

## **4. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.**

### **4.1. PROCESOS DE ESTABILIZACIÓN / SOLIDIFICACIÓN.**

Este tipo de procesos tiene una gran utilidad y efectividad en el tratamiento de muchos residuos, los cuales presentan la dificultad de ser reusados o confinados. Este tipo de tratamiento es flexible tanto en cuestión de contaminantes como económica. Algunos usos de esta técnica son el mezclar contaminantes desde cenizas o lodos de tratamiento de aguas hasta material nuclear de baja peligrosidad.

Los procesos de estabilización solidificación son comúnmente empleados para la inmovilización contaminantes en suelos o lodos, así como materiales con dificultades de manejo o grandes volúmenes de residuos. Para llevar a cabo esta técnica de forma correcta, es necesario cuidar varios aspectos como: el material solidificante, el tipo de contaminante y su concentración, el medio donde está contenido y la compatibilidad entre estos tres aspectos para garantizar el éxito de la aplicación.

#### *4.1.1 Definición de los procesos.*

Según el documento de la EPA A citizen's guide to solidification/stabilization, (EPA, p.1, 2001); “los procesos de solidificación / estabilización son referidos a los procesos de tratamiento de residuos en los cuales se puede usar una enorme variedad de desechos tanto sólidos como líquidos”. Los procesos de estabilización / solidificación están diseñados para cumplir con alguno de los objetivos siguientes:

- Reducir la movilidad o solubilidad del contaminante; con esto garantizar que al tener lo menos móvil posible a un contaminante se reduzca el riesgo de propagación del mismo en otros medios.
- Mejorar el manejo mediante del contaminante mediante la formación de materiales sólidos sin líquidos libres para evitar su dispersión.
- Disminuir la superficie expuesta a la transferencia o pérdida de los contaminantes; con esto evitamos la contaminación de otros materiales.

El nombre de esta técnica describe las dos etapas fundamentales en las que está basada; primero la solidificación, que es referida al cambio de las propiedades físicas necesarias para poder producir un material sólido, este cambio puede o no envolver también reacciones químicas entre el contaminante y el aditivo;

y la estabilización, que se refiere a la conversión del material contaminante en una forma menos tóxica o menos móvil, para esto es necesario regularmente el uso de procesos fisicoquímicos como la solidificación.

#### *4.1.2 Aplicaciones de la Solidificación / Estabilización.*

Este tipo de tratamiento es usado para diferentes tipos de materiales y concentraciones; algunos se indican en la tabla siguiente:

Tipo de Residuo	Posibilidad de tratar por Solidificación/ Estabilización (S/S)
Material flamable	S/S
Corrosivos	S/S
Bario	S/S
Cadmio	S/S (No baterías)
Cromo	S/S
Plomo	S/S
Mercurio	S/S (<250mg/kg de Hg total)
Selenio	S/S
Plata	S/S
Lodos de aguas residuales	S/S
Cianuro gastado	S/S
Producción de HC Clorados o alifáticos	S/S

Tabla 1. Aplicaciones de la S/S para distintos tipos de residuos.

Tabla modificada del EPA Technical Resource Document. (1993, p 24-28)

El proceso de estabilización / solidificación ha sido aplicado a una enorme variedad de residuos como municipales, nucleares, aguas residuales y lodos. Algunos tipos de contaminantes tratados con esta técnica son: compuestos orgánicos volátiles, bifenilos policlorados, metales, asbestos y cianuros; es importante aclarar que en el caso de los compuestos orgánicos volátiles (VOC's), éstos no son el residuo principal a tratar sino son contaminantes secundarios que pueden ser manejados solamente en bajas concentraciones, ya que para que pudieran integrarse al tratamiento por solidificación / estabilización es necesario un tratamiento previo.

La solidificación / estabilización en muchos casos suele ser la única forma de tratamiento para residuos complejos.

Los procesos de solidificación / estabilización sirven para tratar grandes extensiones de tierra contaminada tanto in situ como cuando el material es

excavado y removido, y se puede aplicar exitosamente ex situ. En este tipo de tratamientos los materiales no representan costos elevados, por lo que es una opción muy competitiva en comparación con otros procesos. Los experimentos desarrollados hacia la matriz del material solidificado / estabilizado, han demostrado que mediante procesos físicos y químicos se disminuye la movilidad del contaminante.

En el caso de los materiales conteniendo compuestos inorgánicos, semivolátiles u orgánicos no volátiles. Para este tipo de residuos es necesario un estudio de tratabilidad para elegir el mejor proceso de tratamiento.

En el caso de los materiales orgánicos, no se puede asegurar totalmente que éstos puedan tener una fuerte interacción con la matriz para resistir los ataques de sustancias agresivas de tipo No polar.

#### *4.1.3 Estudio para la elección de tecnologías de tratamiento*

En este sentido, es importante señalar que, para poder tener altas probabilidades de éxito en la implementación de cualquier tecnología de tratamiento, es necesario realizar una correcta selección, evaluación y realizar una búsqueda completa acerca de la posibilidad de optimización en dicha técnica; la base de esta revisión general está definida claramente por el tipo de residuo a manejar, por lo que se tienen que definir las características del contaminante así como los tipos de tratamiento adecuados.

#### 4.1.3.1 Caracterización de los residuos

Los contaminantes poseen algunos materiales como metales, compuestos metálicos, materiales orgánicos y aniones; según el tipo de material contaminante se definirá el tipo de proceso de tratamiento.

En el caso de los metales se incluyen sus sales e iones, estos materiales no se pueden destruir por métodos químicos o térmicos. Regularmente se utilizan tecnologías de extracción o lavado, o inmobilizaciones por estabilización / solidificación. Aunque los costos de tratamiento dependen de la cantidad, tipo y forma en que estén presente los metales. Algunos de los más comunes son:

<b>Contaminante</b>	<b>Industria desechadora</b>
Aluminio	Acabados metálicos
Arsénico	Herbicida
Antimonio	Manufactura de baterías.
Cadmio	Lodos de baterías
Cromo	Plantas eléctricas
Cobre	Arena de fundición
Plomo	Lodos de baterías
Níquel	Lodos de acabados metálicos
Zinc	Lodos de baterías

Tabla 2. Tipos de desechos e industria generadora.

Tabla modificada del EPA Technical Resource Document (1993, 58-62)

Esta técnica también es útil para algunas especies no metálicas de tipo inorgánico, es necesario realizar una caracterización completa que incluya la revisión de las características físicas, químicas y peligrosas de los materiales. Una vez realizada la caracterización se determina si es posible

tratar los contaminantes mediante esta técnica, se determina el tipo de residuo que se marque como objetivo así como las posibles interferencias para la técnica, que pueden ser causadas por las combinaciones que pueden existir. Una vez determinados todos estos puntos se necesita realizar una búsqueda para elegir el material “ligante” que mejor pueda estabilizar a los contaminantes a tratar, para el caso específico de esta tesis se usará el Cemento pórtland Tipo I.

De los ligantes inorgánicos el cemento Pórtland presenta una enorme diversidad de aplicaciones sobre un rango amplio de residuos peligrosos. Dado que el cemento es un material muy común en construcción, usarlo resulta accesible y poco caro en comparación con otros proceso de tratamiento que involucran intensivamente energía tales como la vitrificación o la incineración.

Algunas de las ventajas y desventajas de los procesos de estabilización / solidificación se mencionan en la tabla siguiente:

<b>VENTAJAS</b>	<b>DESVENTAJAS</b>
Disponibilidad del material	Sensibilidad de la calidad del producto a altas concentraciones de impurezas
Bajo costo de materiales y equipo de mezclado	Cierta porosidad del desecho tratado
Uso de materiales naturales para la matriz de concreto	Aumento en el volumen del residuo al añadir el agente ligante
Capacidad para realizar una barrera física fuerte contra algunas adversidades.	Experiencia necesaria para una aplicación exitosa
Flexibilidad para diferentes aplicaciones.	
Baja variabilidad en composición	
Conocimiento del comportamiento y de sus reacciones	

Tabla 3. Ventajas y desventajas del uso de cemento Pórtland.

Algunos materiales que pueden ser usados en esta técnica se muestran en la tabla siguiente:

<b>Contaminante</b>	<b>Tipo de residuo</b>
Ácido residual	Solución para lavado metálico
Ácidos / Metales	Lodos
Ácido residual / Orgánicos	Lodos
Residuos cáusticos	Residuos de pinturas metálicas
Fluoruros y metales	Lodos de fluoruro de calcio
Fluoruro y orgánicos	Residuos de refinería petrolera
Oxalatos	Pulpas de licor gastado

Tabla 4. Tipo de residuo y contaminante.

