

Podemos observar que el residuo que contiene más humedad es el jal, seguido del terrero y la arena. En general, en la industria de la construcción, la humedad en los agregados del concreto (en nuestro caso los residuos) puede llegar a alterar el contenido de agua en las mezclas de los concretos, debido a que parte del agua de mezcla utilizada puede ser absorbida por los agregados. De esta manera, la humedad en los residuos también contribuye al agua necesaria para la realización de la mezcla.

#### 4.1.1.3. Análisis granulométrico.

Como anteriormente se mencionó, debido a que el terrero tiene una granulometría muy grande el análisis SUCS sólo fue realizado al jal y la arena. En el Cuadro VIII se presentan los resultados de la granulometría obtenida para las muestras de jal. Se puede observar que menos del 50% de la muestra son partículas finas, por lo que el jal se considera un material granular.

**Cuadro VIII. Granulometría SUCS para muestra de jal**

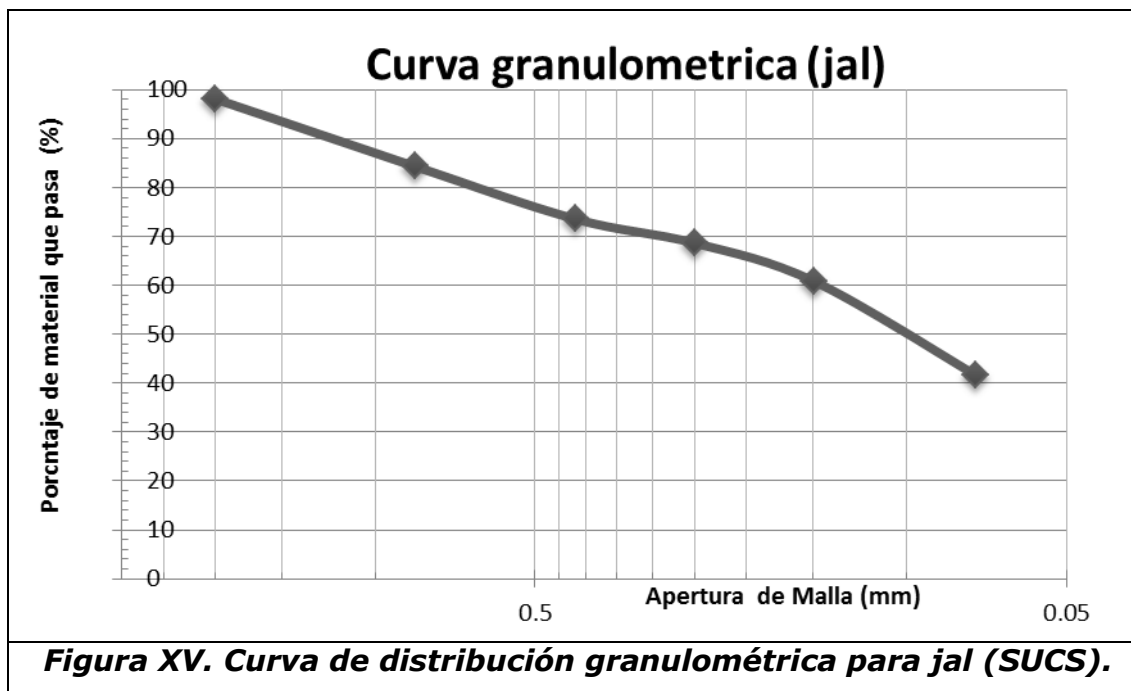
No. Malla	Apertura (mm)	Masa de residuo retenido	Porcentaje de residuo retenido	Porcentaje de residuo que pasa
10	1.68	9.28	1.86	98.14
20	0.84	69.16	13.83	84.31
40	0.42	53.77	10.75	73.56
60	0.25	24.60	4.92	68.64
100	0.149	39.16	7.83	60.80
200	0.074	95.99	19.20	41.61
Finos	0	208.02	41.60	0.00
COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD <sup>2</sup> : 2				

<sup>2</sup> COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD (Cu): división entre el tamaño de malla por debajo del cual queda el 60% del material y el tamaño de malla por debajo del cual queda el 10% del material (en peso).



En dicho cuadro, el coeficiente de uniformidad es de 2, lo que indica que este residuo es uniforme, ya que contiene material con un intervalo corto de tamaño, entre aproximadamente 1.68 Y 0.004 milímetros (tamaño aproximado de la arcilla).

Así mismo, en la Figura XV se presenta la gráfica del porcentaje de partículas que pasa contra la apertura de malla, en dicha figura se puede observar que la curva es suave lo que indica que tiene una granulometría continua, lo cual fue observado cuando todos los tamices retenían cierta cantidad de partículas.



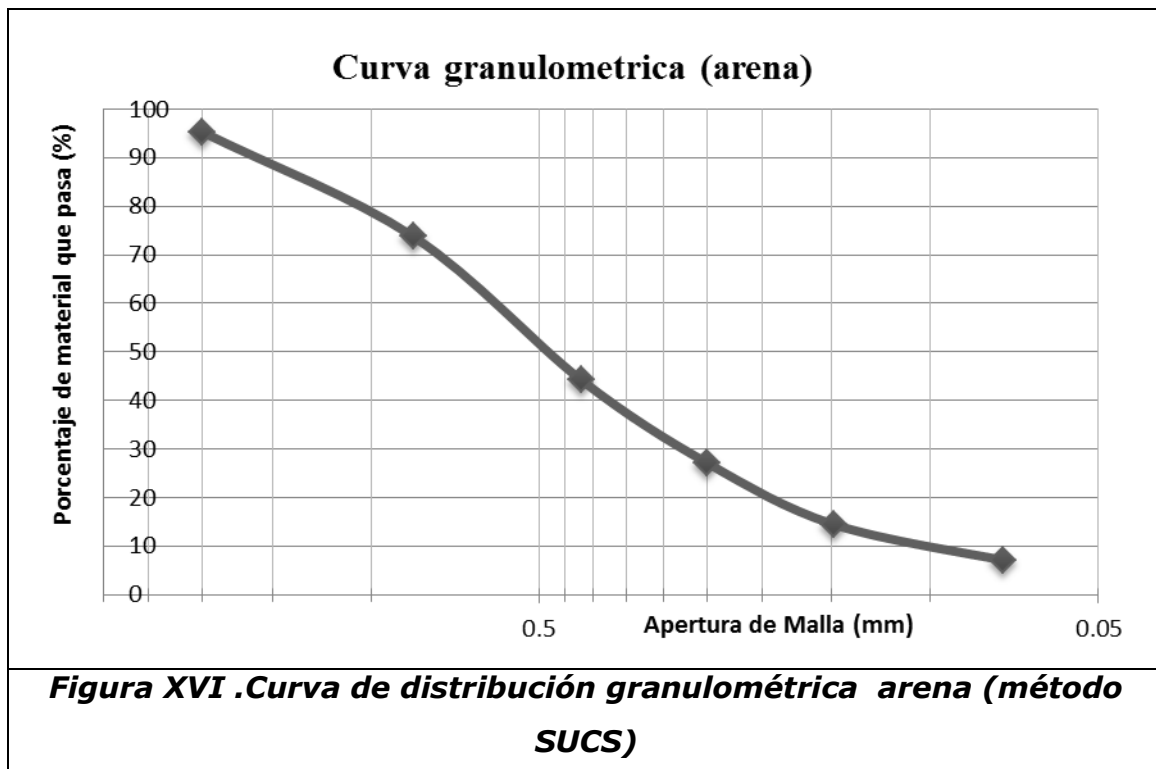
De la misma forma, los resultados de la granulometría de la arena se presentan en el Cuadro IX donde se puede observar que casi no hay presencia de partículas finas y que la mayor parte de las partículas que constituyen a este residuo están comprendidas entre los 1.68 y 0.074 milímetros.

**Cuadro IX Granulometría SUCS para muestra de arena.**

No. Malla	Apertura (mm)	Masa de residuo retenido (g)	Porcentaje de residuo retenido	Porcentaje de residuo que pasa
10	1.68	23.62	4.72	95.28
20	0.84	107.60	21.52	73.76
40	0.42	148.09	29.62	44.14
60	0.25	85.39	17.08	27.06
100	0.149	62.84	12.57	14.49
200	0.074	37.11	7.42	7.07
finos	0	35.34	7.07	0.002
COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD: 5.6				

El coeficiente de uniformidad de la arena es 5.6 por lo que se considera no uniforme, ya que contiene material con un amplio intervalo de tamaño.

De la misma forma, en la Figura XVI se observa la gráfica del porcentaje de partículas que pasa contra la apertura de malla obtenida para la arena, en dicha figura se puede observar que la curva es suave lo que indica que tiene una granulometría continua.



La granulometría de los agregados que se incorporan a los concretos son de gran importancia ya que estos afectan diversos factores, como la trabajabilidad y la textura del concreto, ya que estos agregados tienen que adaptarse a las necesidades de la construcción en las que se van a utilizar.

### **Textura.**

La textura fue determinada para dos tipos de residuos (arena y jal). A partir de los porcentajes de arena, limo y arcillas obtenidos, se realiza una localización de la textura en el triángulo de la Figura XIII. De tal forma, se presenta la textura encontrada para cada uno material (Cuadro X).

***Cuadro X Determinación de textura por el método de la pipeta.***

<b>Muestra</b>	<b>Arena (%)</b>	<b>Limo (%)</b>	<b>Arcilla (%)</b>	<b>Textura</b>
Arena	92.02	5.90	2.09	Arenosa
Jal	24.18	35.13	40.69	Arcilloso limoso

Podemos observar que, la arena tiene el mayor promedio de partículas arenosas, pero menor contenido de arcilla. Mientras que el jal tiene un contenido de partículas más equilibrado.

Se sabe que la proporción de limo y arcilla en los materiales contribuyen en el comportamiento del concreto fresco así como del producto final, ya que puede afectar la adherencia y la consistencia de estos. Si contienen un gran contenido de finos, estos ayudarán a tener una mayor adherencia con los agregados, sin embargo, por ejemplo en el caso del concreto permeable esto afecta la porosidad del material y por tanto se ve mermado su objetivo principal, que es dejar pasar líquidos a través de él.

A partir de estos resultados podemos darnos cuenta que el jal y la arena pueden ser utilizados en concretos como el hidráulico y el celular, donde el contenido de partículas finas no afecten las propiedades del mismo. Por otro lado, el terrero puede ser utilizado en los tres tipos de concretos sugeridos en este trabajo por tener una granulometría mayor, y es el único residuo adecuado para la fabricación del concreto permeable, no obstante, es necesario un pretratamiento del terrero, para dejar a este libre de finos.

#### **4.1.2. Caracterización química de los residuos.**

La caracterización química de los residuos integra la determinación de pH, determinación de elementos totales, geodisponibilidad y prueba de balance acido-base.

##### **4.1.2.1. Determinación de pH.**

Los resultados de las mediciones del pH para las muestras de terreros, de arenas y jales se muestran en el Cuadro XI.

***Cuadro XI. Determinación de pH de los residuos.***

<b>Muestra</b>	<b>pH</b>	<b>pH promedio</b>	<b>DPR</b>
Terrero	9.39	9.26	2.84
	9.13		
Arena	8.53	8.55	0.39
	8.56		
Jal	8.28	8.19	2.16
	8.10		

Se puede observar que el pH de las muestras de residuos es básico y se consideran no peligrosos, esto con base a la NOM-157-SEMARNAT-2009, que establece que los residuos mineros se consideran peligrosos cuando el valor del pH sea menor o igual que 4 o mayor

que 10, para ser considerados como no peligrosos. Por otra parte el porcentaje de coeficiente de variación para la determinación de esta propiedad para cada muestra es bajo, así como también lo es la diferencia potencial relativa entre los duplicados, por tanto, podemos considerar que los valores de pH son aceptables.

#### **4.1.1.2. Determinación de elementos totales en residuos.**

Derivado del análisis de fluorescencia de rayos x, se obtuvieron los siguientes (Cuadro XII) valores de concentración de los elementos analizados.

**Cuadro XII. Contenido de elementos totales en residuos.**

<b>Elemento</b>	<b>Terrero (ppm)</b>	<b>Arena (ppm)</b>	<b>Jal (ppm)</b>
Antimonio	< LD	< LD	< LD
Arsénico	< LD	21.08	42.93
Azufre	597.64	9429.07	13261.25
Bario	385.23	332.55	253.18
Cadmio	< LD	< LD	< LD
Calcio	42007.25	46972.76	63195.79
Cesio	19.45	20.81	23.14
Cobalto	< LD	< LD	386.46
Cobre	230.99	505.04	947.11
Cromo	41.41	< LD	32.90
Escandio	145.02	148.90	218.61
Estaño	< LD	< LD	< LD
Estroncio	84.17	81.10	75.04
Hierro	70514.11	329945.38	209281.80
Manganeso	1597.66	2108.61	2493.92
Mercurio	< LD	< LD	< LD
Molibdeno	< LD	7.31	14.08
Níquel	36.24	139.20	59.70
Oro	< LD	< LD	< LD
Paladio	< LD	< LD	< LD
Plata	< LD	< LD	< LD
Plomo	< LD	30.92	< LD
Potasio	7048.27	4023.88	3163.47
Rubidio	20.50	21.09	14.97

Elemento	Terrero (ppm)	Arena (ppm)	Jal (ppm)
Selenio	< LD	< LD	< LD
Talio	< LD	< LD	< LD
Telurio	< LD	< LD	< LD
Titanio	2148.98	1241.32	1169.53
Torio	< LD	< LD	< LD
Uranio	< LD	< LD	< LD
Vanadio	77.72	75.40	55.07
Wolframio	< LD	48.23	61.60
Zinc	95.57	< LD	< LD
Zirconio	87.03	58.30	52.17

Podemos observar grandes concentraciones de hierro, calcio y azufre, lo cual es congruente con lo esperado, ya que esto se debe principalmente a la presencia de pirita y calcita en los residuos. De igual forma podemos ver que la mayor parte de los elementos analizados se encuentran por debajo del límite de detección del equipo (<LD), o bien, se encuentra en poca proporción.

#### **4.1.2.3. Geodisponibilidad de los residuos.**

La toxicidad de los metales y metaloides en jales no dependen de su concentración total sino de la concentración **“geodisponible”** representada como la fracción extraíble bajo condiciones ambientales. Los metales y metaloides presentes en la fracción extraíble pueden representar un riesgo ambiental, ya que se pueden movilizar en el ambiente. Esta prueba de extracción tuvo como propósito caracterizar la peligrosidad mediante la geodisponibilidad de elementos potencialmente tóxicos (EPT).

En el Cuadro XIII se presentan las concentraciones obtenidas para los elementos normados en la NOM-141-SEMARNAT-2009, los cuales son antimonio (Sb), arsénico (As), bario (Ba), berilio (Be), cadmio

(Cd), cromo(Cr), mercurio (Hg), plata (Ag), plomo (Pb), selenio (Se), así como otros de interés.

