



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**USO DE RESIDUOS MINEROS DE UNA MINA DE FE  
EN LA INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**

**INGENIERA GEÓLOGA**

**P R E S E N T A:**

**NADIA GARCÍA LUNA**



**DIRECTOR DE TESIS :**

**DR. FRANCISCO MARTIN ROMERO**

**MÉXICO, D. F.**

**2015**

**JURADO ASIGNADO:**

**PRESIDENTE:** Profesor: Moisés Dávila Serrano  
**VOCAL:** Profesor: Francisco Martin Romero  
**SECRETARIO:** Profesor: José. E. Santos Jallath  
**1er. SUPLENTE:** Profesor: Luis Gerardo Martínez Jardines  
**2° SUPLENTE:** Profesora: Fabiola Vega García

**SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:**

**INSTITUTO DE GEOLOGÍA, LABORATORIO DE GEOQUÍMICA AMBIENTAL**

**ASESOR DEL TEMA: Dr. Francisco Martin Romero**

**SUPERVISOR TÉCNICO: QFB. José Manuel Montaña Hilario**

**SUSTENTANTE (S): Nadia García Luna**

Dedicado  
a mis padres,  
a mis hermanas,  
a Pirlo y a Frida

## **AGRADECIMIENTOS**

### **Agradecimientos Académicos**

A la máxima casa de estudios la UNAM, ya que gracias a ella he podido lograr un título universitario.

A la Facultad de Ingeniería por que ahí aprendí lo que significa ser un ingeniero, y no solo es saber matemáticas o saber resolver problemas, sino también es tener una base cultural, para poder desenvolverte en todos los ámbitos, entre muchas otras cosas.

Al Instituto de Geología, ya que te brinda una gran gama de opciones para hacer tanto el servicio social como la tesis, y a mi me permitió hacer ambas cosas.

A los integrantes del laboratorio de Geoquímica Ambiental en el cual desarrolle mi proyecto de tesis y en especial a Q.F.B. Fabiola Vega, Q.F.B. José Manuel Montaña que además me orientaron durante el tiempo que escribí la tesis y Q.I. Inés Ramos, de quienes aprendí un poco más de química.

A mi director de tesis el Dr. Romero que me permitió realizar el proyecto, además de darme consejos para que este trabajo fuera de la mejor calidad, al igual que mis sinodales Dr. Moisés Dávila, M. I. José Santos, M. C. Luis Gerardo Martínez y Q.F.B. Fabiola Vega

Al técnico. Rene Alcalá del laboratorio de Física de Suelos del Instituto de Geología quien me proporcionó el material necesario para el análisis textural de los jales.

A la industria Par Pinturas que nos permitió llevar a cabo la elaboración de los concretos y al Ing. Álvaro Potrero quien fue la persona que nos instruyó en la manera de cómo hacer un diseño y el procedimiento para elaborar concretos.

A la Dra. Armienta del Instituto de Geofísica encargada del equipo de análisis de azufre por infrarrojo. Con el cual se determinaron las concentraciones totales de S de los jales.

Al laboratorio de biogeoquímica ambiental (LABQA) de la Facultad de Química, donde se me permitió realizar el procedimiento para determinar la densidad de los jales.

Al Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto (IMCYC), en donde se realizaron las pruebas de resistencia a la compresión del concreto oxidado, especialmente al Ing. Mario Alberto Hernández, quién fue la persona que me apoyó al realizar esta prueba.

### **Agradecimiento Personales**

A mis padres, quienes siempre creyeron en mí, aunque tuve algunos tropiezos durante la carrera.

A mis hermanas Viridiana y Andrea que siempre estuvieron ahí para apoyarme.

A mis compañeros y amigos Memo, Coco, Rosa, Canseco y Roberto con quienes compartí grandes momentos durante la carrera.

A Frida que me ha enseñado su gran perseverancia al superar todos sus obstáculos y a Pirlo que a pesar de sus displasia de cadera es un perro incansable y muy inteligente.

## ÍNDICE

|  |           |
|--|-----------|
| <b>RESUMEN.....</b>  | <b>8</b>  |
| <b>ABSTRACT.....</b>   | <b>10</b> |
| <br>   |           |
| <b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>  | <b>12</b> |
| <b>2. MARCO TEÓRICO.....</b>   | <b>14</b> |
| <b>2.1 Jales mineros.....</b>  | <b>14</b> |
| <b>2.2 Terreros.....</b>   | <b>14</b> |
| <b>2.3 Drenaje ácido.....</b>  | <b>14</b> |
| <b>2.4 Cemento hidráulico.....</b>   | <b>15</b> |
| <b>2.5 Concreto.....</b>   | <b>17</b> |
| <b>2.6 Concreto hidráulico convencional.....</b>   | <b>17</b> |
| <b>2.7 Concreto con inclusión de aire o celular.....</b>                                 | <b>19</b> |
| <b>2.8 Ensayo de asentamiento del cono de Abrams.....</b>                                | <b>21</b> |
| <b>2.9 Prueba de resistencia a la compresión.....</b>                                    | <b>22</b> |
| <br>   |           |
| <b>3. LOCALIZACIÓN Y ASPECTOS GENERALES DEL YACIMIENTO MINERAL DE PEÑA COLORADA.....</b> | <b>24</b> |
| <b>3.1 Localización.....</b>   | <b>24</b> |
| <b>3.2 Consorcio Minero Benito Juárez Peña Colorada (CMBJPC).....</b>                    | <b>25</b> |
| <b>3.3 Geología.....</b>   | <b>26</b> |
| <b>3.4 Yacimiento mineral.....</b>   | <b>27</b> |
| <b>4. PROBLEMÁTICA Y OBJETIVOS.....</b>  | <b>29</b> |
| <b>4.1 Problemática.....</b>   | <b>29</b> |

|   |           |
|---|-----------|
| <b>4.2 Objetivos.....</b>   | <b>29</b> |
| 4.2.1 Objetivo general.....   | 29        |
| 4.2.2 Objetivos particulares.....   | 29        |
| <b>5. METODOLOGÍA.....</b>  | <b>30</b> |
| <b>5.1 Caracterización de química de los jales.....</b>   | <b>30</b> |
| 5.1.1 Determinación del pH.....   | 30        |
| 5.1.2 Obtención de la conductividad eléctrica CE.....   | 30        |
| 5.1.3 Concentraciones totales de los elementos potencialmente tóxicos EPT y otros elementos.....  | 30        |
| 5.1.4 Potencial de generación de drenaje ácido de mina DAM.....                                   | 31        |
| 5.1.5 Determinación de concentraciones disueltas de iones mayores.....                            | 31        |
| 5.1.6 Determinación de concentraciones disueltas de los elementos potencialmente tóxicos EPT..... | 32        |
| <b>5.2 Caracterización física de los jales.....</b>   | <b>32</b> |
| 5.2.1 Análisis del tamaño de las partículas (textura).....  | 32        |
| 5.2.2 Densidad.....   | 34        |
| <b>5.3 Caracterización química de los terreros.....</b>   | <b>35</b> |
| <b>5.4 Elaboración de los concretos.....</b>  | <b>36</b> |
| 5.4.1 Concreto hidráulico convencional.....   | 36        |
| 5.4.2 Concreto celular o con inclusión de aire.....   | 39        |
| <b>5.5 Prueba de resistencia a la compresión a los 7, 14 y 28 días de los concretos.....</b>      | <b>41</b> |
| <b>5.6 Prueba de oxidación acelerada.....</b>   | <b>42</b> |
| 5.6.1 Prueba de resistencia a la compresión al cilindro oxidado.....                              | 43        |
| <b>5.7 Mineralogía.....</b>   | <b>44</b> |

|   |           |
|---|-----------|
| <b>6. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....</b>  | <b>45</b> |
| <b>6.1 Resultados de la caracterización de química de los jales.....</b>  | <b>45</b> |
| 6.1.1 Determinación del pH y conductividad eléctrica CE.....  | 45        |
| 6.1.2 Cocentraciones totales de los elementos presentes en los jales.....   | 45        |
| 6.1.3 Potencial de drenaje ácido de mina DAM.....   | 46        |
| 6.1.4 Concentraciones solubles de los iones mayores.....  | 47        |
| 6.1.5 Concentraciones solubles de los elementos potencialmente tóxicos EPT y otros elementos.....   | 48        |
| <b>6.2 Resultados de la caracterización física de los jales.....</b>  | <b>49</b> |
| 6.2.1 Textura.....  | 49        |
| 6.2.2 Densidad.....   | 50        |
| <b>6.3 Resultados de la caracterización química de los terreros.....</b>  | <b>50</b> |
| 6.3.1 Concentraciones disueltas de los elementos potencialmente tóxicos EPT...  | 50        |
| 6.3.2 Pruebas de movilidad.....   | 51        |
| 6.3.3 Potencial de drenaje ácido DAM.....   | 52        |
| <b>6.4 Elaboración del concreto hidráulico convencional y el concreto celular.....</b>  | <b>52</b> |
| 6.4.1 Prueba de resistencia a la compresión.....  | 53        |
| 6.4.2 Prueba de oxidación acelerada.....  | 54        |
| 6.4.3 Resultados de pH y conductividad eléctrica CE al lixiviado resultado de la oxidación acelerada.....   | 56        |
| 6.4.4 Concentraciones totales de los elementos potencialmente tóxicos EPT y otros elementos de la parte sólida resultado de la oxidación acelerada..... | 57        |
| 6.4.5 Concentraciones solubles de elementos potencialmente tóxicos y otros elementos en el lixiviado del resultado de la oxidación acelerada.....       | 59        |
| 6.4.6 Prueba de resistencia a la compresión del concreto hidráulico convencional y del concreto celular después de la oxidación acelerada.....          | 60        |



|   |           |
|---|-----------|
| 6.4.7 Mineralogía del concreto hidráulico convencional y del concreto celular oxidados..... | 61        |
| <b>7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>   | <b>63</b> |
| <b>7.1 Conclusiones.....</b>  | <b>63</b> |
| <b>7.2 Recomendaciones.....</b>   | <b>63</b> |
| <b>8. REFERENCIAS.....</b>  | <b>65</b> |

## ÍNDICE DE IMÁGENES

|  |    |
|--|----|
| <b>Imagen 1.</b> Ubicación de las minas de Fe en México, publicado por la Coordinación General de Minería en el Perfil de Mercado del Hierro- Acero.....         | 13 |
| <b>Imagen 2.</b> Ubicación de la mina Peña Colorada (Corona y Henríquez, 2004).....  | 24 |
| <b>Imagen 3.</b> Columna estratigráfica de la Formación Tepalcatepec (Corona y Henríquez, 2004).....   | 27 |
| <b>Imagen 4.</b> Triangulo de Texturas.....  | 34 |
| <b>Imagen 5.</b> Procedimiento de elaboración del concreto hidráulico.....   | 37 |
| <b>Imagen 6.</b> Muestra el procedimiento que se llevó a cabo al mezclar todos los elementos del concreto.....   | 38 |
| <b>Imagen 7.</b> Procedimiento que se llevó a cabo para medir la caída del concreto.....   | 38 |
| <b>Imagen 8.</b> Procedimiento de llenado de los cilindros.....  | 39 |
| <b>Imagen 9.</b> El cilindro está listo para comenzar el fraguado.....   | 39 |
| <b>Imagen 10.</b> Mezclador con aspas para generar burbujas de aire en el concreto celular.....  | 40 |
| <b>Imagen 11.</b> Mezcla del concreto celular lista para comenzar el fraguado.....   | 41 |
| <b>Imagen 12.</b> Concreto hidráulico durante la prueba de resistencia a la compresión.....  | 41 |
| <b>Imagen 13.</b> Concreto hidráulico reaccionando con el peróxido de hidrógeno.....   | 42 |
| <b>Imagen 14.</b> Concreto celular reaccionando con el peróxido de hidrógeno.....  | 42 |
| <b>Imagen 15.</b> Concreto hidráulico cuando se le está cabeceando y ya tronado por la máquina de ensayos de compresión.....                                     | 43 |
| <b>Imagen 16.</b> Cilindro de concreto con inclusión de aire al momento de cabecearlo, y ese mismo cilindro tronado con la máquina de ensayos de compresión..... | 43 |
| <b>Imagen 17.</b> Gráfica de resistencia a la compresión vs densidad de los concretos celulares.....   | 54 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|   |    |
|---|----|
| <b>Tabla 1.</b> Clasificación Americana e Inglesa del cemento basada en A. M. Neville, 1987.....  | 16 |
| <b>Tabla 2.</b> Relación a/c con respecto a la resistencia a la compresión (Neville, 2010).....   | 18 |
| <b>Tabla 3.</b> Usos y beneficios del concreto según su resistencia a la compresión propuestos por VITRUARK, administración, proyecto y construcción..... | 19 |
| <b>Tabla 4.</b> Relación entre la densidad y los usos del concreto celular y su composición propuesta por PAN PACIFIC MANAGEMENT RESOURCES PTY LTD.....   | 21 |
| <b>Tabla 5.</b> Consistencia de acuerdo al asentamiento del concreto.....   | 22 |
| <b>Tabla 6.</b> Determinación del % de arcillas.....  | 33 |
| <b>Tabla 7.</b> Diseño de 25 (I) del concreto convencional de acuerdo a la densidad de los materiales.....  | 36 |
| <b>Tabla 8.</b> Diseño de 11 L del concreto celular de acuerdo a la densidad de los materiales.....   | 40 |
| <b>Tabla 9.</b> Resultados del pH y la CE.....  | 45 |
| <b>Tabla 10.</b> Concentraciones de los totales de los EPT y otros elementos importantes.....   | 46 |
| <b>Tabla 11.</b> Resultado del balance acido-base modificado.....   | 47 |
| <b>Tabla 12.</b> Concentraciones de los iones principales.....  | 47 |
| <b>Tabla 13.</b> Concentraciones solubles de los elementos.....   | 48 |
| <b>Tabla 14.</b> Porcentajes de arena, arcillas y limos en los jales y su clasificación de acuerdo al triángulo de texturas.....                          | 49 |
| <b>Tabla 15.</b> Densidad.....  | 50 |
| <b>Tabla 16.</b> Concentraciones disueltas de los elementos potencialmente tóxicos EPT.....   | 53 |
| <b>Tabla 17.</b> Resultados del balance acido-base modificado.....  | 5  |
| <b>Tabla 18.</b> Resultados de la prueba de resistencia a la compresión de los concretos  |    |

|   |    |
|---|----|
| a los 7, 14 y 28 días.....  | 53 |
| <b>Tabla 19.</b> Cambios de los concretos con la oxidación.....   | 55 |
| <b>Tabla 20.</b> Resultados de 3 mediciones de pH y el resultado de la CE con el conductímetro.....           | 57 |
| <b>Tabla 21.</b> Concentraciones de los elementos en la parte sólida resultado de la oxidación acelerada..... | 58 |
| <b>Tabla 22.</b> Concentraciones totales de del cemento RS (Ojeda, 2015).....                                 | 59 |
| <b>Tabla 23.</b> Concentraciones solubles de los elementos en los concretos oxidados.....                     | 59 |
| <b>Tabla 24.</b> Concentraciones solubles de los elementos en el cemento RS (Ojeda, 2015).....                | 60 |
| <b>Tabla 25.</b> Resistencia a la compresión de los concretos después de oxidarlos.....                       | 61 |
| <b>Tabla 26.</b> Resultados de la mineralogía.....  | 62 |

## RESUMEN

Es conocida la importancia económica de la minería en México, pero también es conocido que esta actividad genera grandes volúmenes de residuos que pueden ser peligrosos para el ambiente y salud humana; por lo que se deben manejar de una manera integral y segura para el ambiente.

