# IV. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

## 4.1 Desechos peligrosos

La contaminación producida por la generación de residuos peligrosos industriales y domésticos constituye el talón de Aquiles de una civilización que ha promovido el crecimiento económico y la industrialización como prototipos de la modernización y del progreso económico [13]. Este mal llamado desarrollo se ha realizado, a costa de la extracción y destrucción acelerada de ecosistemas y recursos naturales, con una gran ineficiencia energética, y con el uso excesivo de materiales peligrosos y sustancias tóxicas en procesos productivos que generan consecuentemente un enorme volumen de residuos peligrosos.

En las últimas dos décadas ha surgido una gran preocupación ambiental y de salud por los problemas generados por los residuos industriales, principalmente por los que han sido llamados peligrosos. Esta preocupación tuvo su origen en los países desarrollados industrialmente, ya que por una mala disposición de los residuos se tuvo y tienen que enfrentar problemas de contaminación hacia el medio ambiente y los efectos sobre la salud. Uno de los casos que dejan en claro que deben tomarse acciones preventivas hacia el adecuado manejo y control de residuos son: Love Canal (Estados Unidos 1976).

### 4.1.1 Definición de desecho peligroso

Según la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA) en México, se considera como desecho peligroso a los materiales que por sus características corrosivas, reactivas, explosivas, tóxicas, inflamables o biológicas-infecciosas (criterios CRETIB), representan un riesgo para el equilibrio ecológico o el ambiente.

Los residuos peligrosos se clasifican como: aguas de proceso, arenas, tierras y polvos, breas, cabezas, colas, catalizadores gastados, disolventes, efluentes tratados, envases y empaques, escorias, líquidos residuales, lodos de proceso, lodos de tratamiento, materiales de relleno contaminados, lubricantes gastados entre otros.

***Tabla 4.1.*** *Tipos de desechos y generación de éstos.*

| Desecho | Generación |
|---|---|
| Líquidos, sólidos o lodos | Manufactura (extracción o transformación) o desechos de productos comerciales |

### 4.1.2 Criterios CRETIB

Según el gobierno de los Estados Unidos, si un residuo cumple con cualquiera de las siguientes características lo puede convertir en peligroso:

- Corrosivo (residuos altamente ácidos o alcalinos)
- Inflamable (residuo de fácil combustión que representan riesgo de incendio en su manipulación habitual)
- Reactivo (residuos potencialmente dañinos con reacciones súbitas, tales como explosiones)
- Tóxico (residuos capaces de desprender concentraciones importantes de sustancias específicas en el agua) [8]

### 4.1.3. Procedimiento para determinar si un residuo es peligroso

1. Revisar las tablas 1, 2, 3 y 4 de la NOM-052-SEMARNAT-1993, para determinar su clasificación.
2. El residuo no se encuentra en los listados, pero se conoce las características que lo hacen un residuo peligroso; se podrá declarar como peligroso sin presentar el CRETIB y debe reportarlo con los códigos aplicables.
3. El residuo no se encuentra en las tablas 1,2,3, y 4 de la NOM y se desconoce su peligrosidad. Se deben llevar a cabo las pruebas CRETIB, a través de un laboratorio acreditado. Si presenta una o más

de las características CRETIB es un residuo peligroso. Se reportará con los códigos aplicables.

4. Los residuos no aparecen en las tablas 1, 2, 3 y 4 de la NOM y se sabe que no son peligrosos, se considerarán como no peligrosos.
5. Se puede tratar los residuos peligrosos para eliminar su peligrosidad. Queda prohibida toda dilución de los residuos con el único fin de eludir la NOM.
6. La mezcla de un residuo no peligroso con cualquier residuo peligroso será considerada residuo peligroso.

En las siguientes tablas se presentan características que se deben tomar en cuenta para saber si el desecho que se está manipulando es o no peligroso, así mismo de los materiales cuya eliminación debe ser controlada, para que posteriormente no se genere una fuente constante de contaminación.

***Tabla 4.2.*** *Propiedades que presentan los residuos peligrosos.*

| Criterio | Descripción |
|---|---|
| **C**orrosivo | ↔ En estado líquido o solución acuosa tiene un pH ≤ 2.0 ≥ 12.5.<br>↔ A temperatura de 55ºC es capaz de corroer acero al carbón a una velocidad de 6.35 mm o más por año. |
| **R**eactivo<br>(25°C y 1 atmósfera) | ↔ Se combina o polimeriza violentamente sin detonación<br>↔ En contacto con agua en relación residuo-agua de 5:1, 5:3, 5:5 reacciona formando gases, vapores o humos<br>↔ En contacto con soluciones de pH ácido (HCl 1.0 N) y básico (NaOH 1.0 N), en relación (residuo-solución) de 5:1, 5:3, 5:5 reacciona formando gases, vapores o humos.<br>↔ Si posee en su constitución cianuros o sulfuros que cuando se exponen a condiciones de pH entre 2.0 y 12.5 pueden generar gases, vapores o humos tóxicos en cantidades mayores a: (250 mg de HCN/Kg de residuo o 500mg de $H_2S$/Kg de residuo) |
| **E**xplosivo | ↔ Tiene una constante de explosividad igual o mayor que la de nitrobenceno.<br>↔ A 25ºC y a 1.03 Kg/cm$^2$ de presión es capaz de producir una reacción detonante o explosiva. |
| **T**óxico | ↔ Cuando al someterse a la prueba de extracción conforme a la NOM-053-ECOL-1993, el extracto PECT de la muestra contiene uno o más de los constituyentes de la tabla (número 5 de la NOM-052-ECOL-1993) en una concentración igual o mayor al límite señalado . |
| **I**nflamable | ↔ En solución acuosa contiene más del 24 % de alcohol en volumen.<br>↔ Líquido con punto de inflamación inferior a 60ºC.<br>↔ No líquido, pero es capaz de provocar fuego por fricción, absorción de humedad o cambios químicos espontáneos (a 25°C y a 1.03 Kg/cm$^2$).<br>↔ Se trata de gases comprimidos inflamables o agentes oxidantes que estimulan la combustión. |
| **B**iologico-Infeccioso | ↔ El residuo contiene bacterias, virus o microorganismos con capacidad de infección.<br>↔ Contiene toxinas producidas por microorganismos que causan efectos nocivos. |

***Tabla 4.3*** *. Clasificación de residuos tóxicos.*

| **Categoría Principal** | **Características** | **Ejemplos** |
|---|---|---|
| Residuos Acuosos Inorgánicos | Residuo líquido compuesto primordialmente por agua mezclada con ácidos o alcalinos y/o soluciones concentradas de sustancias inorgánicas tóxicas (como metales pesados o cianuro) | ↜ Ácido sulfúrico agotado de galvanización.<br>↜ Baños cáusticos agotados del acabado de metales.<br>↜ Reactivos amoniacales agotados provenientes de la fabricación de componentes electrónicos.<br>↜ Agua del aclarado de electro plastia.<br>↜ Concentrados agotados de hidrometalurgia. |
| Residuos acuosos orgánicos | Residuo líquido compuesto primordialmente por agua con mezcla o concentración diluida de sustancias orgánicas tóxicas (como pesticidas) | ↜ Agua del aclarado de depósitos de pesticidas.<br>↜ Lavados de reactores químicos y depósitos de composición. |
| Líquidos Orgánicos | Residuo líquido compuesto por una mezcla o solución concentrada de sustancias orgánicas tóxicas. | ↜ Disolventes halogenados agotados provenientes del desengrasamiento y de la limpieza en seco.<br>↜ Residuos de la destilación de la elaboración de productos intermediarios químicos. |
| Aceites | Residuo líquido compuesto principalmente por aceites derivados del petróleo. | ↜ Aceites lubricantes utilizados en motores de combustión interna.<br>↜ Aceites hidráulicos y de turbina utilizados en operaciones con equipos pesados.<br>↜ Aceites lubricante para cuchillas utilizados en la fabricación de maquinaria.<br>↜ Aceites combustibles contaminados. |
| Lodos y sólidos inorgánicos | Lodos, polvo, sólidos u otros residuos no líquidos mezclados con sustancias inorgánicas peligrosas. | ↜ Lodos de tratamiento de aguas residuales provenientes del proceso de baño en mercurio para la producción del cloro.<br>↜ Polvo de control de emisión para la fabricación de acero y fundidores.<br>↜ Arenas agotadas para operaciones de coquificación.<br>↜ Lodos de cal para operaciones de coquificación.<br>↜ Polvo del desbarbado de partes del cromo para la industria del metal. |
| Lodos y sólidos orgánicos | Alquitranes, lodos, sólidos u otros residuos no líquidos mezclados con sustancias orgánicas peligrosas. | ↜ Lodos de operaciones de pintura.<br>↜ Residuos de alquitrán de la fabricación de productos colorantes intermedios.<br>↜ Torta de filtro agotada para la fabricación de fármacos.<br>↜ Alquitranes residuales de destilación procedentes de la producción de fenoles.<br>↜ Suelos contaminados con disolventes. |

Los residuos tóxicos son generados por diversas actividades: industriales, agrícolas, comerciales o domésticas. El tratamiento que puede recibir un residuo es *in situ* o *ex situ*, es decir, puede ser tratado en el mismo lugar donde fue generado o bien, ser transportado a instalaciones de residuos peligrosos para su tratamiento, almacenaje o reciclaje. Los residuos que son tratados en el lugar donde se generan reciben el nombre de **residuos locales,** mientras que los tratados en diferente lugar al de su generación se denominan: **residuos transportados.**

***Tabla 4.4.*** *Materiales cuya eliminación debe controlarse.*

| |
|---|
| Productos caducos |
| Productos fuera de especificación |
| Residuos de producción en general |
| Residuos de procesos industriales (lodos, "colas", etc). |
| Residuos de procesos de torno o pulido(virutas, incrustaciones). |
| Materiales adulterados (por ejemplo, aceites conteniendo PCB). |
| Partes no reusables, desechadas, catalizadores agotados, etcétera. |
| Residuos del procesamiento de materias primas (relaves de minas, chapopote, etc). |
| Cualquier material, sustancia o producto cuyo uso ya ha sido prohibido legalmente. |
| Sustancias que no cumplen satisfactoriamente con su función (ácidos contaminados, disolventes contaminados, etc.). |
| Materiales, sustancias o productos resultantes de acciones de recuperación de sitios contaminados. |
| Cualquier material, sustancia o producto que el generador declara que es un desecho y que no esté incluido en las categorías anteriores. |
| Material contaminado como resultado de una actividad planeada (residuos de operaciones de limpieza, materiales de empaque, contenedoras, etcétera). |

### 4.1.4. Gestión y Control de Residuos Peligrosos

En una adecuada gestión de residuos se tienen contemplados procesos para manipular de manera segura, sin causar impactos negativos al medio ambiente y con un costo reducido, tales como:

- Generación
- Manipuleo
- Acondicionamiento
- Recolección
- Transporte
- Almacenamiento
- Reciclaje
- Tratamiento
- Disposición final de residuos

Conforme avanza el desarrollo tecnológico y la implantación de leyes para el manejo de residuos peligrosos y la descarga de los mismos, las industrias han tenido que disponer parte de su presupuesto para la disposición y tratamiento de los residuos generados. Es por ello que además de que las industrias tengan la obligación de conservar la naturaleza y la energía están impulsando la creación de tecnologías alternas para la reducción y aprovechamiento de la generación de residuos.