Tabla modificada del EPA Technical Resource Document (1993, 63)

Para poder determinar si cierta zona o cierto contaminante puede tratarse mediante la técnica de Estabilización / Solidificación, es necesario realizar un estudio de "tratabilidad" el cual consiste en determinar la compatibilidad del contaminante con la técnica, mediante el estudio de sus características y propiedades, y una vez obtenidos estos datos poder asegurar que el material pueda ser tratado de manera correcta.

De este estudio de tratabilidad se pueden obtener datos de tipos tanto físicos como químicos y peligrosos; de lo cuales se pueden mencionar los siguientes:

<b>Físicos</b>	<b>Químicos</b>	<b>Peligrosos</b>
Gravedad esp.	pH	Inflamabilidad
Permeabilidad	Lixiviabilidad	Toxicidad
Estado físico	Potencial RedOx	Reactividad
Sólidos totales	Contenido de sal	Corrosividad
Tamaño de part.		Radioactividad
Viscosidad		

Tabla5. Propiedades físicas, químicas y peligrosas de los residuos.

#### 4.1.3.1.1 Residuos peligrosos

En el caso de los materiales peligrosos que pueden ser tratados mediante los procesos de estabilización / solidificación tenemos lodos, material radioactivo, bajo ciertas circunstancias Bifenilos Policlorados (PCB's) y Compuestos orgánicos volátiles (COV's), los metales pesados como plomo, cadmio, níquel y cromo son también materiales que pueden ser bien tratados mediante la técnica de estabilización / solidificación por cementación.

##### 4.1.3.1.1.1 Plomo

###### Características Generales

El plomo es un elemento químico cuyas características se enumeran en la tabla siguiente:

Nombre	Plomo
Número Atómico	82
Valencia	2.4
Electronegatividad	1.9
Radio Covalente	1.47 Å
Radio iónico	1.20 (+2) Å
Masa Atómica (g/mol)	207.2
Densidad (g/ml)	11.4
Punto de ebullición °C	1725
Punto de fusión °C	327.4

Tabla6. Propiedades del Plomo

Este elemento es un metal pesado de color azulado con una densidad de 11.4 g/ml. Es flexible e inelástico, se funde a 327°C e hierve a 1725°C. Este material es resistente al ataque de los ácidos sulfúrico y clorhídrico, pero

cuando es sometido a ácido nítrico se disuelve con lentitud; este material forma tanto sales de plomo de los ácidos y sales metálicas del ácido plúmbico. El plomo puede formar sales, óxidos y compuestos órgano metálicos.

Los compuestos más importantes son los óxidos y el tetraetilo de plomo. Forma aleaciones con muchos metales y es así como es usado generalmente; se usa combinado con estaño, cobre, arsénico, antimonio, bismuto, cadmio y sodio tienen importancia industrial.

Los compuestos de plomo son tóxicos y es posible que exista envenenamiento tanto por exposición prolongada como por el uso inadecuado del material. En cuestión de envenenamiento el polvo y el vapor son los vectores principales aunque también el envenenamiento puede llevarse a cabo mediante la absorción a través de la piel en el caso de compuestos órgano plúmbicos.

Es muy raro poder encontrar el plomo en su estado elemental, el mineral más común es el sulfuro.

Este metal es utilizado en la industria de la fabricación de acumuladores; aunque también es utilizado en la fabricación de tetraetilplomo, forros para cables, elementos de construcción, pigmentos, soldadura suave y municiones.

Dado que el plomo presenta una excelente resistencia a la corrosión, encuentra un amplio uso en construcción principalmente en la industria química.

Resiste el ataque de los ácidos dado que forma su propio revestimiento protector de óxido; por esta característica el plomo se usa mucho en la fabricación y el manejo de ácido sulfúrico.

También es usado como protector de las máquinas de rayos X y como blindaje contra la radiación. En pigmentos esta decreciendo en volumen el uso del plomo, el más importante es el  $2\text{PbCO}_3 \cdot \text{Pb(OH)}_2$ .

El plomo es usado en gran variedad de sus compuestos, como los silicatos, carbonatos y sales de ácidos orgánicos. Los silicatos de plomo son usados en la fabricación de vidrio y cerámica.

El azuro de plomo es el detonador estándar para los explosivos. Los arseniatos de plomo se emplean en grandes cantidades como insecticidas.

#### Efectos sobre la salud

Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), el plomo es uno de los cuatro metales con mayor efecto dañino sobre la salud humana. Es posible que ingrese al cuerpo humano por comida, agua y aire. El plomo puede ingresar al cuerpo por comida en un 65% de las veces y puede ingresar mediante fruta, vegetales, carnes, granos, mariscos, refrescos y vino conteniendo una cantidad significativa de plomo. También el humo de cigarro puede contener plomo en cantidades pequeñas.

Puede ingresar en el cuerpo por agua a través de la corrosión de tuberías; esto ocurre regularmente cuando el agua es ligeramente ácida, por lo que es necesario ajustar el pH de las aguas potables.

El plomo no otorga ningún beneficio esencial en el cuerpo humano, por el contrario principalmente causa daños como:

• Perturbación de la biosíntesis de hemoglobina y anemia
• Incremento en la presión sanguínea
• Daño a los riñones
• Abortos
• Perturbación del sistema nervioso
• Daño al cerebro
• Daño en el esperma y en la fertilidad del hombre
• Disminución de habilidades de aprendizaje en el niño
• Alteración en el comportamiento de los niños.

TABLA 7 Daños ocasionados por plomo en el cuerpo

Los niveles de plomo en la sangre oscilan entre los 15 y 40  $\mu\text{g}/\text{dl}$  de sangre. La Organización Mundial de la Salud (OMS) considera como límite aceptable hasta 40, inaceptable de 41 a 60, y peligroso cuando rebasan los 60  $\mu\text{g}/\text{dl}$  de sangre. El promedio aceptable es de 20  $\mu\text{g}/\text{dl}$  de sangre. Análisis químicos ha revelado que entre los adultos, alrededor del 95% del plomo en el cuerpo se almacena en los huesos; este porcentaje es de aproximadamente 70% en los niños.

Algunos de los síntomas de envenenamiento son dolores de cabeza, vértigo e insomnio. En los casos agudos, se presenta estupor, el cual progresa hasta el coma y termina en la muerte. El control médico, hacia los empleados

relacionados con el uso del plomo, compete en exámenes de sangre y orina para la búsqueda de este elemento.

Efectos sobre el ambiente.

El plomo es encontrado en el ambiente regularmente como resultado de las actividades humanas, tal como la gasolina en el plomo, lo cual no es un ciclo natural del plomo y da como resultado después de su combustión la aparición de cloruros, bromuros u óxidos de plomo.

Estas sales, si son grandes, se precipitan en el suelo o la superficie de las aguas y si son pequeñas viajarán a través del aire y permanecerán en la atmósfera, y cierta cantidad caerá con la lluvia.

El plomo puede terminar en el agua y suelos a través de la corrosión de las tuberías de plomo en los sistemas de transporte y a través de la corrosión de pinturas con plomo; este compuesto no se puede romper pero puede convertirse a otros compuestos.

Este metal puede acumularse en organismos acuáticos y del suelo. Las funciones del fitoplancton pueden ser perturbadas cuando el plomo interfiere con estas, la producción de oxígeno es la principal función del fitoplancton. El plomo es bioacumulable individualmente y es posible que pueda entrar a las cadenas alimenticias.

Por todas estas características la EPA limita el plomo en aire en 1.5 microgramos por metro cúbico y en agua a 15 microgramos por litro, en cuanto a la legislación mexicana, en base a la NOM-052-SEMARNAT-1996, el límite máximo permisible es de 5 partes por millón.

#### 4.1.3.1.1.2 Cadmio

Características generales.

El cadmio es un elemento químico cuyas propiedades son enumeradas en la tabla siguiente:

Nombre	Cadmio
Número atómico	48
Valencia	2
Electronegatividad	1.7
Radio Covalente (A)	1.48
Radio iónico (A)	.97(+2)
Masa atómica (g/mol)	112.4
Densidad (g/ml)	8.65
Punto de ebullición (°C)	765
Punto de fusión (°C)	320.9

Tabla 8. Propiedades del cadmio.