De acuerdo a la normatividad ambiental mexicana (NOM-157-SEMARNAT-2009<sup>1</sup>), la gestión integral de los residuos tiene como propósito establecer las actividades para su manejo integral. Los programas de manejo integral de residuos priorizan la reducción y estrategias de valorización antes que la disposición final.

Para evaluar la posibilidad de valorización de residuos mineros como una opción de su manejo integral, en este trabajo de tesis se seleccionaron los jales<sup>2</sup> y terreros<sup>3</sup> de una mina de hierro localizada en el estado de Colima para la elaboración de material de construcción, específicamente en la elaboración de dos tipos de concretos: concreto hidráulico y concreto celular.

Los jales y terreros se utilizaron como agregados pétreos (arenas y gravas) en la elaboración de los dos tipos de concretos y como conglomerante se utilizó cemento portland. En el caso del concreto hidráulico se utilizaron los jales en sustitución de la arena convencional y terreros, en sustitución de la grava; mientras que para el concreto celular se sustituyó la arena por los jales.

Se valoró la peligrosidad tanto de jales como terreros a través de la determinación de la concentración total y soluble de elementos potencialmente tóxicos EPT; así

---

<sup>1</sup> Norma Oficial Mexicana, que establece los elementos y procedimientos para instrumentar planes de manejo de residuos mineros.

<sup>2</sup> Residuos sólidos generados en las operaciones primarias de separación y concentración de minerales (NOM-141-SEMARNAT-2004).

<sup>3</sup> Los terreros son los materiales que sobre-yacen al cuerpo mineralizado de interés y que se excavan con el fin de acceder al mismo. Los terreros se componen de rocas de diferentes tamaños

como de la determinación del potencial de generación de drenaje ácido de mina (DAM). Así mismo, se determinaron las propiedades físicas como densidad y textura.

Los principales resultados indican que tanto en jales como terreros, las concentraciones totales de los elementos potencialmente tóxicos EPT están por debajo del límite establecido por la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004<sup>4</sup>.

La densidad de los jales fue mayor a la densidad de las arenas que se usan para la elaboración de concretos lo que les confiere densidades, a los concretos elaborados, de: 2200 y 2500 kg/m<sup>3</sup> para el concreto hidráulico y de 300 a 1600 kg/m<sup>3</sup> para el concreto celular.

A ambos concretos se les realizó la prueba de resistencia a la compresión, con la finalidad de determinar para qué tipo de construcción pueden ser útiles. Como resultado se obtuvo que el concreto hidráulico puede servir para construcción de viviendas de poca altura. Con respecto al concreto celular la resistencia a la compresión está en función de la densidad, y sus usos a su vez dependen de la densidad, por lo que se puede utilizar en bloques y paneles de concreto para las capas externas de edificios, paredes divisoras, losas de concreto para techos y pisos.

Con estos 2 ejemplos se demuestra que los residuos mineros de la mina de hierro localizada en Colima pueden ser utilizados como agregados pétreos en la elaboración de concreto hidráulico y celular.

---

<sup>4</sup> Norma Oficial Mexicana, que establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/o vanadio.

## **ABSTRACT**

*The economic importance of the mine activities in Mexico it is known, however it is also known that this activity produces large volumes of waste that could constitute an environmental hazards and health risks; therefore appropriate programs must be implemented for the comprehensive management of mining waste*

*According to the Mexican Environmental Regulations (NOM-147-SEMARNAT-2009<sup>5</sup>), the comprehensive management of the waste has the purpose of implementing the activities for their adequate management and safe disposal. The waste comprehensive management programs encourage use of reduction, reuse, and recovery strategies before to final disposal in storage facilities.*

*To evaluate the possibility of reuse of the mining wastes like an option of their comprehensive management, in this thesis work were selected the tailings<sup>6</sup> and the waste rock<sup>7</sup> of an iron mine located in the State of Colima to the production of building material, particularly in the development of 2 types of concretes: hydraulic concrete and the cellular concrete.*

*The tailings and the waste rock were used as stone aggregate (sands and gravels) in the elaboration of the 2 types of concretes and as a conglomerating was used portland cement. In the case of the hydraulic concrete were used the tailings, replacing of the conventional sand and the waste rock, replacing the gravel; while for the cellular concrete it was replaced the sand by tailings.*

*It was valued the hazard on both the tailings and the waste rock, through the determination of the total and soluble concentrations of the potential toxic elements (PTE); as well as determine their potential for acid mine drainage (AMD). Likewise they were determinate the physical properties of the tailings like density and texture.*

---

<sup>5</sup> Mexican Official Standard, which specified the elements and the procedures for implementing management plans of the mining waste.

<sup>6</sup> Solid waste generated in the primary operations of separation and concentration of the minerals (NOM-141-SEMARNAT-2004).

<sup>7</sup> Waste rock is the overburden material that is excavated of in order to access valuable ore bodies. This material is composed of various rock types which vary in size.

*The main results indicate that the total concentrations of the potential toxic elements (PTE) are below intervention guideline dictated by Mexican environmental regulation (NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004<sup>8</sup>), both in the tailings and in the waste rock.*

*In the other side the tailings density was higher than the sand density used to make concretes, which give to 2 types of developed concretes, the following densities: 2200 to 2500 kg/m<sup>3</sup> to hydraulic concrete and 300 to 1600 kg/m<sup>3</sup> for cellular concrete.*

*It was made a test of compressive strength to both concretes; in order to determine the type of construction they will be useful. And as a result, it was concluded that the hydraulic concrete could be used to built houses not high. In respect of cellular concrete, the compressive strength is a function of the density and its uses depends of the density, and as a consequence these could be used as blocks and concrete panels to outer layers of buidings, dividing walls, concrete slabs for roofing and floors.*

*These two examples are a demonstration that mining waste of the iron mine located in Colima, could be useful like stone aggregate in the elaboration of hydraulic and cellular concrete.*

---

<sup>8</sup> Mexican Oficial Standard, which stablishes criteria to determine the concentrations of the remedation of the contaminated soils by arsenic, barium, beryllium, cadmium, hexavalent chromium, mercury, nickel, silver, lead, selenium, thallium and/or vanadium.



## 1. INTRODUCCIÓN

La minería en México es una de las actividades económicas de mayor importancia, ya que es una industria generadora de empleo. En mayo de 2013 en el prontuario de la industria minero metalúrgica se publicó que hasta abril de ese año gracias a esta actividad se generaron 337 mil 598 empleos directos y más de 1.6 millones de empleos indirectos, contribuyendo con el 4.9 % del Producto Interno Bruto (PIB) nacional.

México ocupa el primer lugar en la producción de plata, así mismo se encuentra entre los primeros 10 lugares de los productores de oro, plomo, zinc, cobre, bismuto, fluorita, celestita, wollastonita, cadmio, diatomita, molibdeno, barita, grafito, sal, yeso y manganeso a nivel mundial, según la Secretaría de Economía.

La Coordinación General de Minería en México publicó en 2013 en el Perfil de Mercado del Hierro- Acero que el país ocupa el décimotercer lugar a nivel mundial en la producción de Fe siendo 18 millones de toneladas al año y los principales estados productores son Michoacán (27.2%), Coahuila (21.3%), Colima (19%), Jalisco (9.23%), Sonora (8.8%), Durango (5.2%) y Chihuahua (4.5%) que en conjunto cubren el 95.1% del total de la producción del hierro nacional.

**Imagen 1.** Ubicación de las minas de Fe en México, publicado por la Coordinación General de Minería en el Perfil de Mercado del Hierro- Acero. Falta Referencia.



A pesar de que la minería en México ha sido uno de los pilares para su desarrollo, no se puede deslindar del impacto negativo que genera en el ambiente, ya que al producir residuos sólidos (jales y terreros), líquidos y gaseosos provoca contaminación a diversos niveles, desde el subsuelo hasta la atmósfera.

Es por esto que el concepto de sustentabilidad en la minería, permite el reconocimiento de este sector en la economía del país, pero también analizar el impacto ambiental consecuencia de esta actividad, como lo es la contaminación del agua, sobreexplotación de acuíferos y la destrucción de la flora y la fauna, (Gutiérrez y Morero, 2007).

## **2. MARCO TEÓRICO**

### **2.1 Jales mineros**

Residuos sólidos generados en las operaciones primarias de separación y concentración de minerales (NOM-141-SEMARNAT-2004).

### **2.2 Terreros**

Residuos conformados por apilamiento de material mineral de baja ley (NOM-157-SEMARNAT-2009)

### **2.3 Drenaje ácido**

El drenaje ácido de mina (DAM) es un problema ambiental generado por la meteorización y oxidación de los sulfuros metálicos presentes en los jales los cuales se conforman en su mayoría éstos y son disoluciones que se caracterizan por tener valores bajos de pH y altas concentraciones de EPT disueltos que, al transportarse, pueden convertirse en un problema ambiental severo ya que contaminan suelos, sedimentos, aguas superficiales y subterráneas.

Las reacciones de oxidación ocurren de forma natural, y se aceleran por el aumento de exposición de la roca al oxígeno, al agua y por la acción catalizadora de algunas bacterias. Los sulfuros generan el drenaje ácido, mientras que los carbonatos, aluminos-silicatos e hidróxidos lo neutralizan. La eficiencia de la neutralización, dependerá de la proporción en que se encuentren estos componentes.

Es importante resaltar, que la oxidación de los sulfuros metálicos no siempre genera Drenaje Ácido de Mina (DAM). La capacidad de los residuos mineros para generar DAM depende del potencial de acidez, que está definido por la presencia de minerales generadores de acidez (pirita principalmente) y del potencial de neutralización, que está dado por la presencia de minerales alcalinos que consumen acidez (calcita principalmente). Cuando el potencial de acidez es menor

que el potencial de neutralización, la acidez producida durante la oxidación de los sulfuros metálicos es eficientemente consumida por la disolución de los minerales alcalinos, mediante el denominado proceso de neutralización.

## **2.4 Cemento hidráulico**

El cemento es un agregado de material calcáreo como calizas, conchas, margas, etc. lo que representa de un 60 hasta un 67 % y un material arcilloso compuesto por  $\text{SiO}_2$  (17-25 %),  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (3-8%),  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (0.5-6 %),  $\text{MgO}$  (0.1-4 %), Alcalis (0.2-0.3 %) y  $\text{SO}_3$  (1-3 %) (Neville, A. et. al., 2010).

Estos materiales mezclados homogéneamente y finamente molidos son calcinados a una temperatura de aproximadamente 1400 °C. Una vez fundido este material se le denomina Clinker, el cual se deja enfriar y nuevamente se muele, durante el proceso de molienda se añade una pequeña cantidad de yeso entre 3% a 4%. El cemento se puede mezclar con agua o con otros agregados como arenas y gravas, cuyo resultado será una mezcla endurecida la cual se forma debido a que el cemento con el agua reaccionan y se combinan lentamente para desarrollar estructuras cristalinas cementantes. Además el cemento contiene un material acuoso (yeso) el cual le da la propiedad de fraguarse bajo el agua.

En la siguiente tabla se muestra las clasificaciones inglesa y americana de los cementos, y a su vez se menciona en qué norma internacional ASTM se encuentra establecida esta clasificación. También se encuentran los principales usos de los diferentes tipos de cemento.

**Tabla 1.** Clasificación Americana e Inglesa del cemento basada en A. M. Neville,  
2010

| <b>Inglesa</b>  | <b>Americana</b> | <b>ASTM</b> | <b>Usos</b>  |
|---|------------------|-------------|--|
| <b>Cemento ordinario</b>                                    | Tipo I           | C 150- 84   | Obras de concreto en general (edificios, estructuras industriales, conjuntos habitacionales, etc.).  |
| <b>Cemento de muy alta resistencia a temprana edad</b>      | Tipo III         | C 150-84    | Se usa cuando se necesita que la estructura de concreto reciba carga lo antes posible o cuando se necesita retirar la cimbra a los pocos días del vaciado.                           |
| <b>Cemento de bajo calor</b>                                | Tipo IV          | C 150-84    | Se usa cuando se requiere bajo calor de hidratación en que no pueden producirse dilataciones durante el fraguado.  |
| <b>Cemento modificado (resistencia moderada sulfatos) a</b> | Tipo II          | C 150-84    | Obras de concreto en general y obras expuestas a la acción moderada o donde se requiera moderado calor de hidratación (puentes, tuberías de concreto).                               |
| <b>Cemento resistente sulfatos a</b>                        | Tipo V           | C 150-84    | Obras donde se requiere una elevada resistencia a la acción de los sulfatos (canales, alcantarillas, obras portuarias, etc.).  |
| <b>Cemento siderúrgico</b>                                  | Tipo IS          | C 595-83 a  | Se usa en concretos en masa debido a un menor calor de hidratación y en construcciones donde se implica el agua de mar ya que es más resistente a sulfatos que el cemento ordinario. |
| <b>Cemento blanco</b>                                       | -----            | C 150-84    | Se usa en obras con propósitos arquitectónicos, también se usa por su bajo contenido de álcalis soluble con lo que se evita la tinción.  |

|                           |         |            |  |
|---------------------------|---------|------------|--|
| <b>Cemento puzolánico</b> | Tipo IP | C 595-83 a | En obras de concreto en general, también cuando no se requiere alta resistencia a temprana edad. |
|---------------------------|---------|------------|--|

## 2.5 Concreto

El concreto es un material compuesto de cemento, agua, grava y arena; sin embargo, hoy en día se conocen varios tipos de concretos, los cuales no siempre llevan grava o se les agregan diferentes tipos de aditivos los cuales pueden permitir la reducción del agua necesaria para mejorar su calidad, aceleran o retardan el fraguado, también hay aditivos reductores de agua de amplio rango para dar al concreto una consistencia fluida que ayuda a colocar el concreto en estructuras dúctiles, y otros mejoran al concreto dándoles mayor resistencia, mejor permeabilidad, etc., esto siempre y cuando se use el aditivo y las proporciones correctas.