**Cuadro XIII Concentración total soluble medida por ICP-OES de residuos.**

<b>Elemento</b>	<b>Ag* (mg/L)</b>	<b>Al (mg/L)</b>	<b>As* (mg/L)</b>	<b>B (mg/L)</b>	<b>Ba* (mg/L)</b>	<b>Be* (mg/L)</b>	<b>Ca (mg/L)</b>
<b>LD (mg/L)</b>	<b>0.015</b>	<b>0.023</b>	<b>0.062</b>	<b>0.0098</b>	<b>0.031</b>	<b>0.017</b>	<b>0.013</b>
Terrero	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	10.603
Arena	<LD	0.268	<LD	0.021	0.015	<LD	>200
Jal	<LD	0.091	<LD	0.021	0.007	<LD	>200

<b>Elemento</b>	<b>Cd* (mg/L)</b>	<b>Co (mg/L)</b>	<b>Cr* (mg/L)</b>	<b>Cu (mg/L)</b>	<b>Fe (mg/L)</b>	<b>Hg* (mg/L)</b>	<b>K (mg/L)</b>
<b>LD (mg/L)</b>	<b>0.18</b>	<b>0.003</b>	<b>0.003</b>	<b>0.007</b>	<b>0.014</b>	<b>1.758</b>	<b>0.167</b>
Terrero	<LD	<LD	<LD	<LD	0.020	<LD	1.097
Arena	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	6.559
Jal	<LD	0.012	0.031	<LD	<LD	<LD	1.728

<b>Elemento</b>	<b>Mg (mg/L)</b>	<b>Mn (mg/L)</b>	<b>Mo (mg/L)</b>	<b>Na (mg/L)</b>	<b>Ni (mg/L)</b>	<b>Pb* (mg/L)</b>	<b>S (mg/L)</b>
<b>LD (mg/L)</b>	<b>0.2</b>	<b>0.016</b>	<b>0.023</b>	<b>0.031</b>	<b>0.017</b>	<b>0.05</b>	<b>0.032</b>
Terrero	2.101	<LD	0.038	2.151	0.028	<LD	<LD
Arena	0.639	<LD	<LD	4.132	<LD	<LD	16.627
Jal	1.713	0.031	<LD	1.029	<LD	<LD	302.988

<b>Elemento</b>	<b>Sb* (mg/L)</b>	<b>Se* (mg/L)</b>	<b>Si (mg/L)</b>	<b>Ti (mg/L)</b>	<b>Tl (mg/L)</b>	<b>V (mg/L)</b>	<b>Zn (mg/L)</b>
<b>LD (mg/L)</b>	<b>0.015</b>	<b>0.021</b>	<b>0.008</b>	<b>0.012</b>	<b>0.075</b>	<b>0.016</b>	<b>0.02</b>
Terrero	<LD	<LD	0.340	<LD	0.092	<LD	0.055
Arena	<LD	<LD	0.920	<LD	<LD	<LD	<LD
Jal	<LD	0.027	0.526	<LD	<LD	0.007	0.005

**\*Elementos normados en la NOM-157-SEMARNAT-2009 en residuos mineros.**

En el cuadro anterior se puede ver que en la mayoría de los elementos analizados, los lixiviados de los residuos, se encuentran por debajo del límite de detección. Es importante resaltar que se detectaron altas concentraciones de azufre soluble lo cual, como se

mencionó anteriormente puede afectar la durabilidad de los concretos.

En el Cuadro XIV podemos ver la comparación de las concentraciones obtenidas con los límites máximos permitidos.

**Cuadro XIV. Comparación de contenido de elementos normados con los límites máximos permisibles.**

<b>Elemento</b>	<b>LMP PECT (mg/L)</b>	<b>Terrero (mg/L)</b>	<b>Arena (mg/L)</b>	<b>Jal (mg/L)</b>
Antimonio	0.53	<LD	<LD	<LD
Arsénico	5.00	<LD	<LD	<LD
Bario	100.00	<LD	0.02	0.01
Berilio	1.22	<LD	<LD	<LD
Cadmio	1.00	<LD	<LD	<LD
Cromo	5.00	<LD	<LD	0.03
Mercurio	0.20	<LD	<LD	<LD
Plata	5.00	<LD	<LD	<LD
Plomo	5.00	<LD	<LD	<LD
Selenio	1.00	<LD	<LD	0.03

**\*Límites máximos permisibles (LMP) para los constituyentes tóxicos en extracto. NOM-157-Semarnat-2009**

Con base en los resultados obtenidos podemos decir que los residuos no presentan elementos potencialmente tóxicos extraíbles, ya que la concentración en los lixiviados no sobrepasa los límites máximos permisibles.

#### **4.1.2.4. Prueba de Balance Ácido – Base.**

##### ***Potencial de neutralización.***

Como se mencionó en la metodología, se realizó una prueba cualitativa para observar si existen carbonatos presentes en las muestras de residuos mineros.

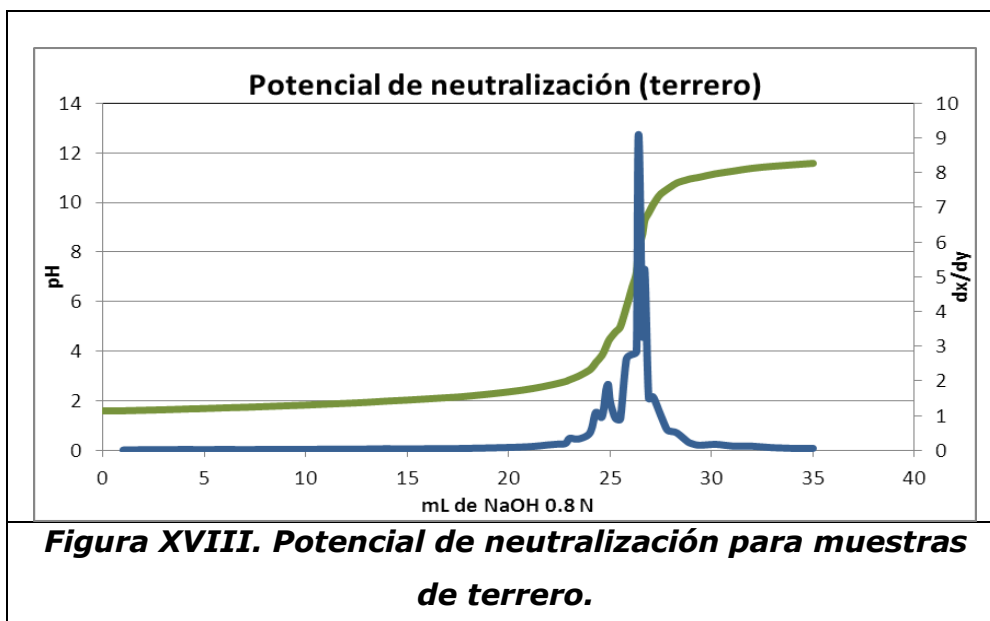


En la Figura XVII se puede apreciar que cuando se le agregan gotas de ácido clorhídrico a las muestras de residuos, se observa una efervescencia. Dicha efervescencia representa el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) que se produce cuando los carbonatos reaccionan con el ácido.



**Figura XVII Prueba cualitativa de carbonatos. Visualización de la efervescencia moderada.**

Continuando con la determinación del potencial de neutralización, éste se calculó a partir de la titulación por retroceso y obteniendo la primera derivada. En la Figura XVIII se presenta un ejemplo de la determinación del potencial de neutralización para la muestra de terrero. En esta gráfica, el eje X representa los mililitros de sosa ( $\text{NaOH}$ ) agregados, siendo el eje Y el pH registrado. Además el eje Y secundario (lado derecho de la gráfica), representa la derivada en cada punto (línea azul). De tal forma, el punto de equivalencia lo encontramos cuando hay una diferencia significativa en el pH y por lo tanto en su derivada.



Finalmente al hacer la valoración de ácido en exceso de todas las muestras se obtuvieron los resultados que se presentan en el Cuadro XV. Se realizaron duplicados de cada una de los residuos y se observa que la diferencia porcentual relativa es baja (<20%) y por tanto aceptable.

**Cuadro XV. Potencial de neutralización de residuos.**

<b>Muestra</b>	<b>PN KgCaCO<sub>3</sub>/TON</b>	<b>DPR</b>
Terrero	131.71	1.28
Jal	167.66	2.35
Arena	103.24	0.81

**Potencial de acidez.**

Se determinó la concentración de azufre por fluorescencia de rayos X (FRX). Esta es una técnica analítica instrumental no destructiva, que mide la composición elemental de una sustancia generalmente sólida al ser expuesta a una radiación de rayos X.

Para realizar la determinación del potencial de acidez, el elemento de nuestro interés en este caso es el azufre por lo que en el Cuadro XVI

se presentan los resultados para este elemento en cada una de las muestras analizadas. Cabe mencionar que los análisis se llevaron a cabo por triplicado para tener una mayor confiabilidad en las determinaciones. Se calculó el coeficiente de variación, del cual, podemos concluir que la mediciones del azufre total es aceptable, ya que este se encuentra por debajo del 20%.

**Cuadro XVI. Contenido de azufre total de residuos.**

<b>Muestra</b>	<b>S<sub>total</sub> (%)</b>	<b>%CV</b>
Terrero	0.27	3.69
Arena	2.70	1.14
Jal	4.12	3.57

Por otro lado, se determinó también la concentración de sulfatos mediante el método turbidimétrico EPA 375.4 mencionado anteriormente. A continuación se muestran (Cuadro XVII) los resultados obtenidos del contenido de sulfatos en las los residuos mineros.

**Cuadro XVII. Contenido de sulfatos de residuos.**

<b>Muestra</b>	<b>S<sub>SO4</sub> %</b>	<b>DPR</b>
Terrero	0.040	40.00
Arena	0.140	45.71
Jal	0.246	34.15

Finalmente, con los datos obtenidos se calculó el potencial de acidez (Cuadro XVIII). Recordemos que este se calcula multiplicando el contenido de sulfuros en porcentaje (diferencia del contenido de azufre total menos los sulfatos) por 31.25 como se muestra a continuación.

$$PA = [\%S^{2-}] \times 31.25$$

**Cuadro XVIII. Potencial de acidez de residuos.**

<b>Muestra</b>	<b>% S<sub>Total</sub></b>	<b>% S<sub>SO4</sub></b>	<b>S<sub>Total</sub>-S<sub>SO4</sub></b>	<b>PA</b>
Terrero	0.27	0.04	0.23	7.19
Arena	2.70	0.14	2.56	80.00
Jal	4.12	0.25	3.87	121.06

De los tres residuos analizados el jal presenta el potencial de acidez más alto, debido a la gran cantidad de sulfuros presentes, convirtiéndolo en el residuo con mayor probabilidad de generar drenaje ácido.

**Potencial de neutralización neto.**

Con los valores de PA y PN determinados, se pudo obtener el potencial de neutralización neto (PNN), los resultados se presentan en el Cuadro XIX.

**Cuadro XIX. Potencial de neutralización neto de residuos.**

<b>Muestra</b>	<b>PA</b>	<b>PN</b>	<b>PNN</b>
Terrero	7.19	131.71	18.33
Arena	80.00	103.24	1.29
Jal	121.06	167.66	1.38

En dicho cuadro podemos observar que el potencial de neutralización neto correspondiente al jal y la arena, se encuentran muy cercanos al límite para ser considerado como residuos generadores de drenaje ácido "peligroso" ( $PN/PA > 1.2$  se considera peligroso).

La generación de drenaje ácido es el principal alarmante, por ello, es importante la presencia de un agente neutralizante en la mezcla, en este caso el cemento cumple con esta función.

#### 4.1.2.5. Difracción de rayos x.

Mediante el análisis por difracción de rayos x fue posible determinar las fases mineralógicas presentes en los residuos. A continuación se presentan los resultados obtenidos (Cuadro XX).

**Cuadro XX. Mineralogía de los residuos mineros obtenida por DRX.**

Muestra	Fases identificadas
Terrero	Cuarzo: $\text{SiO}_2$ Calcita: $\text{CaCO}_3$ Feldespato de tipo plagioclasa intermedia: $(\text{CaNa})(\text{AlSi})_2\text{Si}_2\text{O}_8$ Clinocloro: $(\text{MgFe})_6(\text{SiAl})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$ Anfíbol tipo ferropargasita: $\text{NaCa}_2\text{Fe}_4\text{AlSi}_6\text{Al}_2\text{O}_{22}(\text{OH})_2$ Hematita: $\text{Fe}_2\text{O}_3$ Pirita: $\text{Fe}_2\text{S}$
Arena	Cuarzo: $\text{SiO}_2$ Calcita: $\text{CaCO}_3$ Feldespato de tipo plagioclasa intermedia: $((\text{CaNa})(\text{AlSi})_2\text{Si}_2\text{O}_8$ Clinocloro: $(\text{MgFe})_6(\text{SiAl})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$ Anfíbol tipo ferropargasita: $\text{NaCa}_2\text{Fe}_4\text{AlSi}_6\text{Al}_2\text{O}_{22}(\text{OH})_2$ Magnetita: $\text{Fe}_3\text{O}_4$ Yeso: $\text{Ca}(\text{SO}_4)_2 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$ Pirita: $\text{Fe}_2\text{S}$
Jal	Cuarzo: $\text{SiO}_2$ Calcita: $\text{CaCO}_3$ Feldespato de tipo plagioclasa intermedia: $((\text{CaNa})(\text{AlSi})_2\text{Si}_2\text{O}_8$ Clinocloro: $(\text{MgFe})_6(\text{SiAl})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$ Anfíbol tipo ferropargasita: $\text{NaCa}_2\text{Fe}_4\text{AlSi}_6\text{Al}_2\text{O}_{22}(\text{OH})_2$ Pirita: $\text{Fe}_2\text{S}$

La composición de los tres tipos de residuos mineros analizados es altamente parecida, podemos observar algunas diferencias como la presencia de yeso en la arena o bien, la hematita en terrero. Sin embargo, en todos se detectó la presencia de pirita, el mineral que contiene sulfuros y es el potencial precursor de acidez.

## **4.2. Cementos.**

Existe una gran diversidad de cementos, diseñados cada uno con diferentes propósitos, sin embargo, para fines del presente trabajo fueron analizados sólo dos, el cemento portland normal y el cemento resistente a sulfatos (Cemento RS), el primero es el cemento de uso más común, mientras que el segundo es un cemento resistente a sulfatos.

### **4.2.1. Determinación de pH en cementos.**

Se realizó la determinación del pH a ambos tipos de cementos siguiendo el procedimiento anteriormente descrito, de los cuales se derivaron los siguientes resultados (Cuadro XXI).

***Cuadro XXI. Determinación de pH en cementos.***

<b>Muestra</b>	<b>pH</b>	<b>%CV<sub>(n=3)</sub></b>	<b>DPR</b>
Cemento portland	12.55	0.35	0.08
Cemento portland (dup)	12.54	0.08	
Cemento RS	12.64	0.05	0.11
Cemento RS (dup)	12.65	0.21	

En el cuadro anterior se observa que, el pH de los cementos es alcalino debido a la presencia de carbonatos, lo cual, ayuda a neutralizar los posibles lixiviados ácidos derivados de los residuos mineros.

#### 4.2.2. Determinación de elementos totales.

Derivado del análisis de fluorescencia de rayos x, se obtuvieron las siguientes concentraciones de elementos totales (Cuadro XXII).

**Cuadro XXII. Contenido de elementos totales en cementos.**

<b>Elemento</b>	<b>Cemento portland</b>	<b>Cemento RS</b>
Antimonio	< LD	< LD
Arsénico	81.18	50.69
Azufre	5022.89	1646.24
Bario	513.49	304.85
Cadmio	< LD	< LD
Calcio	266640.19	200294.68
Cesio	< LD	< LD
Cobalto	< LD	< LD
Cobre	73.12	64.55
cromo	61.28	106.37
Escandio	790.46	1073.00
Estaño	< LD	< LD
Estroncio	587.70	465.26
Hierro	13780.13	10866.90
Manganeso	530.05	800.69
Mercurio	< LD	< LD
Molibdeno	8.21	8.38
Níquel	46.43	44.54
Oro	< LD	< LD
Paladio	< LD	< LD
Plata	< LD	< LD
Plomo	17.16	21.84
Potasio	4807.81	7217.52
Rubidio	16.22	29.29
Selenio	< LD	< LD
Talio	< LD	< LD
Telurio	< LD	< LD
Titanio	358.67	< LD
Torio	12.53	8.99
Uranio	< LD	8.39
Vanadio	73.38	69.20
Wolframio	59.26	65.07
Zinc	114.82	118.20
Zirconio	64.15	81.33

Como se observa en el cuadro anterior, ambos tipos de concreto no contienen elementos potencialmente tóxicos, pero si un alto contenido de calcio debido a los silicatos dicálcico y tricálcico, ambos componentes comunes en los cementos.