El cadmio es un elemento que se encuentra de manera natural en la corteza terrestre, es encontrado generalmente como mineral combinado con otros elementos como oxígeno, cloro o azufre; no en estado libre.

Las rocas y el suelo tienen cadmio en pequeñas cantidades. Este metal es extraído de la producción de otros metales como el zinc, el plomo y el cobre. El reciclado también es una fuente importante de producción. Se obtiene por método hidrometalúrgico a partir de polvos arrastrados por los gases de tostación de los sulfuros de los elementos mencionados, se concentra de un 7 a un 10% de cadmio y se lixivian en un medio sulfúrico; la adición de polvo de cinc provoca la precipitación del cadmio metálico que se separa del resto por evaporación o destilación a unos 400°C. No se oxida fácilmente y tiene muchas aplicaciones como baterías, pigmento, capas metálicas y plásticos.

Compuestos de cadmio como los silicatos o los boratos presentan fosforescencia o fluorescencia y se usan como componentes de las sustancias fosforescentes de televisión en blanco y negro y activadores para producir el color azul y verde de tubos de televisión a color.

Efectos sobre la salud.

El cadmio y sus compuestos pueden ser muy tóxicos. Después de que el cadmio es usado entra en el ambiente mayormente por el suelo ya que es encontrado en estiércoles y pesticidas. El humano lo adquiere principalmente a través de los alimentos, aunque cuando la gente fuma se expone a niveles altos. Este humo transporta el cadmio a los pulmones y de aquí la sangre se encargará de distribuirlo a todo el cuerpo; primero lo lleva al hígado, donde se forman complejos que son transportados a los riñones donde daña el mecanismo de filtración por lo que lleva mucho tiempo antes de que el cadmio acumulado en los riñones sea excretado y otros efectos en la salud provocados por su presencia pueden ser:

• 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
• Desórdenes psicológicos
• Posible daño en el ADN o desarrollo de cáncer.

TABLA 9 Daños ocasionados por cadmio en el cuerpo

Otra fuente de exposición es cuando la gente vive cerca de vertederos de residuos peligrosos o cerca de industrias de refinería del metal. El respirar cadmio puede causar la muerte. Largas exposiciones como en los baños de recubrimiento de metales con cadmio presentan enorme problemas de toxicidad.

La exposición a polvo de cadmio no debe exceder de 0,01 mg/m<sup>3</sup> (8 horas diarias). La concentración límite (máximo), durante un período de 15 minutos no deberá exceder de 0,14 mg/m<sup>3</sup>. Para el humo de óxido de cadmio (es tan peligroso como el fósforo), la exposición no debe exceder (8 horas diarias) de 0,05 mg/m<sup>3</sup>, y la concentración máxima no debe exceder de 0,05 mg/m<sup>3</sup>. Puede que estos valores sean demasiados altos y haya que rebajar la exposición.

Efectos sobre el ambiente.

Aproximadamente se liberan al ambiente de forma natural 25,000 toneladas al año en todo el mundo. La mitad de este cadmio es liberado en los ríos a través de la descomposición de rocas, así como fuegos forestales y volcanes. El resto es liberado por actividades humanas. Las aguas residuales con cadmio terminan en los suelos, esta agua provienen de la producción de Zinc, minerales de fosfato y bioindustrias del estiércol.

El cadmio de las corrientes residuales pueden también ingresar 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 son 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. Cuando el cadmio está presente en el suelo este puede ser extremadamente peligroso, y la toma a través de la comida puede incrementar. Los suelos que son ácidos aumentan la toma de cadmio por las plantas. Esto es un daño potencial para los animales que dependen de las plantas para sobrevivir. El cadmio puede acumularse en sus cuerpos. Las vacas, por ejemplo, pueden tener grandes cantidades de cadmio en sus riñones debido a esto.

Las lombrices y otros animales esenciales para el suelo son extremadamente sensibles al envenenamiento por cadmio. Pueden morir a muy bajas concentraciones y esto tiene consecuencias en la estructura del suelo. Cuando las concentraciones de cadmio en el suelo son altas esto puede influir en los procesos del suelo de microorganismos y amenazar a todo el ecosistema del suelo.

En ecosistemas acuáticos el cadmio puede bioacumularse en mejillones, ostras, gambas, langostas y peces. La susceptibilidad al cadmio puede variar ampliamente entre organismos acuáticos. Organismos de agua salada son más resistentes al envenenamiento por cadmio que organismos de agua dulce. Animales que comen o beben cadmio algunas veces tienen la presión sanguínea alta, daños del hígado y daños en nervios y el cerebro, además se ha comprobado que es cancerígeno.

La respiración de altos niveles del cadmio daña seriamente los pulmones y puede causar la muerte

Por estos problemas de toxicidad; la EPA ha fijado un límite de 5 porciones de cadmio por mil millones porciones de agua potable (5 ppb ). La EPA no permite cadmio en los pesticidas. La industria textil limita la cantidad de cadmio en colorantes a 15 porciones por millón (15 ppm).

En el lugar de trabajo se ha limitado la presencia de cadmio en aire a 100 microgramos de cadmio por metro cúbico (100  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) como humos del cadmio y 200  $\mu\text{g}$  cadmio/ $\text{m}^3$  como polvo de cadmio.

En cuanto a la legislación mexicana, en base a la NOM-052-SEMARNAT-1996, el límite máximo permisible es de 5 partes por millón.

#### 4.1.3.1.1.3 Níquel.

##### Características generales

El níquel es un metal duro, blanco plateado, dúctil y maleable; sus principales características se enumeran en la tabla siguiente:

Nombre	Níquel
Número Atómico	28
Valencia	2,3
Electronegatividad	1,8
Radio Covalente (A)	1,21
Radio iónico (A)	,78 (+2)
Masa atómica (g/mol)	58,71
Densidad (g/ml)	8,9
Punto de ebullición (°C)	2730
Punto de fusión (°C)	1453

Tabla. 10 Propiedades del níquel.

El níquel es encontrado con frecuencia en muchos meteoritos y frecuentemente se utiliza para determinar si un mineral procede de meteoritos o no. El níquel es un elemento bastante abundante, constituye aproximadamente el .008% de la corteza terrestre y un .01% de las rocas ígneas. Dos minerales importantes son los sulfuros de hierro y níquel, pentlandita y pirroíta, aunque el gamierita también es importante en el comercio. En plantas y animales el níquel está presente en pequeñas cantidades.

El níquel metálico es fuerte y duro y cuando está finamente dividido es color negro. Resiste la corrosión alcalina y no se inflama en trozos grandes, pero los alambres muy finos pueden incendiarse. Se disuelve con lentitud en ácidos diluidos liberando hidrógeno. En forma metálica es un agente reductor fuerte. La mayor parte de los compuestos de níquel son verdes o azules a causa de la hidratación o de la unión de otros ligandos al metal.

Este mineral es estable al agua y al aire. Los hidróxidos alcalinos no lo atacan. Es usado en aleaciones con todos los metales excepto plomo, plata, torio y metales alcalinos. Los usos que puede tener el níquel es en las tuberías de aleaciones de cobre y níquel así como la fabricación de monedas, monedas, blindajes y cámaras acorazadas.

El sulfato y los óxidos son importantes. Se emplean en el coloreado de verde de los vidrios, también en cerámicas. Los hidróxidos de níquel se emplean en las baterías de níquel y cadmio.

Efectos sobre la salud.

El níquel está presente en la naturaleza a niveles pequeños. Usan el níquel para muchas aplicaciones diferentes. La más común es el uso como

ingrediente del acero y otros productos metálicos. Este puede ser encontrado en productos metálicos comunes como la joyería.

En los alimentos se encuentra en pequeñas cantidades, aunque en el chocolate y las grasas tienen elevados niveles; el níquel también es encontrado en detergentes. Los fumadores tienen un alto grado de exposición al níquel a través de sus pulmones; aunque también puede ser expuesto por respirar aire, beber agua o comer comida y fumar cigarrillos. En pequeñas cantidades el níquel es esencial pero cuando las concentraciones son muy altas se tienen consecuencias como las que se mencionan:

• 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.

Tabla 11 Daños ocasionados por níquel en el cuerpo

Ni el níquel ni sus combinaciones parecen venenosos (excepto el níquel tetracarbonilo). El contacto prolongado con el metal produce sarna de níquel. Los vapores y polvo del metal y del sulfuro son probablemente cancerígenos. La exposición al níquel y sus compuestos solubles no debe exceder de  $0,05 \text{ mg/cm}^3$ .