También se puede modificar el concreto usando agregados de concretos reciclados, polímeros, fibras, inclusión de aire, etc. Esto se debe a que el concreto es el material de construcción más estudiado por científicos, ya que es un material que con ciertos cambios en el diseño puede tener distintas características y esto le confiere una amplia gama de usos.

## 2.6 Concreto hidráulico convencional

El concreto hidráulico convencional está compuesto por agua, cemento, y agregados (arena y grava).

Los agregados tanto finos como gruesos pueden ser de origen natural o antropogénico los cuales son rocas trituradas para obtener la granulometría deseada. Las arenas pueden ser de rocas como escoria volcánica, concreto triturado, o una combinación de estos u otros agregados como los extraídos de bancos de arenas, su granulometría varía de 0.75 mm a menos de 4.75 mm; por otro lado las gravas deben ser retenidas por la malla N° 4 (4.75 mm) y deben pasar por la malla N° 3 ½ (90 mm) la roca puede ser escoria de alto horno, escoria

volcánica, concreto reciclado o una combinación de estos u otras rocas. Es importante que al final la mezcla de los materiales obtenga una densidad entre 2200 y 2500 kg/m<sup>3</sup>.

El factor más importante que determinará la resistencia a la compresión del concreto es la relación con respecto a la masa agua/ cemento (a/c), esto quiere decir que entre mayor cantidad de agua tenga la mezcla será mayor la relación, dando como resultado una menor resistencia a la compresión.

En la tabla 2 se exponen los resultados teóricos de la relación a/c con respecto a la resistencia a la compresión:

**Tabla 2.** Relación a/c con respecto a la resistencia a la compresión (Neville, 2010)

| <b>Resistencia a la compresión (kg/m<sup>2</sup>) a los 28 días</b> | <b>Relación a/c en el Concreto hidráulico</b> | <b>Relación a/c en el Concreto con aire incluido</b> |
|---|---|--|
| <b>422</b>  | 0.41  | ---  |
| <b>351</b>  | 0.48  | 0.40   |
| <b>281</b>  | 0.57  | 0.48   |
| <b>211</b>  | 0.68  | 0.59   |
| <b>140</b>  | 0.82  | 0.74   |

De acuerdo a la resistencia a la compresión de los concretos se determinan sus usos los cuales se enuncian en la tabla 3:

**Tabla 3.** Usos y beneficios del concreto según su resistencia a la compresión propuestos por VITRUARK, administración, proyecto y construcción.

| <b>Resistencia a la compresión<br/>(kg/cm<sup>2</sup>)</b>                            | <b>Usos</b>  | <b>Beneficios</b>  |
|---|--|--|
| <b>Baja<br/>Menor a 150</b>   | Losas ligeras o elementos de concreto sin requisitos estructurales.  | Bajo costo   |
| <b>Moderada<br/>Entre 150 y 250</b>   | Edificaciones de tipo habitacional de poca altura.   | Bajo costo   |
| <b>Normal<br/>Entre 250 y 420</b>   | Todo tipo de estructuras de concreto.  | Funcionabilidad y disponibilidad   |
| <b>Muy alta resistencia<br/>Entre 400 y 800</b>                                       | Columnas de edificios muy altos, secciones de puentes con claros muy largos, elementos pre-esforzados, disminución en los espesores. | Mayor área aprovechable en plantas bajas de edificios altos, elementos pre-esforzados más ligeros, elementos más esbeltos. |
| <b>Alta resistencia temprana<br/>80% total de resistencia solicitada a 1 ó 3 días</b> | Pisos, pavimentos, elementos pre-esforzados, elementos prefabricados, construcción en clima frío.                                    | Elevada resistencia temprana, mayor avance de obra, optimización del uso de cimbra, disminución de costos.                 |

## **2.7 Concreto con inclusión de aire o celular**

Es un concreto con aire, en forma de burbujas muy pequeñas, el cual es incluido mediante un aditivo ya sea durante la elaboración del cemento o en las operaciones de dosificación y mezclado del concreto.



Este tipo de concreto tiene su origen en Munich, Alemania, donde en 1943 Josef Hebel buscaba aumentar la resistencia del concreto a la desintegración cuando queda expuesto a congelación y deshielo en estado saturado o parcialmente saturado, ya que las burbujas retardan la entrada del agua al concreto y además alivian la presión causada por la congelación del agua libre en los capilares, evitando así el daño a la estructura de la pasta endurecida. En los pavimentos se evitan las escamas causadas por la aplicación de productos químicos para remover el hielo. Otras ventajas propuestas por el Manual Contec Mexicana sobre este concreto son:

- Precisión
- Rapidez de construcción
- Trabajabilidad, esto incrementa la impermeabilidad y mejora la resistencia al ataque por sulfatos.
- Versatilidad y resistencia
- Ligereza
- Resistencia al fuego
- Aislamiento térmico y ahorro de energía
- Aislamiento acústico
- No tóxico
- Durabilidad

El concreto celular es recomendable para:

- a) Clima cálido. Evita la penetración del calor a la vivienda.
- b) Clima frío. Es ideal para bajas temperaturas en las que deben utilizarse materiales térmicos para propiciar la acumulación de calor interior evitando el enfriamiento.
- c) Se le utiliza especialmente en aquellas regiones cuyo clima es templado, semi-frío o extremoso tanto en invierno como en verano.

Para este concreto el factor más importante es su densidad, ya que de acuerdo a ella se determinarán sus usos.

En la tabla 4 se presentan sus usos de acuerdo a su densidad y composición.

**Tabla 4.** Relación entre la densidad y los usos del concreto celular y su composición propuesta por PAN PACIFIC MANAGEMENT RESOURCES PTY LTD.

| Densidad [kg/m <sup>3</sup> ] | Composición     | Usos  |
|-------------------------------|-----------------|---|
| <b>300- 600</b>               | Cemento         | No es un material estructural y se usa en pisos o azoteas, canchas de tenis, rellenos interespaciales entre capas de ladrillos en paredes subterráneas, aislamiento en bloques vacíos.                                |
| <b>600- 900</b>               | Arena y cemento | Se emplea para fabricación de bloques y paneles precolados para paredes de revestimiento o losas para cielos rasos (techos falsos), capas de aislamiento térmico y acústico en edificios residenciales y comerciales. |
| <b>900- 1200</b>              | Arena y cemento | Se utiliza en bloques y paneles de concreto para las capas externas de edificios, paredes divisoras, losas de concreto para techos y pisos.   |
| <b>1200- 1600</b>             | Arena y cemento | Se usa en paneles prefabricados de cualquier dimensión para usos comerciales e industriales, la colada en obra de paredes, ornamento de paisajismo.   |

### 2.8 Ensayo de asentamiento del cono de Abrams

Esta prueba sirve para conocer la consistencia del concreto, lo cual nos da como indicativo la cohesión del concreto, ya que dependiendo de su forma de asentamiento podemos determinar si tienen o no cohesión.

En la tabla 5 se menciona la consistencia del concreto de acuerdo a su asentamiento.

**Tabla 5.** Consistencia de acuerdo al asentamiento del concreto.

| <b>Consistencia</b> | <b>Asentamiento [cm]</b> |
|---------------------|--------------------------|
| <b>Seca</b>         | 0 a 2                    |
| <b>Plástica</b>     | 3 a 5                    |
| <b>Blanda</b>       | 6 a 9                    |
| <b>Fluida</b>       | 10 a 15                  |
| <b>Líquida</b>      | ≥ 16                     |

## **2.9 Prueba de resistencia a la compresión**

La resistencia a la compresión del concreto es la medida más común que se emplea para conocer su desempeño y con base en este parámetro diseñar distintas estructuras.

Éste se determina tronando probetas cilíndricas de concreto en una máquina de ensayos de compresión, y la resistencia se calcula a partir de la carga de ruptura dividida entre el área de la sección que resiste a la carga y se reporta en megapascales MPa o en  $\text{kg/cm}^2$ .

Con el fin de conseguir una distribución uniforme de la carga, generalmente los cilindros se cabecean con un mortero de azufre de acuerdo a la norma ASTM-C-617 o con almohadillas de neopreno de acuerdo a la norma ASTM-C-1231.

Los cilindros sometidos a esta prueba de aceptación y control de calidad se elaboran y curan siguiendo los procedimientos descritos en la norma ASTM-C-031 “Práctica estándar para elaborar y curar cilindros de ensaye de concreto en campo”. Y la norma ASTM-C-039 “Método estándar de prueba de resistencia a la compresión de probetas cilíndricas de concreto” describe el ensayo para someter las probetas a esta prueba.

Para cumplir con los requerimientos de resistencia específicos de un proyecto se aplican 2 criterios de aceptación propuestos por el Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto (IMCYC):

- ✓ El promedio de 3 ensayos consecutivos es igual o supera la resistencia especificada,  $f_c$
- ✓ Ninguno de los ensayos deberá arrojar un resultado inferior a  $f_c$  en más de 3.45 MPa ó 35.18 kg/cm<sup>2</sup>, ni ser superior en más de 0.10 MPa ó 1 Kg/cm<sup>2</sup>  $f_c$ , cuando  $f_c$  sea mayor a 35 MPa o 356 Kg/cm<sup>2</sup>.

Condiciones que afectan los resultados de las pruebas de resistencia a la compresión:

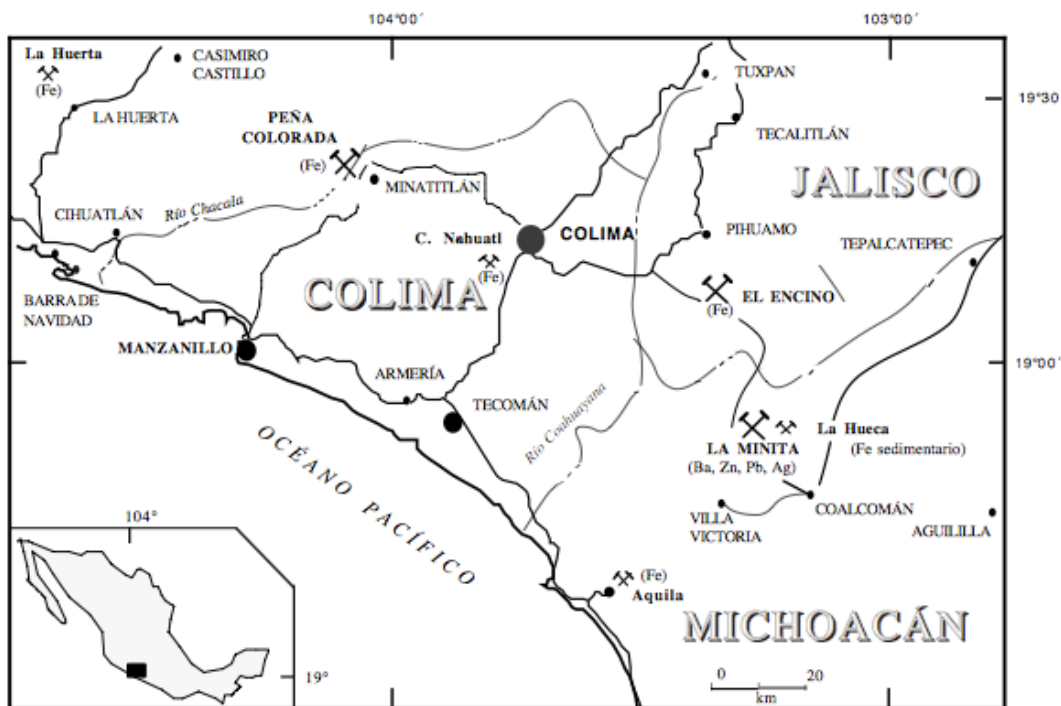
- Método de muestreo
- Método de elaboración del espécimen
- Tamaño y forma del espécimen de prueba
- Irregularidades en el espécimen de prueba (bases no paralelas, ejes desviados con respecto a la vertical en más de 6 mm)
- Contenido de humedad en el espécimen
- Cabeceo de más de 0.005 cm respecto al plano
- Tipo de platinas de la máquina de prueba
- Velocidad de aplicación de la carga

### 3. LOCALIZACIÓN Y ASPECTOS GENERALES DEL YACIMIENTO MINERAL DE PEÑA COLORADA

#### 3.1 Localización

El yacimiento mineral de Peña Colorada se localiza en el extremo noroccidental de la provincia fisiográfica de la Sierra Madre del Sur, en la Sierra del Mamey. Se encuentra ubicado en las coordenadas geográficas  $19^{\circ} 21' 37''$  N;  $104^{\circ} 05' 43''$  W, al norte de la Sierra Madre del Sur en el estado de Colima, la mina se encuentra a unos 6 km al poniente del municipio de Minatitlán, y a 45 km de la ciudad de Colima.

**Imagen 2.** Ubicación de la mina Peña Colorada (Corona y Henríquez, 2004)



### **3.2 Consorcio Minero Benito Juárez Peña Colorada (CMBJPC)**

Esta mina explota una mena de Fe (magnetita), utilizando el método a cielo o tajo abierto. Comenzó sus operaciones en 1976 y es uno de los yacimientos de Fe más grandes de México.

El proceso de producción de Fe se compone de 4 etapas (Romero, 2012):

- Exploración

Esta etapa se lleva a cabo a través de métodos directos (barrenación a diamante) e indirectos (geofísicos y geoquímicos), con cuyos resultados el departamento de Geología de la mina determina la calidad y la posición del mineral, también se pudo concluir que la mineralización de la magnetita como mineral de interés presenta 3 apariencias: masiva, diseminada y brechoide.

- Explotación

Debido a la cercanía de los cuerpos mineralizados a la superficie, la explotación se puede realizar por el método a tajo abierto. Lo que se busca es extraer el mineral con interés económico; sin embargo, se extrae en conjunto la roca estéril, es decir que no contiene Fe o su contenido es menor a la ley (20% Fe por tonelada métrica seca) de corte económicamente explotable. Teniendo como resultado de esto, los terreros, los cuales son depositados a orillas de los límites finales del tajo. Y el material que tiene suficiente Fe se envía al proceso de beneficio.