#### 4.2.3. Geodisponibilidad en cementos.

De igual forma que con los residuos mineros, se realizó la determinación de metales y metaloides extraíbles bajo condiciones ambientales (geodisponibilidad) en los cementos, los resultados se presentan en el Cuadro XXIII.

**Cuadro XXIII. Concentración total soluble medida por ICP-OES en cementos.**

<i>Elemento</i>	<i>Ag (mg/L)</i>	<i>Al (mg/L)</i>	<i>As (mg/L)</i>	<i>B (mg/L)</i>	<i>Ba (mg/L)</i>	<i>Be (mg/L)</i>	<i>Ca (mg/L)</i>
<i>LD (mg/L)</i>	<b>0.0150</b>	<b>0.0230</b>	<b>0.0620</b>	<b>0.0098</b>	<b>0.0310</b>	<b>0.0170</b>	<b>0.013</b>
Cemento portland	<LD	0.105	<LD	0.040	0.475	<LD	>200
Cemento RS	<LD	0.122	<LD	0.024	0.440	<LD	>200

<i>Elemento</i>	<i>Cd (mg/L)</i>	<i>Co (mg/L)</i>	<i>Cr (mg/L)</i>	<i>Cu (mg/L)</i>	<i>Fe (mg/L)</i>	<i>Hg (mg/L)</i>	<i>K (mg/L)</i>
<i>LD (mg/L)</i>	<b>0.180</b>	<b>0.003</b>	<b>0.003</b>	<b>0.007</b>	<b>0.014</b>	<b>1.758</b>	<b>0.167</b>
Cemento portland	<LD	0.005	<LD	<LD	<LD	<LD	184.059
Cemento RS	<LD	0.005	<LD	<LD	<LD	<LD	235.657

<i>Elemento</i>	<i>Mg (mg/L)</i>	<i>Mn (mg/L)</i>	<i>Mo (mg/L)</i>	<i>Na (mg/L)</i>	<i>Ni (mg/L)</i>	<i>Pb (mg/L)</i>	<i>S (mg/L)</i>
<i>LD (mg/L)</i>	<b>0.200</b>	<b>0.016</b>	<b>0.023</b>	<b>0.031</b>	<b>0.017</b>	<b>0.050</b>	<b>0.032</b>
Cemento portland	0.080	<LD	<LD	87.040	<LD	<LD	151.287
Cemento RS	0.056	<LD	<LD	90.956	<LD	<LD	172.610

<i>Elemento</i>	<i>Sb (mg/L)</i>	<i>Se (mg/L)</i>	<i>Si (mg/L)</i>	<i>Ti (mg/L)</i>	<i>Tl (mg/L)</i>	<i>V (mg/L)</i>	<i>Zn (mg/L)</i>
<i>LD (mg/L)</i>	<b>0.015</b>	<b>0.021</b>	<b>0.008</b>	<b>0.012</b>	<b>0.075</b>	<b>0.016</b>	<b>0.020</b>
Cemento portland	<LD	0.056	0.535	<LD	<LD	<LD	0.006
Cemento RS	<LD	0.053	0.482	<LD	<LD	<LD	0.006



En dicho cuadro se observa que para ambos cementos, la concentración de la mayoría de los elementos es baja o se encuentra por debajo del límite de detección (<LD). Sin embargo, las altas concentraciones de elementos como el calcio, silicio, sodio y azufre, se deben a que estos se encuentran constituidos principalmente por silicato tricálcico ( $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ), silicato dicálcico ( $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ), aluminato tricálcico ( $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ) y aluminoferrito tetracálcico ( $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ ) y sulfato de calcio ( $\text{CaSO}_4$ ) como se había mencionado anteriormente. También pueden estar presentes como  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{K}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .

Hay que recordar que existen algunos componentes menores en el cemento como  $\text{MgO}$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Mn}_2\text{O}_3$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  y  $\text{Na}_2\text{O}$  que, por lo general, no sobrepasan un pequeño porcentaje del peso.

#### **4.2.4. Prueba de Balance Ácido – Base en cementos.**

Posteriormente, se realizó la prueba de balance ácido-base (ABA) en las muestras de cemento, para la cual se determinó el potencial de neutralización, el potencial de acidez y el potencial de neutralización neto siguiendo los procedimientos mencionados en el capítulo 3.1.3.4.

#### **Potencial de neutralización.**

La determinación del potencial de neutralización se realizó utilizando duplicados de las muestras y se calculó a partir de la titulación por retroceso y obteniendo la primera derivada. Los valores obtenidos se presentan en el Cuadro XXIV.

***Cuadro XXIV. Potencial de neutralización en cementos.***

<b>Muestra</b>	<b>PN KgCaCO/TON</b>	<b>DPR</b>
Cemento portland	676.40	2.73
Cemento RS	785.57	1.33

Podemos observar que los cementos tienen un alto potencial de neutralización, lo que nos indica que, estos tienen la capacidad de neutralizar los posibles lixiviados ácidos derivados de la oxidación de los residuos mineros debido a la acción del ambiente.

### **Potencial de acidez.**

Por otro lado, se realizó la determinación del potencial de acidez en los cementos debido a la posible presencia de sulfuros, para ello primero se determinó el azufre total por medio de fluorescencia de rayos x, y posteriormente el azufre como sulfato determinado por medio del análisis turbidimétrico.

En el Cuadro XXV observamos que el contenido de azufre en los cementos es pequeño (comparado con el contenido en los residuos mineros).

**Cuadro XXV. Contenido de azufre total en cementos.**

<b>Muestra</b>	<b>S<sub>total</sub> (%)</b>	<b>%CV</b>
Cemento portland	0.86	0.001
Cemento RS	0.80	0.001

Gran parte del azufre presente en las muestras son sulfatos (Cuadro XXVI), esto se debe a que el azufre proviene del sulfato de calcio (CaSO<sub>4</sub>) utilizado para su fabricación.

**Cuadro XXVI. Contenido de sulfatos en cementos.**

<b>Muestra</b>	<b>% S<sub>SO4</sub></b>	<b>DPR</b>
Cemento portland	0.48	15.00
Cemento RS	0.57	1.41

Posteriormente se calculó el potencial de acidez para ambas muestras de cemento (Cuadro XXVII). Observamos que el cemento resistente a sulfatos tiene un menor potencial.

**Cuadro XXVII. Potencial de acidez en cementos.**

<b>Muestra</b>	<b>% S<sub>Total</sub></b>	<b>% S<sub>SO4</sub></b>	<b>S<sub>Total</sub>-S<sub>SO4</sub></b>	<b>PA</b>
Cemento portland	0.86	0.48	0.38	11.88
Cemento RS	0.80	0.57	0.23	7.25

### **Potencial de neutralización neto.**

Finalmente, se realizó el cálculo del potencial de neutralización neto para los cementos, este, igual que los residuos mineros, es el balance entre el potencial de acidez y el de neutralización.

**Cuadro XXVIII. Potencial de neutralización neto en cementos.**

<b>Muestra</b>	<b>PA</b>	<b>PN</b>	<b>PNN</b>
Cemento portland	11.88	676.40	56.96
Cemento RS	7.25	785.57	108.35

Podemos ver que el cemento resistente a sulfatos tiene un mayor PNN que un cemento normal por lo que podría ser más eficaz en el proceso de neutralización de posibles lixiviados ácidos, sin embargo, no debemos descartar al cemento portland ya que podría el PNN de este ser suficiente para la neutralización, pues cabe mencionar que, el cemento RS tiene un mayor precio en el mercado y podría no ser factible económicamente para los constructores.

### **4.3. Elaboración de los concretos.**

A continuación se describe la fabricación del concreto hidráulico, celular y permeable, así como los materiales utilizados.

#### **4.3.1. Concreto hidráulico.**

Como se comentó en la metodología, para realizar un concreto hidráulico, se utilizan materiales, como el cemento, el agua, los agregados y los aditivos, de tal forma, para la elaboración de éste

tipo de concreto se utilizaron los residuos (terrero, arena, jal) como agregados.

En la Figura XIX se observan los componentes (terrero, arena, jal, cemento, aditivo y agua) integrados en una revolvedora hasta la obtención de una mezcla homogénea, esta fue vertida en moldes especiales siguiendo el procedimiento anteriormente descrito.



**Figura XIX. Mezcla de los componentes para concreto hidráulico**

En la Figura XX se pueden observar los cilindros de concreto fresco (*lado izquierdo*), así como el cilindro seco después de la etapa de fraguado (*lado derecho*).



**Figura XX. Cilindros de concreto hidráulico fresco y seco después del fraguado.**

### **4.3.2 Concreto celular.**

Para la elaboración del concreto celular se utilizó jal y arena, ya que al tener una granulometría más pequeña son los más adecuados para elaborar este tipo de concretos.

Como se comentó en el capítulo 3.3.2., para la elaboración de este concreto, se utilizó una mezcladora que cuenta con espas de tela de malla de metal (Figura XXI), que generan mayor área de contacto entre los componentes y por tanto propician la generación de burbujas en el concreto.



***Figura XXI. Mezcladora de motor a gasolina para la fabricación de concreto celular.***

De la misma forma en la En la Figura XXII se observan los concretos celulares obtenidos (en estado fresco) en los moldes cilíndricos.



***Figura XXII Cilindros de concreto fresco de concreto celular.***

Los cilindros de concreto celular obtenidos obtuvieron buenas características de trabajabilidad y apariencia, estos en efecto, resultaron ser mucho más ligeros que el concreto hidráulico, gracias a la inclusión de burbujas de aire, sin embargo, es importante mencionar que se observó disgregabilidad en las piezas de este tipo de concreto debido al contenido de partículas finas.

#### **4.3.3 Concreto permeable.**

El concreto permeable se fabricó con terrero, para lo cual el residuo se tuvo que triturar para llegar a un tamaño de partícula de 3/4 in que es lo recomendable para este tipo de concreto.

La etapa de mezclado se realizó de la misma forma que para el concreto hidráulico, sin embargo, en esta ocasión no se rellenaron los moldes cilíndricos, debido a que no se tenía el equipo de compactación necesario, sino que la mezcla se vertió en un molde rectangular de madera, el cual se compactó manualmente. El espécimen obtenido se puede observar en la Figura XXIII.



***Figura XXIII. Pieza de concreto permeable  
fabricada con terrero.***

Este tipo de concreto, al estar elaborado sólo de terrero, es menos probable que presente un peligro al ambiente ya que como se vio en los resultados de balance ácido-base, este material no genera drenaje ácido.

No obstante, como se mencionó antes, se requiere de un pretratamiento (trituration y cribado) de la muestra para que este residuo esté libre de finos y pueda ser usado en este tipo de concreto, lo que lo hace menos factible económicamente que los demás concretos evaluados.

#### **4.4. Evaluación de los concretos.**

Por su naturaleza disgregable el concreto permeable no fue sometido a las pruebas de tradicionales de resistencia a la compresión. Por otra parte, dado que se fabricó exclusivamente con terrero y estos no presentan potencial de generación de acidez, no se practicaron experimentos de oxidación acelerada.

##### **4.4.2. Resistencia a la compresión.**

###### **Concreto hidráulico**

Como se mencionó en el capítulo 3.4. para la realización de la prueba de resistencia a la compresión es necesario el "cabeceo" de las piezas cilíndricas (Figura XXIV, lado izquierdo). Este mortero de azufre es de mayor resistencia que el de la pieza, de este modo el punto de ruptura corresponde a la pieza de concreto.

De igual manera, en la Figura XXIV (lado derecho), se muestra un ejemplo de la prueba de compresión, en donde el cilindro ya ha sido preparado y montado en la máquina diseñada para esta prueba.



Por otro lado, los resultados de la resistencia para diferentes especímenes de concreto hidráulico se muestran en el Cuadro XXIX.

**Cuadro XXIX. Resistencia a la compresión de concreto hidráulico.**

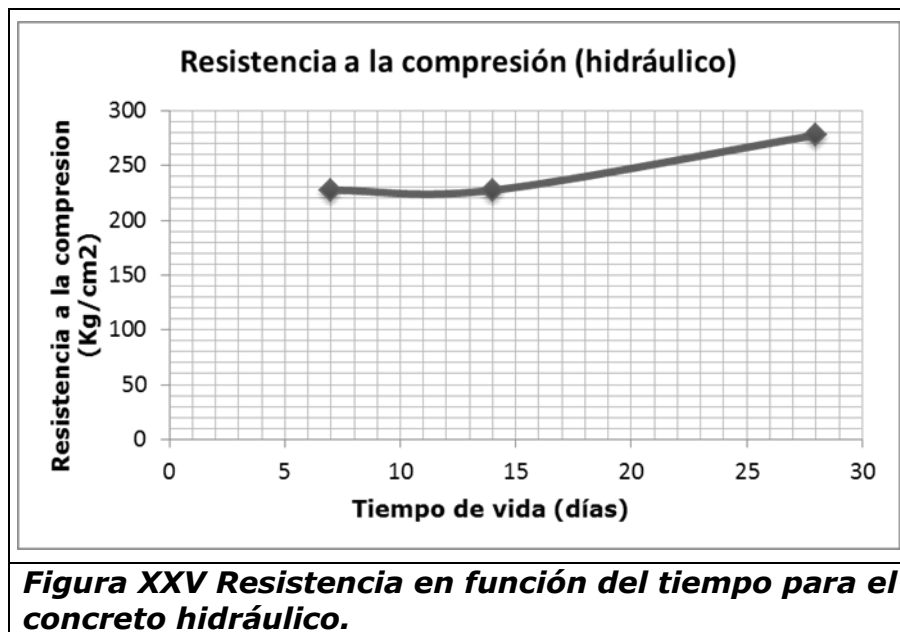
Tiempo de vida(días)	Resistencia a la compresión (kg/cm <sup>2</sup> )
7	227.49
14	227.49
28	277.68

En dicho cuadro, se puede observar que dentro de los 7 primeros días de fraguado, el concreto ya alcanza una resistencia de 227.49 kg/cm<sup>2</sup> (que representa el 82% con respecto al valor de diseño. Así mismo, esta resistencia se mantiene constante dentro de los 14 días de fraguado. No obstante, se puede volver a observar un aumento en la



resistencia del concreto a un valor de 277.68 kg/cm<sup>2</sup>, el cual sobrepasa en casi 1% el valor recomendado en los requerimientos de resistencia para este tipo de concretos (250 kg/cm<sup>2</sup>).

En la Figura XXV se puede observar mejor el comportamiento de la resistencia en función del tiempo. En dicha figura, el eje X es el tiempo de fraguado y el eje Y representa la resistencia a la compresión.



Con base en los resultados anteriores el concreto hidráulico compuesto por los residuos mineros (terrero, arena y jal), alcanza satisfactoriamente la resistencia a la compresión requerida para un concreto hidráulico de uso común en pisos.

### Concreto celular

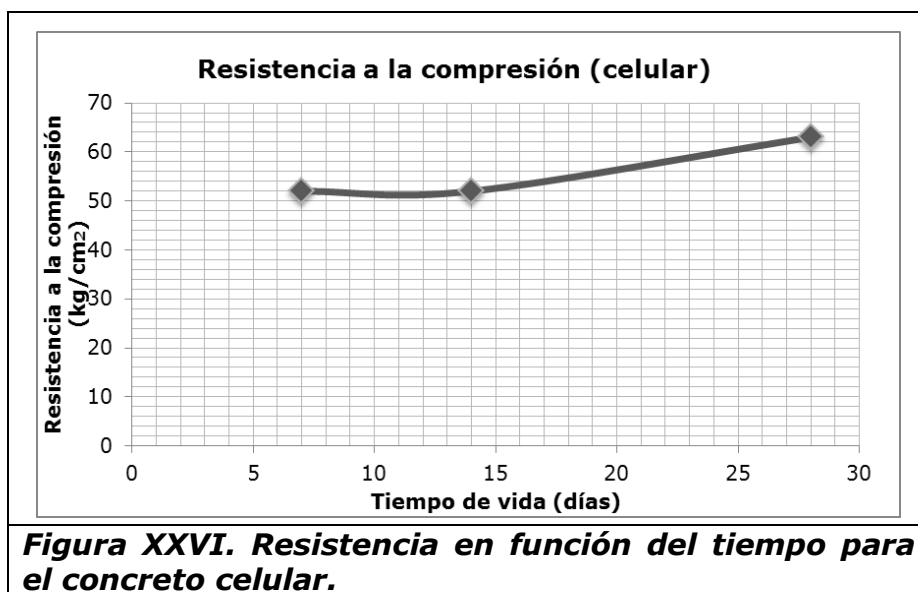
La prueba de resistencia se realizó también para la muestras de concreto celular, las cuales presentan a continuación en el Cuadro XXX.