Efectos sobre el ambiente.

El níquel es liberado al aire por las plantas de energía y las incineradoras de basura, posteriormente se deposita en el suelo o cae después de reaccionar con las gotas de lluvia. Para ser eliminado por el aire es necesario un periodo de tiempo muy largo. El níquel puede terminar también 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 llegarán a inmovilizarse. Las altas concentraciones de níquel en suelos arenosos provocan daño en las plantas y en aguas superficiales puede ocasionar la disminución del rango de crecimiento de las algas. Los microorganismos pueden sufrir también una disminución del crecimiento debido a la presencia de níquel aunque pueden desarrollar resistencia. Para los animales, cuando excede la máxima cantidad tolerable puede causar varios tipos de cáncer en diferentes lugares del cuerpo de los animales. Este metal no se biomagnifica en la cadena alimenticia. en cuanto a la legislación mexicana, en base a la NOM-052-SEMARNAT-1996, el límite máximo permisible es de 5 partes por millón.

#### 4.1.3.1.1.4 Cromo

Características generales

El cromo es un metal blanco plateado que es duro y quebradizo, cuyas principales características químicas son:

Nombre	Cromo
Número Atómico	24
Valencia	2,3,4,5,6
Electronegatividad	1,6
Radio Covalente (A)	1,27
Radio iónico (A)	,69 (+2)
Masa atómica (g/mol)	51,996
Densidad (g/ml)	7,19
Punto de ebullición (°C)	2665
Punto de fusión (°C)	1875

Tabla 12 Características del cromo.

Este metal es relativamente suave y dúctil cuando no esta sujeto a tensión o cuando esta muy puro. Sus principales usos son la producción de aleaciones anticorrosivas de gran dureza y resistentes al calor y como recubrimiento para galvanizados.

El cromo elemental no se encuentra en la naturaleza, su mineral más importante por abundancia es la cromita.

El cromo galvanizado y pulido es color blanco azulado brillante. Su poder reflejante es 77% del de la plata. Sus propiedades como dureza y la resistencia ala tensión determinan su capacidad de utilización. El cromo tiene una capacidad relativamente baja de forjado, enrollamiento y propiedades de manejo. Cuando se encuentra libre totalmente de oxígeno, hidrógeno, carbón y nitrógeno es muy dúctil y puede ser forjado y manejado. Aunque resulta complicado almacenarlo libre de estos elementos.

El cromo forma tres series de compuestos con otros elementos y son representados según los óxidos de cromo; cromo con valencia dos, CrO óxido de Cr(II); cromo con valencia tres, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; óxido crómico; y con valencia seis, CrO<sub>3</sub>; anhídrido de ácido crómico. También son conocidos los

peróxidos, ácido percrómico y perchromatos. Los halogenuros de cromo son compuestos bastante comunes de este metal.

Efectos sobre la salud.

La gente puede estar expuesta al cromo al respirarlo, comerlo o beberlo y a través del contacto con la piel con cromo o con compuestos del mismo. En agua y aire el nivel de cromo es bajo. En agua para beber el nivel de Cromo es usualmente bajo como en el agua de pozo, pero el agua de pozo contaminada puede contener Cromo hexavalente, el cual representa un grave peligro. La mayor parte del cromo es ingerido por comida que contiene cromo III como vegetales, frutas, carnes, levaduras y granos. El cromo III es un nutriente esencial para los humanos y la falta de este puede causar trastornos metabólicos, condiciones del corazón y diabetes. El cromo III en exceso puede causar erupciones cutáneas.

El cromo VI es un peligro mayormente para las personas que trabajan en la industria del acero y textil. La gente que fuma tabaco también puede tener un alto grado de exposición al cromo. El cromo VI es conocido porque causa varios efectos sobre la salud. Si es un compuesto en los productos de la piel puede ocasionar reacciones alérgicas como erupciones cutáneas. Cuando el cromo VI se respira puede irritar la nariz y causar sangrado. Aunque puede causar otros problemas como:

• Erupciones cutáneas
• 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

Tabla 13 Daños ocasionados por el cromo en el cuerpo.

Efectos sobre el ambiente.

Dependiendo de la clase de cromo, los efectos sobre los organismos serán diferentes. 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. Las actividades humanas que incrementan las concentraciones de Cromo III y Cromo VI son el acero, las peleterías y las industrias textiles, pintura eléctrica y otras aplicaciones industriales del cromo VI. Estas aplicaciones incrementan la concentración de cromo en agua. El cromo III es un elemento esencial para organismos que puede interferir en el metabolismo del azúcar y causar problemas de corazón cuando la dosis es muy baja. El cromo VI es mayoritariamente tóxico para los organismos ya que puede alterar el material genético y causar cáncer.

Cuando la cantidad de cromo en el suelo aumenta, la concentración en los cultivos también aumenta. La acidificación del suelo puede también influir en la captación de cromo por los cultivos. Las plantas usualmente absorben Cromo III en ciertos niveles ya que si se exceden pueden ocurrir efectos negativos. En los animales el cromo puede causar problemas respiratorios, puede contraer enfermedades, defectos de nacimiento, infertilidad y

formación de tumores. en cuanto a la legislación mexicana, en base a la NOM-052-SEMARNAT-1996, el límite máximo permisible es de 5 partes por millón.

Por todas estas características de toxicidad tanto para el humano como para el ambiente del Cromo, Níquel, Plomo y Cadmio; se ha decidido trabajar con sales de Cromo, Níquel y con Plomo para poder, en base a los resultados obtenidos, establecer los lineamientos óptimos para esta técnica. A continuación se mencionan algunos puntos necesarios para el tratamiento de los metales.

#### 4.1.3.2 Técnicas de pretratamiento para solidificación de residuos.

Los sistemas de pretratamiento pueden ser usados para obtener ciertas condiciones en el desecho y así asegurar una mejora en las características del material una vez que ha sido solidificado y estabilizado. Algunas de las técnicas de pretratamiento son:

- Destrucción de materiales como ácidos u oxidantes, debido a que estos pueden reaccionar con los agentes solidificantes como el cemento.
- Reducción del volumen del residuo para ser solidificado usando procesos de desaguado.

#### 4.1.3.3 Limitaciones tecnológicas.

Algunos de los mecanismos que pueden interferir con el proceso de Estabilización / Solidificación, pueden estar dados por un mezclado incompleto dado por la presencia de un elevado porcentaje de humedad o por contener químicos de tipo orgánico resultando en un humedecimiento parcial o solo la capa de las partículas del desecho con los agentes y la agregación de desechos no tratados formando una especie de terrones.

Cuando los residuos tienen un elevado contenido de arcillas también puede ocurrir una interferencia con la obtención de un mezclado uniforme con los agentes estabilizantes / solidificantes, o la superficie de arcillas pueden adsorber reactantes claves interrumpiendo polimerización y por lo tanto dejando incompleto el proceso de cementación. Cuando se tienen sustancias con un alto contenido de sustancias hidrofílicas puede interferir con la solidificación evitando que el gel formado tome la estructura adecuada para llevar a cabo el proceso de cementación.

Los mecanismos químicos también pueden interferir con la estabilización / solidificación por cemento; estos mecanismos pueden ser adsorción química, precipitación o nucleación. Algunos químicos que pueden ser fuentes de interferencia pueden ser aceites y grasas, fenoles, agentes quelantes y etilenglicol.

En el caso específico de los compuestos orgánicos volátiles, se ha comprobado, mediante pruebas de laboratorio, que mediante el proceso de cementación puede perderse hasta un 90% de los VOC's debido a la reacción exotérmica presente en la cementación y en el proceso de curado puede perderse el 60% del VOC remanente.

#### 4.1.3.4 Caracterización del lugar donde se encuentran los residuos.

Es necesario realizar una caracterización del sitio donde se encuentran presentes contaminantes para establecer que tipo de proceso de tratamiento es el más adecuado para usarse.

Una vez realizada esta caracterización se podrá obtener información de los estudio hidrológicos, geológicos, climatológicos, así como de las actividades que se llevaron a cabo en ese lugar para determinar que tipos de residuos pueden estar presentes en la zona, también es necesario determinar puntos como la existencia de contaminación en mantos freáticos, la velocidad y dirección de agua subterránea y del aire, proximidad a áreas populares, uso de sitio post remediación y las implicaciones que pueden tenerse por la capacidad del sitio para contener el producto final ya estabilizado y solidificado.