### 4.1.5. Tratamiento de Residuos Peligrosos

Los procesos de tratamiento de residuos peligrosos tiene como fin reducir el volumen y toxicidad de éstos, estos tratamientos se agrupan en tres áreas:

- Físico-Química
- Biológica
- Térmica

Algunos promueven la destrucción de productos indeseables; otros alteran sus características de peligrosidad para que su disposición final al medio ambiente sea mas aceptable o simplemente segregan la masa de residuos de los constituyentes indeseables para favorecer el reciclaje y reducir el volumen final.

Para el tratamiento de residuos peligrosos existen una variedad de métodos, los cuáles van desde neutralización de materiales alcalinos o ácidos, solidificación o encapsulamiento (inmovilización de contaminantes), utilización de polímeros (descomposición sustancias tóxicas orgánicas) e incineración a temperaturas muy elevadas. La elección de éstos dependen del tipo de residuo que se maneje, accesibilidad, estándares de seguridad y costos.

Referente a las nuevas tecnologías, se han desarrollando investigaciones en el área de tratamiento físico y biológico. En el área de tratamientos físicos se dispone de diferentes técnicas de encapsulamiento para la obtención de materiales que puedan auto solidificarse con una mínima adición de otros constituyentes.

### 4.1.6. Disposición Final de Residuos Peligrosos

Se entiende como disposición final de residuos peligrosos como: la ubicación de los residuos en áreas o zonas previamente seleccionadas y adecuadas para este fin.

- En rellenos sanitarios
- En rellenos de seguridad
- Inyección en pozos profundos
- Colocación en minas o domos de sal [24]

Los dos primeros son los métodos mas utilizados en todo el mundo; los últimos dos son procesos poco conocidos, aceptables, pero que necesitan desarrollo tecnológico.

La forma más común para la disposición de residuos peligrosos es el relleno de seguridad. Los costos de este método son relativamente bajos, pero requiere de un diseño apropiado y de control constante de la contaminación, inclusive después de clausurado el relleno. Entre los requisitos para poder construir un relleno de seguridad están la evaluación del suelo y de las características hidrogeológicas del área. En el diseño es necesario incluir materiales aislantes, a fin de prevenir la contaminación del ambiente, principalmente la contaminación de colectores hídricos subterráneos, sean freáticos o artesianos; asimismo, se deben instalar pozos de monitoreo.

La inyección de residuos en pozos profundos así como su colocación en minas de sal o el lanzamiento al mar son todavía formas aceptables de disposición final de ciertos tipos de residuos peligrosos.

Lamentablemente se han dado casos de rellenos de seguridad diseñados según las normas técnicas, que han contaminado fuentes de agua. Por esta razón, actualmente se investigan otras alternativas posibles.

### 4.1.7. Efectos de los desechos industriales sobre la Salud

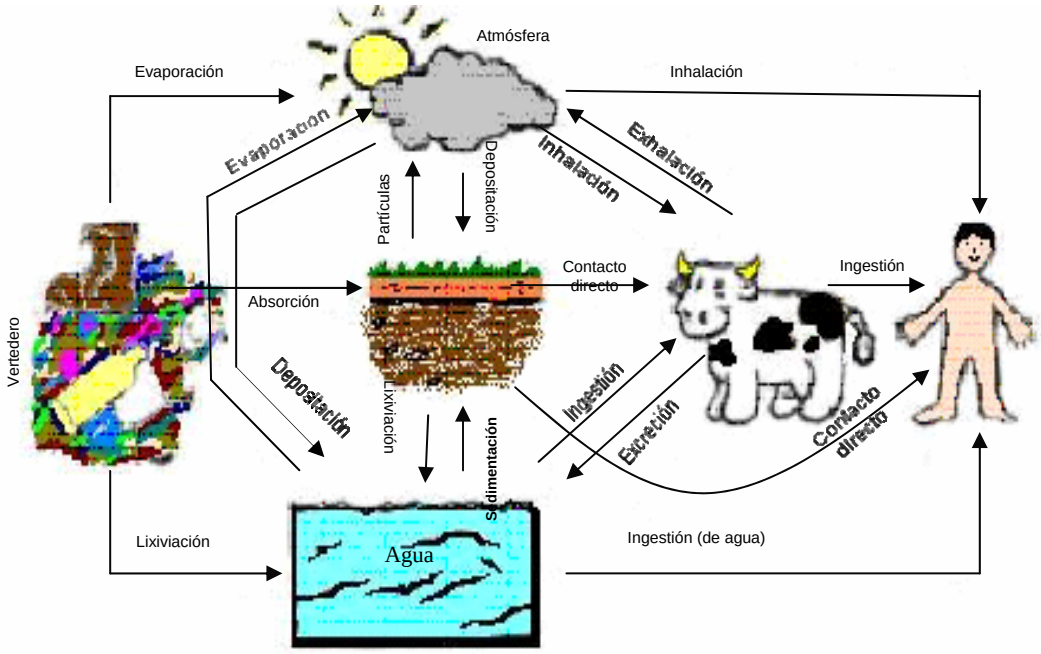


***Figura 4.1.*** *Rutas de movilización de residuos peligrosos a partir un sitio de disposición final sin control.*

En México se tiene el registro de un caso por el mal manejo de desechos del proceso de cromita, la que era procesada en la Fábrica de Cromatos de México, Tultitlán Estado de México. Los desechos producidos por esta empresa eran depositados en pozos, los acumulaban en montones sobre terrenos de la empresa para posteriormente se donaban al municipio para bachear las calles. A este caso las autoridades no dieron respuesta a pesar de que se tenía evidencia, había obreros y empleados que tenían el tabique nasal perforado. Nunca se aceptaron oficialmente los daños a la salud de la comunidad.

### 4.1.8. Situación en México

#### 4.1.8.1. Volúmenes y Fuentes

En México no existe un inventario completo del tipo y volumen de residuos peligrosos generados en el país, a pesar de los manifiestos que por ley deberían cumplir las empresas y establecimientos generadores, sin embargo haciendo un cálculo aproximado, para el 2004 se tuvo una producción de 34 602 000 toneladas a nivel nacional.

***Tabla4.5 .*** *Generación de Residuos por zona.*

| Zona | Generación per cápita diaria (Kilogramos por habitante por día) | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1997 | 1998 | 1999 | 2000 | 2001 | 2002 | 2003 | 2004 |
| Centro a | 0.775 | 0.838 | 0.826 | 0.83 | 0.841 | 0.849 | 0.857 | 0.869 |
| Distrito Federal | 1.316 | 1.266 | 1.273 | 1.387 | 1.383 | 1.398 | 1.386 | 1.4 |
| Norte b | 0.882 | 0.733 | 0.719 | 0.873 | 0.889 | 0.897 | 0.913 | 0.922 |
| Sur c | 0.672 | 0.645 | 0.631 | 0.657 | 0.665 | 0.672 | 0.677 | 0.684 |
| Frontera norte d | 0.946 | 1.36 | 1.354 | 0.83 | 0.836 | 0.844 | 0.847 | 0.855 |
| **Zona** | **Generación anual (Toneladas)** | | | | | | | |
| | **1997** | **1998** | **1999** | **2000** | **2001** | **2002** | **2003** | **2004** |
| Centro a | 13 996 692 | 15 498 418 | 15 658 230 | 15 356 959 | 15 789 612 | 16 179 316 | 16 581 950 | 17 366 700 |
| Distrito Federal | 4 121 767 | 4 220 944 | 4 350 691 | 4 350 691 | 4 350 691 | 4 459 174 | 4 380 000 | 4 500 450 |
| Norte b | 6 010 511 | 5 819 134 | 5 859 901 | 5 829 566 | 5 983 153 | 6 058 256 | 6 257 195 | 6 701 400 |
| Sur c | 2 941 871 | 2 971 290 | 3 001 990 | 2 986 123 | 3 074 318 | 3 157 382 | 3 237 550 | 3 445 600 |
| Frontera norte d | 2 201 584 | 2 040 893 | 2 081 480 | 2 209 928 | 2 290 7 | | | |

**FUENTE: INEGI**. Con base en SEDESOL. DGOT. Subdirección de Asistencia Técnica a Organismos Operadores Urbanos Regionales.

a. Aguascalientes, Colima, Guanajuato, Hidalgo, Jalisco, México, Michoacán de Ocampo, Morelos, Puebla, Querétaro de Arteaga, Tlaxcala y Veracruz de Ignacio de la Llave.

b. Baja California, Baja California Sur, Chihuahua, Coahuila de Zaragoza, Durango, Nayarit, Nuevo León, San Luis Potosí, Sinaloa, Sonora, Tamaulipas y Zacatecas.

c. Campeche, Chiapas, Guerrero, Oaxaca, Quintana Roo, Tabasco y Yucatán.

d. Incluye todos los municipios de Baja California, Sonora, Coahuila de Zaragoza, Chihuahua, Nuevo León y Tamaulipas, que están dentro de la franja de 100 km al Sur del límite internacional con los Estados Unidos de América.