**Cuadro XXX. Resistencia a la compresión de concreto celular.**

Tiempo de vida(días)	Resistencia a la compresión (kg/cm <sup>2</sup> )
7	52.00
14	52.00
28	63.00

En dicho cuadro, se puede observar que dentro de los 7 primeros días de fraguado, el concreto ya alcanza una resistencia de 52 kg/cm<sup>2</sup>. Así mismo, esta resistencia se mantiene constante dentro de los 14 días de fraguado. No obstante, se puede volver a observar un aumento en la resistencia del concreto a un valor de 63 kg/cm<sup>2</sup>. Lo anterior lo podemos observar de forma más clara en la Figura XXVI.

El concreto celular comúnmente utilizado, tiene una resistencia a la compresión desde los 60 hasta los 150 kg/cm<sup>2</sup> en el caso de concreto no estructural, sin embargo, algunos pueden llegar a los 300 kg/cm<sup>2</sup>. Comparando los valores obtenidos de las pruebas de resistencia con la literatura podemos ver que el concreto celular hecho con residuos mineros alcanza una resistencia a la compresión dentro de los estándares habituales



**Figura XXVI. Resistencia en función del tiempo para el concreto celular.**

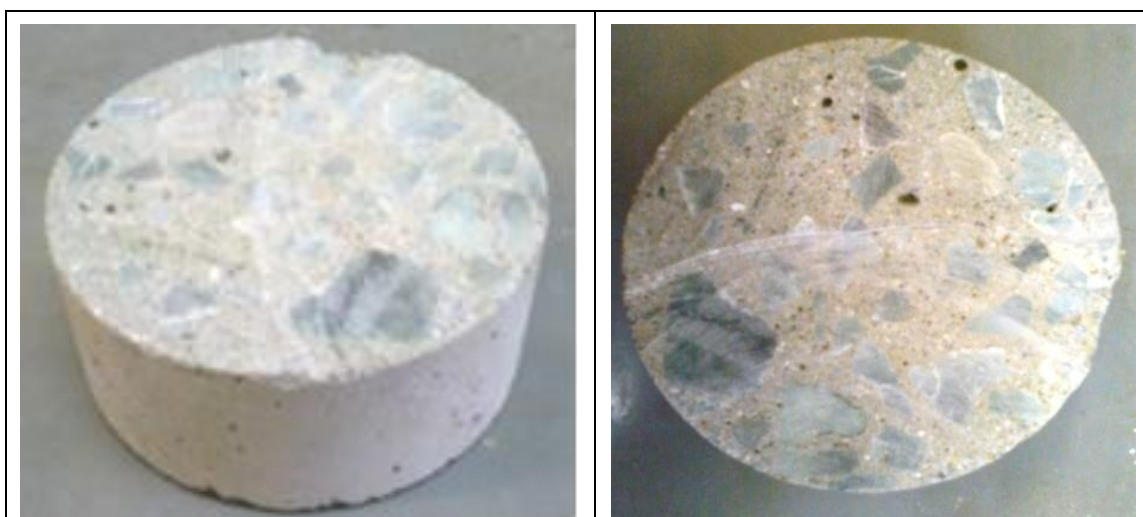
#### **4.4.3. Oxidación acelerada.**

Con el propósito de simular condiciones de intemperismo y observar las afectaciones que pudieran ocurrir a largo plazo debido a una exposición al ambiente, se realizó una prueba de oxidación acelerada en las muestras de concreto hidráulico y celular.

#### **Concreto Hidráulico**

Como se describió en la metodología, el proceso consistió en oxidar el concreto mediante el uso de peróxido de hidrogeno (un agente altamente oxidante). En la Figura XXVII se puede apreciar el cambio en la pieza de concreto al ser oxidado. Antes (Figura XXVII, lado izquierdo) y después de la prueba de oxidación (Figura XXVII, lado derecho).

Después de la prueba de oxidación se puede observar que la superficie del concreto se torna ligeramente café, siendo la pasta cementante donde se observa más, lo que sugiere que la pasta fue la parte con mayor oxidación.



**Figura XXVII. Muestras de concreto hidráulico (sin oxidar y oxidado)**

Los lixiviados obtenidos de la prueba de oxidación fueron caracterizados en pH y potencial eléctrico y los resultados se muestran en el Cuadro XXXI.

**Cuadro XXXI. pH del lixiviado del concreto hidráulico oxidado.**

<b>pH promedio</b>	<b>%CV<sub>n=5</sub></b>
8.16	0.33

Como se puede observar, el pH de los lixiviados después de la oxidación presentan un pH alcalino (pH= 8.16), lo que podría interpretarse que tras un proceso de oxidación, el concreto hidráulico preparado con este tipo de agregados (terrero, arena, jal), si se expone al ambiente no presentará tendencia a generar lixiviados ácidos y que aunque el material pétreo (agregado) pueda generar lixiviados ácidos, el cementante tendría la capacidad de neutralizarlo. Lo anterior concuerda con lo esperado ya que teóricamente la cantidad de cemento utilizada sería capaz de neutralizar hasta 1.7 % en sulfuros presentes en el concreto, mientras que el contenido real es solo de 1.2%.

Después de realizar el proceso de oxidación acelerada, el concreto hidráulico fue probado en resistencia para observar como afectaba una exposición prolongada al ambiente la resistencia del concreto. Los resultados de dicha prueba se puede observar en el Cuadro XXXII

**Cuadro XXXII. Resistencia a la compresión después del proceso de oxidación (concreto hidráulico).**

<b>Muestra</b>	<b>Carga máxima (kgf)</b>	<b>Resistencia a la compresión (kgf/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>DPR</b>
Concreto sin oxidar	78300.00	440.00	5.95
Concreto oxidado	83000.00	467.00	

En el cuadro se compara un testigo del concreto hidráulico sin oxidar contra el espécimen del concreto oxidado y podemos observar que la diferencia de la resistencia a la compresión de los dos ejemplares es poca, y podríamos decir, que al ser sometidos a la prueba de oxidación este no presenta una alteración en esta característica.

El valor de las resistencias obtenidas en esta prueba difieren con los valores de resistencia a la compresión obtenidos en el capítulo 4.4.2 , debido a que los cilindros fueron cortados para la realización del procedimiento de oxidación ,y por tanto, la resistencia de los mismos se ve alterada. Sin embargo, se comparan los valores de resistencia a la compresión en especímenes de concreto después del tratamiento.

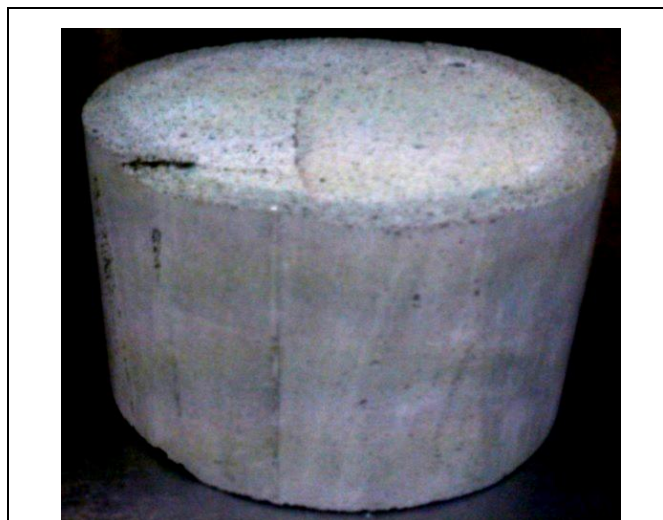
Es importante mencionar que, debido a que este tipo de concreto es poco permeable o casi nulo, no fue posible oxidar la parte interna del cilindro, y ya que la prueba de resistencia se aplica en el eje vertical, no se pudo observar una diferencia significativa en el caso del concreto hidráulico.

### **Concreto Celular.**

De la misma forma que para el concreto hidráulico, en la Figura XXVIII se observa la pieza de concreto celular sin oxidar (lado izquierdo) y oxidado (lado derecho). Es posible apreciar que después de la prueba la superficie del concreto se torna café como consecuencia de la oxidación de los compuestos ahí presentes, se puede ver mejor esto en la Figura XXIX.



**Figura XXVIII. Muestras de concreto celular (sin oxidar y oxidado)**



**Figura XXIX. Concreto Celular expuesto a oxidación.**

Los lixiviados obtenidos de la prueba de oxidación fueron caracterizados en pH y potencial eléctrico y los resultados se muestran en el Cuadro XXXIII.

**Cuadro XXXIII. pH de residuos de oxidación para concreto celular.**

<b>pH promedio</b>	<b>%CV<sub>n=5</sub></b>
12.47	0.06

En dicho cuadro podemos ver que el pH de los lixiviados después de la oxidación presentan un pH alcalino (pH = 12.47), por lo que podemos interpretar que tras un proceso de oxidación, el concreto celular preparado con arena y jal, si se expone al ambiente no presentará tendencia a generar lixiviados ácidos y que aunque el material pétreo pueda generar drenaje ácido, el cementante tendría la capacidad de neutralizarlo.

De igual manera que con el concreto hidráulico, las piezas de concreto celular fueron expuestas al proceso de oxidación acelerado y probadas en resistencia para observar como afectaba una exposición prolongada al ambiente la resistencia del concreto. A continuación en el Cuadro XXXIV se presentan los resultados obtenidos.

**Cuadro XXXIV. Resistencia a la compresión después del proceso de oxidación (concreto celular).**

<b>Muestra</b>	<b>Carga máxima (kgf)</b>	<b>Resistencia a la compresión (kgf/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>DPR</b>
Concreto sin oxidar	16700.00	93.00	13.79
Concreto oxidado	14300.00	81.00	

En el cuadro se compara una pieza de concreto hidráulico sin oxidar contra el espécimen del concreto oxidado y podemos observar que la diferencia de la resistencia a la compresión de los dos ejemplares es poca. Sin embargo, la diferencia, comparada con la obtenida con el concreto hidráulico, es mayor. Esto es probable que se deba a que el concreto celular tiene una porosidad mucho mayor y el ataque de oxidación fue más significativo.

Es importante mencionar que durante la realización del procedimiento la pieza de concreto absorbió gran humedad, esto pudo deberse a que debido a la porosidad de este tipo de concreto ligero, hay un

mayor contacto de los agregados (arena y jal) con los componentes del cemento, lo que podría propiciar las reacciones álcali-agregados y estas, como se mencionó en el capítulo 1.11.2., forman una capa de silicatos alrededor de los agregados, la cual absorbe humedad.

Otro fenómeno que se podría darse en el concreto celular es la formación de etringita, ya que debido a la gran área de contacto entre los residuos mineros con el ambiente, se propicia la generación de drenaje ácido, el cual, con base en el pH obtenido de los lixiviados después de la oxidación, se neutralizan con el hidróxido derivado de la hidratación del cemento, lo que puede provocar grandes cantidades de sulfatos que reaccionan con el aluminato tricálcico dando como producto la etringita.

Por tanto podemos decir que el concreto celular, al ser expuesto a ambientes drásticos, o bien, con el paso del tiempo, tiene mayor probabilidad de presentar problemas de grietas o fisuras provocando daños a las estructuras.

#### **4.4.4. Microscopia Electrónica de barrido Acoplada a Espectrometría de Rayos X por Energía Dispersa (MEB-EDS) y Difracción de Rayos x en muestras de concretos.**

Se realizaron análisis de MEB-EDS y de DRX a las muestras testigo (sin oxidar) y a las muestras expuestas a oxidación de ambos tipos de concreto (hidráulico y celular), los resultados de dichos análisis se presentan a continuación.

##### **Concreto hidráulico.**

Derivado de los análisis MEB-EDS y de DRX realizados en el concreto hidráulico (Cuadro XXXV y Cuadro XXXVI) se detectaron elementos como aluminio calcio magnesio silicio y sodio, presentes como cuarzo,



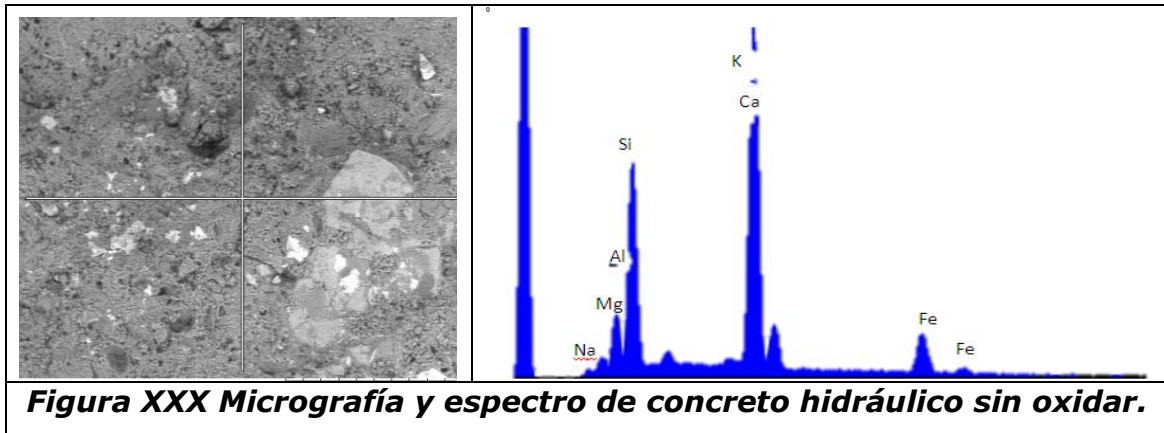
calcita, feldespato, clinocloro, Anfíbol tipo ferropargasita, así como óxidos de hierro (hematita y magnetita). En ambos concretos (antes y después de oxidación) se puede observar la presencia de pirita, el cual, es el principal aportador de sulfuros en el residuo minero.