#### *4.1.4 Técnicas de tratamiento de Solidificación/ Estabilización..*

Una vez desarrolladas las caracterizaciones tanto del sitio como de los contaminantes puede definirse cual es la técnica de tratamiento más adecuada.

En el caso de la solidificación / estabilización existen distintas técnicas como, vitrificación, ceramización y cementación, siendo esta última el objetivo de esta tesis.

#### 4.1.4.1 Cementación.

Tal vez la única aplicación que el cemento Pórtland pueda tener en el manejo de residuos es en la Estabilización / Solidificación. Esta técnica se refiere al mezclado con cemento dentro del medio contaminado o en los desechos para inmovilizar los contaminantes con el material tratado.

Cuando se mezcla cemento Pórtland con un desecho que contiene líquidos libres, se obtiene un material con una integridad física sólida, además de que las propiedades químicas de la hidratación del cemento Pórtland son usadas para disminuir la toxicidad de algunos constituyentes tóxicos.

La cementación es usada para tratar residuos industriales y hacerlos seguros para su disposición; además es usado para tratar suelos contaminados, sedimentos o 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 de Estabilización / Solidificación por cementación puede ser aplicado tanto in situ como ex situ. La técnica in situ puede traer beneficios extras tales como la mejora de las condiciones del suelo para la construcción de estructuras y pavimentos.

De acuerdo con la Environmental Protection Agency (EPA) este proceso es el más frecuentemente usado para el tratamiento de sitios contaminados, siendo elegido el 25% de las veces.

Este proceso no destruye los compuestos químicos solamente evita que se muevan. En el caso de la solidificación, se refiere a mezclar suelo o lodo contaminado con cemento lo que causa un endurecimiento del suelo. La mezcla forma un sólido que puede ser dejado en el sitio o removido. El proceso de solidificación previene el esparcimiento de los químicos en el

ambiente. La lluvia o el agua no puede disolver los químicos ni moverlos a través del suelo tratado. La estabilización cambia los químicos peligrosos en sustancias menos peligrosas o menos móviles. Por ejemplo en el caso de los metales, al unirlos con el cemento éstos interactúan para disminuir su solubilidad y evitar su movimiento a través del suelo.

Una vez formados los bloques de cemento conteniendo los materiales contaminantes es necesario aplicar una serie de pruebas para garantizar la exitosa aplicación de la técnica y la minimización de riesgos de lixiviación o escape de los contaminantes.

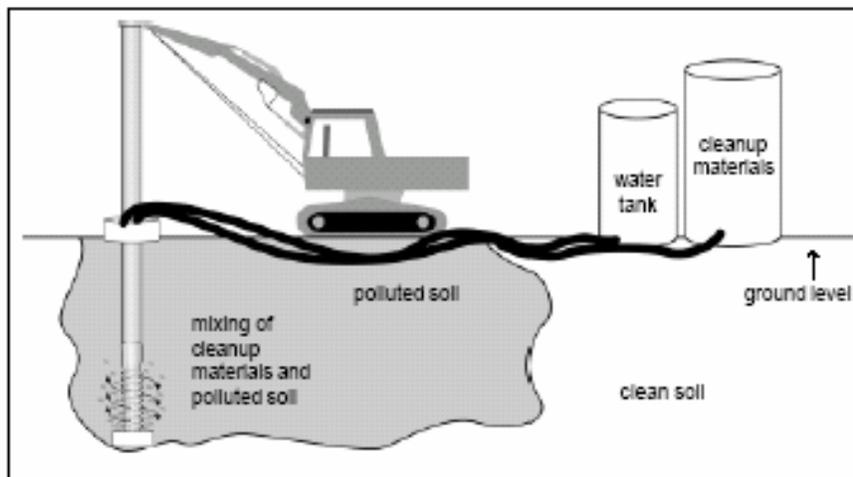


Imagen 1. Proceso de cementación

Las características de los materiales y la técnica se describen a continuación.

#### 4.1.4.1.1 Impacto Ambiental.

La industria en México, principalmente la pequeña y mediana, representa una enorme fuente de residuos que, muchas veces por su pobre economía,

emiten al medio ambiente sin tratamiento previo, algunas veces concientes de la problemática y del daño que pueden causar estas acciones. Empresas como curtidurías, fabricantes de acumuladores, plantas eléctricas y de acabados metálicos, representan la principal fuente emisora de metales pesados al ambiente, como se ha mencionado anteriormente, las características de los metales pesados tienen un impacto de alto grado tanto en la salud humana como en la ambiental; es por esto que las técnicas de estabilización como técnicas de pretratamiento; surgen como etapa intermediaria en la espera del desarrollo de tecnologías que puedan deshacerse completamente de los contaminantes.

#### 4.1.4.1.2 Toxicidad.

La toxicidad de los metales pesados, principalmente está dada por contaminación a los mantos freáticos mediante la lixiviación de las emisiones al medio ambiente por parte de empresas generadoras de este tipo de residuo, esta contaminación de los mantos freáticos, se podría ver reflejada en daños a la salud de los humanos así como a la fauna y flora natural, en el caso de la afectación a los seres humanos, ésta se ve reflejada con la adquisición de enfermedades, principalmente cáncer y daño al sistema nervioso. En el caso del daño al medio ambiente, la lixiviación y la contaminación de aguas superficiales, trae consigo la bioacumulación del contaminante en algunas especies marinas y la muerte en otras, así como el daño en el suelo a los microorganismos nativos, afectando así todo el ecosistema del suelo.

#### 4.1.4.1.3 Estabilización.

Esta técnica al aplicarse correctamente, estabiliza de manera tanto física como química los contaminantes metálicos, mediante la reacción química que liga a los componentes en una especie de “red” por lo que los materiales son atrapados mediante enlaces con los componentes del cemento, de esta manera se evita que anden “suelos” y por lo tanto que exista el riesgo de tener alguna lixiviación o escape de estos materiales, la otra forma de “atrapamiento” es de manera física mediante la formación de un bloque o estructura sólida que impide la salida de los materiales destinados a ser inmovilizados.

## **4.2 CEMENTO.**

### *4.2.1 Definición*

En la búsqueda por encontrar una definición completa y correcta de lo que es el cemento se han encontrado algunas definiciones de diferentes autores, los cuales mencionan lo siguiente:

De acuerdo con Lea (1970, p.1); “El cemento puede ser definido como una sustancia adhesiva capaz de unir fragmentos o masas de materiales sólidos en un material compacto”.

Otro autor Kosmakta (1992, p.13) menciona que “El cemento es un compuesto de silicato de calcio hidráulicos que fraguan y endurecen al reaccionar químicamente con el agua”

De acuerdo con la definición que aparece en la Norma Mexicana NMX-C-414-ONNCCE, “El cemento Pórtland es el que proviene de la pulverización del clínker obtenido por fusión incipiente de materiales arcillosos y calizos, que contengan óxidos de calcio, silicio, aluminio y fierro en cantidades convenientemente dosificadas y sin más adición posterior que yeso sin calcinar, así como otros materiales que no excedan del 1% del peso total y que no sean nocivos para el comportamiento posterior del cemento, como pudieran ser los álcali”

Con estas definiciones podemos concluir que el cemento es una sustancia adhesiva proveniente de la pulverización del clínker, que al reaccionar

químicamente con el agua fragua y endurece convirtiéndose en un material duro y resistente.

El cemento Pórtland es producido por la pulverización del clínter, el cual está formado principalmente por silicatos hidráulicos de calcio, aluminatos de calcio y aluminoferritos de calcio; aunque normalmente también se encuentran presentes una o más formas de sulfato de calcio.

Los materiales usados para fabricar cemento deben contar con proporciones adecuadas de óxido de calcio, sílice, alúmina y componentes de óxido de hierro.

#### *4.2.2 Materias primas para la fabricación del cemento.*

Las materias primas que se utilizan en el proceso de fabricación se pueden enumerar como siguen:

**-Caliza:** Este es un material que es extraído de las capas superficiales de cerros y montañas; en cuanto a volumen representa la parte mayoritaria para la formación total de clínter con alrededor de 80%. Es necesario que el grado de pureza del material contenga alrededor de un 95% de carbonato de calcio para evitar problemas.

**-Pizarra:** Este material es una arcilla formada por óxidos de silicio en proporción de un 45 a un 65%, óxidos de aluminio de 10 a 15%, por óxido de fierro de un 6 a un 12% y de óxido de calcio de un 4 a un 10%. Este material conforma al clínter en aproximadamente un 15% de la materia prima.