De acuerdo con las cifras registradas, en la tabla anterior, y tomando en cuenta las cinco zonas en las que fue dividido el territorio nacional, el porcentaje de generación de residuos se clasifica de la siguiente forma:

- Zona Centro 50.19%
- D.F 13.00%
- Zona Norte 19.37%
- Zona Sur 9.96%
- F. Norte 7.48%

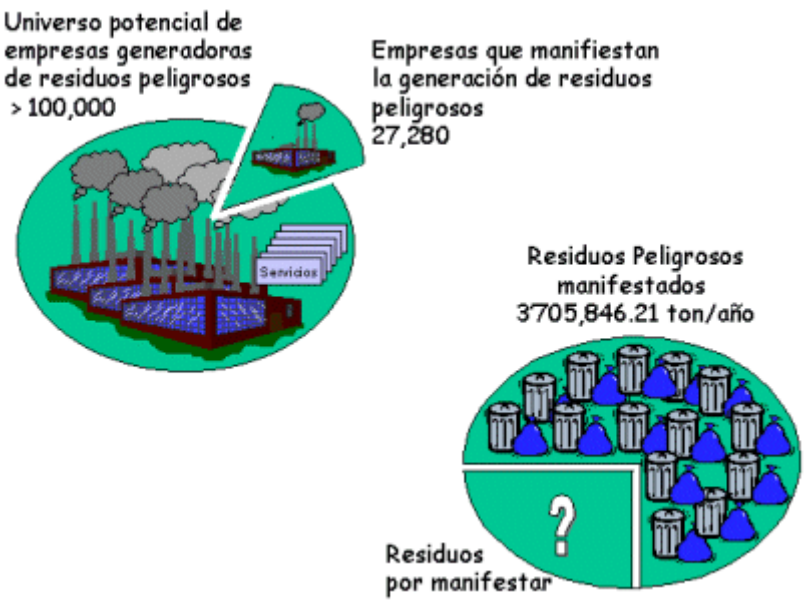


**Figura 4.2.** Universo de Generadores de Residuos Peligrosos (1988-2000)

**Fuente:** Instituto Nacional de Ecología. Julio 2000

***Tabla 4.6.*** *Distribución geográfica de los generadores de residuos peligrosos registrados 2000.*

| ESTADO | NO. DE EMPRESAS | GENERACIÓN DE RESIDUOS PELIGROSOS (TON/AÑO) | ESTADO | NO. DE EMPRESAS | GENERACIÓN DE RESIDUOS PELIGROSOS (TON/AÑO) |
|---|---|---|---|---|---|
| AGUASCALIENTES | 608 | 9,554.77 | MORELOS | 562 | 8,315.97 |
| BAJA CALIFORNIA | 2,359 | 33,523.00 | NAYARIT | 263 | 2,389.85 |
| BAJA CALIFORNIA SUR | 124 | 107.5 | NUEVO LEÓN | 1,143 | 253,079.48 |
| CAMPECHE | 183 | 58,501.91 | OAXACA | 131 | 60,533.73 |
| COAHUILA | 1,020 | 2,359.34 | PUEBLA | 480 | 11,200.00 |
| COLIMA | 254 | 1,697.73 | QUERÉTARO | 507 | 13,878.91 |
| CHIAPAS | 527 | 939.2 | QUINTANA ROO | 278 | 48.68 |
| CHIHUAHUA | 2,224 | 3,862.50 | SAN LUIS POTOSÍ | 341 | 29,292.40 |
| DISTRITO FEDERAL | 3,955 | 624,995.00 | SINALOA | 220 | 6,332.07 |
| DURANGO | 272 | 976.57 | SONORA | 545 | 7,404.50 |
| GUANAJUATO | 1,181 | 1,148,550.35 | TABASCO | 314 | 134,096.00 |
| GUERRERO | 255 | 1,282.52 | TAMAULIPAS | 409 | 218,576.20 |
| HIDALGO | 916 | 392,843.47 | TLAXCALA | 550 | 52,275.40 |
| JALISCO | 1,686 | 4,722.72 | VERACRUZ | 478 | 152,862.26 |
| MÉXICO | 4,429 | 233,640.00 | YUCATÁN | 659 | 2,441.16 |
| MICHOACÁN | 223 | 233,680.58 | ZACATECAS | 184 | 1,882.45 |

***Tabla 4.7.*** *Totales de empresas y generación de residuos.*

| NO. DE EMPRESAS | GENERACIÓN DE RESIDUOS PELIGROSOS (TON/AÑO) |
|---|---|
| 27,280 | 3,705,846.21 |

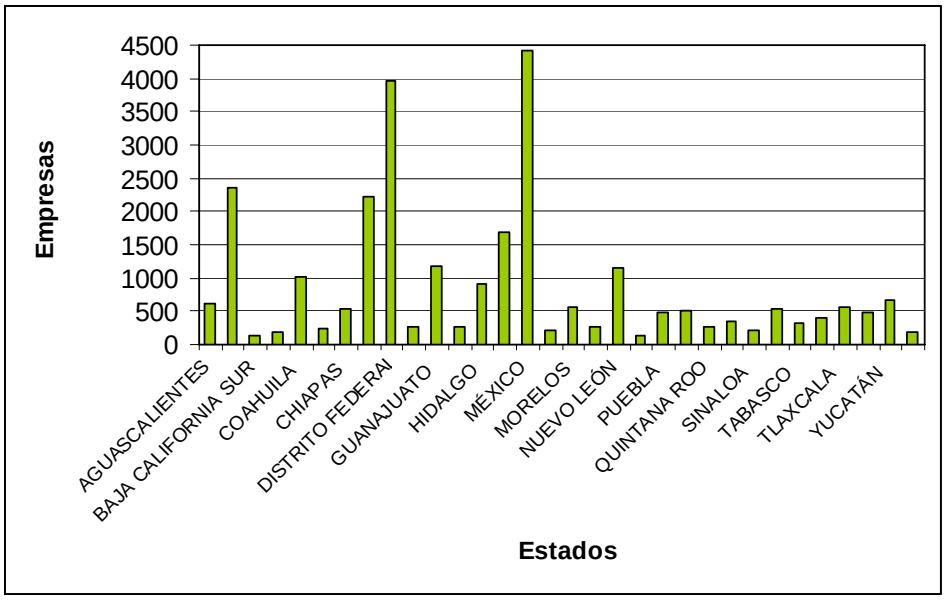


***Figura 4.3.*** *Estadísitica de número de empresas ubicadas en cada estado de la República Mexicana.*

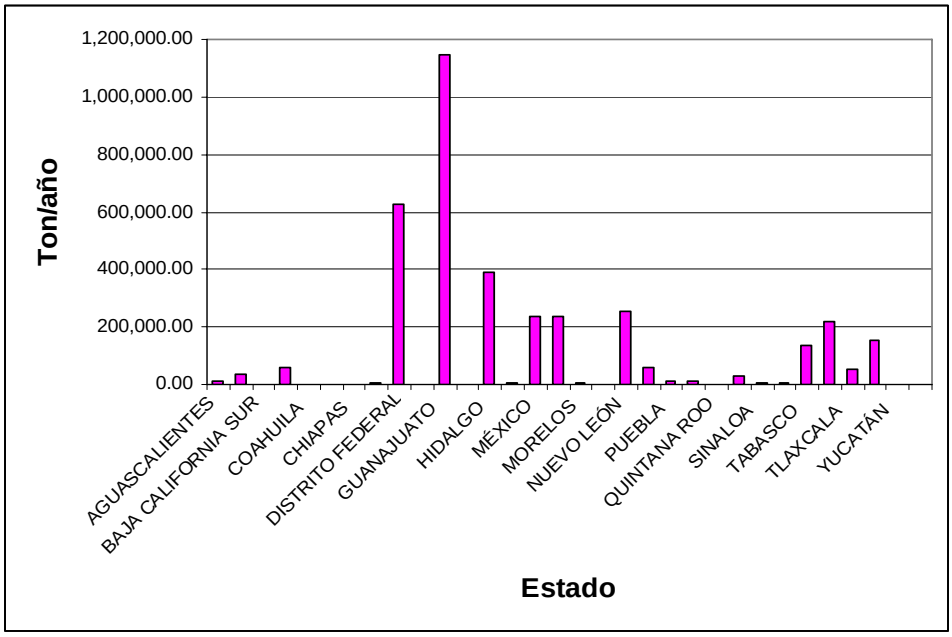


***Figura 4.4.*** *Estadística de tonelaje de producción de residuos peligrosos en cada estado de la República Mexicana.*

***Tabla 4.8.*** *Generación per cápita diaria.*

| Zona | Generación per cápita diaria (Kilogramos por habitante por día) | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1997 | 1998 | 1999 | 2000 | 2001 | 2002 | 2003 | 2004 |
| Centro a | 0.775 | 0.838 | 0.826 | 0.83 | 0.841 | 0.849 | 0.857 | 0.869 |
| Distrito Federal | 1.316 | 1.266 | 1.273 | 1.387 | 1.383 | 1.398 | 1.386 | 1.4 |
| Norte b | 0.882 | 0.733 | 0.719 | 0.873 | 0.889 | 0.897 | 0.913 | 0.922 |
| Sur c | 0.672 | 0.645 | 0.631 | 0.657 | 0.665 | 0.672 | 0.677 | 0.684 |
| Frontera norte d | 0.946 | 1.36 | 1.354 | 0.83 | 0.836 | 0.844 | 0.847 | 0.855 |

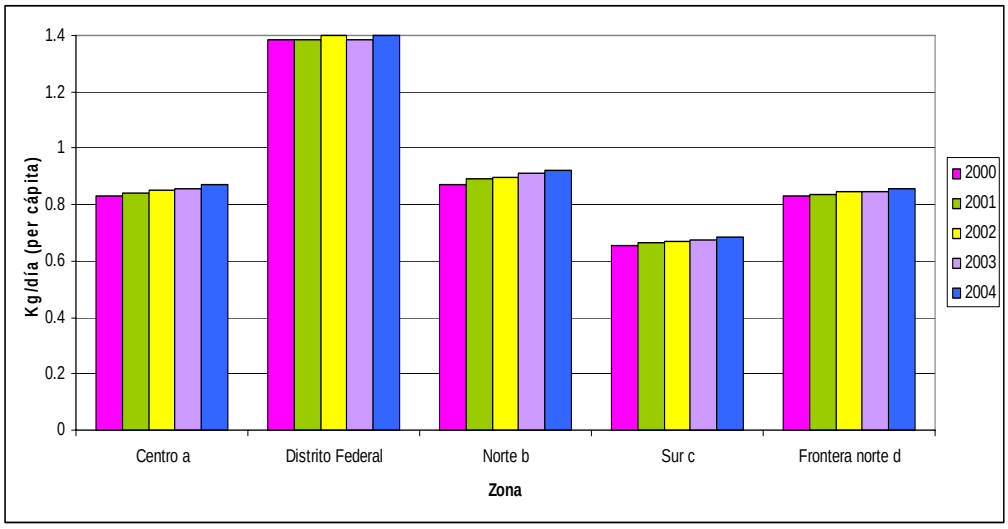


***Figura 4.5.*** *Estadística de producción diaria per cápita.*

Entre los sectores generadores principales tenemos a la industria química básica, secundaria y petroquímica (40 % del total); le siguen las industrias metal mecánica y metálica con un 10% y la industria eléctrica con un 8 %, dando un total de 58%. El porcentaje restante se debe al uso de plaguicidas químicos en la agricultura, los residuos biológicos infecciosos generados por clínicas, hospitales y los producidos por uso doméstico. Se estima que sólo el 12% de los residuos peligrosos generados en el país reciben un tratamiento o son depositados en lugares autorizados. La mayoría son vertidos directamente en la red de drenaje, o tirados en las barrancas, ríos, mares, mezclados con los residuos sólidos municipales o almacenados en los patios de las empresas.

## 4.2 Solidificación – Estabilización

Las técnicas de estabilización y solidificación han sido utilizadas ampliamente en la gestión de los residuos peligrosos:

1. En recuperación de vertederos de residuos peligrosos
2. Tratamiento de residuos procedentes de otros procesos de eliminación
3. Tratamiento de terrenos contaminados (grandes cantidades de suelos contaminados)

La estabilización puede definirse como: *"proceso mediante el cual los contaminantes quedan total o parcialmente confinados por la adición de un medio soporte aglomerante u otros modificadores"*.