**Cuadro XXXV. Composición elemental y fases mineralógicas del concreto hidráulico sin oxidar.**

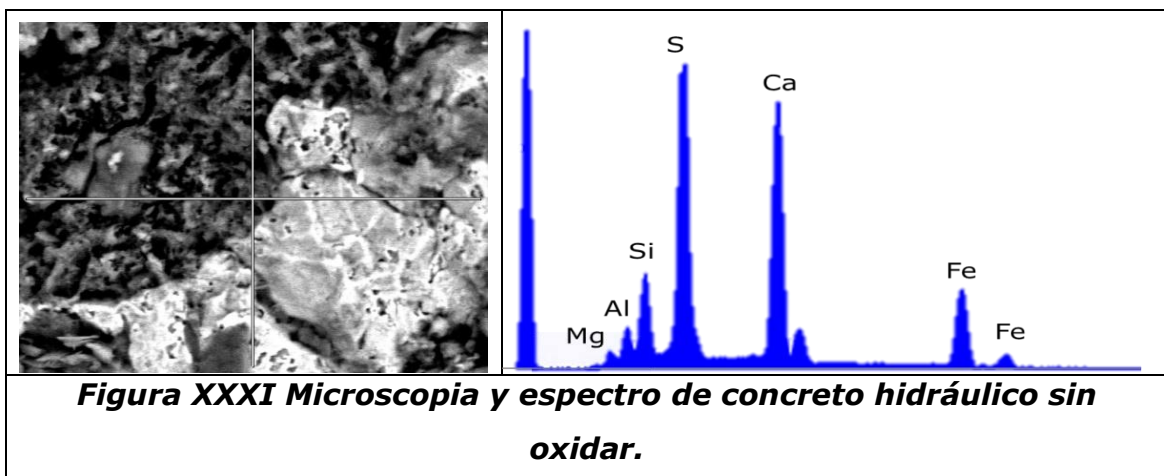
MEB-EDS			DRX
Elemento	% <sub>prom</sub>	$\sigma$	Fases identificadas
Aluminio	6.6	4.1	Cuarzo: $\text{SiO}_2$ Calcita: $\text{CaCO}_3$ Feldespato de tipo plagioclasa intermedia: $(\text{CaNa})(\text{AlSi})_2\text{Si}_2\text{O}_8$ Clinocloro: $(\text{MgFe})_6(\text{SiAl})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$ Anfíbol tipo ferropargasita: $\text{NaCa}_2\text{Fe}_4\text{AlSi}_6\text{Al}_2\text{O}_{22}(\text{OH})_2$ Pirita: $\text{Fe}_2\text{S}$ Hematita: $\text{Fe}_2\text{O}_3$ Magnetita: $\text{Fe}_3\text{O}_4$ Portlandita: $\text{Ca}(\text{OH})_2$ Trazas de Mica-illita
Azufre	6.4	11.1	
Calcio	43.5	19.6	
Hierro	27.4	14.8	
Magnesio	3.0	3.2	
Potasio	1.0	0.2	
Silicio	13.7	6.0	
Sodio	0.9	0.2	
Talio	6.5	NA	
Zinc	3.2	NA	

A continuación se muestran dos ejemplos de micrografías del concreto hidráulico sin oxidar, en la primera se analiza al cementante, mientras que en la segunda se analiza el agregado grueso y la partículas adheridas a este.

En el primer espectro (Figura XXX) podemos observar concentración de azufre, esto debido a que la mezcla contiene partículas finas de jal y arena distribuidas en todo el concreto. También podemos observar un alto contenido de calcio, debido en mayor parte la presencia de calcita ( $\text{CaCO}_3$ ), fase identificada por DRX.



En el espectro de la Figura XXXI se analizaron las partículas en contacto con el agregado grueso (terrero), donde se obtuvo uno de los valores más altos en azufre que podrían propiciar lixiviados ácidos. Cabe resaltar que las altas concentraciones de azufre aunado al alto contenido de calcio detectado, nos sugiere la presencia de yeso ( $\text{CaSO}_4$ ) alrededor de los agregados.



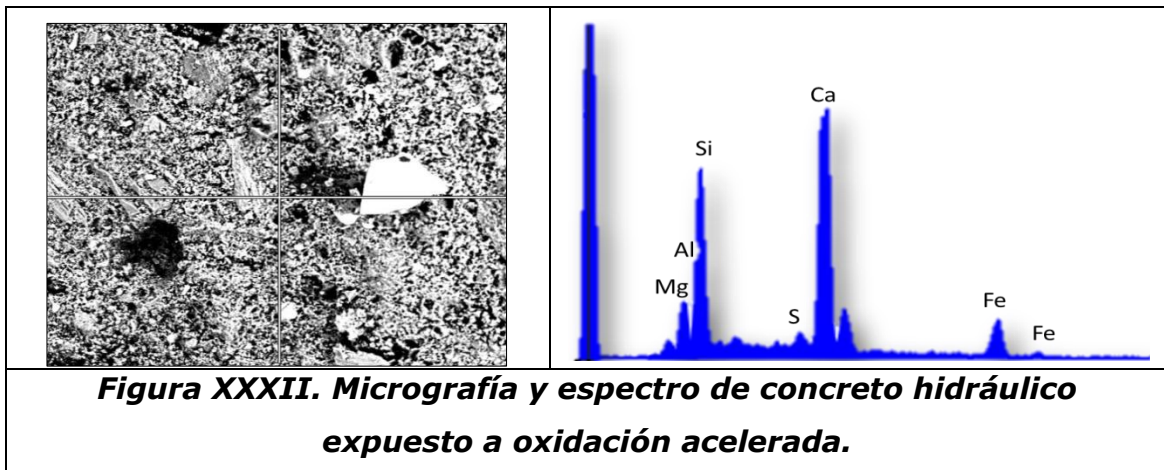
De igual manera, en el Cuadro XXXVI se observa el contenido en porcentaje obtenido por microscopia, así como las fases identificadas para la muestra expuesta a la oxidación acelerada.

**Cuadro XXXVI Composición elemental y fases mineralógicas del  
concreto hidráulico oxidado.**

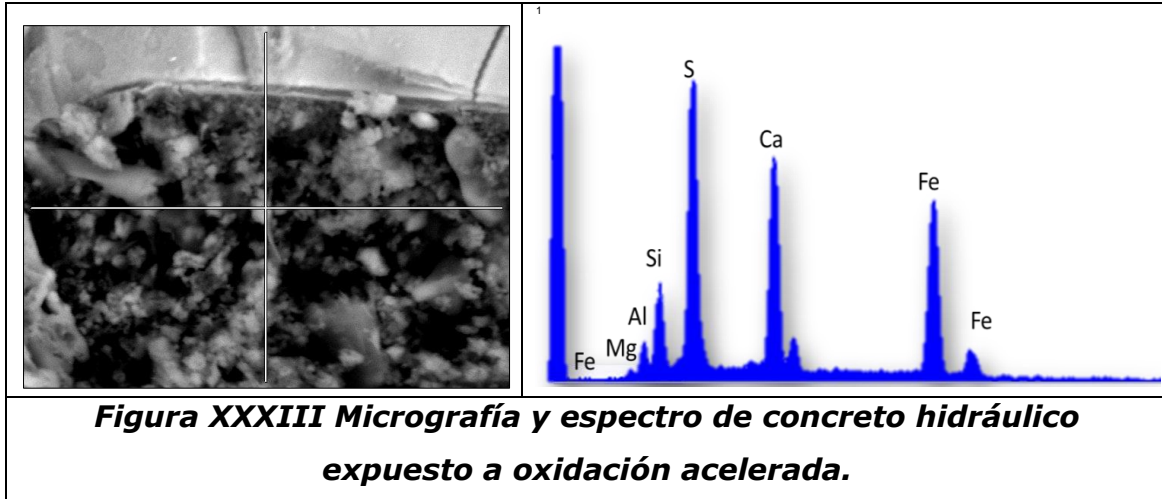
MEB-EDS			DRX
Elemento	% <sub>prom</sub>	$\sigma$	Fases identificadas
Aluminio	4.23	1.62	Cuarzo: SiO <sub>2</sub> Calcita: CaCO <sub>3</sub> Feldespato de tipo plagioclasa intermedia: (CaNa)(AlSi) <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>8</sub> Clinocloro: (MgFe) <sub>6</sub> (SiAl) <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>8</sub> Anfíbol tipo ferropargasita: NaCa <sub>2</sub> Fe <sub>4</sub> AlSi <sub>6</sub> Al <sub>2</sub> O <sub>22</sub> (OH) <sub>2</sub> Pirita: Fe <sub>2</sub> S Magnetita: Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> Portlandita: Ca(OH) <sub>2</sub>
Azufre	7.06	6.96	
Calcio	43.10	13.37	
Fosforo	0.90	NA	
Hierro	30.81	20.22	
Magnesio	1.39	4.23	
Potasio	1.52	0.61	
Silicio	15.37	8.44	
Sodio	1.15	0.41	

A continuación se muestran dos ejemplos de micrografías del concreto hidráulico oxidado. En la primera se analiza al cementante mientras que en la segunda se analiza el agregado grueso y las partículas adheridas a éste.

En el primer espectro (Figura XXXII), podemos observar el análisis en la parte del cementante cercana al residuo (terrero), en donde se tienen valores altos de silicio (20.3%) y calcio (50.2%), muy probablemente debidos a los componentes del cemento como silicato dicálcico y silicato tricálcico.



En el segundo espectro (Figura XXXIII) podemos observar muestra (19.5%) y hierro (51.9 %) en las partículas adheridas al agregado grueso, debido a la presencia de Pirita ( $\text{Fe}_2\text{S}$ ).



Finalmente, cabe mencionar que en ambos análisis mineralógicos del concreto hidráulico fue posible identificar portlandita, uno de los principales componentes en la fabricación del cemento.

### **Concreto Celular.**

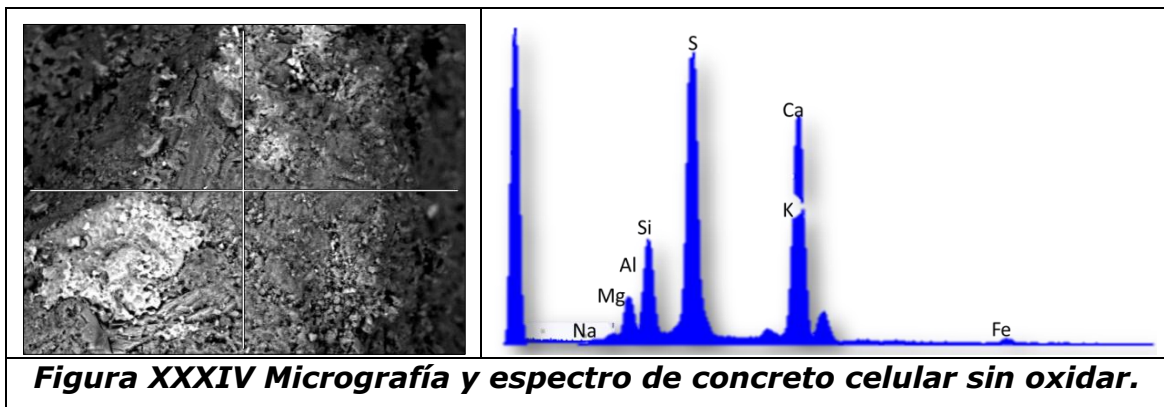
De forma general, los resultados derivados de los análisis MEB-EDS y de DRX realizados en el concreto celular (Cuadro XXXVII y Cuadro XXXVIII) se detectaron elementos como aluminio, calcio, hierro, magnesio, potasio y silicio, presentes como cuarzo, calcita, feldespato, clinocloro, Anfíbol tipo ferropargasita, así como óxidos de hierro (hematita y magnetita). En ambos concretos (antes y después de oxidación) se puede observar la presencia de pirita, el cual, es el principal aportador de sulfuros en el residuo minero.

**Cuadro XXXVII Composición elemental y fases mineralógicas de concreto celular sin oxidar.**

MEB-EDS			DRX
Elemento	% <sub>prom</sub>	$\sigma$	Fases identificadas
Aluminio	4.87	1.00	Calcita: $\text{CaCO}_3$ Feldespato de tipo plagioclasa intermedia: $(\text{CaNa})(\text{AlSi})_2\text{Si}_2\text{O}_8$ Clinocloro: $(\text{MgFe})_6(\text{SiAl})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$ Cuarzo: $\text{SiO}_2$ Hematita: $\text{Fe}_2\text{O}_3$ Magnetita: $\text{Fe}_3\text{O}_4$ <i>Trazas de anfíbol</i>
Azufre	12.19	16.16	
Calcio	63.11	13.19	
Hierro	4.97	1.94	
Indio	4.50	ND	
Magnesio	1.01	0.26	
Potasio	2.20	0.46	
silicio	11.23	2.03	
Sodio	1.58	0.53	

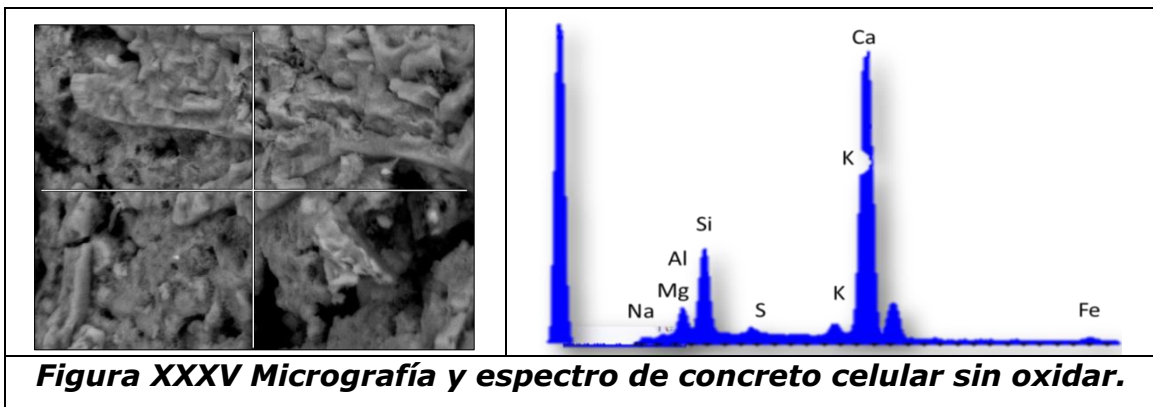
En el caso de este tipo de concreto, al carecer de agregados gruesos, este presenta gran uniformidad, por lo que el análisis se realizó en diversos puntos aleatorios de las muestras de concreto.

A continuación se presentan dos ejemplos de micrografías del concreto celular sin oxidar. En el primer espectro (Figura XXXIV) se detectó uno de los valores más altos de azufre (49.2%) así como de calcio (34.7%), lo que nos sugiere q hay grandes cantidades de estos elementos presentes en diversos compuestos que podrían reaccionar.



**Figura XXXIV Micrografía y espectro de concreto celular sin oxidar.**

Mientras tanto, la segunda micrografía (Figura XXXV) se puede observar con mayor detalle la forma en la que la mezcla de cemento con agua y aditivo agrupa las pequeñas partículas de residuo minero y que entre ellos existe grandes espacios, los cuales, son los culpables de la ligereza del material, así como también, de que el concreto tenga una mayor exposición al ambiente, por tanto, de que haya una mayor probabilidad de que los compuestos presentes en los residuos se oxiden con rapidez.

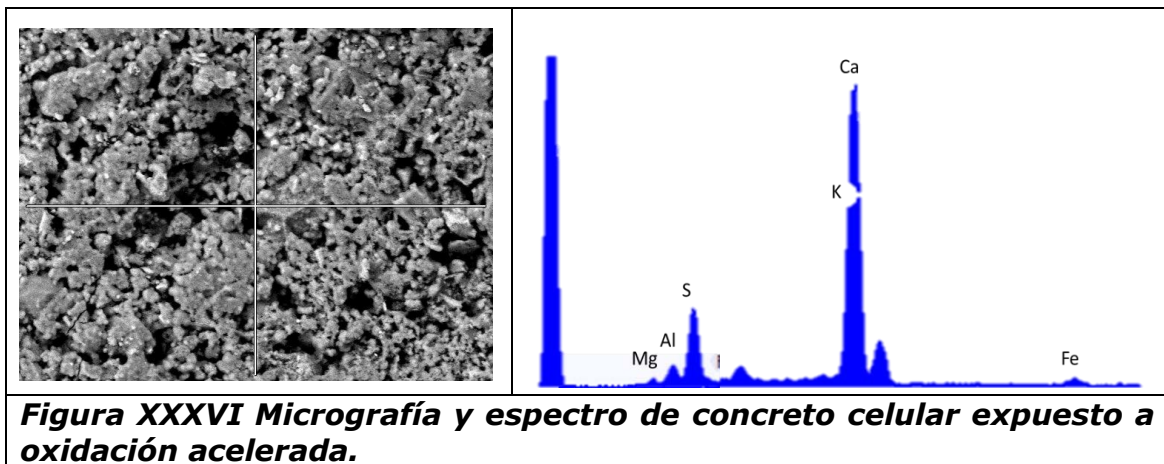


Seguidamente se presentan los resultados obtenidos para el concreto celular al cual se le expuso a un tratamiento de oxidación acelerada.