**-Sílice:** Estas arenas sílicas contienen de 75 a 90% de sílice, las cuales son agregadas para obtener el óxido de silicio requerido en la mezcla cruda.

**-Hematita:** Este material es el donador del mineral de fierro; contiene entre 75 y 90% de óxido férrico, y conforma aproximadamente entre el 1 y el 2% de la mezcla total.

**-Caolín:** Esta arcilla tiene un alto contenido de alúmina usado para fabricar el cemento blanco.

#### *4.2.3 Proceso de fabricación.*

Una vez realizada la selección de las materias primas, las rocas deben ser trituradas debido a que la alimentación de las materias primas a los molinos no deben rebasar un determinado tamaño de  $\frac{3}{4}$ ". Una vez triturados los materiales debe de existir una homogeneización de los materiales triturados para obtener homogeneización química y de tamaño; a continuación se dosifican estos materiales según la composición deseada. Mientras más molido esté el polvo crudo más fácil será la reacción química en el horno.

Hasta este momento es necesario efectuar análisis para determinar si la dosificación y la finura del polvo es la adecuada.

Posteriormente a la molienda, el crudo se homogeneiza y se transporta al calcinador; donde consta de cuatro etapas: secado, precalentamiento, precalcificación y clinkerización. En esta última etapa se alcanzan temperaturas de hasta 1450°C, a la cual el polvo calcinado reacciona químicamente y es llamado ya clínker; una vez formado el clínker se le inyecta aire a presión y se enfría hasta 40°C. El clínker es el polvo obtenido por calcinación de las materias primas. Este producto debe tener una

composición química ya determinada; y para obtenerla es necesario dosificar cuidadosamente las materias primas debido a que una falla en este proceso provocaría que existiera cal libre y que el concreto pudiera tener expansiones o grietas.

Una vez enfriado el clínker se vuelve a moler y es aquí donde se añaden algunos aditivos si es que se desea algún tipo de cemento en especial, pueden agregárseles algunos materiales como los que se mencionan a continuación:

#### Yeso

Este material que puede ser Sulfato de calcio dihidratado funciona como regulador de hidratación y fraguado, cuando reacciona con el aluminato tricálcico; ya que se produce el sulfoaluminato tricálcico, lo que ocasiona la aceleración del silicato tricálcico.

#### Puzolana

Las puzolanas son hechas a base de arcillas activadas. Este material contribuye a las resistencias mecánicas y a la resistencia a ataques agresivos; este efecto es producido cuando la sílice contenida en la puzolana se combina con la cal liberada por el cemento al hidratarse.

#### 4.2.4 Tipos y usos del cemento Pórtland.

Según de American Society for Testing of Materials (ASTM); se estipula que existen ocho tipos de cemento Pórtland, los cuales pueden enumerarse como sigue:

Tipo de cemento	Especificaciones
TIPO I	Normal
TIPO 1A	Normal, inclusivor de aire
TIPO II	De resistencia moderada a los sulfatos
TIPO IIA	De resistencia moderada a los sulfatos, inclusivor de aire
TIPO III	De alta resistencia a edad temprana
TIPO IIIA	De alta resistencia a edad temprana, inclusivor de aire
TIPO IV	De bajo calor de hidratacion
TIPO V	De resistencia elvada a los sulfatos

Tabla 14 Tipos de cemento y sus especificaciones.

##### 4.2.4.1 Cemento Pórtland Tipo I.

Este tipo de cemento es usado de manera general y cuando no sean necesarias propiedades especiales otorgadas por los componentes de otros tipos de cementos. Este cemento no resiste el ataque agresivo de algunas sustancias y es usado en pavimentos, pisos, edificios, puentes, tuberías, mamposterías y otros productos de concreto pre reforzado.

##### 4.2.4.2 Cemento Pórtland Tipo II

Este tipo de cemento responde moderadamente al ataque agresivo de sustancias corrosivas se emplea comúnmente cuando la estructura se encuentra sujeta a ataques moderados de sulfatos, por ejemplo en drenajes. Este tipo de cemento reacciona exotéricamente de manera inferior a menor velocidad que el cemento Tipo I; por lo que si existe algún límite máximo

para el calor de hidratación, se puede hacer uso confiable de este tipo de cemento; puede ser usado en estructuras de volumen grande, como en pilas de gran masa, estribos gruesos y muros de contención. Su uso reducirá las temperaturas altas.

#### 4.2.4.3 Cemento Pórtland Tipo III.

Este tipo de cemento; otorga altas resistencias de manera rápida; como límite máximo de una semana. La ventaja otorgada en este tipo de cementos es que debido a la mayor fineza de sus partículas, las cimbras pueden ser retiradas en tiempos muy cortos. En cuanto a propiedades físicas y químicas, este cemento es similar al cemento Pórtland Tipo I.

#### 4.2.4.4 Cemento Pórtland Tipo IV

Este cemento no otorga gran calidad ni velocidad de generación de calor, su resistencia es generada de manera lenta. Es recomendable su uso en obras de volúmenes muy grandes donde las estructuras requieran concreto masivo, donde el aumento de temperatura resultante del calor generado en el transcurso del endurecimiento se tenga que conservar en el valor mínimo posible.

#### 4.2.4.5 Cemento Pórtland Tipo V.

Este tipo de cemento es usado especialmente cuando se tienen concretos expuestos agresiones severas por parte de los sulfatos. La resistencia que otorga este tipo de cemento es lenta en comparación al cemento tipo I. Esta característica de resistencia a la agresión por sulfatos es atribuida al bajo contenido de aluminato tricálcico ( $C_3A$ ); debido a que esta resistencia se incrementa al disminuir la relación cemento/agua o al incluir aire, aunque es

necesario mencionar que este cemento no resiste el ataque de ácidos ni de otras sustancias fuertemente corrosivas.

#### 4.2.4.6 Cementos Tipo “A” ó con inclusión de aire.

En estos cementos se han agregado pequeñas cantidades de material incluso de aire que han sido mezcladas junto con el clinker durante su fabricación. Estos cementos producen concretos con resistencias mejoradas contra la acción de la congelación-deshielo y contra la desescamación provocada por la aplicación de productos químicos para remover el hielo. Estos concretos tienen burbujas diminutas uniformemente distribuidas y separadas entre sí.

Adicionalmente a los tipos de cemento ya mencionados, existe una variedad de cementos con propiedades especiales que a continuación se describen.

#### 4.2.4.7 Cemento Pórtland Blanco.

Este tipo de cemento Pórtland difiere del cemento gris sólo por su color; es fabricado igual al cemento tipo I o III; sin embargo el proceso de manufactura es controlado de manera tal que el producto terminado sea blanco. Este cemento es fabricado con materias que contienen poca cantidad de óxido de hierro y manganeso, que son las que proporcionan el color gris al cemento. El cemento blanco se usa principalmente para fines arquitectónicos como: muros precolados, aplanados, paneles para fachadas, pintura de cemento, pega azulejo y como concreto decorativo.

#### 4.2.4.8 Cementos hidráulicos mezclados.

Este tipo de cementos se produce al mezclar el cemento Pórtland, escorias de alto horno molidas, cenizas volantes y otras puzolanas, cal hidratada, y combinaciones de estos materiales con cemento previamente mezcladas. Los tipos de cementos mezclados reconocidos por la ASTM son los siguientes:

Tipo	Descripcion
Tipo IS	Cemento Portland de escoria de alto horno
Tipo IP y Tipo P	Cemento Portland puzolana
Tipo S	Cemento de escoria
Tipo I (PM)	Cemento Portland modificado con puzolana
Tipo I (SM)	Cemento Portland modificado con escoria.

Tabla 15 Tipos de cemento hidráulicos mezclados.

#### Cemento Tipo S

Este cemento de escoria de alto horno se puede emplear en las construcciones de concreto en general. Para producir este tipo de cemento, es necesario obtener escoria de alto horno granulada, de cierta calidad para ser molida con el clínter de cemento Pórtland, o se produce por medio de una combinación de molienda y mezclado. El contenido de escoria de alto horno de este cemento varía entre el 25 y 70% en peso. Se pueden especificar inclusión de aire, resistencia moderada a los sulfatos o moderado calor de hidratación agregando los sufijos, A, MS o MH, respectivamente.