- Beneficio

El objetivo de este proceso es concentrar los minerales de Fe, y para esto se debe triturar y moler el material, y luego aprovechando las propiedades magnéticas del mineral es separado del resto del material para después ser enviado a la planta peletizadora por gravedad a través de un ferroaductor.

Durante este proceso se generan los residuos de granulometría fina llamados jales los cuales se depositan en la denominada presa de jales.

- Peletizado

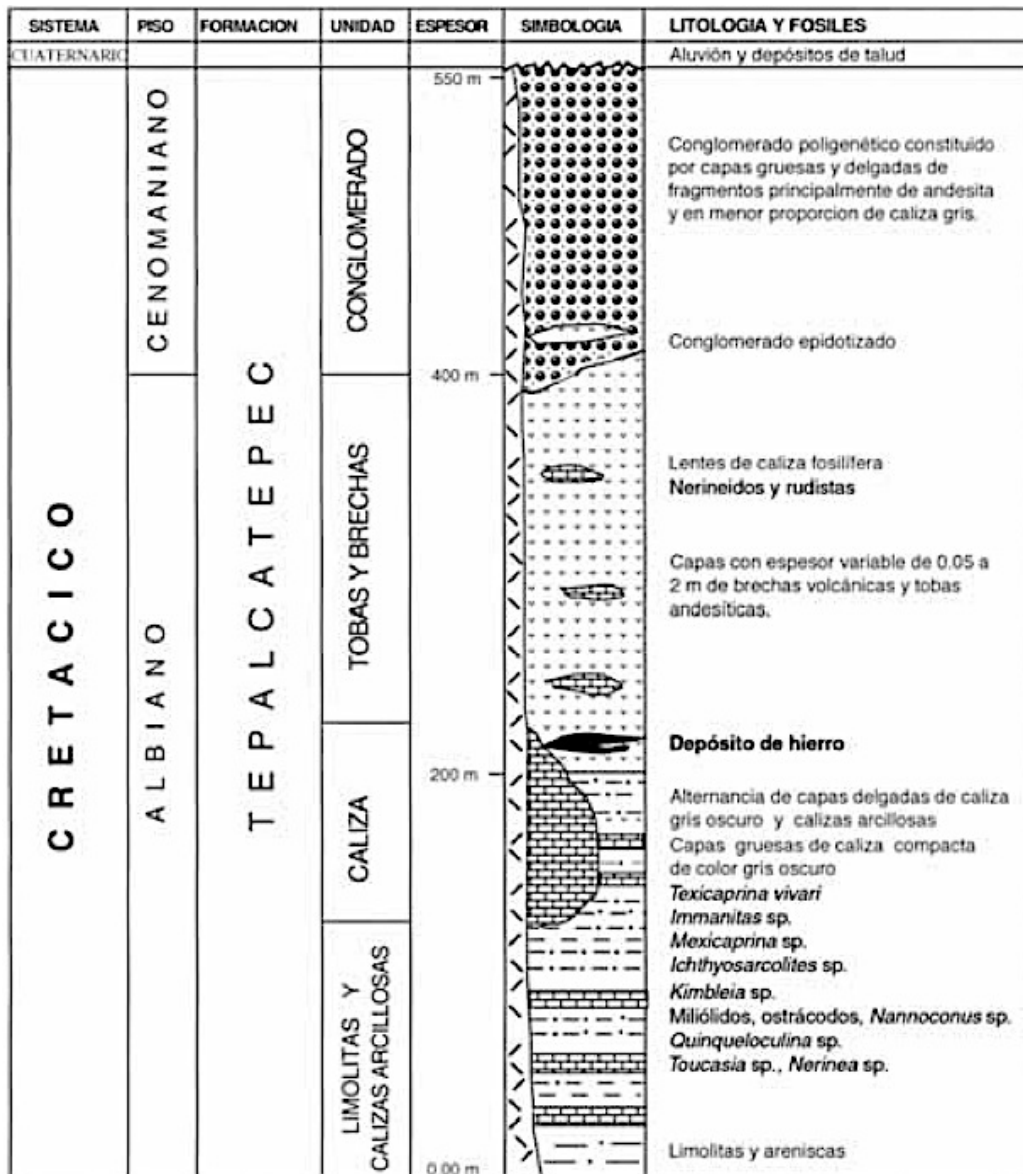
Este es un proceso mecanizado mediante el cual se elaboran los pellets de Fe de 3/4", con especificaciones comerciales en cuanto a elementos que se denominan contaminantes en el proceso de siderurgia como el S, Si, P, y Fe total contenido como interés económico.

### **3.3 Geología**

La geología del sitio está conformada por una secuencia sedimentaria donde el basamento está formado por materiales de fondo oceánico de edad triásica, muy deformados (Tritla Jordi, et. al. 2003). Sobre este basamento se encuentra la Formación Alberca, constituida por pelitas negras, calizas margosas, areniscas de grano fino y tobas andesíticas con un espesor medio de 1500 m. Concordantemente con la anterior, se dispone la Formación Tecalitlán, constituida por rocas vulcano-sedimentarias, con flujos andesíticos, flujos piroclásticos riolíticos, areniscas y conglomerados con una potencia media de 1200- 2000 m. Enseguida se encuentra la Formación Tepalcatepe, la base de esta formación está constituida por margas, pelitas carbonáceas, limolitas, areniscas, niveles evaporíticos y esporádicos de arrecifes carbonatados con abundantes bivalvos y rudistas. La parte media consiste en carbonatos marinos micríticos, con intercalaciones de limolitas, que pasan verticalmente a una serie de intercalaciones de niveles carbonatados con tobas andesíticas calcoalcalinas, características de un ambiente extensional de tras-arco (Tritla Jordi, et. al. 2003). En la zona de la mina falta la parte superior de la Formación Tepalcatepec.

Toda el área de Peña Colorada está cortada por diques de pórfidos andesíticos de posible edad terciaria (Tritla Jordi, et. al. 2003).

**Imagen 3.** Columna estratigráfica de la Formación Tepalcatepec (Corona y Henríquez, 2004).



### 3.4 Yacimiento mineral

El yacimiento mineral de Peña Colorada es volum6tricamente el m6s grande de M6xico con alrededor de 192 millones de toneladas (Consejo de Recursos Minerales, 1995) Se considera que el yacimiento contiene el 38.6% de las reservas de Fe en M6xico (Corona y Henríquez, 2004).



La mineralización de este sitio ocurre de 2 maneras (Rivas, 2002):

- a) Un cuerpo estratiforme subhorizontal que adopta la forma de herradura.
- b) Una veta de magnetita que se encuentra oculta, sigue una orientación E-W y tiene un espesor de 3 - 10 m llamada la Chula.

La roca encajonante que aloja al yacimiento de hierro estratiforme es la secuencia pelítico-calcareá de la Formación Encino Superior de edad del Cretácico inferior. Existe una estructura vetiforme encajonada en el contacto del intrusivo con el conglomerado en la zona de La Chula, muy cerca del cuerpo principal. También se observa mineralización diseminada en un hornfels feldespático de protolito ígneo andesítico-diorítico.

La mena principal de hierro es magnetita masiva y diseminada que al alterarse se presenta como hematita y a veces se asocia con limonita, especularita, pirita, pirrotita, calcopirita y trazas de cuarzo y calcita donde se encuentra burdamente bandeada. La magnetita está asociada con granates, clorita y epidota en la zona de alteración (Coordinación General de Minería, 2013). El depósito está afectado por algunas fallas normales y laterales, que dividen los diferentes cuerpos mineralizados.

## **4. PROBLEMÁTICA Y OBJETIVOS**

### **4.1 Problemática**

La industria minera genera grandes cantidades de residuos mineros (jales y terreros), los cuales pueden ser o no peligrosos para el ambiente y los habitantes en los alrededores.

### **4. 2 Objetivos**

#### **4.2.1 Objetivo general**

Determinar el posible potencial de los residuos mineros provenientes de Peña Colorada en Colima, México; como materia prima para elaboración de concreto.

#### **4.2.2 Objetivos particulares**

- Determinar la peligrosidad de los jales y terreros en función de la concentración de su contenido de elementos potencialmente tóxicos (EPT) y su potencial para generar drenaje ácido de mina (DAM).
- Elaborar concreto hidráulico convencional y concreto celular utilizando los jales y terreros de la zona minera estudiada, y determinar que los concretos elaborados cumplan con la resistencia a la compresión y consistencia adecuada para su probable uso en la industria de la construcción.

## **5. METODOLOGÍA**

La minera Benito Juárez- Peña Colorada proporcionó muestras de jales y terreros provenientes de los depósitos dentro de la empresa.

Se realizó una caracterización física y química de los jales. Para el caso de los terreros se hizo una caracterización química, la cual fue realizada en el laboratorio acreditado ABC Química, Investigación y Análisis, S.A. de C.V. (Acreditado ante la Entidad Mexicana de Acreditación "EMA": N° R-0091-009/07).

### **5.1 Caracterización química de los jales**

#### **5.1.1 Determinación del pH**

Se determinó el pH de las muestras siguiendo el protocolo implementado en el laboratorio de geoquímica ambiental del Instituto de Geología, UNAM; el cual se describe a continuación: 5 g de muestra en 100 ml de agua destilada, esta mezcla se deja agitando durante una hora. Se usó el potenciómetro Denver instrument mode UB-10 para realizar la medición.

#### **5.1.2 Obtención de la conductividad eléctrica CE**

La medición de la conductividad eléctrica se realizó siguiendo el método implementando en el laboratorio de geoquímica ambiental, el cual es igual al descrito en el punto anterior, pero la lectura se realizó con el conductímetro OAKLON, modelo CON700.

#### **5.1.3 Concentraciones totales de los elementos potencialmente tóxicos EPT y otros elementos**

Para este análisis se molieron las muestras hasta que pasaran por la malla número 200 (0.074 mm). Se analizaron las muestras para conocer las concentraciones de los elementos en niveles de los porcentajes (%) y las trazas

(mg/Kg), determinándose las concentraciones de los elementos potencialmente tóxicos y comparándolos con los límites establecidos para suelos de uso residencial por la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, utilizándose el equipo el Niton FRX FXL 959 de Thermo Scientific.

#### **5.1.4 Potencial de generación de drenaje ácido de mina (DAM)**

Se determinó conforme a la técnica de balance ácido-base modificada, establecida por la NOM-141-SEMARNAT-2003. Esto sirvió para evaluar la relación del potencial de neutralización y el potencial de acidez, que están dentro de la norma citada.

#### **5.1.5 Determinación de concentraciones disueltas de iones mayores**

Este análisis permite conocer las concentraciones solubles de los iones mayoritarios presentes usando el cromatógrafo 883 Basic IC Plus Metrohm.

Para ello se procedió a realizar el procedimiento marcado por la NOM-157-SEMARNAT-2009 “extracción de compuestos solubles en equilibrio con CO<sub>2</sub>”

Los extractos obtenidos se sometieron al análisis por esta técnica, para los aniones (F, Cl, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) se utilizó como fase estacionaria una columna METROSEP A Supp 7- 250 cuya dimensión es de 250 mm x 4.00 mm, y el diámetro de las partículas es de 5 µm y como la fase móvil una disolución 3.6 mM de Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>. Las condiciones del análisis fueron flujo de 0.7 ml/min y presión de 9.5 MPa.

Para los cationes (Li, Na, K, Ca, Mg) se utilizó como fase móvil una columna METROSEP C 4- 100/4.0 cuya dimensión es de 100 mm x 4.00 mm, y diámetro de las partículas es de 5 µm. Y como fase móvil una disolución de ácido nítrico 1.7 mM y ácido dipicolínico 0.7 mM.

Las características del análisis son flujo de 0.9 ml/min y presión de 4.6 MPa

### **5.1.6 Determinación de concentraciones disueltas de los elementos potencialmente tóxicos EPT**

La técnica permite determinar la concentración soluble de diversos analitos, en este caso el interés estaba en los EPT disueltos.

Para este caso en que las muestras son sólidas se obtiene un lixiviado mediante el procedimiento de lixiviación de precipitación sintética establecido por la NOM-157-SEMARNAT-2009. Los resultados fueron comparados con los límites en solución establecidos por esta misma norma.

## **5.2 Caracterización física de los jales**

### **5.2.1 Análisis del tamaño de las partículas (textura)**

Método de la pipeta

Este método cuantifica las partículas minerales del suelo en forma gravimétrica y se considera el más exacto en la determinación granulométrica, donde se separan arenas, limos y arcillas.

Separación de las fracciones

- Fracción de arenas.

Se pasó la muestra a través de un tamiz de ocho pulgadas con tamaño de poro de 53  $\mu\text{m}$  ( número 270), y se tenía una base de plástico para retener el residuo. Las arenas que quedaron en el tamiz se lavaron con un chorro de agua destilada. Una vez que se lavaron las arenas, se pasaron a una cápsula aluminio (previamente pesada). Se sometió a secado en una estufa a 105 °C y se determinó la masa, hasta que ésta fue constante.

- Fracción de limo y arcilla

Se llevó la parte del limo y la arcilla a una probeta de 1 litro. Adicionándose 10 ml de disolución de dispersante HMF y llevándose la probeta hasta la marca del aforo con agua destilada. Se dejó equilibrar la mezcla hasta que se observó la formación de una suspensión. Posteriormente, se agitó vigorosamente durante un minuto. Registrando el tiempo y la temperatura de la suspensión. Se introdujo la pipeta lentamente a la profundidad de 5 cm y se giró la llave del vacío con lo que se llenó la pipeta en un tiempo aproximado de 12 segundos. Se descargó el contenido de la pipeta en una cápsula de aluminio de peso conocido. Se lavó la pipeta con agua destilada de una piceta, agregando dicho lavado a la cápsula. Se evaporó el exceso de agua y se secó la arcilla a 105 °C y posteriormente se enfrió en un desecador, para luego ser pesado.

El siguiente cuadro muestra el uso de la pipeta para determinar el porcentaje del tamaño de las fracciones usando un pipeta de 25 ml de capacidad.