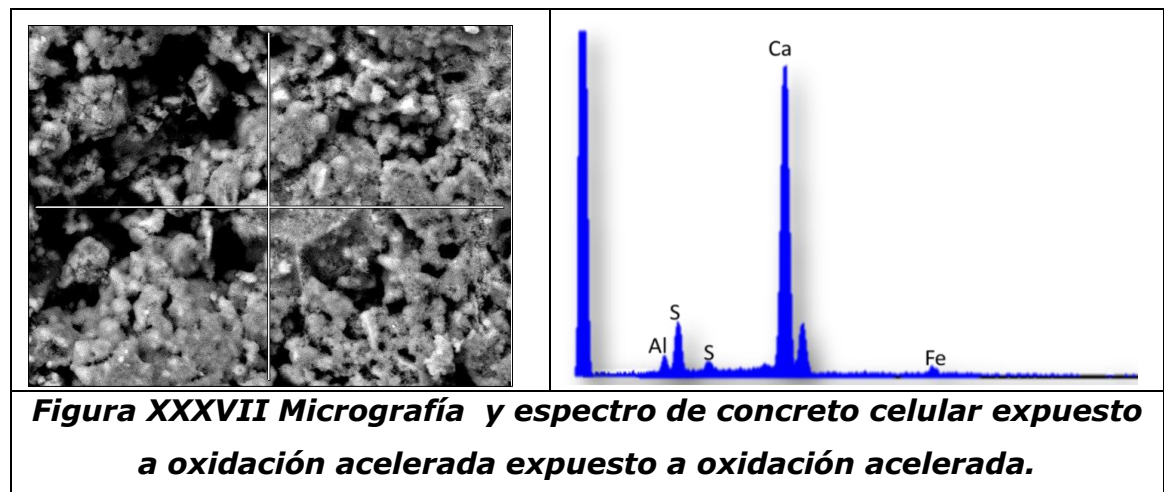
**Cuadro XXXVIII Composición elemental y fases mineralógicas de concreto celular oxidado.**

MEB-EDS			DRX
Elemento	% <sub>prom</sub>	σ	Fases identificadas
Aluminio	3.57	1.04	Cuarzo: SiO <sub>2</sub> Calcita: CaCO <sub>3</sub> Feldespato de tipo plagioclasa intermedia: (CaNa)(AlSi) <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>8</sub> Clinocloro: (MgFe) <sub>6</sub> (SiAl) <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>8</sub> Anfíbol tipo ferropargasita: NaCa <sub>2</sub> Fe <sub>4</sub> AlSi <sub>6</sub> Al <sub>2</sub> O <sub>22</sub> (OH) <sub>2</sub> Magnetita: Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> Pirita: Fe <sub>2</sub> S Trazas de Mica-illita
Azufre	2.49	0.48	
Calcio	75.18	5.45	
Hierro	5.99	1.98	
Magnesio	1.08	0.35	
Potasio	1.05	0.35	
Silicio	11.40	2.80	
Sodio	ND	ND	

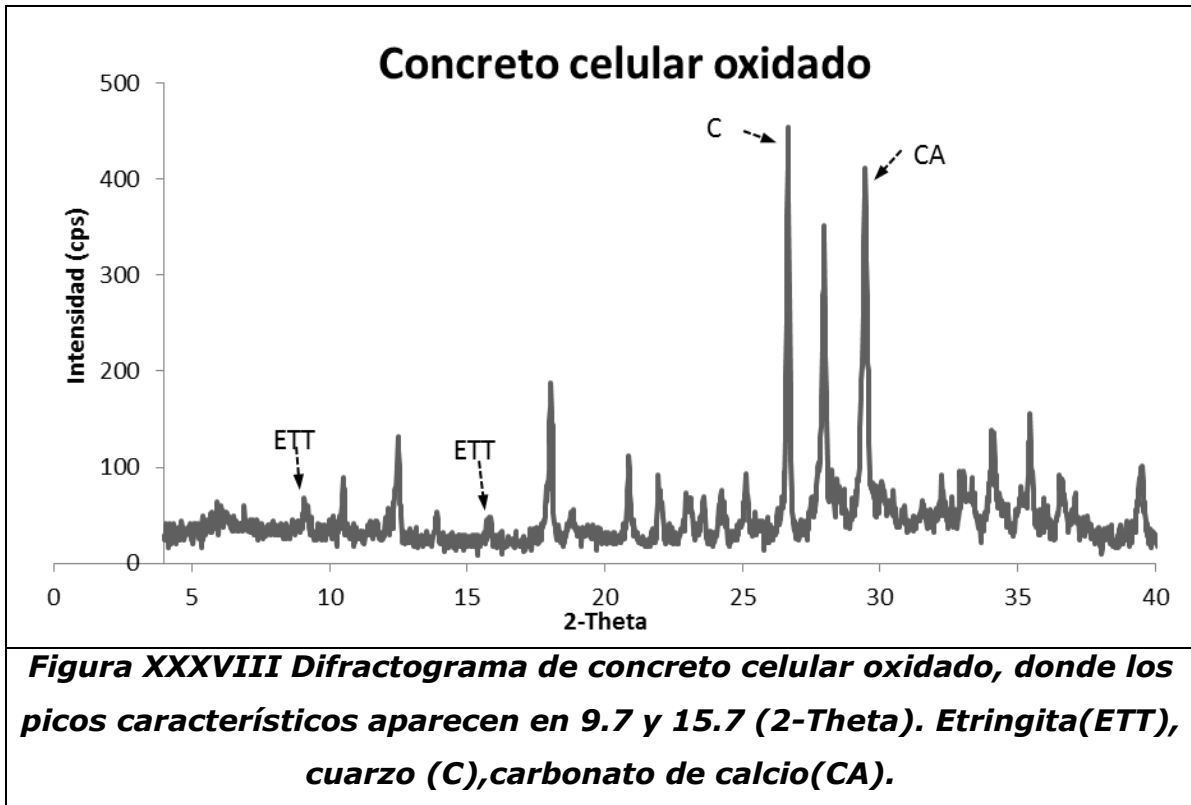
A continuación se presentan dos ejemplos de micrografías del concreto celular después de haber sido expuesto al tratamiento de oxidación acelerada. En el primer espectro (Cuadro XXXV) se detectó una de las concentraciones más altas de calcio (78.2%) de los concretos analizados. Sin embargo, a diferencia de lo esperado el porcentaje de azufre es poco en este punto.



De igual forma, en el segundo espectro (Cuadro XXXVI) se puede observar un grano del residuos minero (arena) rodeado por las pequeñas partículas constituyentes del cementante. En este punto se detectaron principalmente calcio (82.4%), silicio (7.4%), azufre (1.6%) y hierro (6%), presentes en compuestos como silicato tricálcico, silicato dicálcico y piritita.



Finalmente, tras analizar las muestras de concreto hidráulico y celular mediante difracción de rayos x, fueron detectados los picos que confirman la presencia de etringita en la muestra de concreto celular oxidado. A continuación se muestra el difractograma obtenido.



De esta manera, se corrobora la formación de etringita en concretos realizados a base de los residuos mineros con contenido de piritita ( $\text{FeS}_2$ ).



## **CONCLUSIONES.**

Fue posible la fabricación de concretos utilizando como agregados los tres tipos de residuos (terrero, arena, jal) derivados del beneficio de hierro en la zona de Michoacán. Se propusieron y fabricaron tres tipos de concreto diferentes, el concreto hidráulico, celular y permeable, de estos, dos fueron evaluados y se observaron diversas ventajas y desventajas.

Los concretos fabricados con estos residuos mineros no representan un peligro ambiental ni a la salud, ya que, ninguno de los residuos presentan elementos potencialmente tóxicos que pudieran ser expuestos al ambiente. Además, a pesar de contener sulfuros y uno de ellos (el jal específicamente) ser un potencial generado de drenaje ácido, los concretos fabricados tuvieron la capacidad de neutralizar los posibles lixiviados ácidos derivados del intemperismo.

También, al ser evaluada la calidad física de los concretos fabricados, mediante pruebas de resistencia, se obtuvo que estos son capaces de generar una alta resistencia, fueron alcanzados los valores de diseño y en el caso del concreto hidráulico, esto fueron por demás superado, utilizando una proporción de 39.2% terrero ,35% arena y 9.6% jal de la mezcla total.

Posteriormente, al ser expuestas las piezas de concreto celular e hidráulico a un tratamiento de oxidación acelerada, con el fin de simular intemperismo, podemos decir que el que presentó mejores características al respecto fue el concreto hidráulico, ya que, al tener poca permeabilidad la oxidación no fue profunda y por tanto, no tuvo consecuencias graves que impactara la resistencia a la compresión.

Por otro lado, el concreto celular debido a sus características porosas es más propenso al intemperismo ya que los agregados (los residuos) están mucho más expuestos al ambiente, lo que podría propiciar una afectación en la durabilidad del concreto, ya que se observó que hubo una afectación del 12% aproximadamente en la resistencia.

Derivado de los análisis de DRX podemos decir que, el uso de estos residuos como agregados, puede tener como consecuencia la afectación de los concretos debida a la formación de etringita.

El concreto permeable a pesar de contar con atractivas características ambientales y de diseño en construcción, no es económicamente atractivo ya que el residuo minero utilizado debe ser triturado y cribado antes para ser utilizado con este fin.

Finalmente, de los tres tipos de concreto propuestos, el concreto hidráulico es el que presenta mejores características para ser usado en la industria de la construcción.

## **RECOMENDACIONES.**

Con el fin de mejorar el presente trabajo y motivar el estudio de los materiales alternativos, a continuación se exponen algunas recomendaciones para posibles trabajos futuros.

### ***Profundizar en el estudio de aspectos relacionados con la durabilidad del concreto***

En este aspecto, sería adecuado ampliar el análisis de la formación de la etringita, así como también, una investigación sobre la afectación del agua en concretos fabricados con residuos mineros.

### ***Estudios sobre diseños de mezcla.***

Se recomienda realizar futuros diseños de mezcla que contemplen un mayor número de proporciones utilizadas, o bien, la mezcla con otros materiales para la reducción del porcentaje de azufre en los residuos.

### ***Estudios orientados a la mejora de los concretos fabricados.***

Fabricación y análisis de concretos variando el tipo de cemento utilizado, ya que este componente es de suma importancia en su elaboración y se propone probar la fabricación de concretos con cemento con puzolanas, ya que se ha observado que este podría contrarrestar la formación de etringita, y de este modo aumentar la durabilidad de los concretos fabricados con los residuos mineros.

## REFERENCIAS.

Aire, Carlos (Junio, 2011). *Concreto Permeable: alternativas sustentables*. [Versión electrónica]. Construcción y Tecnología en concreto. Instituto Mexicano del cemento y del concreto. Número 03. <http://www.imcyc.com/revistacyt/jun11/arttecnologia.htm>.

Alaejos, M. P.; Bermúdez, M. A. (2003). *Durabilidad y procesos de degradación del hormigón de presas*. Estudio Bibliográfico. Monografía M-76. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas. Madrid. 168 pp

American Concrete Institute (Comite ACI 201)(1988). Durabilidad del concreto. Editorial Limusa S.A. 4ª Reimpresión. México D.F.

ASTM-C-192 *Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory*. American Section of the International Association for Testing Materials

Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión (Noviembre 2013) *Ley General para la prevención y gestión integral de los residuos* Última Reforma DOF 05-11-2013. En: Diario Oficial de la Federación P.47

Chang J L., Rómel S. C., Moreno E. I. (2003). *Influencia de los agregados pétreos en las características del concreto*. Ingeniería. Universidad Autónoma de Yucatán México.

Das, B. (2001). *Fundamentos de ingeniería geotécnica*. (I. Bernal Carreño, Trad.) D.F., México: Thomson Learning.

Flores D.L.; Alcalá M.J.R. (2010). *Manual de procedimientos analíticos*. Laboratorio de física de suelos. Departamento de Edafología. Instituto de geología. Universidad Nacional Autónoma de México.

Giraldo M.; Tobon J.(2006). *Evolución mineralógica del cemento portland durante el proceso de hidratación*. Dyna, Año 73, Nro. 148, pp. 69-81. Medellín, Marzo de 2006.

Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto . (1981). *Control de calidad de concreto*.

Instituto Mexicano del Concreto y del Cemento (Agosto 2004). *Conceptos básicos del concreto. Pruebas de concreto*. Construcción y Tecnología en concreto. Vol. XVI. Número 195.

Instituto Mexicano del cemento y del concreto. (Julio 2006). **Los Aditivos para concreto en seis pasos**. Construcción y Tecnología en concreto. Núm 218.(32-38).

Instituto Mexicano del cemento y del concreto. (octubre 2006)  
Cemento y concreto resistentes a sulfatos. En Revista: construcción y tecnología de concreto

Instituto Mexicano del cemento y del concreto. (Julio 2009)  
**Concretos Ligeros**. [Versión electrónica]. Construcción y Tecnología en concreto. <http://www.imcyc.com/ct2009/jul09/tecnologia.htm>

Lawrence, R.W., Wang, Y., (1997). Determination of neutralization potential in the prediction of acid rock drainage. Fourth International Conference on acid rock drainage. Vancouver, BC. Canadá

Love, T. W. **El Concreto en la construcción**. Editorial Trillas .2006. 2ª edición. 173 pág.

Miranda C, Sergio (2002). Curso de Química Industrial II, Universidad de los Andes. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Química.

Montenegro Bravo, Juan Carlos. Efecto de los Residuos Mineros en la Durabilidad del Concreto, el Caso de Soluciones Ácidas Sulfuradas. Rep. Met. y de Mat., La Paz, n. 6, mayo 2008 . Disponible: <[http://www.revistasbolivianas.org.bo/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2010-04072008000100006&lng=es&nrm=iso](http://www.revistasbolivianas.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2010-04072008000100006&lng=es&nrm=iso)>. Consultado el 26 enero 2015.

Neville, A.M. (1999). Tecnología del Concreto, 1ª edición, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto. Mexico.

Neville. A.M. (1959). **Role of cement in creep of** mortar. ACI Journal Proceedings. Volumen 55.3 (963-984).

**Romero M.F; Armienta M.A; Gutiérrez M.E; Villaseñor G.(2008)**. Factores geológicos y climáticos que determinan la peligrosidad y el impacto ambiental de Jales Mineros. -**Revista internacional de contaminación ambiental. Vol. 24 n.2**

**Secretaría de Comercio y Fomento Industrial**. NMX-AA-074-1981 "Análisis de agua – Determinación del ion sulfato". **Dirección General de Normas**.

**Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales**. Norma Oficial Mexicana NOM-052-SEMARNAT-2006, que establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y los

listados de los residuos peligrosos. En: *Diario Oficial de la Federación*.

**Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.** Norma Oficial Mexicana NOM-141-SEMARNAT-2003, Establece el procedimiento para la caracterización de los jales, así como las especificaciones y criterios para la caracterización y preparación del sitio proyecto, construcción, operación y pos operación de presas de jales. En: *Diario Oficial de la Federación* p. 59

**Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.** Norma Oficial Mexicana NOM-157-SEMARNAT-2009, establece los elementos y procedimiento para instrumentar planes de manejo de residuos mineros. En: *Diario Oficial de la Federación*. p. 33

Palbol L. (1996). Optimización de los agregados para concreto. "Construcción y tecnología," (México), 9 (100), p.30.

Servicio Geológico Mexicano (Julio 2013). *Panorama Minero del Estado de Michoacán*. Secretaría de Economía. <http://www.sgm.gob.mx/pdfs/MICHOACAN.pdf>

Pappua Asokan, Saxenaa Mohini, Asole Shyam R. (2007). *Solid wastes generation in India and their recycling potential in building materials*. Building and Environment 42.

Vite T. J. (2008). *Elaboración de materiales de construcción a partir de residuos industriales sólidos granulares utilizando tierras diatomáceas y jales mineros*. Instituto Nacional de investigaciones Nucleares Contacto Nuclear.

**Viterbo A.; O'Reilly D.; Rubén A.; Bancroft H.; Ruiz L.(2010).** Las Tecnologías del concreto en su ciclo de vida. En: *Concreto y Cemento. Investigación y Desarrollo*. Vol. 1, Núm. 2.