La estabilización es una técnica donde son mezclados los aditivos con los residuos para la minimización de la velocidad de migración de los contaminantes contenidos en los residuos, así como para reducir la toxicidad de éstos.

En el proceso de solidificación se añade cantidad suficiente de material solidificante a los materiales peligrosos para dar origen a una masa solidificada mediante adición de reactivos que cumplen con las siguientes características:

- Aumentan la resistencia
- Disminuyen la compresibilidad
- Disminuyen la permeabilidad del residuo

Cabe mencionar que estas técnicas no destruye los químicos o contaminantes, sino que protegen la salud humana y el medio ambiente. Estas dos técnicas se utilizan en conjunto para prevenir el contacto de químicos nocivos con personas y/o medio ambiente.

La estabilización-solidificación, es utilizada en el tratamiento de residuos industriales, y en diversos tipos de medios contaminados (tierra, sedimentos) por contaminantes como metales pesados, arsénico, TCI, petróleo.

### 4.2.1 Aplicaciones

Existen tres campos principales donde es utilizada esta técnica:

- Eliminación en el terreno (estabilización de residuos previa a su eliminación en vertederos de seguridad)
- Recuperación de terrenos (contaminados)
- Solidificación de residuos industriales (residuos inestables no peligrosos, lodos)

Los residuos líquidos y los lodos que contienen alto grado de humedad deben estabilizarse antes de ser eliminados en vertederos, se debe tomar en cuenta para tener una estabilización eficaz de líquidos que los agentes estabilizantes no pueden ser absorbentes.

Los terrenos contaminados que contienen residuos orgánicos, inorgánicos y/o suelos contaminados se pueden recuperar mediante estabilización, esta técnica es recomendada para los sitios donde se tenga un terreno con dimensiones considerables de suelo y con un nivel bajo de contaminación, en estos casos la técnica de estabilización es utilizada para las siguientes actividades:

1. Mejoramiento de las características físicas y manejo de residuos.
2. Disminución de la velocidad de migración de contaminantes por medio de la disminución de la superficie en la que se tiene la probabilidad de tener una transferencia de contaminantes.
3. Reducción de la toxicidad de algunos contaminantes.

La solidificación mejora las características mecánicas y ayuda a reducir la velocidad de migración de los contaminantes al medio ambiente. En muchos de los casos donde ha sido utilizada esta técnica se han sido mejorados los aspectos de

estabilidad estructural, estéticos para que el uso del terreno se pueda extender a otras actividades.

### 4.2.2 Método Solidificación/ Estabilización

Tratamiento de residuos líquidos, pastosos ó sólidos contaminados con materia orgánica, metales pesados, etcétera, por medio de la utilización de reactivos específicos capaces de destruir o fijar los elementos contaminantes, de tal forma que se obtenga un residuo final aceptable en vertedero controlado. El agua de lluvia u otras fuentes no pueden disolver los químicos, atrapados en el concreto que se ha realizado, al atravesar el suelo o lodo tratado.

Al mezclar el agente contaminante, metales con cemento, se lleva a cabo una reacción que provoca una formación de metales menos solubles. Éstos no salen ni se mueven del suelo con facilidad.

Existen diferentes maneras en las que se puede llevar a cabo esta técnica; se puede realizar directamente en el suelo contaminado (ex situ), donde es necesario hacer una excavación, por medio de barrenas (auger´s) o paletas rotatorias, para posteriormente verter los materiales de limpieza, cemento, y mezclar bajo tierra. Posteriormente este suelo o sitio tratado se cubre con suelo limpio, es decir no contaminado, o con pavimento. Cuando se ha llegado a esta etapa en las solidificación/estabilización la EPA (Environmental Protection Agency) realiza una serie de análisis en el suelo tratado y sus alrededores para verificar que no haya restos de contaminación, o bien, tratamiento de medios en el mismo lugar (in situ), este método, in situ, tiene el beneficio de mejorar las condiciones de la tierra para una posterior construcción de estructuras y pavimentos.

***Figura 4.6.*** *Representación de tratamiento de suelo contaminado.*

***FUENTE:*** *Guide Citizen´s.*

Los análisis que la EPA realiza son a la mezcla final para confirmar y tener la seguridad de que la mezcla que se ha realizado tenga un sellado perfecto que no permita que los materiales contaminantes puedan escapar, así como la resistencia y durabilidad de los materiales que se han sometido a esta técnica (solidificación/estabilización). En ocasiones la EPA establece limitaciones sobre el suelo tratado con el fin de evitar posibles daños futuros.

Esta técnica de control de contaminantes es relativamente rápida, sin embargo, el tiempo de fraguado, secado, que se requiere para que el suelo tratado puede tardar entre semanas y meses, lo anterior es cuestión de varios factores que están en relación con:

- Tipo y cantidad de contaminantes presentes.
- Tamaño y profundidad del área contaminada.
- Tipos de suelo y condiciones geológicas.
- Lugar donde se realizó la mezcla.

### 4.2.3 Materiales

La técnica de estabilización se realiza con el empleo de diferentes aditivos (reactivos) individual o conjuntamente. Entre los utilizados se puede enumerar a los **aglomerantes**, termino empleado para los reactivos que aumentan la resistencia asociada a la estabilización, y el **sorbente** que son los reactivos que retienen los contaminantes en la matriz estabilizada.

Dentro del mercado de materiales disponibles para emplear en esta técnica se encuentra una amplia gama de sorbentes y aglomerantes, algunos de ellos se presentan en el anexo A [ 13].

Al realizar la estabilización por cementación, los residuos son mezclados con cemento, si es necesario hidratar los residuos, se añade agua para hidratarlos. Esto da lugar a la formación de una estructura cristalina de alumino silicato cálcico, masa dura con aspecto rocoso.

Cabe mencionar que la estabilización con cemento es apto para residuos inorgánicos, en especial los que contienen metales pesados, debido a que el cemento presenta un pH elevado, los metales son retenidos en la estructura endurecida formada como hidróxidos insolubles o carbonatos, tal es el caso de el plomo, zinc, estaño y cadmio que se unen por fijación química formando compuestos insolubles. En cambio, el proceso de hidratación se ve interferido cuando se utiliza compuestos orgánicos además de reducir la resistencia y no son fáciles de estabilizar.

## 4.3 Cemento

La palabra cemento deriva del latín *"caementum"*, los romanos llamaban *"opus caementitium"* (obra cementicia) a la grava y a diversos materiales parecidos al hormigón que usaban en sus morteros, aunque no era la sustancia que los unía. Técnicamente se le conoce como cemento hidráulico, denominación que comprende a los aglomerantes que fraguan y endurecen una vez que se mezclan con agua e inclusive, bajo el agua.

De acuerdo con el Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C. (ONNCCE), es un *"material inorgánico finamente pulverizado, que al agregar agua, ya sea sólo o mezclado con arena o grava, asbesto u otros materiales similares tiene propiedades de fraguar y endurecer, incluso bajo el agua, en virtud de reacciones químicas durante la hidratación y que una vez endurecido, conserva su resistencia y estabilidad"*.

El papel que juega el cemento en la estabilización de residuos peligrosos es el de agente principal. El tipo de cemento más utilizado es el cemento portland, este tipo de cemento se obtiene al someter a altas temperaturas, dentro de un horno, a la mezcla de caliza y arcilla.

Las principales etapas del proceso de fabricación del cemento son:

- Molienda de crudo
- Calcinación
- Molienda de cemento

De las etapas anteriores las más importante es la calcinación, ya que es donde se tiene mayor control químico, con el fin de obtener clínker de mejor calidad.

### 4.3.1 Etapas de proceso

#### 4.3.1.1 Materias Primas

La base para la fabricación del cemento es la elaboración de clínker, para ello son necesarias materias primas que principalmente son caliza y pizarra, minerales de fierro (hematita) y sílice en cantidades pequeñas (1 a 5%) para obtener la composición deseada.

##### 4.3.1.1.1. Caliza

Roca de calcita o carbonato cálcico ($CaCO_3$), acompañadas de compuestos de hierro, sílice y otras sustancias. Aporta la mayor cantidad de óxidos para la formación de compuestos hidráulicos para el cemento portland.

Se encuentra en las capas superficiales de muchos cerros y montañas, en depósitos de profundidad variable. Para la fabricación de cemento se sacan volúmenes muy grandes debido a que la caliza representa el 80% de las materias primas que forman el clínker. El análisis químico permite conocer la calidad de una cantera de

caliza. Se considera buena la que tiene carbonato de calcio en un 95% o más, abajo de 90% ocasiona problemas.

#### 4.3.1.1.2. Pizarra

Roca sílico - aluminosa ($SiO_2$ – $Al_2O_3$). Se le llama "pizarra" a las arcillas constituidas principalmente por óxidos de silicio de un 45 a 65%, por óxidos de aluminio de 10 a 15%, por óxidos de fierro de 6 a 12% y por cantidades variables de óxido de calcio de 4 a 10%. Es también la principal fuente de álcalis. La pizarra representa aproximadamente un 15% de la materia prima que formará el clínker.

#### 4.3.1.1.3. Sílice

Óxido de silicio ($SiO_2$); su uso en la mezcla cruda depende de la composición de los componentes principales. Se agregan arenas sílicas que contienen de 75% a 90% de sílice, para obtener el óxido de silicio requerido en la mezcla cruda.

#### 4.3.1.1.4. Hematita

Óxido Férrico ($Fe_2O_3$). Al material que aporta mineral de fierro se le llama “hematita”, aunque pueden ser diversos minerales de fierro o escoria de laminación. La hematita contiene entre 75 y 90% de óxido férrico. Con estos minerales se controla el contenido de óxido férrico de la mezcla. La hematita constituye entre el 1 y 2% de la mezcla cruda.

#### 4.3.1.1.5. Caolín o Yeso

Sulfato cálcico hidratado ($CaSO_4.2H_2O$).El caolín es una arcilla con alto contenido de alúmina que se utiliza para la fabricación del cemento blanco.