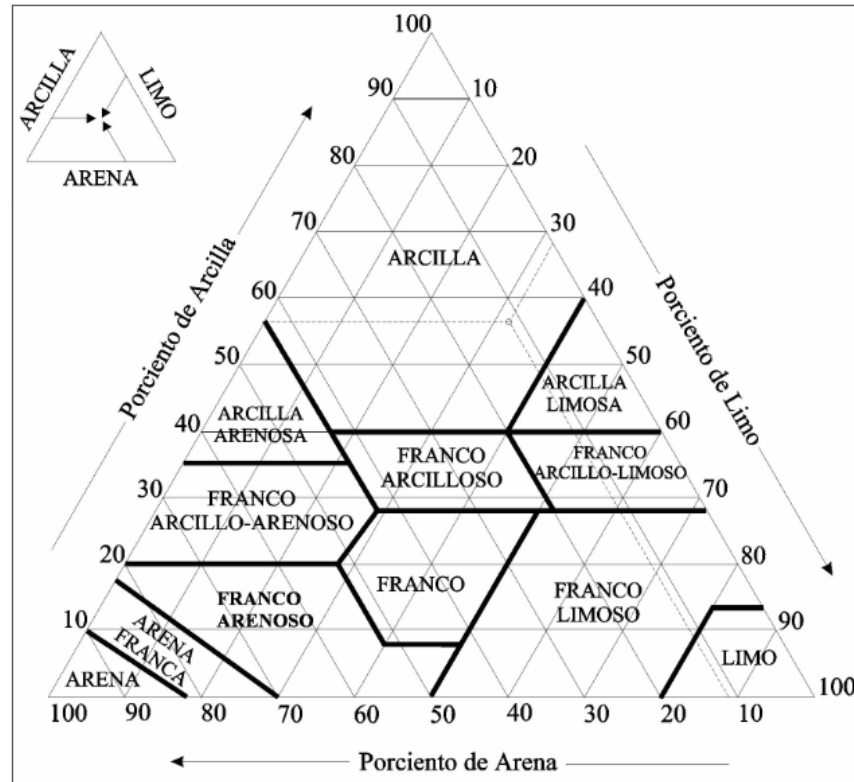
**Tabla 6.** Determinación del % de arcillas

| Tamaño de la partícula [mm] | Peso de la muestra [g] | Concentración [g/l] | Concentración sin el HMF | % total en la muestra |
|-----------------------------|------------------------|---------------------|--------------------------|-----------------------|
| Arcilla 0.002               | 0.057                  | 2.28                | 1.78                     | 17.4                  |

Con el peso conocido de las partículas de arena se determina el % en el total de la muestra. Y después se sumó este % con el de las arcillas y el % que falta para el 100% corresponde a los limos.

Finalmente para determinar la textura se usó el triángulo de texturas,

**Imagen 4.** Triangulo de Texturas



### 5.2.2 Densidad

Para determinar la densidad se pesó un picnómetro limpio y seco incluyendo la tapa, después se adicionó 10 g de suelo seco y nuevamente se pesó el picnómetro con el suelo. De forma separada se determinó el contenido de humedad, secando otra muestra de suelo a 105 °C.

Se llenó el picnómetro hasta la mitad con agua destilada, para lavar el suelo que quedó en el cuello del picnómetro. Después se removi6 el aire entrampado o retenido en 6l, introduciendo el picn6metro a una c6mara para vac6o por varios minutos, hasta que dej6 de burbujear..

Posteriormente, se llenó el picnómetro con agua destilada, después se colocó la tapa y se asentó cuidadosamente para evitar que se formaran burbujas de aire. Se limpió y secó la parte externa de este con una franela. Una vez limpio y seco, se pesó el picnómetro y se determinó la temperatura.

Finalmente se removi6 el suelo del picn6metro a una cubeta para desechos, y se lav6 el picn6metro con agua destilada, luego se llen6 el picn6metro con agua hervida y fría, y se insert6 la tapa y se sec6 el agua del exterior del picn6metro; se pes6 con el agua dentro, y nuevamente se tom6 la temperatura.

Cálculos

Para calcular la densidad se utiliz6 la siguiente expresi6n:

$$\rho_p \left( \frac{mg}{m^3} \right) = \rho_w (W_s - W_a) / [(W_s - W_a) - (W_{sw} - W_w)]$$

donde:

$\rho_w$ = densidad del agua en (g/cm<sup>3</sup>) a la temperatura observada

$W_s$ = peso del picn6metro con la muestra corregida a 105 °C

$W_a$ = peso del picn6metro con aire

$W_{sw}$ = peso del picn6metro llenado con suelo y agua

$W_w$ = peso del picn6metro llenado con agua a la temperatura observada.

### 5.3 Caracterizaci6n quí mica de los terreros

Esta caracterizaci6n fue tomada del informe “Caracterizaci6n de los terreros de Peña Colorada” con el fin de valorar su peligrosidad, elaborado por el Dr. Francisco Romero, 2012. Se determinaron los siguientes parámetros

- Concentraciones totales base seca



- Pruebas de movilidad
- Potencial de generación de drenaje ácido

## 5.5 Elaboración de los concretos

### 5.5.1 Concreto hidráulico convencional

Se hizo un diseño de 25 litros, tomando en cuenta la densidad de la densidad de los materiales, ya que en este caso particular su densidad es mayor que la habitual.

En la tabla 7 se muestra el diseño utilizado:

**Tabla 7.** Diseño de 25 (l) del concreto convencional de acuerdo a la densidad de los materiales.

|                         | Densidad kg/m <sup>3</sup> | Masa (Kg) | Volumen de 25 (l) |
|-------------------------|----------------------------|-----------|-------------------|
| <b>Cemento *CPC40RS</b> | 3150                       | 7.00      | 2.222             |
| <b>Grava (terreros)</b> | 2800                       | 28.82     | 10.29             |
| <b>Arena (jales)</b>    | 3500                       | 33.82     | 9.66              |
| <b>Agua</b>             | 1000                       | 3.67      | 3.67              |

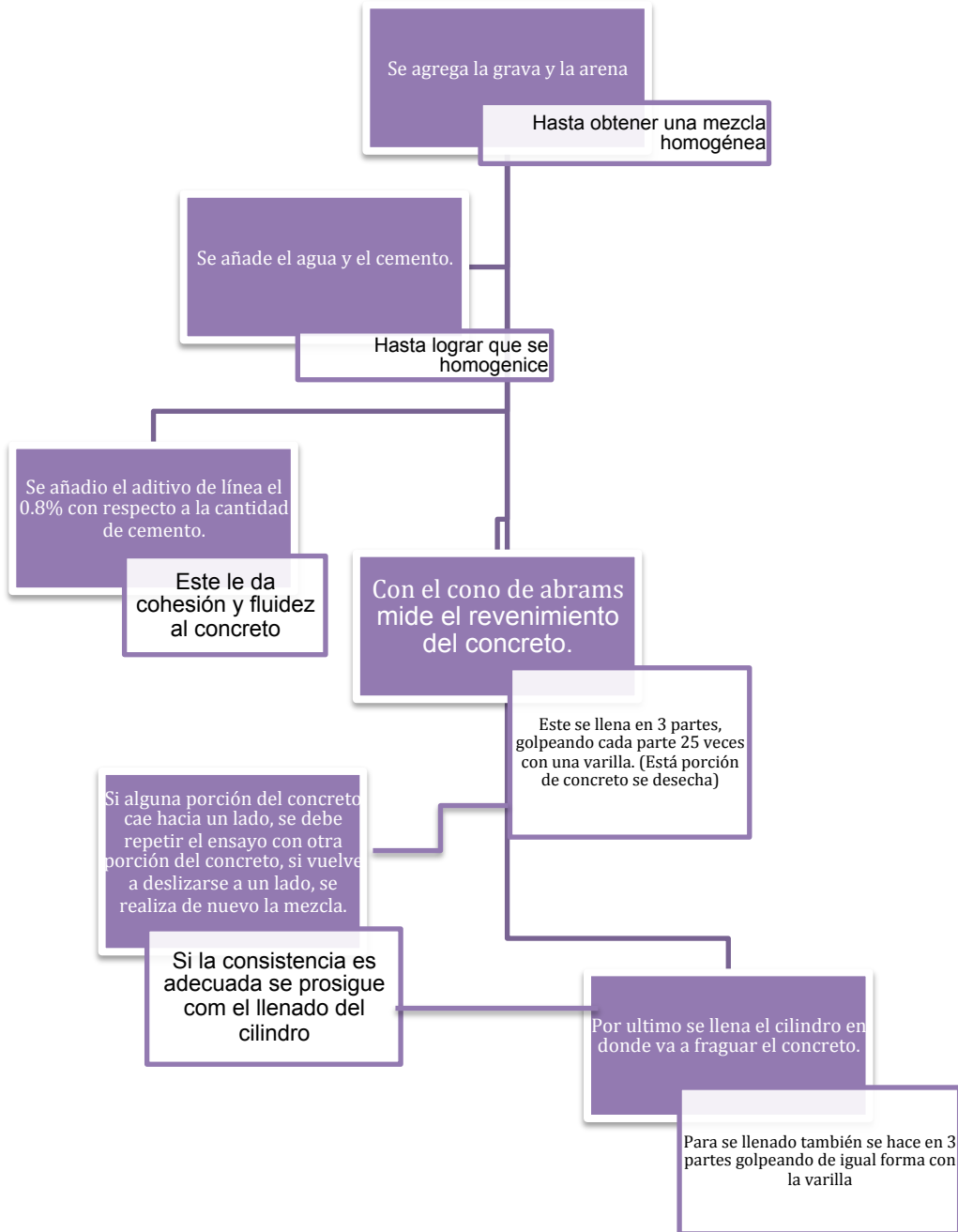
**\*Cemento Portland Compuesto Resistente a Sulfatos CPC40RS**

La relación agua- cemento (a/c) de este diseño es de 0.52

El equipo en el que se realiza la mezcla tiene una capacidad de 30 l.

Se llevó a cabo el método para la elaboración de concretos hidráulicos convencionales, el cual se muestra en la imagen 4.

**Imagen 5.** Procedimiento de elaboración del concreto hidráulico.



**Imagen 6.** Muestra el procedimiento que se llevó a cabo al mezclar todos los elementos del concreto.



**Imagen 7.** Se puede observar paso por paso en orden consecutivo de izquierda a derecha el procedimiento que se llevó a cabo para medir el revenimiento del concreto.



**Imagen 8.** Procedimiento de llenado de los cilindros



**Imagen 9.** El cilindro está listo para comenzar el fraguado.



### **5.5.2. Concreto celular o con inclusión de aire**

Para este concreto sólo se utilizaron los jales con arena y cemento. Para este diseño se lo importante era lograr una densidad entre  $1000$  y  $1100 \text{ kg/cm}^3$ .

**Tabla 8.** Diseño de 11 l del concreto celular de acuerdo a la densidad de los materiales

|                      | Densidad Kg/m <sup>3</sup> | Masa (Kg) | Volumen de 11 (l) |
|----------------------|----------------------------|-----------|-------------------|
| <b>Arena (Jales)</b> | 3500                       | 12.5      | 3.57              |
| <b>Cemento</b>       | 3150                       | 9         | 2.87              |
| <b>Agua</b>          | 1000                       | 4.95      | 4.95              |

Para este tipo de concreto se pretende crear burbujas por lo que se usa un mezclador con aspas y además un inclusor y un aditivo que facilitará la formación de éstas

**Imagen 10.** Mezclador con aspas para generar burbujas de aire en el concreto celular



Para elaborar la mezcla de este concreto primero se agrega el cemento y la arena, después se va añadiendo poco a poco el inclusor y el aditivo. Se deja mezclando 20 min pero en un intervalo de cada 5 min se verifica la formación de burbujas, al término de los 20 min se vacía en los cilindros para que comience el fraguado y el secado.

Para este tipo de concreto no son necesarios los golpes con la varilla debido a que es más móvil y se asienta por sí solo.

**Imagen 11.** Mezcla del concreto celular lista para comenzar el fraguado.



### **5.6 Prueba de resistencia a la compresión de los concretos a los 7, 14 y 28 días después del fraguado**

Se hicieron 3 cilindros de cada uno de los concretos a los cuales se les realizó la prueba de resistencia a la compresión, a uno se le hizo a los 7 días después del fraguado, otro a los 14 días y al último a los 28 días

En la imagen 11 se muestra del lado izquierdo el cilindro del concreto hidráulico cabeceado antes de hacer la prueba de resistencia a la compresión, del lado derecho el cilindro se encuentra en la máquina de ensayos de compresión.

**Imagen 12.** Concreto hidráulico durante la prueba de resistencia a la compresión



### 5.7 Prueba de oxidación acelerada

El objetivo de esta prueba es verificar que al oxidarse el concreto no pierda resistencia a la compresión, así como asegurarse que el drenaje ácido que generan los jales se haya neutralizado. Esta prueba consistió en sumergir al concreto en peróxido de hidrógeno al 30% para oxidar todo el sulfuro disponible y obtener sulfatos.

**Imagen 13.** Concreto hidráulico reaccionando con en el peróxido de hidrógeno



**Imagen 14.** Concreto celular reaccionando con el peróxido de hidrógeno



Al finalizar la prueba de oxidación acelerada se midió el pH, la conductividad eléctrica y la concentración soluble de los EPT al lixiviado y al residuo sólido se le determinó la concentración total de los EPT y su mineralogía.

### 5.7.1 Prueba de resistencia a la compresión al cilindro oxidado

Una vez secado el cilindro se le volvió a realizar la prueba de resistencia a la compresión para compararla con la resistencia obtenida antes de ser oxidado, y a su vez verificar que no haya disminuido.

**Imagen 15.** Del lado izquierdo se muestra el cilindro de concreto hidráulico cuando se le está cabeceando y en el lado derecho se muestra el cilindro ya tronado por la máquina de ensayos de compresión



**Imagen 16.** Del lado izquierdo se encuentra el cilindro de concreto con inclusión de aire al momento de cabecearlo, del lado derecho se observa ese mismo cilindro tronado con la máquina de ensayos de compresión.





## **5.8 Mineralogía**

Esta prueba se realizó para saber si hubo formación de minerales como el yeso que puedan afectar la resistencia en ambos tipos de concretos, así como otros que minerales que puedan dar una mayor resistencia.

## 6. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 6.1 Resultados de la caracterización de química de los jales

#### 6.1.1 Determinación del pH y conductividad eléctrica CE

En la tabla 9 se reportan los resultados de pH y CE

**Tabla 9.** Resultados del pH y la CE.

| Muestra                  | pH   | CE ( $\mu\text{s}$ ) |
|--------------------------|------|----------------------|
| <b>N1</b>                | 8.26 | 453                  |
| <b>N1 D<sup>+9</sup></b> | 8.17 | 438                  |
| <b>N2</b>                | 8.24 | 524                  |
| <b>N3</b>                | 8.10 | 592                  |
| <b>N4</b>                | 8.05 | 222                  |
| <b>N4 D<sup>+</sup></b>  | 8.16 | 243                  |

De acuerdo a los resultados obtenidos se puede asegurar que el pH de los jales es básico y con respecto a los valores de conductividad eléctrica son relativamente bajos, lo que nos podría indicar que la concentración de sales disueltas es baja.