## ANEXO A.

### Determinación de pH.

Para la medición de pH se pesó 20 gramos en envases de vidrio, a los cuales se les adicionó 60 mililitros agua nanopura.

Es necesario antes de iniciar, introducir la temperatura de trabajo al equipo, para que este realice la compensación por temperatura en la medición. El procedimiento inició con la calibración del equipo, en nuestro caso se utilizó un estándar de pH 7 y otro de pH 10.01.

Posteriormente, con el equipo calibrado, se analizaron las muestras teniendo el cuidado de lavar con agua destilada el electrodo de pH entre cada medición.

Terminado cada lote se leyó un estándar para verificar la confiabilidad de las lecturas.

Muestra	pH	pH promedio	% CV	pH	DPR
Estándar pH 7	7.02	NA	NA	NA	NA
Estándar pH 10.01	10.02	NA	NA	NA	NA
Terrero	9.52	9.39	1.45	9.26	2.84
	9.25				
	9.41				
	9.09	9.13	0.58		
	9.11				
	9.19				
Jal	8.40	8.28	1.30	8.19	2.16
	8.20				
	8.23				
	8.16	8.10	0.64		
	8.07				
	8.07				
Arena	8.59	8.53	0.61	8.55	0.39
	8.50				
	8.50				
	8.62	8.56	1.46		
	8.42				
	8.65				

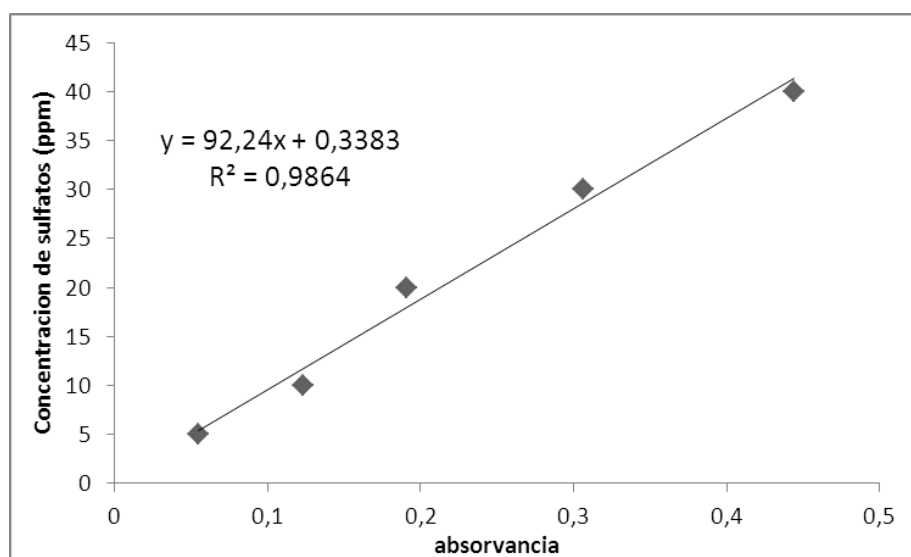
Muestra	pH	pH promedio	% CV	pH	DPR
Cemento normal	12.60	12.55	0.35	12.55	0.08
	12.52				
	12.53				
	12.54	12.54	0.08		
	12.53				
	12.55				
Cemento resistente a Sulfatos	12.64	12.64	0.05	12.64	0.11
	12.63				
	12.64				
	12.63	12.65	0.21		
	12.64				
	12.68				
Estándar pH 7	7.02	NA	NA	NA	NA
Estándar pH10.01	10.03	NA	NA	NA	NA

### **Método turbidimétrico (Método EPA 375.4)**

El procedimiento se fundamenta en que el ion sulfato precipita con cloruro de bario en un medio ácido (ácido clorhídrico), formando cristales de sulfato de bario de tamaño uniforme y la concentración del ion se determina por comparación con una curva patrón.

A continuación se presentan los resultados obtenidos.

- Curva de calibración.





<b>Muestra</b>	<b>ppm</b>	<b>Absorbancia</b>
patrón 1	5	0.0550
patrón 2	10	0.1236
Patrón 3	20	0.1906
patrón 4	30	0.3066
patrón 5	40	0.4442

<b>Muestra</b>	<b>S<sub>SO4</sub> (ppm)</b>	<b>S<sub>SO4</sub> (%)</b>	<b>S<sub>SO4</sub> (%) promedio</b>	<b>DPR</b>
Cemento Portland	4440.00	0.44	0.48	15.00
Cemento Portland duplicado	5160.00	0.52		
Cemento RS	5640.00	0.56	0.57	1.41
Cemento RS duplicado	5720.00	0.57		
Terrero	480.00	0.05	0.04	40.00
Terrero duplicado	320.00	0.03		
Jal	2040.00	0.20	0.25	34.15
Jal duplicado	2880.00	0.29		
Arena	1720.00	0.17	0.14	45.71
Arena duplicado	1080.00	0.11		
Terrero	33.68	0.00	0.01	101.54
Terrero duplicado	103.16	0.01		

### **Determinación de elementos totales (Fluorescencia de rayos x)**

A continuación se presentan los resultados derivados del análisis por fluorescencia de rayos X. Al inicio se efectuó la lectura de un estándar calibración para asegurar que el equipo trabaja adecuadamente. (Método EPA 6200). Las mediciones se realizaron por triplicado.

Muestra	Ag	Ag promedio	Ag %CV	As	As promedio	As %CV	Au	Au promedio	Au %CV	Ba	Ba promedio	Ba %CV	Ca	Ca promedio	Ca %CV
LD ppm	5.00			5			6			30.00			12.00		
Estándar Montana	25.63	26.27	2.42	1602.79	1604.96	0.64	< LD	< LD	< LD	237.33	238.12	3.75	6879.98	6938.25	0.81
	26.90			1595.91			< LD			247.42			6943.08		
	26.29			1616.19			< LD			229.62			6991.68		
Terrero	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	374.23	385.23	2.51	41891.03	42007.25	0.30
	< LD			< LD			392.37			42142.48					
	< LD			< LD			389.10			41988.23					
Jal	< LD	< LD	< LD	42.25	42.93	7.42	< LD	< LD	< LD	246.40	253.18	7.52	63213.96	63195.79	0.16
	< LD			46.40			< LD			238.44			63285.13		
	< LD			40.14			< LD			274.69			63088.28		
Arena	< LD	< LD	< LD	15.41	21.08	25.06	< LD	< LD	< LD	325.07	332.55	2.66	46947.85	46972.76	0.16
	< LD			25.86			< LD			330.26			46914.00		
	< LD			21.98			< LD			342.33			47056.43		
Cemento Portland	< LD	< LD	< LD	81.78	81.18	0.98	< LD	< LD	< LD	528.55	513.49	3.14	266669.97	266640.19	0.09
	< LD			81.47			< LD			515.45			266392.56		
	< LD			80.28			< LD			496.47			266858.03		
Cemento RSS	< LD	< LD	< LD	47.87	50.69	5.85	< LD	< LD	< LD	299.53	304.85	2.84	200291.36	200294.68	0.12
	< LD			50.41			< LD			314.84			200541.39		
	< LD			53.78			< LD			300.19			200051.30		
Estandar Montana	28.02	25.01	11.34	1579.82	1593.35	0.85	< LD	< LD	< LD	227.27	228.14	1.20	7161.76	7105.76	1.54
	24.62			1606.78			< LD			231.21			7175.92		
	22.39			1593.44			< LD			225.94			6979.59		

Muestra	Cd	Cd promedio	Cd %CV	Co	Co promedio	Co %CV	Cr	Cr promedio	Cr %CV	Cs	Cs promedio	Cs %CV	Cu	Cu promedio	Cu %CV
<b>LD ppm</b>	<b>6.00</b>			<b>70.00</b>			<b>15.00</b>			<b>17.00</b>			<b>10</b>		
Estándar Montana	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	68.63	69.42	3.34	< LD	< LD	< LD	3206.88	3185.81	1.51
	< LD			67.60			3130.84								
	< LD			72.03			3219.71								
Terrero	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	34.29	41.41	15.26	18.88	19.45	20.62	228.13	230.99	1.47
	< LD			43.59			230.09								
	< LD			46.35			234.75								
Jal	< LD	< LD	< LD	462.95	386.46	17.75	32.40	32.90	4.82	29.00	23.14	25.81	955.97	947.11	1.29
	< LD			366.00			31.62			17.06			952.24		
	< LD			330.44			34.67			23.36			933.13		
Arena	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	19.83	20.81	4.10	522.89	505.04	3.64
	< LD			< LD			< LD			21.34			506.02		
	< LD			< LD			< LD			21.27			486.20		
Cemento Portland	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	59.97	61.28	5.08	< LD	< LD	< LD	70.31	73.12	4.69
	< LD			< LD			< LD			64.83			72.10		
	< LD			< LD			< LD			59.03			76.94		
Cemento RSS	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	104.79	106.37	1.29	< LD	< LD	< LD	67.24	64.55	3.63
	< LD			< LD			< LD			107.27			62.98		
	< LD			< LD			< LD			107.06			63.42		
Estandar Montana	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	69.35	68.11	6.91	< LD	< LD	< LD	3225.11	3227.70	0.44
	< LD			< LD			< LD			72.08			3243.03		
	< LD			< LD			< LD			62.91			3214.96		

Muestra	Fe	Fe promedio	Fe %CV	Hg	Hg promedio	Hg %CV	K	K promedio	K %CV	Mn	Mn promedio	Mn %CV	Mo	Mo promedio	% CV Mo
LD ppm	20.00			6			25.00			45.00			3		
Estándar Montana	40470.82	40387.34	0.24	< LD	< LD	< LD	16879.58	16915.88	0.67	1854.91	1897.69	2.57	9.65	9.32	5.06
	40281.98			< LD			17042.50			1950.77			8.78		
	40409.22			< LD			16825.56			1887.38			9.53		
Terrero	70738.17	70514.11	0.40	< LD	< LD	< LD	6990.77	7048.27	0.79	1597.75	1597.66	0.46	< LD	< LD	< LD
	70604.44			< LD			7051.89			1605.01			< LD		
	70199.71			< LD			7102.15			1590.21			< LD		
Jal	209445.14	209281.80	0.48	< LD	< LD	< LD	3137.98	3163.47	2.06	2491.64	2493.92	0.34	13.36	14.08	6.00
	210191.83			< LD			3237.55			2503.22			15.01		
	208208.42			< LD			3114.88			2486.91			13.87		
Arena	329748.72	329945.38	0.45	< LD	< LD	< LD	4056.22	4023.88	0.98	2161.31	2108.61	3.64	7.39	7.31	4.54
	331519.44			< LD			4035.39			2144.04			6.95		
	328567.97			< LD			3980.03			2020.47			7.6		
Cemento Portland	13891.54	13780.13	0.73	< LD	< LD	< LD	4841.48	4807.81	0.69	557.56	530.05	6.32	8.77	8.21	7.28
	13754.96			< LD			4775.30			539.84			7.58		
	13693.90			< LD			4806.66			492.74			8.27		
Cemento RS	10937.82	10866.90	0.60	< LD	< LD	< LD	7262.15	7217.52	0.99	793.55	800.69	1.89	7.11	8.38	14.25
	10853.74			< LD			7135.21			818.07			9.48		
	10809.14			< LD			7255.19			790.45			8.55		
Estandar Montana	40786.75	40635.52	0.35	< LD	< LD	< LD	17347.12	17281.98	0.80	1948.78	1926.92	1.17	8.97	9	3.02
	40616.16			< LD			17374.88			1928.27			8.75		
	40503.66			< LD			17123.93			1903.71			9.29		
	Ni			Pb			Pd			Rb			S		

Muestra	Ni	Ni promedio	Ni %CV	Pb	Pb promedio	Pb %CV	Pd	Pd promedio	Pd %CV	Rb	Rb promedio	Rb %CV	S	S promedio	S %CV
<b>LD ppm</b>	<b>15.00</b>			<b>5</b>			<b>4.00</b>			<b>4</b>			<b>150.00</b>		
Estándar Montana	< LD	< LD	< LD	5267.30	5277.74	0.34	< LD	< LD	< LD	98.49	99.44	1.20	4768.77	4710.00	3.23
	< LD			5267.20			100.78			4824.13					
	< LD			5298.70			99.04			4537.11					
Terrero	44.27	36.24	20.67	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	19.86	20.50	3.01	733.18	597.64	25.51
	35.01			< LD			21.09			432.55					
	29.44			< LD			20.54			627.19					
Jal	56.36	59.70	9.61	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	14.39	14.97	4.25	13428.32	13261.25	1.95
	56.41			< LD			15.65			13392.50					
	66.32			< LD			14.87			12962.94					
Arena	133.34	139.20	5.99	40.33	30.92	26.37	< LD	< LD	< LD	20.83	21.09	3.97	9468.34	9429.07	3.12
	135.50			26.40			20.42			9117.06					
	148.75			26.02			22.03			9701.81					
Cemento Portland	47.56	46.43	10.59	17.50	17.16	5.77	< LD	< LD	< LD	16.53	16.22	3.84	5215.82	5022.89	3.98
	41.04			16.04			15.50			4816.72					
	50.68			17.93			16.62			5036.12					
Cemento RSS	41.13	44.54	10.36	22.12	21.84	17.57	< LD	< LD	< LD	28.79	29.29	2.75	1625.11	1646.24	7.91
	42.70			25.53			30.22			1527.90					
	49.79			17.87			28.86			1785.70					
Estandar Montana	< LD	< LD	< LD	5364.07	5333.83	0.51	< LD	< LD	< LD	97.91	98.48	0.59	4819.38	4785.17	0.63
	< LD			5325.39			98.45			4772.19					
	< LD			5312.03			99.07			4763.93					

Muestra	Sb	Sb promedio	Sb %CV	Sc	Sc promedio	Sc %CV	Se	Se promedio	Se %CV	Sn	Sn promedio	Sn %CV	Sr	Sr promedio	Sr %CV
<b>LD ppm</b>	<b>12.00</b>			<b>25.00</b>			<b>3</b>			<b>12.00</b>			<b>5.00</b>		
Estándar Montana	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	228.26	227.93	0.50
	< LD			< LD			228.87								
	< LD			< LD			226.67								
Terrero	< LD	< LD	< LD	146.79	145.02	4.05	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	84.19	84.17	0.14
	< LD			138.47			< LD			84.04					
	< LD			149.80			< LD			84.28					
Jal	< LD	< LD	< LD	218.54	218.61	1.56	< LD	< LD	< LD	28.57	26.70	10.67	76.74	75.04	3.09
	< LD			215.23			< LD			28.11			75.97		
	< LD			222.05			< LD			23.42			72.40		
Arena	< LD	< LD	< LD	161.06	148.90	7.15	< LD	< LD	< LD	28.72	30.68	7.15	80.89	81.10	0.77
	< LD			144.38			< LD			33.05			80.60		
	< LD			141.27			< LD			30.27			81.80		
Cemento Portland	< LD	< LD	< LD	752.57	790.46	4.16	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	591.46	587.70	0.92
	< LD			807.65			< LD			< LD			581.53		
	< LD			811.16			< LD			< LD			590.12		
Cemento RSS	< LD	< LD	< LD	1046.35	1073.00	3.49	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	466.57	465.26	0.87
	< LD			1056.81			< LD			< LD			468.49		
	< LD			1115.83			< LD			< LD			460.71		
Estandar Montana	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	229.82	228.39	7.51
	< LD			< LD			< LD			228.67					
	< LD			< LD			< LD			14.77					