### 4.3.2. Obtención del cemento

El proceso de obtención de cemento consta de los siguientes pasos:

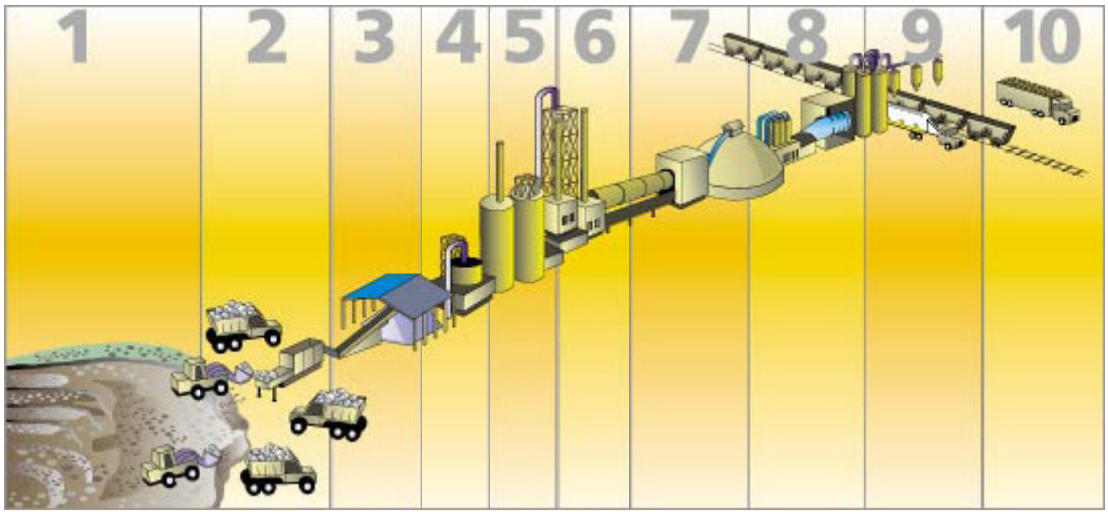


***Figura 7.*** *Proceso de la elaboración de cemento.*

***FUENTE:*** *Asociación de Fabricantes de Cemento Portland.*

1. El Proceso industrial comienza en la cantera con la extracción de las materias primas, que se efectúa mediante explotaciones a cielo abierto, con uso de perforadoras especiales y posteriores voladuras.

   El material así extraído , es cargado mediante palas de gran capacidad, que depositan las rocas en camiones, los que transportan la materia prima hasta la planta de trituración.

2. La planta de trituración de caliza y arcillas ,permite reducir el material con tamaño de hasta 1,2 m³, hasta un tamaño final comprendido entre 0/46 mm Este material triturado es transportado hasta el predio de la planta, mediante una cinta transportadora.

3. Una vez llegado a la planta, el material es depositado en un parque de almacenamiento de materias primas, donde se efectúa un adecuado proceso de prehomogeneización.

4. A partir del parque de almacenamiento y mediante un proceso de extracción automático, las materias primas son conducidas a la instalación de molienda por molino de bolas, las materias son reducidas a una sustancia de gran finura que se denomina "harina", y constituye el elemento que alimentará posteriormente al horno. Es en la etapa de molienda, donde se seleccionan las características químicas de la "harina" que se desea obtener.

5. El material así molido es transportado mediante sistemas neumáticos o transportes mecánicos a silos de homogeneización, donde se logra finalmente una harina de extraordinaria constancia de calidad, que servirá para alimentar el horno.

6. La harina cruda es introducida, en forma neumática y debidamente dosificada, a un intercambiador de calor por suspensión en contracorriente de gases de varias etapas, en la base del cual se ha instalado un moderno sistema de precalcinación de la mezcla, antes de la entrada al horno rotativo, donde se desarrollan las restantes reaccciones físicas-químicas, que dan lugar a la formación del clinker.

7. El clinker así obtenido, es sometido a un proceso de enfriamiento rápido en un "enfriador". Posteriormente, luego de pasar por un quebrantador, el clinker es trasladado por medio de un transportador metálico, a un parque de almacenamiento.

8. De este parque de almacenamiento, y mediante un proceso de extracción controlada, el clinker es conducido a la molienda de cemento, constituida por un molino de bolas a circuito cerrado o por una acción combinada de molienda mediante rodillos de presión y tubo a bolas, con separador neumático que permite obtener una finura de alta superficie específica (Blaine).

En esta etapa de molienda, y mediante básculas automáticas, se adicionan los agregados requeridos según el tipo de cemento a obtener.

9. El producto terminado "Cemento Portland" es controlado por análisis químico y ensayos físicos en un laboratorio totalmente equipado, como para garantizar la calidad del producto final, y transportado por medios neumáticos a silos de depósito desde donde se encuentra listo para ser despachado en bolsas y/o granel.

10. Para la primera forma, se cuenta con embolsadoras rotativas automáticas. El producto envasado se carga -mediante un sistema semiautomático o automático- simultáneamente en plataformas totalmente cubiertas, para igual cantidad de camiones con sus respectivos acoplados o vagones telescópicos para el transporte ferroviario. También se cuenta con modernos sistemas de paletizado de bolsas, para facilitar la cargan [].

### 4.3.3. Tipos de cemento

La clasificación de los tipos de cemento la proporciona la NMX – C – 414 – ONNCCCE – 1999. Los clasifica de acuerdo a composición, características especiales y resistencia.

***Tabla 4.9.*** *Clasificación de cementos de acuerdo a composición*

| Tipo | Denominación |
|---|---|
| CPO | Cemento Pórtland Ordinario |
| CPP | Cemento Pórtland Puzolánico |
| CPEG | Cemento Pórtland con Escoria Granulada de alto horno |
| CPC | Cemento Pórtland Compuesto |
| CPS | Cemento Pórtland con humo de sílice |
| CEG | Cemento con Escoria Granulada de alto horno |

***FUENTE:*** *Cementos Cruz Azul*

***Tabla4.10.*** *Clasificación de cementos de acuerdo a características especiales.*

| Nomenclatura | Descripción |
|---|---|
| RS | Resistencia a los sulfatos |
| BRA | Baja reactividad Álcali agregado |
| BCH | Bajo calor de hidratación |
| B | Blanco |

***FUENTE:*** *Cementos Cruz Azul*

***Tabla4.11.*** *Clasificación de cementos de acuerdos a resistencia.*

| Clase | Resistencia a la Compresión N/mm$^2$ | | |
|---|---|---|---|
| **Resistente** | **Mínimo a 3 días** | **Mínimo a 28 días** | **Máximo a 28 Días** |
| 20 | -- | 20 | 40 |
| 30 | -- | 30 | 50 |
| 30 R | 20 | 30 | 50 |
| 40 | -- | 40 | -- |
| 40 R | 30 | 40 | -- |

***FUENTE:*** *Cementos Cruz Azul*

La resistencia normal del cemento es la mínima mecánica a la compresión a 28 días, 20,30 ó 40 Newton por milímetro cuadrado (N/mm$^2$).

En un saco de cemento, la clasificación del cemento está integrada por:

**Composición + Característica especial**

Por ejemplo: ***Cemento CPO 40 R***

Indica un cemento Pórtland ordinario, con alta resistencia inicial.

#### 4.3.3.1 Cemento Pórtland

El cemento portland es un conglomerante hidráulico cuya principal propiedad es la de formar masas pétreas resistentes y duraderas cuando se mezcla con áridos y agua. El

endurecimiento de la mezcla ocurre transcurrido un cierto tiempo desde el momento en que se realiza el amasado, lo que permite dar forma a la piedra artificial resultante. Estas tres cualidades (moldeable, resistente, duradero) hacen que los productos derivados del cemento tengan una gran aplicación en la construcción de edificios y obras públicas.

***Tabla 4.12.*** *Recomendaciones del fabricante para utilización de Cemento Portland Ordinario.*

| Tipo de cemento | Clase Resistente | Utilizable para: | No recomendables, salvo precauciones especiales, para: | Precauciones |
|---|---|---|---|---|
| Cemento Portlad Ordinario (CPO) | 20 | Obras de concreto en masa, de pequeño o mediano volumen. Obras de concreto armado. Algunas obras o elementos de concreto pretensado. Prefabricación con tratamientos higrotérmicos. Pavimentación y firmes en carreteras. Estabilización de suelos. | Obras en ambientes, aguas y terrenos agresivos. Obras de concreto en masa, de gran volumen, especialmente con dosificaciones altas. | Cuidar el almacenamiento, tratando de que no se prolongue más de tres meses. |
| | 30 y 30R | Obras de concreto armado en las que se requiera un endurecimiento más rápido de lo normal. Obras o elementos de concreto pretensado. Prefabricación, incluso con tratamientos higrotérmicos. | Obras en ambientes, aguas y terrenos agresivos. Obras y piezas de concreto armado, de mediano o de gran volumen o espesor, y estructuras fácilmente figurables por retracción, tanto plática como térmica e hidráulica. | Cuidar el almacenamiento, tratando de que no se propague más de dos meses. Cuidar la dosificación (en peso), el amasado y, especialmente, el curado. Tomar las medidas necesarias para evitar figuraciones por retracción, particularmente durante las primeras horas (retracción plática), y en caso de piezas y elementos voluminosos, o de pequeño espesor. |
| | 40 y 40R | Obras especiales de concreto armado de endurecimiento muy rápido y de muy altas resistencias a toda edad. Obras o elementos de concreto pretensado en los que se de la misma circunstancia. Prefabricación muy cuidada. Fabricación de concreto en tiempo o en clima muy frío. Descimbrado, desencofrado y desmoldado muy rápidos. | Obras en ambientes, aguas o terrenos agresivos. Obras de concreto armado de mediano volumen o espesor, y estructuras figurables por retracción, tanto térmica como hidráulica. | Cuidar el almacenamiento, tratando de que no se propague más de un mes. Cuidar la dosificación (en peso), el amasado y, muy especialmente, el curado. Tomar medidas para evitar figuraciones por retracción, particularmente durante las primeras horas (retracción plática), y en el caso de piezas y elementos voluminosos y /o con dosificaciones incluso bajas. |

***FUENTE:*** *Cementos Cruz Azul*

#### 4.3.3.2 Cemento Puzolanico

Es idóneo para prefabricación mediante tratamientos higrotérmicos del concreto con vapor libre o con presión en autoclave. Así mismo, el cemento Pórtland puzolánico va

particularmente bien en el caso forzado de tener que emplear en el concreto agregados reactivos como los álcalis del Cemento Portland Ordinario, en primer lugar porque la adición de puzolana reduce la proporción de clínker Portland y con ella la de los álcalis que éste aporta, en segundo, porque la propia puzolana fija álcalis y evita o atenúa la acción sobre los agregados reactivos.

Es de bajo calor de hidratación, pudiendo dar la totalidad a cortas edades, calores de hidratación inferiores.

Por lo anterior los cementos puzolánicos son idóneos para obras de concreto en contacto con aguas agresivas de cualquier naturaleza, pero en particular en puras, carbónicas y ligeramente ácidas. Son aptos para concreto con grandes masas en los que se requiera evitar una elevación de temperatura y con ello la retracción y figuración de origen térmico. Uso recomendado para concreto de presas y cimentaciones masivas. No recomendados para concreto pre – tensado.

Las características principales que brinda el cemento puzolánico son las siguientes:

- Ingrediente activo que forma un aglomerante con los productos liberados por la hidratación del cemento
- Actúa como agregado fino, lo que permite sustituir parte de arena por grava.
- Concreto obtenido es muy plástico y puede trabajarse fácilmente por lo que requiere menos agua de lo que indica su apariencia
- Acabados más tersos e impermeables
- Mayor resistencia al ataque de los sulfatos, reacción alcalina y lluvia ácida.