#### Cementos Tipo IP y Tipo P

Los tipos IP y P sirven para designar los cementos Pórtland puzolana. El tipo IP es usado en cualquier tipo de construcciones en general y el P es usado cuando no se necesitan resistencias elevadas a corto tiempo. El tipo P es

usada en obras masivas como estribos, presas y pilas de cimentación. Estos tipos de cementos se fabrican moliendo clínker de cemento Pórtland junto con una puzolana apropiada; mezclando cemento Pórtland o cemento Pórtland de escoria de alto horno junto con una puzolana; o por una combinación de los dos procesos. La cantidad ideal de puzolana de los dos cementos se encuentra entre el 15% y el 40% en peso. Los cementos pueden ser denominados como inclusión de aire, resistencia moderada a los sulfatos o moderado calor de hidratación agregando los sufijos, A, MS o MH, respectivamente. Al cemento tipo P también puede designarse como de bajo calor de hidratación agregándole el sufijo LH.

#### Cemento Tipo I(PM)

Este cemento ha sido modificado con puzolana para emplearse en todo tipo de construcciones de concreto. El cemento puede ser fabricado combinando cemento Pórtland o cemento Pórtland de escoria de alto horno con una puzolana fina; esto puede ser logrado mezclando el cemento Pórtland con la puzolana; mezclando el cemento Pórtland de escoria de alto horno con la puzolana; moliendo conjuntamente el clínker del cemento Pórtland con la puzolana ó por medio de una combinación de molienda conjunta y de mezclado. En este tipo de cemento la cantidad de puzolana representa menos del 15% del cemento terminado. Los cementos pueden ser denominados como inclusión de aire, resistencia moderada a los sulfatos o moderado calor de hidratación agregando los sufijos, A, MS o MH, respectivamente.

#### Cemento Tipo S de escoria.

El cemento tipo S, de escoria, es usado en obras donde se requieran resistencias no muy elevadas. Este cemento se fabrica por medio de métodos

tales como: la mezcla de escoria molida de alto horno y cemento Pórtland; mezclando escoria molida de alto horno y cal hidratada; la combinación de mezclar escoria molida de alto horno, cemento Pórtland y cal hidratada. El contenido mínimo de escoria es de 70% del peso del cemento de escoria. Se puede designar la inclusión de aire por el sufijo A.

#### Cemento Tipo I(SM)

El cemento Pórtland modificado con escoria, tipo I(SM) se puede emplear en todo tipo de construcciones de concreto. Existen distintos métodos de fabricación como: por medio de la combinación durante la molienda del clínter de cemento Pórtland y alguna escoria granular de alto horno; por la mezcla de cemento Pórtland con alguna escoria granular de alto horno finamente molida ó por la combinación de molienda y de mezclado. El contenido de escoria es inferior al 25% del peso del cemento terminado. El cemento puede ser designado con inclusión de aire, resistencia moderada a los sulfatos o moderado calor de hidratación agregando los sufijos, A, MS o MH, respectivamente.

Varios de los cementos mezclados tienen una menor adquisición de resistencia a edad temprana si se les compara con el tipo I. Si se diluye un cemento mezclado con puzolanas o escorias, el concreto que se produzca se deberá probar muy cuidadosamente en cuanto a cambios de resistencia, durabilidad, contracción, permeabilidad y otras propiedades.

#### 4.2.4.9 Cementos de albañilería.

Otros tipos de cemento existentes son los cementos de albañilería que son cementos hidráulicos que se emplean en morteros para construcciones de

mampostería. Este tipo de cemento puede estar formado por alguno o varios de los siguientes compuestos: cemento Pórtland, cemento Pórtland-puzolana, cemento Pórtland de escoria de alto horno, cemento de escoria, cal hidráulica, y cemento natural; además de que contienen materiales como cal hidratada, caliza, creta, conchas calcáreas, talco, escoria o arcilla. Los materiales se seleccionan de acuerdo a su capacidad para impartir trabajabilidad, plasticidad y retención de agua a los morteros. Según la norma ASTM C 91 clasifica a estos cementos como Tipo N, Tipo S y Tipo M.

- Cemento Tipo N: Se utiliza para morteros tipo N y tipo O. también se puede usar junto a cementos Pórtland o mezclados para producir morteros tipo S y tipo M.
- Cemento Tipo S: Se utiliza para el mortero Tipo S. También se puede usar junto con cementos Pórtland o mezclados para producir un mortero Tipo M.
- Cemento Tipo M se utiliza sin la adición de otros cementos ni de cal hidratada para el mortero Tipo M.

La trabajabilidad, resistencia y color de los cementos de albañilería se mantienen a niveles uniformes debido a los controles durante su manufactura.

#### 4.2.4.10 Cementos expansivos.

Este tipo de cemento es un cemento hidráulico que se expande de manera ligera durante el periodo de endurecimiento a edad temprana después del fraguado. Este cemento es designado en la especificación ASTM C 845 como Tipo E-1.

De este tipo de cemento se conocen tres variedades de cemento expansivo, las cuales son designadas como K, M y S; letras que son agregadas como sufijos al tipo del cemento.

El cemento tipo E- 1 (K) contiene cemento Pórtland, trialuminosulfato tetracálcico anhídrido, sulfato de calcio y oxido de calcio sin combinar.

El cemento tipo E-1 (M) contiene cemento Pórtland, cemento de aluminato de calcio y sulfato de calcio.

El cemento tipo E-1 (S) contiene cemento Pórtland con un contenido elevado de aluminato tricálcico y sulfato de calcio.

El cemento expansivo también se puede fabricar siguiendo algunas metodologías distintas a las ya mencionadas. Las propiedades de cada tipo pueden variar entre sí.

Cuando la expansión se restringe, por ejemplo debido al refuerzo, el concreto de cemento expansivo puede ser usado para compensar la disminución de volumen ocasionada por la contracción por secado, inducir esfuerzos de tensión en el refuerzo y estabilizar a largo plazo las dimensiones de las estructuras de concreto postensado respecto al diseño original. Una de las principales ventajas de usar cemento expansivo en el concreto consiste en controlar y reducir las grietas de contracción por secado.

#### 4.2.4.11 Cementos especiales.

Existen tipos especiales de cemento que no están necesariamente incluidos en las especificaciones de la ASTM; algunos de ellos contienen cemento Pórtland y son mencionados a continuación.

##### Cementos para pozos petroleros.

Los cementos empleados para sellar pozos petroleros, están hechos normalmente de clínker de cemento Pórtland o de cementos hidráulicos mezclados. En este tipo de cemento se recomienda tener un fraguado lento, además de que tienen que resistir altas presiones y temperaturas. Las especificaciones para pruebas y materiales para cementos destinados a pozos del American Petroleum Institute, incluyen los requisitos para nueve clases de cemento para pozo petrolero. Cada clase resulta aplicable para usarse en un cierto rango de profundidades de pozo, temperaturas, presiones y ambientes sulfatados. La industria petrolera también emplea tipos convencionales de cemento Pórtland con los aditivos adecuados para modificar al cemento. Los cementos expansivos también se han usado satisfactoriamente como cementos para pozos.

##### Cementos Pórtland impermeabilizados.

El cemento Pórtland impermeabilizado usualmente se fabrica añadiendo al clínker de cemento Pórtland una pequeña cantidad de aditivo repelente al agua como el estearato, que puede ser de aluminio, de sodio o de otro, durante la molienda final. Fabricado en color blanco o gris, reduce la transmisión capilar de agua a presiones bajas o nulas; pero sin embargo no detiene la transmisión de vapor de agua.

### Cementos Plásticos.

Los cementos plásticos se hacen añadiendo agentes plastificantes, en una cantidad no mayor del 12% del volumen total, al cemento Pórtland de tipo I o II durante la operación de molienda. Estos cementos comúnmente son empleados para hacer morteros o aplanados..

### Cementos de fraguado regulado.

Es un cemento hidráulico que se puede formular y controlar para producir concreto con tiempos de fraguado que varíen desde unos cuantos minutos hasta una hora y con un desarrollo de resistencia a edad temprana correspondiente a  $70 \text{ kg/cm}^2$  o más luego de una hora después de haber fraguado. Se trata de un cemento Pórtland modificado que se puede fabricar en el mismo horno usado para fabricar cemento Pórtland convencional. El cemento de fraguado regulado incorpora componentes para el control del fraguado (sulfato de calcio) junto con componentes para el desarrollo de resistencia a edad temprana. Las propiedades físicas finales del concreto resultante son en muchos aspectos comparables a las de concretos similares fabricados con cementos Pórtland.