Muestra	Te	Te promedio	Te %CV	Th	Th promedio	Th %CV	Ti	Ti promedio	Ti %CV	TI	TI promedio	TI %CV	U	U promedio	U %CV
<b>LD ppm</b>	<b>15.00</b>			<b>4</b>			<b>100.00</b>						<b>5</b>		
Estándar Montana	< LD	< LD	< LD	74.49	68.26	8.50	2531.05	2579.62	1.92	< LD	< LD	< LD	12.83	14.21	16.13
	< LD			67.27			2577.56			< LD			12.95		
	< LD			63.01			2630.25			< LD			16.86		
Terrero	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	2225.62	2148.98	3.14	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
	< LD			< LD			2098.24			< LD			< LD		
	< LD			< LD			2123.09			< LD			< LD		
Jal	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	1178.78	1169.53	0.90	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
	< LD			< LD			1171.75			< LD			< LD		
	< LD			< LD			1158.06			< LD			< LD		
Arena	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	1272.28	1241.32	2.47	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
	< LD			< LD			1210.96			< LD			< LD		
	< LD			< LD			1240.72			< LD			< LD		
Cemento Portland	< LD	< LD	< LD	12.51	12.53	1.44	354.85	358.67	1.85	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
	< LD			12.72			354.85			< LD			< LD		
	< LD			12.36			366.32			< LD			< LD		
Cemento RSS	< LD	< LD	< LD	8.69	8.99	20.56	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	9.23	8.39	10.39
	< LD			7.31			< LD			< LD			7.49		
	< LD			10.97			< LD			< LD			8.46		
Estandar Montana	< LD	< LD	< LD	80.75	77.45	7.41	2610.95	2595.10	0.56	< LD	< LD	< LD	17.83	15.47	13.55
	< LD			80.77			2582.04			< LD			13.82		
	< LD			70.82			2592.30			< LD			14.77		

Muestra	V	V promedio	V %CV	W	W promedio	W %CV	Zn	Zn promedio	Zn %CV	Zr	Zr promedio	Zr %CV
LD ppm	25.00			20			8			5		
Estándar Montana	83.10	73.98	10.79	89.62	108.23	17.73	4092.45	4082.47	0.40	195.85	196.34	0.85
	70.59			127.95			4091.21			198.21		
	68.25			107.11			4063.75			194.97		
Terrero	90.25	77.72	14.56	< LD	< LD	< LD	95.50	95.57	2.36	87.27	87.03	0.25
	68.24			< LD			97.86			86.85		
	74.67			< LD			93.35			86.98		
Jal	59.10	55.07	9.16	67.63	61.60	10.26	< LD	< LD	< LD	51.96	52.17	1.12
	49.41			55.02			< LD			51.72		
	56.69			62.15			< LD			52.83		
Arena	82.31	75.40	9.89	53.72	48.23	12.60	< LD	< LD	< LD	59	58.3	1.50
	67.49			49.26			< LD			58.59		
	76.39			41.70			< LD			57.32		
Cemento Portland	67.93	73.38	6.92	64.43	59.26	8.95	115.88	114.82	1.31	61.88	64.15	3.70
	74.21			59.53			115.47			66.62		
	77.99			53.83			113.10			63.94		
Cemento RSS	67.37	69.20	3.79	61.59	65.07	7.61	114.99	118.20	4.22	81.94	81.33	0.77
	72.21			62.88			123.95			81.35		
	68.03			70.74			115.65			80.69		
Estandar Montana	73.30	77.49	9.05	108.25	106.69	1.71	4072.40	4070.60	0.15	196.87	197.48	8.69
	85.59			104.69			4063.77			197.04		
	73.59			107.13			4075.62			226.67		



## Oxidación Acelerada.

Resultados de pH de residuos de oxidación. Se muestra la calibración y verificación del mismo.

- Concreto hidráulico.

<b>Muestra</b>	<b>observación</b>	<b>pH</b>	<b>pH promedio</b>	<b>% CV</b>
Estándar pH 7	calibración	7.02	N/A	N/A
Estándar pH 10	calibración	10.06	N/A	N/A
Estándar pH 10	confirmación de lectura	10.05	N/A	N/A
Residuo	lectura	8.18	8.16	0.33
Residuo	lectura	8.13		
Residuo	lectura	8.14		
Residuo	lectura	8.18		
Residuo	lectura	8.19		
Estándar pH 7	rectificación de estándar	7.01	N/A	N/A
Estándar pH 10	rectificación de estándar	10.06	N/A	N/A

- Concreto Celular

<b>Muestra</b>	<b>observación</b>	<b>pH</b>	<b>pH promedio</b>	<b>%CV</b>
Estándar pH 7	calibración	7.02	N/A	N/A
Estándar pH 10	calibración	10.02	N/A	N/A
Estándar pH 10	confirmación de lectura	7.01	N/A	N/A
Residuo	lectura	12.48	12.47	0.06
Residuo	lectura	12.47		
Residuo	lectura	12.47		
Residuo	lectura	12.47		
Residuo	lectura	12.46		
Estándar pH 7	rectificación de estándar	7.01	N/A	N/A
Estándar pH 10	rectificación de estándar	10.02	N/A	N/A

## Microscopia Electrónica de barrido Acoplada a Espectrometría de Rayos X por Energía Dispersa (MEB-EDS).

A continuación se presentan los resultados de microscopia electrónica de barrido Acoplada a Espectrometría de rayos X por energía Dispersa (MEB-EDS), realizada a muestras de concreto hidráulico y celular.

### Concreto Hidráulico

- **Concreto Hidráulico Testigo**

Muestra	Na %	Mg%	Al%	Si %	S %	K %	Ca %	Ti %	Fe%	Zn%
Espectro1	ND	1,8	5,2	17,5	1,3	1,3	52,8	ND	16,9	3,2
Espectro 2	1,3	1,8	5,3	18,6	1,4	0,8	50,5	ND	20,2	ND
Espectro 3	ND	1,9	4,7	18,4	1	ND	48,9	ND	25,1	ND
Espectro 4	0,7	3	5,6	20,7	ND	ND	37,4	ND	32,5	ND
Espectro 5	1	2,8	5,5	16,7	ND	1,1	41,1	ND	31,9	ND
Espectro 6	1	1,3	4,5	13,6	1,3	0,9	67,2	ND	10,2	ND
Espectro 7	1,2	1,3	4,3	11,7	0,7	1	72,7	ND	7	ND
Espectro 8	ND	ND	14,8	7,6	ND	ND	13,4	ND	64,3	ND
Espectro 9	ND	9,8	12,8	21,5	3,4	ND	17,1	ND	35,4	ND
Espectro 10	ND	9,7	12,4	21,3	1,2	ND	28,6	ND	26,8	ND
Espectro 11	ND	ND	2,7	5,4	0,9	ND	61,4	6,5	23,1	ND
Espectro 12	ND	1,1	4,9	9	2,5	ND	74,2	ND	8,3	ND
Espectro 13	ND	1,3	2,5	6,1	26,5	ND	32,4	ND	31,3	ND
Espectro 14	ND	0,6	2,3	4,8	33,3	ND	25,4	ND	33,5	ND
Espectro 15	ND	ND	10,9	12,3	3,4	ND	29,6	ND	43,8	ND

\*ND= No detectado por el equipo.

- **Concreto Hidráulico Oxidado**

Muestra	Na %	Mg%	Al%	Si%	P%	S%	K%	Ca%	Fe%
Espectro1	ND	2	5,6	18,3	ND	1,2	1,7	52,3	18,9
Espectro 2	1	2,1	5	20,3	ND	ND	1,3	50,2	20,2
Espectro 3	1,1	2	5,2	19,5	ND	ND	1,4	51,6	19,4
Espectro 4	1,6	1,5	6,5	29,8	ND	0,9	2,7	49,3	7,8
Espectro 5	1,7	1,4	7,3	31,4	ND	ND	2,5	49,4	6,2
Espectro 6	0,7	2	4,9	20,9	0,9	ND	2,1	55,4	13,1
Espectro 7	ND	1,2	3	13,8	ND	6,4	1,1	47,7	26,8
Espectro 8	ND	0,7	2,2	7,9	ND	9,5	0,9	38,5	40,3
Espectro 9	ND	1,6	4,8	16,3	ND	ND	1,6	57,1	18,5
Espectro 10	ND	1,3	3,4	10,3	ND	ND	1	30,8	53,1
Espectro 11	ND	1,4	4	10,2	ND	ND	0,9	29	54,6
Espectro 12	ND	0,8	2	6,7	ND	11,2	ND	23,7	55,5
Espectro 13	0,8	1,4	4,6	17,1	ND	0,7	1,7	62,5	11,3
Espectro 14	ND	0,7	2,1	5,4	ND	19,5	ND	20,5	51,9
Espectro 15	ND	0,7	2,8	2,6	ND	ND	0,9	28,5	64,5

\*ND= No detectado por el equipo

## Concreto celular

- **Concreto Celular Testigo**

Muestra	Na%	Mg%	Al%	Si%	S%	K%	Ca%	Mn%	Fe%	In%
Espectro1	ND	ND	6,5	12,4	11,2	ND	59,5	ND	6	4,5
Espectro 2	1,3	ND	6	10,7	26,4	2,1	50,3	ND	3,2	ND
Espectro 3	2,1	1,1	7	14,6	10,2	2,5	59,2	ND	3,3	ND
Espectro 4	1,9	1,2	5,3	14,5	1,5	2,6	68	ND	4,9	ND
Espectro 5	1,9	1,1	4,8	12,5	1,3	2,8	70,7	ND	4,9	ND
Espectro 6	1,9	1,1	5,4	13,3	1,2	2,4	70,2	ND	4,4	ND
Espectro 7	2,1	0,8	4,2	11,9	1,2	2,4	74	ND	3,5	ND
Espectro 8	2,2	1,1	4,4	11,4	1	2,3	71,6	ND	6	ND
Espectro 9	1,6	1,3	4,3	9,5	0,9	2,4	73,8	ND	6,2	ND
Espectro 10	1,4	ND	3,9	8,1	0,9	2	77,9	ND	5,7	ND
Espectro 11	ND	1,3	4,3	10,4	1,1	2,6	72,1	ND	8,3	ND
Espectro 12	ND	1,2	4	10,5		2,3	73	ND	8,9	ND
Espectro 13	1	0,7	5,1	11	28,3	1,7	47,8	ND	4,3	ND
Espectro 14	0,8	0,7	4,3	9,7	36,3	1,5	43,9	ND	2,8	ND
Espectro 15	0,7	0,5	3,6	7,9	49,2	1,2	34,7	ND	2,1	ND

\*ND= No detectado por el equipo

- **Concreto Celular Oxidado**

Muestra	Na%	Mg%	Al%	Si%	S%	K%	Ca%	Fe%
Espectro1	ND	ND	5,1	15,4	2,4	ND	71,9	5,2
Espectro 2	ND	1,5	4,9	13,7	2,9	ND	69,3	7,8
Espectro 3	ND	1,5	4,5	13,5	3	1	68,7	7,8
Espectro 4	ND	1,1	4,7	14,3	2,9	ND	69,6	7,4
Espectro 5	ND	ND	3,3	12,6	2,7	ND	75,2	6,2
Espectro 6	ND	ND	4,2	12	2,7	1,9	68,7	10,6
Espectro 7	ND	1	2,7	10,1	2,2	0,9	78,2	4,9
Espectro 8	ND	0,6	2,2	8,1	2,3	0,8	82,2	3,8
Espectro 9	ND	ND	2,6	7,4	1,6	ND	82,4	6
Espectro 10	ND	0,7	2	6	1,5	1	84,1	4,8
Espectro 11	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Espectro 12	ND	1,3	3,5	11,7	2,6	1	74,4	5,5
Espectro 13	ND	1,3	3,5	12	2,7	0,8	75,2	4,5
Espectro 14	ND	0,7	3,2	11,4	2,9	1	77,4	3,4

**\*ND= No detectado por el equipo.**

## **ANEXO B.**

### **GLOSARIO**

**Agregados:** Son todos aquellos materiales pétreos que debidamente fragmentados y clasificados sirven para incorporarse a un concreto, para efectos básicamente de llenante o para ocupar un volumen. Hacen parte de los agregados las arenas, las gravas y los triturados

**Análisis granulométrico** Análisis que consiste en hacer pasar un peso conocido de una muestra a través de una serie de cribas sucesivamente más finas y pesar la cantidad retenida sobre cada una de ellas para determinar el porcentaje de peso en cada fracción de tamaño y su distribución relativa con respecto al peso original.

**Beneficio:** Conjunto de operaciones empleadas para la preparación, tratamiento, fundición de primera mano y refinación de productos minerales, en cualquiera de sus fases, con el propósito de recuperar u obtener minerales o sustancias, al igual que de elevar la concentración y pureza de sus contenidos.

**Drenaje ácido (DAM):** Lixiviado, efluente o drenaje contaminante que ha sido afectado por la oxidación natural de minerales sulfurosos contenidos en rocas o residuos expuestos al aire, agua y/o microorganismos promotores de la oxidación de sulfuros.

**Explotación:** Las obras y trabajos destinados a la preparación y desarrollo del área que comprende el depósito mineral, así como los encaminados a desprender y extraer los productos minerales o sustancias existentes en el mismo.

**Estabilización química:** Proceso que consiste en agregar material ajeno al jal que reduce el potencial de generación de drenaje ácido del mismo.

**Intemperismo:** Proceso de degradación y descomposición que sufren los materiales rocosos debido a la corrosión atmosférica puede ser intemperismo mecánico o de desintegración, y químico o de descomposición, pero ambos procesos, por regla general interactúan.

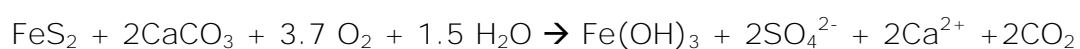
**Jales:** Residuos sólidos generados en las operaciones primarias de separación y concentración de minerales.

**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.

**Mena:** Cuerpo de roca de composición mineralógica uniforme, generalmente metálica, que en forma de cuerpos continuos forma parte de las reservas económicas de un yacimiento.

**Planta de beneficio:** Lugar donde se realizan los trabajos para preparación, tratamiento y fundición de primera mano de productos minerales, en cualquiera de sus fases, con el propósito de recuperar u obtener minerales o sustancias, al igual que de elevar la concentración y pureza de sus contenidos.

**Potencial de acidez (PA):** Capacidad de un residuo, de generar acidez debido a la oxidación de los sulfuros metálicos como ácido sulfúrico, que si no es neutralizado por minerales con reacción básica, produce drenaje ácido (DA) que contiene disueltos metales y metaloides potencialmente tóxicos. Se calcula como la diferencia entre el azufre total ( $S_{total}$ ) y el azufre como sulfatos ( $S_{SO_4^{2-}}$ ) y se multiplica por 31.25; valor que se obtiene de la siguiente reacción de neutralización de los sulfuros.



Por lo anterior, el Potencial de acidez, expresado como kg requeridos de  $\text{CaCO}_3$ /ton de jales, se calcula utilizando la siguiente fórmula:

$$\text{PA} = \% \text{S}^{2-} \times 31.25$$
$$\% \text{S}^{2-} = (\% \text{S}_{\text{total}} - \% \text{S}_{\text{sulfatos}})$$

**Potencial de neutralización (PN):** Capacidad de un material para neutralizar, debido al contenido de minerales consumidores de acidez (carbonatos, hidróxidos y aluminosilicatos). Se determina por medio de la valoración inversa de ácido en exceso de acuerdo a la NOM-141-SEMARNAT-2003.

**Potencial de neutralización neto (PNN):** Balance entre el potencial de acidez y potencial de neutralización. El cual se calcula de la siguiente manera.

$$\text{PNN} = \text{PN}/\text{PA}$$

**Presa de jales:** Obra de ingeniería para el almacenamiento o disposición final de los jales, cuya construcción y operación ocurren simultáneamente.

**Residuos mineros:** Son aquellos provenientes de las actividades de la explotación y beneficio de minerales o sustancias.

**Separación magnética:** Proceso físico que utiliza las características magnéticas del mineral para que se adhiera a los tambores o superficies magnetizadas. No se modifica el mineral.

**Terreros:** Residuos conformados por apilamiento de material mineral de baja ley.