***Tabla 4.13.*** *Recomendaciones del fabricante para la utilización de Cemento Puzolánico.*

| Tipo de cemento | Clase Resistente | Utilizable para: | No recomendables, salvo precauciones especiales, para: | Precauciones |
|---|---|---|---|---|
| Cemento Portland Puzolánico (CPP) | 20 | Obras de concreto en masa y armado. Pavimentaciones y cimentaciones. Morteros en general. Prefabricación con tratamientos higrotérmicos. Concretos más susceptibles a ataques por aguas puras, carbónicas, agresivas o con débil acidez. Obras de concreto en masa en grandes volúmenes (presas, cimentaciones masivas, muros de contención, etc.) Obras en las que se requiere impermeabilidad, a condición de que la dosificación sea la adecuada. Obras de concreto en masa, con áridos sospechosos de reactividad frente a álcalis. Obras marítimas masivas que no requieran resistencias mecánicas elevadas. Tratamientos hidrotérmicos de higrotérmicos del concreto | Concreto pesado con alambres adherentes. Fabricación de concreto en tiempos de heladas. | Las normales en la dosificación y en el almacenamiento, tratando de que no se prolongue más de tres meses. Curar adecuada y prolongadamente, en especial en climas secos y fríos, evitando desecaciones durante el primer periodo de endurecimiento, en climas cálidos y secos. |
| | 30, 30R, 40 y 40R | Los mismos fines que el tipo CPP, clase resistente 20. Obras de concreto en masa o armado que toleren un moderado calor de hidratación. Obras de concreto en masa o armado en ambientes ligeramente agresivos por aguas puras, carbónicas o con débil acidez mineral. Obras de concreto en masa o armado con agregados sospechosos de reactividad frente a álcalis. Obras de gran impermeabilidad, con dosificaciones adecuadas. Prefabricación con tratamiento hidrotérmico e higrotérmico. Obras de concreto pesado. | Los mismos fines que el tipo CPP, clase resistente 20, excepto concreto pretensazo. Obras en ambientes, aguas y terrenos agresivos. | Los mismos fines que el tipo CPP, clase resistente 20, reduciendo el periodo de almacenamiento a no más de dos meses. |

***FUENTE:*** *Cementos Cruz Azul*

### 4.3.3.3 Cemento Portland con escoria granulada de alto horno (CPEG)

Es menos vulnerable a agresión química, cuanto mayor es su contenido de escoria, son los menos atacables frente a las agresiones por agua de mar o sulfatos, tiene bajo calor de hidratación. Contiene sulfuros, por la escoria, lo que da lugar a acciones corrosivas sobre armaduras, por lo tanto, es idóneo para concreto en masa o armados, que estén en ambientes agresivos (salinos, sulfatados y yesíferos), obras en zonas costeras o sumergidas en el mar, o en aguas, suelos y terrenos salinos, sulfatados o selenitosos. Y

en casos donde además de requerir resistencia química sea necesario un bajo calor de hidratación que evite o disminuya la retracción térmica y figuración.

***Tabla 4.14.*** *Recomendaciones del fabricante para la utilización de Cemento Portland con escoria granulada.*

| **Tipo de cemento** | **Clase Resistente** | **Utilizable para:** | **No recomendables, salvo precauciones especiales, para:** | **Precauciones** |
|---|---|---|---|---|
| Cemento Portland con escoria granulada de alto horno (CPEG) | 20 | Obras de concreto en masa, incluso de gran volumen, que requieran un bajo calor de hidratación. Pavimentaciones y cimentaciones. Obras subterráneas. Estabilización de suelos, suelocemento y gravacemento. Morteros de recubrimiento, agarre y juntas, salvo problemas de coloración. Obras de concreto en masa en ambientes débilmente agresivos por salinidad en general (zonas litorales) o por sulfatos. Obras marítimas masivas de mediana resistencia. Concreto armado. Prefabricación con tratamientos hidrotérmicos e higrotérmicos. | Concreto pretensado con alambres adherentes. Fabricación de concreto a bajas temperaturas o en tiempo de heladas. Obras en las que importe el aspecto exterior del concreto (manchas). | Las normales en la dosificación y en el almacenamiento, tratando de que éste no se prolongue más de tres meses. Curar adecuada y prolongadamente, en especial en climas fríos o a temperaturas bajas, evitando al máximo la desecación prematura y empleando productos de curado, si es preciso. |
| | 30, 30R, 40 y 40R | Los mismos fines que el tipo CPEG, clase resistente 20, en empleos que exijan resistencias aún más altas y además en: prefabricación con tratamientos higrotérmicos. | Los mismos fines que el tipo CPEG, clase resistente 20. | Las mismas prácticamente que para el tipo CPEG, clase resistente 20, reduciendo el periodo de almacenamiento a no mas de dos meses. Curado y desecación. |

***FUENTE:*** *Cementos Cruz Azul*

### 4.3.3.4 Cemento Pórtland Compuesto

Se prefiere este tipo de cemento a efectos de durabilidad, resistencia química (excepto corrosión de armaduras), calor de hidratación, retracción y fisuración o tratamientos higrotérmicos,

***Tabla 4.15.*** *Recomendaciones del fabricante para la utilización de Cemento Portland Compuesto.*

| Tipo de cemento | Clase Resistente | Utilizable para: | No recomendables, salvo precauciones especiales, para: | Precauciones |
|---|---|---|---|---|
| Cemento Portland Compuesto (CPC) | 20 | Prácticamente todos los fines de los tipos de CPEG y CPP, de las clases resistentes correspondientes, su comportamiento se puede considerar como suma ponderada, según sea la composición, de las propiedades y comportamientos de dichos tipos de cemento y clases resistentes. | Prácticamente los mismos casos limitativos de los tipos CPEG y CPP, de las correspondientes clases resistentes, por los mismos motivos. | Las mismas precauciones para los tipos CPEG y CPP, de las clases resistentes correspondientes por razones análogas. |
| | 30, 30R, 40 y 40R | Prácticamente todos los fines de los tipos CPEG y CPP, ya que sus propiedades y comportamientos se pueden considerar como suma ponderada según las propiedades y comportamientos de dichos tipos de cemento y clases resistentes. | Los mismo casos limitativos para CPEG y CPP, de las correspondientes clases resistentes, por los mismos motivos. | Mismas para los tipos CPEG y CPP, por razones análogas. |

***FUENTE:*** *Cementos Cruz Azul*

### 4.3.3.5 Cemento Portland con humo de sílice

Su uso en ocasiones requiere el uso de enérgicos superfluidificantes reductores de agua en el concreto, a fin de mantener aceptablemente bajas las exigencias de agua del mismo y su retracción hidráulica de secado, esto se debe a que el humo de sílice es un producto que consta de partículas muy finas de sílice amorfa, con una superficie 50 veces mayor que la de un cemento portland ordinario.

***Tabla 4.16.*** *Recomendaciones del fabricante para la utilización de Cemento Portland humo de sílice.*

| Tipo de cemento | Clase Resistente | Utilizable para: | No recomendables, salvo precauciones especiales, para: | Precauciones |
|---|---|---|---|---|
| Cemento Portland humo de sílice (CPS) | 20 | Obras de concreto en masa y armado, Pavimentaciones y cimentaciones, morteros en general. Prefabricación con tratamientos higrotérmicos. Obras en las que se requiera impermeabilidad, a condición de que la dosificación sea la adecuada. | Concreto pretensado con alambres adherentes. Fabricación de concreto en tiempo de heladas. | Las normales en la dosificación y en el almacenamiento, tratando que no se prolongue más de tres meses. Curar adecuada y prolongadamente, en especial en climas secos y fríos, evitando desecaciones durante el primer periodo de endurecimiento, en climas cálidos y secos. |
| | 30, 30R, 40 y 40R | Los mismo fines que el tipo CPS, clase resistente 20. Obras de gran impermeabilidad, con dosificaciones adecuadas. Prefabricación con tratamiento hidrotérmico e higrotérmico. | Los mismos fines que el tipo CPS, clase resistente 20, excepto concreto pretensado. Obras en ambientes, aguas y terrenos agresivos. | Los mismos que el tipo CPS, clase resistente 20, reduciendo el periodo de almacenamiento a no más de dos meses. |

***FUENTE:*** *Cementos Cruz Azul*

### 4.3.3.6 Cemento con escoria granulada de alto horno

Se utiliza en casos en los que le puede afectar al concreto problemas de agresividad salina por parte de yesos, sulfatos en general o agua de mar. También en casos cuando siendo compatibles con el resto de las circunstancias del caso, éste exija la condición de calor de hidratación más bajo.

***Tabla 4.16.*** *Recomendaciones del fabricante para la utilización de Cemento con Escoria Granulada.*

| Tipo de cemento | Clase Resistente | Utilizable para: | No recomendables, salvo precauciones especiales, para: | Precauciones |
|---|---|---|---|---|
| Cemento con Escoria Granulada de Alto Horno (CEG) | 20 | Obras de concreto en masa, incluso de gran volumen que requieren un calor de hidratación bajo. Obras de concreto en masa en ambientes húmedos o agresivos por salinidad en general (zonas litorales) o por sulfatos de aguas y terrenos. Pavimentaciones, cimentaciones y obras subterráneas. Estabilización de suelos, sueloconcreto y gravacemento. Obras marítimas. | Concreto armado y pretensado. Concreto a bajas temperaturas. Obras de gran superficie y poco espesor, en las que importe el aspecto externo del concreto (manchas). Concreto en ambientes secos. | Las mismas que las del tipo CPEG, clase resistente 20, sobre todo en lo referente al curado a la desecación. Extremar las relativas a las dosificaciones mínimas y a la compacidad. Evitar su empleo, salvo precauciones extremas de curado, en ambientes muy secos. Fabricación de concreto en tiempo frío y desecación, en el caso de concreto armado. |
| | 30 y 30R | Los mismos fines que el tipo CEG, clase resistente 20, siempre que se requieran resistencias mecánicas aún mayores. | Los mismos fines que el tipo CEG, clase resistente 20. | Las mismas que para el tipo CEG, clase resistente 20. |

***FUENTE:*** *Cementos Cruz Azul*

## 4.4. Concreto

El origen de la palabra concreto viene del latín *"concretus"* cuyo significado es crecer unidos o unir.

Básicamente es una mezcla de dos componentes: agregado y pasta. La pasta, se componen de cemento portland y agua, su función es unir los agregados (arena y grava o piedra triturada) para formar una masa semejante a una roca, ya que se lleva a cabo una reacción química entre cemento y agua.

Como agregados se tienen dos grupos: finos y gruesos. Los agregados finos, son arenas naturales o manufacturadas con tamaños de partícula que puede llegar hasta 10

mm, en cambio, los gruesos son aquellos cuyas partículas se retienen en malla No. 16 las que pueden variar hasta 15.2mm.