#### 6.1.2 Cocentraciones totales de los elementos presentes en los jales

En la tabla 10 se presentas las concentraciones totales de los elementos potencialmente tóxicos EPT y otros elementos importantes.

---

<sup>9</sup> D<sup>+</sup> son los duplicados

**Tabla 10.** Concentraciones de los totales de los EPT y otros elementos importantes

| Muestra        | Ag    | As   | Ba    | Cd  | Cr   | Ni   | Pb  | Se  | Tl  |
|----------------|-------|------|-------|-----|------|------|-----|-----|-----|
|                | mg/kg |      |       |     |      |      |     |     |     |
| N1             | <LD   | 11.0 | 391.0 | <LD | 34.0 | 46.0 | <LD | <LD | 5.3 |
| N2             | <LD   | 12.0 | 317.0 | <LD | 32.0 | 37.0 | 6.0 | <LD | 3.0 |
| N3             | <LD   | 14.0 | 337.0 | <LD | 28.0 | 34.0 | <LD | <LD | 4.0 |
| N4             | <LD   | 11.0 | 406.0 | <LD | 51.0 | 35.0 | 7.0 | <LD | 3.0 |
| Mínimo         | <LD   | 11.0 | 317.0 | <LD | 29.0 | 34.0 | <LD | <LD | 3.0 |
| Máximo         | <LD   | 14.0 | 406.0 | <LD | 52.0 | 46.0 | 7.0 | <LD | 5.3 |
| Límite normado | 390   | 22   | 5400  | 32  | 280  | 1600 | 400 | 390 | 5.2 |

| Muestra | Ca % | Fe % | K % | Cu<br>mg/kg | Mn<br>mg/kg | Sr<br>mg/kg | W<br>mg/kg | Zn<br>mg/kg | Zr<br>mg/kg |
|---------|------|------|-----|-------------|-------------|-------------|------------|-------------|-------------|
| N1      | 6.3  | 13.9 | 1.0 | 595.49      | 1433.33     | 390         | 56.4       | 52.9        | 176.2       |
| N2      | 5.6  | 11.3 | 1.1 | 415.2       | 1046.67     | 530         | 44.3       | 13.2        | 147.4       |
| N3      | 5.64 | 11.1 | 1.2 | 366.8       | 1103.33     | 513.3       | 43.8       | 21.8        | 142.1       |
| N4      | 5.5  | 10.9 | 1.0 | 331.9       | 1193.33     | 370         | 50.05      | 87.1        | 166.0       |
| Mínimo  | 5.5  | 10.9 | 1   | 331.9       | 1046.67     | 370         | 43.8       | 13.2        | 142.1       |
| Máximo  | 6.3  | 13.9 | 1.2 | 595.49      | 1433.33     | 530         | 56.4       | 87.1        | 176.2       |

Las concentraciones de los EPT en los jales son tan bajas que son menores a los límites permisibles por la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 para suelos de uso residencial. Por lo que no representan peligro para la población ni para el ambiente

Al analizar las muestras por FRX se determinaron también las concentraciones de otros elementos que se encuentran con una concentración en  $\geq 1\%$  y de otros elementos que a pesar de no presentar altas concentraciones son importantes debido a las reacciones que pudieran ocurrir durante la elaboración del concreto, o después de ser oxidado.

### 6.1.3 Potencial de drenaje ácido de mina DAM

En la tabla 11 se muestran los resultados del S total, sulfatos, potencial de neutralización (PN), potencial de acidez (PA) y el cociente PN/PA, el cual indica su potencial de generación de drenaje ácido.

**Tabla 11.** Resultado del balance acido-base modificado

| Muestra | *S total % | Sulfatos % | PN kg CaCO <sub>3</sub> /ton | PA kg CaCO <sub>3</sub> /ton | PN/PA |
|---------|------------|------------|------------------------------|------------------------------|-------|
| N1      | 5.2        | 0.008      | 82.66                        | 162.25                       | 0.509 |
| N1 D    | 5.2        | 0.008      | 82.21                        | 162.25                       | 0.507 |
| N2      | 5          | 0.012      | 114.74                       | 155.87                       | 0.736 |
| N3      | 4.6        | 0.003      | 117.21                       | 143.66                       | 0.816 |
| N3 D    | 4.6        | 0.003      | 104.74                       | 143.66                       | 0.729 |
| N4      | 4.3        | 0.003      | 79.06                        | 134.28                       | 0.589 |
| Mínimo  | 4.3        | 0.012      | 79.06                        | 134.28                       | 0.82  |
| Máximo  | 5.2        | 0.003      | 117.21                       | 162.25                       | 0.5   |

\*El S total se obtuvo con el equipo de análisis de azufre por infrarrojo Leco S-144DR, espectrofotómetro uv-visible HP8452A, del instituto de Geofísica.

La NOM-141-SEMARNAT-2003 establece que cuando  $PN/PA \leq 1.2$  los jales son potenciales generadores de drenaje ácido, comparando ese parámetro con los resultados del análisis se observa que estos jales son potenciales generadores de drenaje ácido.

#### 6.1.4 Concentraciones solubles de los iones mayores

En la tabla 12 se reportan las concentraciones de los iones principales.

**Tabla 12.** Concentraciones de los iones principales

| Muestra | Na <sup>+</sup> | K <sup>+</sup> | Ca <sup>2+</sup> | Mg <sup>2+</sup> | F    | Cl   | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> | HCO <sub>3</sub> | Balance de cargas |
|---------|-----------------|----------------|------------------|------------------|------|------|------------------------------|-------------------------------|------------------|-------------------|
|         | Ppm             |                |                  |                  |      |      |                              |                               |                  | % de Error        |
| N1      | 0.78            | 1.31           | 42.46            | 0.76             | 0.07 | 0.79 | 8.72                         | 84.19                         | 15.70            | 1.70              |
| N2      | 1.46            | 1.36           | 43.11            | 1.75             | 0.13 | 0.83 | 5.51                         | 94.19                         | 26.30            | -2.70             |
| N2 D    | 1.30            | 1.41           | 50.12            | 1.75             | 0.15 | 0.76 | 3.22                         | 124.27                        | 26.20            | -6.10             |
| N3      | 0.72            | 1.00           | 20.17            | 0.37             | 0.03 | 0.65 | 6.45                         | 29.39                         | 21.00            | 0.70              |
| N4      | 0.72            | 1.00           | 20.17            | 0.37             | 0.03 | 0.65 | 6.45                         | 28.69                         | 21.00            | 0.70              |
| N4 D    | 0.96            | 0.98           | 19.24            | 0.46             | 0.03 | 1.10 | 5.81                         | 28.69                         | 21.00            | -0.10             |
| Mínimo  | 0.72            | 0.98           | 19.24            | 0.37             | 0.03 | 0.65 | 3.22                         | 28.69                         | 15.70            |                   |
| Máximo  | 1.46            | 1.41           | 43.11            | 1.75             | 0.15 | 1.10 | 8.72                         | 124.27                        | 26.20            |                   |

La cromatografía iónica nos proporciona las concentraciones de los iones principales disueltos en agua, y esto sirve para saber cuáles son las sales disueltas que de alguna forma puedan repercutir en la resistencia del concreto que

se elaboró. Los  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ , y  $\text{Ca}^{2+}$ , son los que tienen las concentraciones más altas y de los cuales no se espera que presenten ningún inconveniente para la realización del concreto; sin embargo, la cantidad de sulfatos va a repercutir en el potencial de acidez de los jales.

### 6.1.5 Concentraciones solubles de los elementos potencialmente tóxicos EPT y otros elementos

En la tabla 13 se muestran las concentraciones de los EPT y otros.

**Tabla 13.** Concentraciones solubles de los elementos

| Muestra   | Ag   | Ba   | Be   | As   | Ca    | Cd   | Cr    | Cu    | Fe    | Mg    | Mn    | Ni    | Pb    | Se   | Si   | Tl   | V    |
|---|------|------|------|------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|------|
|   | mg/L |      |      |      |       |      |       |       |       |       |       |       |       |      |      |      |      |
| N1  | <LD  | <LD  | <LD  | <LD  | 39.56 | <LD  | <LD   | <LD   | <LD   | 1.61  | <LD   | <LD   | <LD   | <LD  | 1.09 | <LD  | <LD  |
| N1 D  | <LD  | <LD  | <LD  | <LD  | 38.19 | <LD  | <LD   | <LD   | <LD   | 1.91  | <LD   | <LD   | <LD   | <LD  | 1.27 | <LD  | <LD  |
| N2  | <LD  | <LD  | <LD  | <LD  | 50.61 | <LD  | <LD   | <LD   | <LD   | 2.87  | 0.105 | <LD   | <LD   | <LD  | 1.78 | <LD  | <LD  |
| N2 D  | <LD  | <LD  | <LD  | <LD  | 41.94 | <LD  | <LD   | <LD   | <LD   | 2.98  | <LD   | <LD   | <LD   | <LD  | 1.85 | <LD  | <LD  |
| N3  | <LD  | <LD  | <LD  | <LD  | 48.43 | <LD  | <LD   | <LD   | <LD   | 2.92  | 0.123 | <LD   | <LD   | <LD  | 1.51 | <LD  | <LD  |
| N3 D  | <LD  | <LD  | <LD  | <LD  | 58.64 | <LD  | <LD   | <LD   | <LD   | 3.15  | 0.147 | <LD   | <LD   | <LD  | 1.73 | <LD  | <LD  |
| N4  | <LD  | <LD  | <LD  | <LD  | 17.65 | <LD  | <LD   | <LD   | <LD   | 0.76  | <LD   | <LD   | <LD   | <LD  | 0.74 | <LD  | <LD  |
| N4 D  | <LD  | <LD  | <LD  | <LD  | 16.13 | <LD  | <LD   | <LD   | <LD   | 0.71  | <LD   | <LD   | <LD   | <LD  | 0.90 | <LD  | <LD  |
| Mínimo  | <LD  | <LD  | <LD  | <LD  | 16.13 | <LD  | <LD   | <LD   | <LD   | 0.71  | <LD   | <LD   | <LD   | <LD  | 0.74 | <LD  | <LD  |
| Máximo  | <LD  | <LD  | <LD  | <LD  | 58.64 | <LD  | <LD   | <LD   | <LD   | 3.15  | <LD   | <LD   | <LD   | <LD  | 1.85 | <LD  | <LD  |
| LD  |      |      |      | 0.07 | 0.08  | 0.02 | 0.003 | 0.122 | 0.010 | 0.010 | 0.007 | 0.010 | 0.030 | 0.08 |      | 0.02 | 0.05 |
| Límite permisible para la base seca en la NOM-157-SEMARNAT-2009 | 100  | 2000 | 24.4 | 100  |       | 20   | 100   |       |       |       |       |       | 100   | 20   |      |      |      |

La concentración de los EPT disueltos es menor al límite de detección que tiene el equipo. Y como consecuencia están por debajo del límite que marca la NOM-157-SEMARNAT-2009. Por lo tanto estos jales no causan ningún peligro a la población ni al ambiente.

## 6.2 Resultados de la caracterización física de los jales

### 6.2.1 Textura

En la tabla 14 se muestran los porcentajes de arena, limos y arcillas así como su clasificación con base en esos porcentajes usando el triángulo de texturas.

**Tabla 14.** Porcentajes de arena, arcillas y limos en los jales y su clasificación de acuerdo al triángulo de texturas.

| Muestra     | Arena % | Arcilla % | Limos % | Clasificación  |
|-------------|---------|-----------|---------|----------------|
| <b>N1</b>   | 77.39   | 1.09      | 21.52   | Franco arenoso |
| <b>N1 D</b> | 77.01   | 0.69      | 22.30   | Franco arenoso |
| <b>N2</b>   | 79.86   | 0.69      | 19.45   | Franco arenoso |
| <b>N2 D</b> | 81.18   | 1.49      | 17.33   | Franco arenoso |
| <b>N3</b>   | 77.25   | 1.09      | 21.66   | Franco arenoso |
| <b>N3 D</b> | 78.33   | 1.09      | 20.58   | Franco arenoso |
| <b>N4</b>   | 90.34   | 1.89      | 7.77    | Arena          |
| <b>N4 D</b> | 88.93   | 1.89      | 9.18    | Arena          |

Se realizó el análisis granulométrico para determinar la cantidad de arenas, limos y arcillas en los jales y con esto verificar su clasificación como arenas, para poder usar los jales en sustitución de arenas.

## 6.2.2 Densidad

En la tabla 15 se reporta la densidad de los jales.

**Tabla 15.** Densidad

| Muestra | $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> ) |
|---------|-----------------------------|
| N1      | 3.5                         |
| N2      | 3.5                         |
| N3      | 3.5                         |
| N4      | 2.9                         |

La densidad es una propiedad muy importante para la elaboración de cualquier material para la construcción, ya que dependiendo de su densidad se usará determinada cantidad del material. Para el caso de los jales como se puede observar es una densidad mayor a la promedio en las arenas, la cual puede variar de 1.6 a 2.5 (g/cm<sup>3</sup>) dependiendo de su composición. Por lo que se deberá tomar en cuenta al momento de realizar los diseños de concretos.