De la calidad de la pasta (cemento portland + agua y aire) depende la calidad del concreto. Cada una de las partículas de agregado, en un concreto elaborado adecuadamente, está cubierta con pasta y también todos los espacios entre partículas de éstos.

En cualquier preparado de concreto, la cantidad de concreto endurecido está determinada por la cantidad de agua utilizada en relación con la cantidad de cemento. Algunas de las ventajas que presentan al reducir la cantidad de agua en una mezcla son:

- Incremento de la resistencia a la compresión y a la flexion.
- Menor permeabilidad y por lo tanto, mayor hermeticidad y menor absorción.
- Incremento de la resistencia al intemperismo.
- Mejor unión entre capas sucesivas, entre el concreto y el esfuerzo.

Por lo anterior se tiene que entre menos agua se utilice, se tendrá una mejor calidad de concreto (con la única restricción de que se pueda consolidar adecuadamente).

### 4.4.1. Proporcionamiento de Mezclas

El objetivo de diseñar una mezcla de concreto es determinar la combinación más practica y económica de los materiales con los que se dispone, para producir un concreto que cumpla los requisitos de comportamiento bajo las condiciones particulares de su uso. Una mezcla para obtener un buen concreto, deberá cumplir con las siguientes características:

1. En el concreto fresco, trabajabilidad aceptable.
2. En el concreto endurecido, durabilidad, resistencia y presentación uniforme.
3. Economía.

## 4.5 Sales en Uso

Los residuos industriales se general debido a que de el total de la materia prima que entra en el proceso, una parte de ellos salen como parte del producto terminado. “Por residuo peligroso de entiende a aquellos que en razón de presentar al menos una característica de riesgo, causan o son susceptibles de causar daños a la salud o al medio ambiente” (Publicación de Banco Mundial).

El desarrollo de las urbes ha traído consigo la producción a gran escala de desechos industriales que en su mayoría resultan ser peligrosos debido a que no se les da un tratamiento adecuado para la prevención de la dispersión de los compuestos tóxicos que éstos pudieran tener.

Los desechos industriales a los que se enfocará este estudio son, como ya se mencionó anteriormente, plomo, cromo +3 y cadmio, éstos al ser un desecho resultan tener un gran impacto sobre la salud humana y del medio ambiente, por ello se presenta a continuación los efectos que causan en los respectivos casos.

### 4.5.1 Cadmio

***Tabla 4.17.*** *Propiedades físicas y químicas de cadmio.*

| **Nombre** | Cadmio |
|---|---|
| **Número atómico** | 48 |
| **Valencia** | 2 |
| **Estado de oxidación** | 2 |
| **Electronegatividad** | 1.7 |
| **Masa atómica (g/mol)** | 112.4 |
| **Densidad (g/ml)** | 8.65 |
| **Punto de ebullición (ºC)** | 765 |
| **Punto de fusión (ºC)** | 320.9 |

Este elemento se encuentra en mayor proporción en la corteza terrestre. Por lo general se encuentra incrustado en el zinc .El Cadmio también consiste en las industrias como inevitable subproducto del Zinc, plomo y cobre extracciones. Después de ser aplicado este entra en el ambiente mayormente a través del suelo, porque es encontrado en

Años atrás, los usos comerciales que se le daban al cadmio eran:

1. Como cubierta electro depositada sobre hierro o acero como protección contra corrosión
2. En baterías de níquel-cadmio
3. Como reactivo químico y pigmento.

Se recurre a cantidades apreciables en aleaciones de bajo punto de fusión en rociadoras automáticas contra el fuego y en cantidad menor, en aleaciones de latón soldaduras y cojinetes. Los compuestos de cadmio se emplean como estabilizadores de plásticos y en la producción de cadmio fosforado. Por su gran capacidad de absorber neutrones, en especial el isótopo 113, se usa en barras de control y recubrimiento de reactores nucleares.

#### 4.5.1.1 Efectos sobre la Salud

La toma por los humanos de Cadmio tiene lugar mayormente a través de los alimentos, por ejemplo patés, champiñones, mariscos, mejillones, cacao y algas secas.

El humo del tabaco transporta el Cadmio a los pulmones, por consiguiente la sangre transportará el Cadmio al resto del cuerpo donde puede incrementar los efectos por potenciación del Cadmio que está ya presente por comer comida rico en Cadmio. Otra alta exposición puede ocurrir con gente que vive cerca de los vertederos de residuos peligrosos o fábricas que liberan Cadmio en el aire y gente que trabaja en las industrias de refinerías del metal.

Otros daños a la salud causados por Cadmio son:

- Diarreas, dolor de estómago y vómitos severos
- Fractura de huesos
- Fallos en la reproducción y posibilidad incluso de infertilidad
- Daño al sistema nervioso central
- Daño al sistema inmune
- Desordenes psicológicos

- Posible daño en el ADN o desarrollo de cáncer.

#### 4.5.1.2. Efectos al medio ambiente

Las aguas residuales con Cadmio procedentes de las industrias mayoritariamente terminan en suelos. Las causas de estas corrientes de residuos son por ejemplo la producción de Zinc, minerales de fosfato y las bioindustrias del estiércol. El Cadmio de las corrientes residuales pueden también entrar en el aire a través de la quema de residuos urbanos y de la quema de combustibles fósiles. Debido a las regulaciones sólo una pequeña cantidad de Cadmio entra ahora en el agua a través del vertido de aguas residuales de casas o industrias.

Otra fuente importante de emisión de Cadmio es la producción de fertilizantes fosfatados artificiales. Parte del Cadmio terminará en el suelo después de que el fertilizante es aplicado en las granjas y el resto del Cadmio terminará en las aguas superficiales cuando los residuos del fertilizante sean vertidos por las compañías productoras.

El Cadmio puede ser transportado a grandes distancias cuando es absorbido por el lodo. Este lodo rico en Cadmio puede contaminar las aguas superficiales y los suelos. El Cadmio es fuertemente adsorbido por la materia orgánica del suelo.

De forma natural grandes cantidades de Cadmio son liberadas al ambiente, sobre 25.000 toneladas al año. La mitad de este Cadmio es liberado en los ríos a través de la descomposición de rocas y algún Cadmio es liberado al aire a través de fuegos forestales y volcanes. El resto del Cadmio es liberado por las actividades humanas, como es la manufacturación.

### 4.5.2 Cromo +3

***Tabla 4. 18.*** *Propiedades químicas de cromo.*

| **Nombre** | Cromo |
|---|---|
| **Número atómico** | 24 |
| **Valencia** | 2,3,4,5,6 |
| **Estado de oxidación** | 3 |
| **Electronegatividad** | 1.6 |
| **Masa atómica (g/mol)** | 52 |
| **Densidad (g/ml)** | 7.19 |
| **Punto de ebullición (ºC)** | 2665 |
| **Punto de fusión (ºC)** | 1875 |

El cromo forma tres series de compuestos con otros elementos; éstos se representan en términos de los óxidos de cromo: cromo con valencia dos, CrO, óxido de Cr(II) u óxido cromoso; con valencia tres, $Cr_2O_3$, óxido de Cr(III) u óxido crómico, y con valencia seis, $CrO_3$, anhídrido de Cr(VI) o anhídrido de ácido crómico. El cromo es capaz de formar compuestos con otros elementos en estados de oxidación (II), (III) y (VI).

#### 4.5.2.1 Efectos sobre la salud

Existen varias clases diferentes de Cromo que difieren de sus efectos sobre los organismos. El Cromo entra en el aire, agua y suelo en forma de Cromo (III) y Cromo (VI) a través de procesos naturales y actividades humanas

El cromo +3 se encuentra naturalmente en muchos vegetales, frutas, carnes, levaduras y granos. La concentración de cromo en alimentos puede aumentar cuando éstos están almacenados en tanques o latas. El Cromo III es un nutriente esencial para los humanos y la falta de este puede causar condiciones problemáticas en el corazón, trastornos metabólicos y diabetes, sin embargo, Cromo III en exceso también puede causar efectos sobre la salud, por ejemplo erupciones cutáneas.

El Cromo (VI) es un peligro para la salud de los humanos, mayoritariamente para la gente que trabaja en la industria del acero y textil. La gente que fuma tabaco también puede tener un alto grado de exposición al Cromo. Cuando es un compuesto en

los productos de la piel, puede causar reacciones alérgicas, como erupciones cutáneas. Después de ser respirado el Cromo (VI) puede causar irritación y sangrado de la nariz.

Otros problemas de salud causado por el Cromo (VI) son:

- Malestar de estómago y úlceras
- Problemas respiratorios
- Debilitamiento del sistema inmune
- Daño en los riñones e hígado
- Alteración del material genético
- Cáncer de pulmón
- Muerte

#### 4.5.2.2. Efectos sobre el ambiente

Dentro del campo laboral existen actividades que aumentan las concentraciones de Cromo (III) como industrias de acero, las peleterías y las industrias textiles, pintura, eléctrica y otras aplicaciones industriales del Cromo (VI). Los cultivos contienen sistemas para gestionar la toma de Cromo para que está sea lo suficientemente baja como para no causar cáncer, sin embargo, cuando la cantidad de cromo en el suelo registra un aumento, eleva las concentraciones en los cultivos.

### 4.5.3 Níquel

***Tabla 4.19.*** *Propiedades químicas de níquel.*

| **Nombre** | Níquel |
|---|---|
| **Número atómico** | 28 |
| **Valencia** | 2,3 |
| **Estado de oxidación** | 2 |
| **Electronegatividad** | 1,8 |
| **Masa atómica (g/mol)** | 58,71 |
| **Densidad (g/ml)** | 8,9 |
| **Punto de ebullición (ºC)** | 2730 |
| **Punto de fusión (ºC)** | 1453 |

La aplicación más común del níquel es el uso como ingrediente del acero y otros productos metálicos. Este puede ser encontrado en productos metálicos comunes como es la joyería.

#### 4.5.3.1. Efectos sobre la salud

Los alimentos naturalmente contienen pequeñas cantidades de níquel. El chocolate y las grasas son conocidos por contener altas cantidades. El níquel es tomado y este aumentará cuando la gente come grandes cantidades de vegetales procedentes de suelos contaminados. Es conocido que las plantas acumulan níquel y como resultado la toma de níquel de los vegetales será eminente. Los fumadores tiene un alto grado de exposición al níquel a través de sus pulmones. Finalmente, el níquel puede ser encontrado en detergentes. Los humanos pueden ser expuestos al níquel al respirar el aire, beber agua, comer comida o fumar cigarrillos. El contacto de la piel con suelo contaminado por níquel o agua puede también resultar en la exposición al níquel. En pequeñas cantidades el níquel es esencial, pero cuando es tomado en muy altas cantidades este puede ser peligroso par la salud humana.