## 6.3 Resultados de la caracterización química de los terreros

### 6.3.1 Concentraciones disueltas de los elementos potencialmente tóxicos EPT

En la tabla 16 se presentan las concentraciones de los EPT de los terreros

**Tabla 16.** Concentraciones solubles de EPT en los terreros

| Muestra   | Ag          | As  | Ba   | Be   | Cd | Cr   | Hg | Pb  | Sb   | Se |
|---|-------------|-----|------|------|----|------|----|-----|------|----|
|   | mg/kg (ppm) |     |      |      |    |      |    |     |      |    |
| N8  | *ND         | ND  | 25.7 | ND   | ND | 24.3 | ND | ND  | ND   | ND |
| N9  | ND          | ND  | 11.2 | ND   | ND | 24.5 | ND | ND  | ND   | ND |
| N10   | ND          | ND  | 7.1  | ND   | ND | 14.2 | ND | 1.3 | ND   | ND |
| N11   | ND          | ND  | 12.1 | ND   | ND | 15.3 | ND | 4.5 | ND   | ND |
| N12   | ND          | ND  | 19.4 | ND   | ND | 4.7  | ND | 6.2 | ND   | ND |
| N13   | ND          | ND  | 5.2  | ND   | ND | 15.3 | ND | 2.0 | ND   | ND |
| Mínimo  | ND          | ND  | 5.2  | ND   | ND | 4.7  | ND | 1.3 | ND   | ND |
| Máximo  | ND          | ND  | 25.7 | ND   | ND | 24.5 | ND | 6.2 | ND   | ND |
| Límite permisible para la base seca en la NOM-157-SEMARNAT-2009 | 100         | 100 | 2000 | 24.4 | 20 | 100  | 4  | 100 | 10.6 | 20 |

\*ND elemento no detectado por el equipo

La concentraciones disueltas de los EPT en los terreros no fueron detectadas por el equipo debido a que sus concentraciones tienden a 0, a excepción del Cr, Pb y Ba, de los cuales si se detecto una concentración; sin embargo, todas están por debajo del límite permitido por la NOM-157-SEMARNAT-2009. Con lo que se puede asegurar que los terreros no son peligroso ni para el ambiente, ni para población.

### 6.3.2 Pruebas de movilidad

La prueba de movilidad no se realizó debido a que las concentraciones de EPT no son superiores a los límites permisibles por la NOM-157-SEMARNAT-2009.



### 6.3.3 Potencial de drenaje ácido DAM

En la tabla 17 se muestran los resultados del balance ácido- base modificado

**Tabla 17.** Resultados del balance ácido-base modificado

| Muestra | S total % | Sulfatos % | PA kg CaCO <sub>3</sub> /ton | PN kg CaCO <sub>3</sub> /ton | PN/PA |
|---------|-----------|------------|------------------------------|------------------------------|-------|
| N8      | 0.10      | ND         | 2.70                         | 75.50                        | 27.87 |
| N9      | 0.13      | ND         | 3.90                         | 60.00                        | 15.58 |
| N10     | 0.32      | 0.01       | 9.80                         | 157.10                       | 16.09 |
| N11     | 0.31      | 0.01       | 9.40                         | 204.00                       | 21.77 |
| N12     | 0.50      | 0.03       | 14.70                        | 539.60                       | 36.69 |
| N13     | 0.60      | 0.02       | 18.20                        | 108.80                       | 5.99  |
| Mínimo  | 0.10      | ND         | 2.70                         | 60.00                        | 5.99  |
| Máximo  | 0.32      | 0.27       | 18.20                        | 539.60                       | 36.69 |

La NOM-157-SEMARNAT-2009 establece que cuando  $PN/PA \leq 3$  los residuos son generadores de drenaje ácido y si  $PN/PA > 3$  entonces no se generará drenaje ácido. Comparando ese parámetro con los resultados del análisis se observa que los terreros no son potenciales generadores de drenaje ácido.

### 6.4 Elaboración del concreto hidráulico convencional y el concreto celular

Al hacer la prueba de revenimiento en el concreto hidráulico se obtuvo como resultado un valor de 18 cm, lo que indica que tiene una consistencia líquida. La densidad de éste fue de 2382 kg/m<sup>3</sup>. Obteniendo una densidad dentro del rango establecido en la literatura.

La densidad del concreto celular fue de  $1083 \text{ kg/m}^3$ , lo cual indica que de acuerdo a PAN PACIFIC MANAGEMENT RESOURCES PTY LTD se puede utilizar para bloques y paneles de concreto para las capas externas de edificios, paredes divisoras, losas de concreto para techos y pisos.

#### 6.4.1 Prueba de resistencia a la compresión.

En la tabla 18 se reportan los resultados de la prueba de resistencia a la compresión.

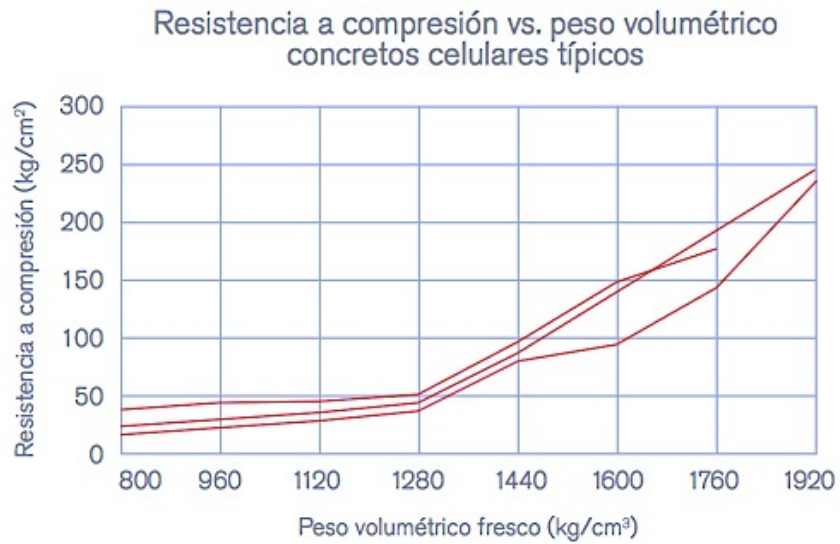
**Tabla 18.** Resultados de la prueba de resistencia a la compresión de los concretos a los 7, 14 y 28 días.

| Concreto | Resistencia a la compresión a los 7 días | Resistencia a la compresión a los 14 días | Resistencia a la compresión a los 28 días |
|----------|--|---|---|
| N14      | 175.42 $\text{kg/cm}^2$                  | 175.42 $\text{kg/cm}^2$                   | 222.11 $\text{kg/cm}^2$                   |
| N15      | 24.30 $\text{kg/cm}^2$                   | 24.30 $\text{kg/cm}^2$                    | 31.00 $\text{kg/cm}^2$                    |

La prueba se hace 3 veces cada una a distinto tiempo para ver la evolución en la resistencia a la compresión del concreto, en el caso del concreto hidráulico se alcanzó una resistencia de  $222.11 \text{ kg/cm}^2$  y se puede utilizar para la construcción de edificaciones habitacionales de poca altura, de acuerdo a VITRUARK, administración, proyecto y construcción.

Para el caso del concreto celular los valores de la resistencia a la compresión está en función de la densidad del concreto, por lo que la resistencia a la compresión para concretos cuya densidad varía entre  $960 - 1200 \text{ kg/cm}^3$ , varía entre  $25$  y  $50 \text{ kg/cm}^2$ .

**Imagen 17.** Gráfica de resistencia a la compresión vs densidad de los concretos celulares.



En esta gráfica se observa la dependencia de la resistencia a la compresión en el concreto celular a la densidad de éste.

#### **6.4.2 Prueba de oxidación acelerada**

En la tabla 19 se describen los cambios principales durante el proceso de oxidación acelerada.

**Tabla 19.** Cambios de los concretos con la oxidación

| Tiempo               | N14   | N15   |
|----------------------|---|---|
| 0                    | <p>La reacción del H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> con el concreto fue moderada en el inicio.</p>  | <p>La reacción del H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> con el concreto fue mayor.</p>   |
| 7 (1 h después)      | <p>La reacción siguió siendo moderada, se comenzaba a ver un cambio en la coloración del concreto.</p>  | <p>La reacción seguía siendo mayor y se comenzó a aumentar la temperatura, el color del concreto no cambio.</p>   |
| 14- 15 (3 h después) | <p>La temperatura comenzó a aumentar rápido, el color del concreto ya se observaba anaranjado.</p>     | <p>Debido a que en un inició la reacción se consumió el H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y para este momento la reacción era casi nula, el color del concreto no cambio; sin embargo, el color del lixiviado era amarillo.</p>  |
| 18 (18 h después)    | <p>La reacción fue disminuyendo poco a poco, en este momento era constante, tanto el lixiviado como el concreto tomaron un color rojizo, la temperatura es estable.</p>                   | <p>La reacción ya era casi nula, el color del lixiviado era gris oscuro, en el concreto apenas se veía un cambio de color un poco amarillo, la temperatura es estable.</p>  |
|                      | <p>La reacción sigue disminuyendo, el color del lixiviado y del concreto es rojizo, la</p>  | <p>La reacción sigue disminuyendo, el color del concreto sigue sin sufrir</p>   |

|                          |  |  |
|--------------------------|--|--|
| <p>24 (24 h después)</p> | <p>temperatura es estable.</p>  | <p>cambios, sólo se ve un poco amarillo en algunos puntos, el lixiviado es gris oscuro, la temperatura es estable.</p>  |
| <p>29 (6 h después)</p>  | <p>La reacción es casi nula, los cambios en el concreto y en el lixiviado no han variado.</p>                    | <p>La reacción es nula, el lixiviado y el concreto no sufrieron más cambios.</p>   |
| <p>31 (2 h después)</p>  | <p>La reacción es nula, el lixiviado y el concreto no sufrieron más cambios.</p>                                 |  |

### 6.4.3 Resultados de pH y conductividad eléctrica CE al lixiviado resultado de la oxidación acelerada

En la tabla 20 se muestran los resultados de pH y CE del lixiviado resultado de la oxidación acelerada.

**Tabla 20.** Resultados de 3 mediciones de pH, dos de ellas se hicieron con el papel reactivo y una con el potenciómetro para pH, las muestra N18 y N19 no estaban filtradas, por lo que no se pudo determinar el pH con el potenciómetro. Resultado de la CE con el conductímetro.

| Muestra      | pH 1      | pH2       | pH3   | CE mS |
|--------------|-----------|-----------|-------|-------|
| <b>N16</b>   | 9.00      | 8.00-9.00 | 9.77  | 2.87  |
| <b>N16 D</b> | 8.00-9.00 | 9.00      | 9.46  | 3.10  |
| <b>N17</b>   | 7.00      | 6.00      | 8.08  | 1.10  |
| <b>N17 D</b> | 7.00      | 8.00      | 7.95  | 1.52  |
| <b>N18</b>   | 12.00     | 12.00     | ----- | 6.84  |
| <b>N19</b>   | 6.00      | 7.00      | ----- | 1.53  |

El pH del lixiviado del resultado de la oxidación en general fue básico, lo que indica que tanto el cemento como los terreros fungieron como neutralizadores de los jales, evitando el drenaje ácido de éste. A excepción de las muestras N19 y N17, donde está en un rango de ácido a neutro cuando se hizo la prueba con el papel reactivo, tomando en cuenta que este método es menos preciso. En cuanto a la conductividad eléctrica es mayor que la obtenida de los jales, lo que sugiere que hay una mayor cantidad de sales disueltas en este lixiviado.

#### **6.4.4 Concentraciones totales de los elementos potencialmente tóxicos EPT y otros elementos de la parte sólida resultado de la oxidación acelerada**

En la tabla 21 se muestran las concentraciones totales de la parte sólida del resultado de la prueba de oxidación acelerada.

**Tabla 21.** Concentraciones de los elementos en la parte sólida resultado de la oxidación acelerada.

| Muestra    | Ag    | As    | Ba  | Cd  | Cr    | Ni     | Pb  | Se  | Tl  | V     |
|------------|-------|-------|-----|-----|-------|--------|-----|-----|-----|-------|
|            | mg/kg |       |     |     |       |        |     |     |     |       |
| <b>N20</b> | <LD   | 67.42 | <LD | <LD | 97.16 | 453.10 | <LD | <LD | <LD | 45.79 |
| <b>N21</b> | <LD   | 43.05 | <LD | <LD | 50.60 | <LD    | <LD | <LD | <LD | 37.43 |

| Muestra    | Ca %  | Fe %  | K %  | Mn mg/kg | Mo mg/kg | Rb mg/kg | Sr mg/kg | W mg/kg | Zn mg/kg | Zr mg/kg |
|------------|-------|-------|------|----------|----------|----------|----------|---------|----------|----------|
| <b>N20</b> | 12.98 | 22.64 | 1.24 | 3204.90  | 15.56    | 6.04     | 68.37    | 198.8   | 199      | 23.18    |
| <b>N21</b> | 21.34 | 10.32 | 0.88 | 652.70   | 11.27    | 25.58    | 387.7    | 38.28   | 35.25    | 65.57    |

Se determinaron las concentraciones totales de varios elementos entre ellos los EPT, solo para tener un control de sus concentraciones, y el único elemento que se puede observar que aumento fue el As, y esto tiene explicación debido a que las concentraciones de As en el cemento son mayores que las de los jales. En la tabla 22 se muestran estas concentraciones

En cuanto a las concentraciones de los elementos como el Ca, Fe en los concretos aumentaron con respecto a la de los jales, y lo más probables es que esto se deba a que el cemento tiene altas concentraciones de Ca y a los terreros, a pesar de que de Fe no tiene altas concentraciones, es probable que los terreros son los que están aportando más Fe, Mn, el K se mantiene relativamente constante, esto hablando de la muestra N20 Por otro lado las concentraciones de Sr disminuyeron, para la muestra N21 donde no se usaron terreros las concentraciones de Ca son mayores y el Fe y K su concentración es similar a las concentraciones de los jales, el Mn disminuyo y el Sr tiene una concentración similar a la mínima reportada en los jales.

En la tabla 22 se muestran las concentraciones totales del cemento

**Tabla 22.** Concentraciones totales de del cemento RS (Ojeda, 2015)

| Muestra    | Ag    | As    | Ba     | Cd  | Cr     | Ni    | Pb    | Se  | Tl  |
|------------|-------|-------|--------|-----|--------|-------|-------|-----|-----|
|            | mg/kg |       |        |     |        |       |       |     |     |
| Cemento RS | <LD   | 50.69 | 304.85 | <LD | 106.37 | 44.54 | 21.84 | <LD | <LD |

| Muestra    | Ca %  | Fe % | K %  | Cu mg/kg | Mn mg/kg | Sr mg/kg | Ti mg/kg | W mg/kg | Zn mg/kg | Zr mg/kg |
|------------|-------|------|------|----------|----------|----------|----------|---------|----------|----------|
| Cemento RS | 20.02 | 1.09 | 0.72 | 64.55    | 800.69   | 465.26   | <LD      | 65.07   | 118.20   | 81.33    |

Se puede observar claramente que las concentraciones totales de todos los elementos es baja, a excepción del Ca, Fe y de K; sin embargo, no es de extrañarse debido a que son unos de los principales elementos de los compuestos que forman el cemento. Por otro lado los resultados indican que su concentración de As es mayor a la de los jales caracterizados.