La toma de altas cantidades de níquel tienen las siguientes consecuencias:

- Elevadas probabilidades de desarrollar cáncer de pulmón, nariz, laringe y próstata.
- Enfermedades y mareos después de la exposición al gas de níquel.
- Embolia de pulmón.
- Fallos respiratorios.
- Defectos de nacimiento.
- Asma y bronquitis crónica.
- Reacciones alérgicas como son erupciones cutáneas, mayormente de las joyas.

- Desordenes del corazón.

#### 4.5.3.2. Efectos ambientales del Níquel

El níquel es liberado al aire por las plantas de energía y las incineradoras de basuras. Este se depositará en el suelo o caerá después de reaccionar con las gotas de lluvia. Usualmente lleva un largo periodo de tiempo para que el níquel sea eliminado del aire. El níquel puede también terminar en la superficie del agua cuando es parte de las aguas residuales. La mayor parte de todos los compuestos del níquel que son liberados al ambiente se absorberán por los sedimentos o partículas del suelo y llegará a inmovilizarse. En suelos ácidos, el níquel se une para llegar a ser más móvil y a menudo alcanza el agua subterránea.

No hay mucha más información disponible sobre los efectos del níquel sobre los organismos y los humanos. Sabemos que altas concentraciones de níquel en suelos arenosos puede claramente dañar a las plantas y altas concentraciones de níquel en aguas superficiales puede disminuir el rango de crecimiento de las algas. Microorganismos pueden también sufrir una disminución del crecimiento debido a la presencia de níquel, pero ellos usualmente desarrollan resistencia al níquel. Para los animales el níquel, es un elemento esencial en pequeñas cantidades. Pero el níquel no es sólo favorable como elemento esencial; puede ser también peligroso cuando se excede la máxima cantidad tolerable. Esto puede causar varios tipos de cánceres en diferentes lugares de los cuerpos de los animales, mayormente en aquellos que viven cerca de refinerías. No es conocido que el níquel se acumule en plantas o animales. Como resultado el níquel no se biomagnifica en la cadena alimentaria.

### 4.5.4 Plomo

***Tabla 4.20.*** *Propiedades químicas de Plomo.*

| **Nombre** | Plomo |
|---|---|
| **Número atómico** | 82 |
| **Valencia** | 2.4 |
| **Estado de oxidación** | 2 |
| **Electronegatividad** | 1.9 |
| **Masa atómica (g/mol)** | 207.19 |
| **Densidad (g/ml)** | 11.4 |
| **Punto de ebullición (ºC)** | 1725 |
| **Punto de fusión (ºC)** | 327.4 |

Para el uso industrial de plomo, éste es manejado en forma de aleaciones con diferentes metales. Todas las aleaciones formadas con estaño, cobre, arsénico, antimonio, bismuto, cadmio y sodio tienen importancia industrial.

#### 4.5.4.1 Efectos sobre la Salud

Plomo, uno de los cuatro metales que tienen un mayor efecto dañino sobre la salud humana. Este puede entrar en el cuerpo humano a través de la comida (65%), agua (20%) y aire (15%).

Comidas como fruta, vegetales, carnes, granos, mariscos, refrescos y vino pueden contener cantidades significantes de Plomo. El Plomo puede entrar en el agua potable a través de la corrosión de las tuberías. Esto es más común que ocurra cuando el agua es ligeramente ácida. Esta es una de las razones de por qué los sistemas de tratamiento de aguas públicas en la actualidad requiere que se lleve a cabo un ajuste de pH en el agua que sirve como agua potable.

Este metal puede provocar los siguientes daños:

- Perturbación de la biosíntesis de hemoglobina y anemia
- Incremento de la presión sanguínea
- Daño a los riñones
- Abortos

- Perturbación del sistema nervioso
- Daño al cerebro
- Disminución de la fertilidad del hombre a través del daño en el esperma
- Disminución de las habilidades de aprendizaje de los niños
- Perturbación en el comportamiento de los niños, como es agresión, comportamiento impulsivo e hipersensibilidad.

#### 4.5.4.2. Efectos ambientales del Plomo

Debido a la aplicación del plomo en gasolinas un ciclo no natural del Plomo tiene lugar. En los motores de los coches el Plomo es quemado, lo que genera sales de Plomo (cloruros, bromuros, óxidos) se originarán.

Estas sales de Plomo entran en el ambiente a través de los tubos de escape de los coches. Las partículas grandes precipitarán en el suelo o la superfice de aguas, las pequeñas partículas viajarán largas distancias a través del aire y permanecerán en la atmósfera. Parte de este Plomo caerá de nuevo sobre la tierra cuando llueva. Este ciclo del Plomo causado por la producción humana está mucho más extendido que el ciclo natural del plomo. Este ha causad contaminación por Plomo haciéndolo en un tema mundial no sólo la gasolina con Plomo causa concentración de Plomo en el ambientel. Otras actividades humanas, como la combustión del petróleo, procesos industriales, combustión de residuos sólidos, también contribuyen.

El Plomo puede terminar en el agua y suelos a través de la corrosión de las tuberías de Plomo en los sistemas de transportes y a través de la corrosión de pinturas que contienen Plomo. No puede ser roto, pero puede convertirse en otros compuestos.

El Plomo se acumula en los cuerpos de los organismos acuáticos y organismos del suelo. Estos experimentarán efectos en su salud por envenenamiento por Plomo. Los efectos sobre la salud de los crustáceos puede tener lugar incluso cuando sólo hay pequeñas concentraciones de Plomo presente.

Las funciones en el fitoplancton pueden ser perturbados cuando interfiere con el Plomo. El fitoplancton es una fuente importante de producción de oxígeno en mares y muchos grandes animales marinos lo comen. Este es el porqué nosotros ahora empezamos a preguntarnos si la contaminación por Plomo puede influir en los balances globales. Las funciones del suelo son perturbadas por la intervención del Plomo, especialmente cerca de las autopistas y tierras de cultivos, donde concentraciones extremas pueden estar presente. Los organismos del suelo también sufren envenenamiento por Plomo.

El Plomo es un elemento químico particularmente peligroso, y se puede acumular en organismos individuales, pero también entrar en las cadenas alimenticias.

## 4.6 Definición de Métodos

### 4.6.1 Cementación

Consiste, en síntesis, en la mezcla de los residuos con cemento en condiciones que garanticen una buena homogeneidad del producto, descargando en envases donde fragua y solidifica. La operación se puede llevar acabo de forma discontinua o semicontinua.

El producto sólido obtenido puede tener buena resistencia mecánica incluso con y un contenido del 20% en peso de residuos sólidos, posee unas características de lixiviación moderadas y tiene la ventaja del autoblindaje

De a cuerdo con lo mencionado en una tesis anterior a este trabajo, el uso del cemento se reduce a la solidificación de los desechos industriales, pues al mezclar el cemento con las sales se evita que éstas se dispersen al medio ambiente.

La cementación es utilizada para tratar residuos industriales y hacerlos seguros para su disposición; además es usado para el tratamiento de suelos contaminados, sedimentos y lodos. La cementación puede ser aplicada a una amplia variedad de desechos conteniendo una variedad de contaminantes como metales pesados, PCB´s y

aceites. El tratamiento Estabilización/solidificación por cementación puede ser aplicado tanto in situ como ex situ. La técnica in situ puede traer beneficios extras tales como; mejora de las condiciones del suelo para la construcción de estructuras y pavimentos.

The enviromental protection Agency (EPA) menciona que este proceso es frecuentemente utilizado para el tratamiento de suelos contaminados, alrededor de un 25% de las veces.

### 4.6.2 Resistencia a la Compresión

La resistencia a la compresión se puede definir como: *"la máxima resistencia medida de un espécimen de concreto o de mortero a carga axial"* ***[artículo resistencia]***, es expresada (generalmente) en kilogramos por centímetro cuadrado ($Kg/cm^2$), se identifica mediante la simbología de: f'c. Las pruebas realizables para determinar la resistencia a la compresión se llevan a cabo con especimenes de mortero o de concreto.

Ésta es una propiedad fundamental del concreto, es tan importante realizarla, pues es empleada el los cálculos para diseño de puentes, edificios y otras estructuras. El concreto utilizado comúnmente presenta una resistencia a la compresión de 210 y 350 $Kg/cm^2$, mientras que en un concreto de alta resistencia los valores mínimos alcanzados son de 420 $Kg/cm^2$.

Las variaciones que se presentan en esta prueba, se deben principalmente a:

- Contenido y tipo de cemento usado
- Eficiencia lograda en el mezclado del cemento
- Característica y efectividad de los aditivos utilizados
- Calidad y cantidad de agua usada
- Tiempo transcurrido después de realizados la humectación, mezclado y compactado de los materiales
- Grado de compactación alcanzado
- Duración y método de realización del curado

- Prevenciones tomadas para disminuir el agrietamiento [8].

### 4.6.3 Análisis CRETIB (Extracción PECT)

CRETIB es el código de clasificación de las características que contienen los residuos peligrosos y significan:

- **C**orrosivo
- **R**eactivo
- **E**xplosivo
- **T**óxico
- **I**nflamable
- **B**iológico infeccioso.

Este análisis se aplica para determinar si un residuo es peligroso o no.

### 4.6.4 Absorción Atómica

La Absorción Atómica es una técnica capaz de detectar y determinar cuantitativamente la mayoría de los elementos del Sistema Periódico, por lo tanto sus campos de aplicación son diversos. Es empleado para el análisis de aguas, análisis de suelos, bioquímica, toxicología, Medicina, industria farmacéutica, industria alimenticia, industria petroquímica, etcétera.

***Tabla 4.1.*** *Aplicaciones de absorción atómica.*

| **Absorción atómica se puede aplicar en:** | | |
|---|---|---|
| Sedimentos | Metales y aleaciones | Lodos |
| Aguas de efluentes | Minerales | Plantas y material biológico |
| Aguas industriales | Aguas marinas | Cerámicos |

***Tabla 4.1.***. *Elementos que se analizan por medio de absorción atómica.*

| **Elementos Analizables** | |
|---|---|
| Al (Aluminio) | Mn (Manganeso) |
| Ag (Plata) | Mo (Molibdeno) |
| As (Arsénico) | Na (Sodio) |
| Au (Oro) | Ni (Níquel) |
| Ba (Bario) | Os (Osmio) |
| Be (Berilio) | Pd (Paladio) |
| Bi (Bismuto) | Pb (Plomo) |
| Ca (Calcio) | Pt (Platino) |
| Cd (Cadmio) | Rb (Rubidio) |
| Co (Cobalto) | Se (Selenio) |
| Cu (Cobre) | Si (Silicio) |
| Cr (Cromo) | Sb (Antimonio) |
| Fe (Hierro) | Sn (Estaño) |
| Hg (Mercurio) | Te (Teluro) |
| Ir (Iridio) | Ti (Titanio) |
| K (Potasio) | V (Vanadio) |
| Mg (Magnesio) | Zn (Zinc) |