#### 6.4.5 Concentraciones solubles de elementos potencialmente tóxicos y otros elementos en el lixiviado del resultado de la oxidación acelerada

En la tabla 23 se reportan las concentraciones solubles de varios elementos en el lixiviado de los concretos oxidados.

**Tabla 23.** Concentraciones solubles de los elementos en los concretos oxidados.

| Muestra  | Al    | As   | Ba    | Cd   | Cr    | Cu    | Fe    | Li    | Mn    | Mo    | Pb   | Sb   | Se   | Si    | Sr    | V     |
|--|-------|------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|-------|-------|-------|
|  | mg/L  |      |       |      |       |       |       |       |       |       |      |      |      |       |       |       |
| N16  | 0.023 | <LD  | ND    | ND   | 0.886 | 0.020 | 0.025 | 0.027 | 0.017 | 0.158 | ND   | <LD  | <LD  | 40.34 | 0.054 | 0.650 |
| N16 D  | 0.018 | <LD  | 0.005 | ND   | 0.920 | 0.030 | 0.049 | 0.028 | 0.016 | 0.160 | ND   | <LD  | <LD  | 40.95 | 0.052 | 0.670 |
| N17  | ND    | <LD  | 0.010 | ND   | 0.099 | ND    | ND    | 0.013 | 0.051 | 0.096 | ND   | <LD  | <LD  | 18.82 | 0.143 | 0.300 |
| N17 D  | ND    | <LD  | 0.010 | ND   | 0.095 | ND    | ND    | 0.130 | 0.052 | 0.092 | ND   | <LD  | <LD  | 18.53 | 0.143 | 0.300 |
| LD   |       | 0.07 |       | 0.02 | 0.003 | 0.122 | 0.01  |       | 0.007 | 0.03  | 0.03 | 0.05 | 0.08 |       |       | 0.05  |
| Límite para la base seca en la NOM-157-SEMARNAT-2009 |       | 100  | 2000  | 20   | 100   |       |       |       |       |       | 100  | 10.6 | 20   |       |       |       |



A pesar que en los resultados de las concentraciones totales se vio un aumento en el As, en las concentraciones solubles este continua manteniéndose <LD, por lo que al estar expuestos los concretos al intemperismo provocado por la lluvia, las radiaciones solares y el viento, este no presentara un peligro a la población.

En la tabla 24 se muestra las concentraciones solubles del cemento RS

**Tabla 24.** Concentraciones solubles de los elementos en el cemento RS (Ojeda, 2015)

| Muestra           | Al    | As    | Ba    | Cd    | Cr    | Cu    | Fe    | Hg    | Mn    | Mo    | Pb    | Sb    | Se    | Si    | V     |
|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                   | mg/L  |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| <b>Cemento RS</b> | 0.122 | <LD   | 0.440 | <LD   | <LD   | <LD   | <LD   | <LD   | <LD   | <LD   | <LD   | <LD   | 0.053 | 0.482 | <LD   |
| <b>LD</b>         | 0.023 | 0.062 | 0.031 | 0.180 | 0.003 | 0.007 | 0.014 | 1-758 | 0.016 | 0.023 | 0.050 | 0.015 | 0.021 | 0.008 | 0.016 |

En estos resultados se puede ver que a pesar de que el cemento tiene concentraciones totales significativas en el Fe y As estas no son solubles.

### 6.5.6 Prueba de resistencia a la compresión del concreto hidráulico convencional y del concreto celular después de la oxidación acelerada

En la tabla 25 se presentan los resultados de oxidación acelerada en los concretos oxidados.

**Tabla 25.** Resistencia a la compresión de los concretos después de oxidarlos.

| Concreto   | Resistencia a la compresión |
|------------|-----------------------------|
| <b>N24</b> | 337 kg/cm <sup>2</sup>      |
| <b>N25</b> | 33 kg/cm <sup>2</sup>       |

La resistencia a la compresión aumento de manera significativa en el concreto hidráulico convencional N24, esto pudo ser como consecuencia de la oxidación acelerada ya que se ha visto que la oxidación de jales con concentraciones de pirita al oxidarse se forma SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> y Fe, al seguir oxidando entonces se forman

óxidos e hidróxidos de hierro (Romero, et al, 2006) los cuales dan una mayor resistencia a la compresión de los concretos, aunado a que la roca caliza y el cemento neutralizan el ácido que se forma al seguir oxidando a los sulfatos..

En el caso del concreto celular N25 no es tan favorecido este proceso, ya que el si bien los jales tiene pirita, los terreros tiene mayor cantidad de Fe sin estar formando compuestos como la pirita, lo cual hace que la formación de oxidos e hidróxidos se mayor y más rápida de formar.

### 6.5.7 Mineralogía del concreto hidráulico convencional y del concreto celular oxidados

En la tabla 26 se muestran los resultados de la mineralogía

**Tabla 26.** Resultados de la mineralogía

| Muestra    | Fases identificadas   | Fichas PDF        | Observaciones                                   |
|------------|---|-------------------|---|
| <b>N18</b> | Calcita: $\text{CaCO}_3$  | 5-506             | Predominio de calcita                           |
|            | Feldespato de tipo plagioclasa intermedia:<br>$(\text{CaNa})(\text{AlSi})_2\text{Si}_2\text{O}_8$ | 9-0465<br>29-0701 |   |
|            | Clinocloro: $(\text{MgFe})_6(\text{SiAl})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$                            | 33-664            |   |
|            | Hematita: $\text{Fe}_2\text{O}_3$   | 19.629            |   |
|            | Magnetita: $\text{Fe}_3\text{O}_4$  | 46-1045           |   |
|            | Trazas de Cuarzo: $\text{SiO}_2$  |                   |   |
| <b>N19</b> | Calcita: $\text{CaCO}_3$  | 5-506             | Similar a la muestra N18<br>No aparece hematita |
|            | Feldespato de tipo plagioclasa intermedia:<br>$(\text{CaNa})(\text{AlSi})_2\text{Si}_2\text{O}_8$ | 9-0465<br>29-0701 |   |
|            | Clinocloro: $(\text{MgFe})_6(\text{SiAl})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$                            | 19.629            |   |
|            | Magnetita: $\text{Fe}_3\text{O}_4$  | 46-1045           |   |
|            | Trazas de Cuarzo: $\text{SiO}_2$  |                   |   |

La DRX proporcionó información acerca de los minerales que se encuentran en el concreto después de la oxidación, lo cual es importante, ya que se debe asegurar

que no hay minerales arcillosos que puedan afectar la resistencia del concreto o yeso, el cual puede provocar baja resistencia. En contraste a esto y continuando con la discusión del aumento de la resistencia a la compresión al oxidarse el concreto, se puede observar que no esta presenta la pirita y además se tiene los oxidos de Fe como la magnetita y la hematita en el concreto hidráulico N18 y solo la formación de magnetita en el concreto celular.

## **7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **7.1 Conclusiones**

- Los terreros no son peligrosos de acuerdo a las pruebas de potencial de generación de drenaje ácido y sus concentraciones de EPT solubles están por debajo del límite establecido por la NOM-157-SEMARNAT-2009. Para el caso de los jales las concentraciones solubles de estos también están por debajo del límite establecido por esta norma; sin embargo estos si son potenciales generadores de drenaje ácido.
- A pesar de que los jales a largo plazo generarán drenaje ácido, el cemento y los terreros funcionan como neutralizadores, neutralizando el drenaje ácido
- Se elaboraron 2 tipos de concretos satisfactoriamente: hidráulico convencional que de acuerdo a su resistencia a la compresión pueden ser utilizados para viviendas de poca altura y el celular, el cual de acuerdo a su densidad tiene varios usos como: bloques y paneles de concreto para las capas externas de edificios, paredes divisoras, losas de concreto para techos y pisos.
- Gracias a la gran versatilidad de los concretos, se pueden hacer diferentes diseños, según las necesidades de la obra, por lo que estos 2 tipos de concretos, son sólo un ejemplo de lo que se puede realizar con estos materiales considerados como residuos sin valor económico.

### **7.2 Recomendaciones**

- Realizar un análisis granulométrico de los terreros, para determinar el tamaño correcto a utilizar en los concretos.

- Elaborar más especímenes para poder hacer un análisis estadístico de la resistencia a la compresión.
- De acuerdo a la NMX-C-111-ONNCCE-2004 “Industria de la Construcción- Agregados para Concreto Hidráulico- Especificaciones y Métodos de Prueba” realizar la pruebas propuestas como son: Reactividad potencial (reacción álcali- agregado) y sanidad (intemperismo acelerado).
- Determinar otros factores físicos en el concreto como: módulo de elasticidad, resistencia a la tensión, contracción moderada al secarse y expansión reducida al humedecerse. Y con esto asegurarnos que el concreto tiene todas las propiedades físicas necesarias para ser seguro y duradero.
- Realizar un estudio beneficio-costos considerando el traslado del material para usarse en algunas plantas de fabricación de concreto y cemento, con la intención de compararse contra materiales de agregado convencionales pero de menor distancia de acarreo.

## 8. REFERENCIAS

Administración, proyecto y construcción VIRTRUAK. Página en red:  
<http://www.virtruak.com.mx/recursos/clasificacion-de-concretos-resistencia/>.

Cervantes, A.. (2008). Nuevas tecnologías en concretos concreto celular- concreto reforzado con fibra- concreto ligero estructural. En libro: Memorias 2008 Congreso Nacional de Administración y Tecnología para la Arquitectura, Ingeniería y Diseño. p: 141- 153. Página en red:  
[http://administraciónytecnologiaparaeldisenio.azc.uam.mx/publicaciones/memorias\\_cong2008/10.pdf](http://administraciónytecnologiaparaeldisenio.azc.uam.mx/publicaciones/memorias_cong2008/10.pdf).

Cervantes, M. A. H. (2014). Caracterización del Drenaje ácido y de las rocas asociadas a una mina para evaluar su posible aplicación en un sistema de tratamiento pasivo. Tesis de licenciatura, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, México D. F., p: 11- 20.

Concreto Ahorrador de Energía CAE. Página en red:  
<http://fabricamx.wsiefusion.net/PDF/cemex/AhorradordeEnergia.pdf>.

CONTEC Mexicana. *Manual técnico contec Mexicana*. 3ª edición. Nuevo León, México, p: 10-12 y 61-71.

Coordinación General de Minería. (2013). *Perfil de mercado del hierro- acero*. Diciembre 18, 2014, de Secretaría de Economía. Sitio web:  
[http://economia.gob.mx/files/comunidad\\_negocios/industria\\_comercio/información\\_Sectorial/minero/pm\\_hierro\\_acero\\_1013.pdf](http://economia.gob.mx/files/comunidad_negocios/industria_comercio/información_Sectorial/minero/pm_hierro_acero_1013.pdf)

Corona, R. y Henríquez, F. (2004). Modelo magmático del yacimiento de hierro de Peña Colorada, Colima, y su relación con la exploración de otros yacimientos de hierro en México. *Publicaciones del Instituto de Geología*, boletín 113, p: 23- 28.

Cortinas, C.. (2007). Manejo ambiental de los relaves o jales mineros. Enero 20, 2015, de Instituto Nacional de Ecología. Sitio web: <http://www2.ineec.gob.mx/publicaciones/gacetas/155/cortinas.html>.

Flores, L. y Alcalá J. (2010). Manual de procedimientos analíticos. Laboratorio de física de suelos. México D. F. Instituto de Geología, p: 6- 8 y 11- 20.

Gutiérrez, M. y Moreno, M.. (2007). Los residuos en la minería mexicana. Enero 15, 2015, de Instituto Nacional de Ecología. Página en red: [http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/libros/35/los\\_residuos.html](http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/libros/35/los_residuos.html).

Instituto de Ingeniería UNAM y Comisión Federal de Electricidad. (1994). Manual de tecnología del concreto, sección 2, 1ª edición, editorial Limusa, p: 1- 10.

Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto. (Junio 2006). *Pruebas de resistencia a la compresión del concreto*. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto. Página en red: <http://www.imcyc.com/ct2006/junio06/PROBLEMAS.pdf>.

McMillan, F. y Tuthill, L. (1992). Cartilla del concreto, 1ª edición, México D. F., Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A. C., p: 7- 40.

Neville, A. y Brooks, J.. (2010). *Concrete Technology*. 2ª edición, Inglaterra, Person. 460 pp.

Ojeda R., C. A.. (2015). Evaluación de residuos mineros provenientes de la extracción de hierro, para su posible uso en la elaboración de concretos. Tesis de Licenciatura, Facultad de Química, Universidad Nacional Autónoma de México, México D. F., p: 78- 79.

Rivas S. Ma. De la L. 2002. Caracterización mineralógica y físico-química del mineral de hierro “normal” y “amorfo”, del yacimiento de Peña Colorada, estado de Colima. Tesis de Maestría en Ciencias (Geología), Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, México D. F., p: 14- 18.

Romero F. M. (2012). Caracterización de los terreros de Peña Colorada con el fin de valorar su peligrosidad, con base en la NOM-157-SEMARNAT-2009. *Publicaciones del Instituto de Geología*.

Romero F. M., Armienta M. A. y González H. G. Solid- phase control on the mobility of potentially toxic elements in an abandoned lead/ zinc mine tailings impoundment, Taxco, México. *Applied Geochemistry*.

SEMARNAT. 2003. Norma Oficial Mexicana NOM-141-SEMARNAT-2003, Establece procedimiento para caracterizar los jales, así como las especificaciones y criterios para la caracterización y preparación del sitio, proyecto, construcción, operación y post operación de presas de jales. Diario Oficial de la Federación. Página en red: <http://www.semarnat.gob.mx>.

SEMARNAT/SSA1. 2004. Norma Oficial Mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, Establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsenico, barrio, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/o vanadio. Diario Oficial de la Federación. Página en red: <http://www.semarnat.gob.mx>.

SEMARNAT. 2009. Norma Oficial Mexicana NOM-157-SEMARNAT-2009, Establece los elementos y procedimientos para instrumentar planes de manejo de residuos mineros. Diario Oficial de la Federación. Página en red: <http://www.semarnat.gob.mx>.



Tecnología del concreto aireado, ligero y espumoso de PAN PACIFIC GROUP OF COMPANIES. Página en red: <http://www.litebuilt.com./esp/about-esp.html>.

Tritlla, J., Camprubí, A., Centeno, E., Corona, R., Iriondo, A., Sánchez, S., Gasca, A., Cienfuegos, E. y Morales, P. (2003). Estructura y edad del depósito de hierro de Peña Colorada (Colima): un posible equivalente fanerozoico de los depósitos de tipo IOCG. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, vol. 20, p: 182-201.