### Cementos con adiciones funcionales (aditivos).

Las adiciones funcionales que se pueden mezclar con el clínker de cemento durante la molienda, son una combinación de adiciones de reductores de agua, retardantes y acelerantes.

### 4.3. ESTRUCTURA Y COMPOSICIÓN QUÍMICA.

Durante la calcinación, en la fabricación del clinker de cemento Pórtland, el óxido de calcio se combina con los componentes ácidos de la materia prima para formar cuatro compuestos fundamentales que constituyen el 90% del peso del cemento. También se encuentran presentes yeso y otros materiales que se enumeran como sigue:

Nombre	Fórmula	Sintetizada
Silicato tricálcico	$3CaO \cdot SiO_2$	$C_3S$
Silicato dicálcico	$3CaO \cdot Al_2O_3$	$C_2S$
Aluminato tricálcico	$2CaO \cdot SiO_2$	$C_3A$
Aluminoferrito tetracálcico	$4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$	$C_4AF$

Tabla 16. Otros componentes del cemento.

En presencia del agua, los cuatro compuestos se hidratan para formar nuevos compuestos que constituyen la infraestructura de la pasta del cemento endurecido en el concreto. Los silicatos de calcio,  $C_3S$  y  $C_2S$ , que constituyen cerca del 75% del peso del cemento, se hidratan para formar los compuestos de hidróxido de calcio e hidrato de silicato de calcio. El cemento hidratado contiene aproximadamente un 25% de hidróxido de calcio y un 50% de hidrato de silicato de calcio. La resistencia y otras propiedades del cemento hidratado se deben principalmente al hidrato de silicato de calcio. El  $C_3A$  reacciona con el agua y con el hidróxido de calcio para formar el hidrato de aluminato tetracálcico. El  $C_4AF$  reacciona con el agua para formar hidrato de aluminoferrito de calcio. El  $C_3A$ , el yeso y el agua se pueden combinar para formar el hidrato sulfoaluminato de calcio.

En el clinker y en el cemento, el  $C_3S$  y el  $C_2S$  son también conocidos como alita y belita. A partir del análisis químico del cemento es posible calcular el porcentaje aproximado para cada compuesto. Para determinar con mayor precisión los porcentajes de los compuestos se pueden utilizar técnicas de rayos X. Los porcentajes típicos de los compuestos en algunos cementos se marcan en la tabla siguiente:

Tipo de cemento	Composición química %						Pérdida por ignición %	Residuo insoluble %	Comp pot de comp %			
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>			C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF
Tipo I	20.9	5.2	2.3	64.4	2.8	2.9	1	0.2	55	19	10	7
Tipo II	21.7	4.7	3.6	63.6	2.9	2.4	0.8	0.4	51	24	6	11
Tipo III	21.3	5.1	2.3	64.9	3	3.1	0.8	0.2	56	19	10	7
Tipo IV	24.3	4.3	4.1	62.3	1.8	1.9	0.9	0.2	28	49	4	12
Tipo V	25	3.4	2.8	64.4	1.9	1.6	0.9	0.2	38	43	4	9
Blanco	24.5	5.9	0.6	65	1.1	1.8	0.9	0.2	33	46	14	2

Tabla 17. Porcentajes de componentes en algunos tipos de cementos.

De los compuestos que forman al cemento, se tienen ciertas propiedades las cuales son responsables del comportamiento final del cemento; las más relevantes se enuncian a continuación:

**El silicato tricálcico**,  $C_3S$ , se hidrata y endurece rápidamente y es responsable en gran medida del fraguado inicial y de la resistencia temprana. En general la resistencia temprana del concreto de cemento Pórtland es mayor con porcentajes superiores de  $C_3S$ .

El silicato tricálcico posee todas las propiedades esenciales del cemento Pórtland. Las mezclas de silicato tricálcico y agua son menos plásticas que el cemento Pórtland y más agua es requerida para obtener una pasta trabajable. La adición de yeso a la masa la hace más plástica y tiene efectos en el

tiempo de fraguado. El silicato tricálcico otorga la mayor parte de esta fuerza en 7 días.

**El silicato dicálcico**,  $C_2S$ , se hidrata y endurece lentamente y contribuye en gran parte al incremento de resistencia a edades mayores a una semana. El silicato dicálcico no define ningún tiempo de fraguado. La adición de yeso produce cambios muy pequeños.

El silicato dicálcico no otorga tanta fuerza a edades tempranas, pero gana estabilidad en fuerza a edades tardías hasta la aproximación de equilibrio con silicato tricálcico.

**El aluminato tricálcico**,  $C_3A$ , libera una gran cantidad de calor durante los primeros días de hidratación y endurecimiento. También contribuye de manera no tan importante al desarrollo de la resistencia temprana. El yeso, que se agrega al cemento durante la molienda final retrasa la velocidad de hidratación del  $C_3A$ . Sin el yeso, un cemento que contuviera  $C_3A$  fraguaría rápidamente. Los cementos con bajos porcentajes de  $C_3A$  son particularmente resistentes a los suelos y aguas que contienen sulfatos. El aluminato tricálcico da un fraguado casi instantáneo con agua y es acompañado por la emisión de mucho calor y esto conduce a la emisión de violenta de vapores. Al mezclarse adicionalmente, se obtiene una masa fácilmente trabajable. Si esto es mantenido en aire húmedo la masa se endurece, otorgando solo dureza; pero al colocarlo en agua el material se desintegraría. Un tiempo normal de fraguado puede ser obtenido por la adición de 15% de yeso en mezclas con alto contenido de agua. El aluminato tricálcico otorga algo de fuerza en un día, pero no muestra fuerza subsecuente

**El aluminoferrito tetracálcico**,  $C_4AF$ , reduce la temperatura de formación del clínker ayudando por tanto a la manufactura del cemento. Se hidrata con cierta rapidez pero contribuye mínimamente a la resistencia. La mayoría de efectos de color se debe al  $C_4AF$  y a sus hidratos.

#### *4.3.1 Fases constituyentes mayoritarias en el cemento Pórtland.*

La alita es el constituyente más importante de todos los clínters de cemento Pórtland, éste compone alrededor del 50 al 70% del total. Está formado por silicato tricálcico, está modificado por incorporaciones de iones como  $Mg^{2+}$ ,  $Al^{3+}$  y  $Fe^{3+}$ . Estos reaccionan relativamente rápido con el agua y en cementos Pórtland normales es el más importante de las fases constituyentes para la creación de resistencia principalmente a los 28 días.

La belita constituye del 15 al 30% de los clínters de cemento Pórtland, está formada por silicato dicálcico modificado por iones normalmente presentes enteramente como beta polimorfos. Estas reaccionan lentamente con agua por lo que contribuyen a la resistencia final a los 28 días. Pero sustancialmente se incrementa a edades posteriores. Pasado un año las resistencias otorgadas tanto por alita como por belita pueden ser iguales bajo condiciones comparables.

La fase aluminato constituye aproximadamente del 5 al 10% de la cantidad total de los clínters de cemento Pórtland. Este está constituido por aluminato tricálcico substancialmente modificado en composición y algunas veces además en estructura por la incorporación de algunos iones como  $Si^{4+}$ ,  $Fe^{3+}$ ,

$\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$ . Estos reaccionan rápidamente con agua y para evitar efectos no deseados se añade yeso.

La fase ferrita representa del 5 al 15% del total del clínker del cemento Pórtland. Es aluminoferrita tetracálcica substancialmente modificada en composición por la variación en la relación de Al/Fe y la incorporación de ciertos iones. La tasa a la que reacciona con el agua puede ser variable, debido a las diferencias de composición o en otras características, pero en general es inicialmente alto e intermedio entre la alita y la belita a edades avanzadas.

Una exitosa calcinación de forma comercial no solamente depende de la composición de la mezcla cruda, sino además de las características tanto físicas como químicas de los materiales. A nivel laboratorio es necesario tener la materia prima en una fase fina en cuestión de tamaño debido a que de lo contrario se presentarían dificultades para obtener el clínker. Una mezcla gruesa conteniendo altas cantidades de cal puede ser comercialmente adecuada debido a la enorme reactividad de este componente. La incineración del cemento consiste en una serie de reacciones que toman lugar entre sólidos finamente divididos, esto solo ocurre en las etapas finales de la incineración donde se forma el líquido donde se llevan a cabo las reacciones. Cuando los líquidos o las soluciones reaccionan juntos, los productos dependen de la composición de la reacción de las mezclas y la temperatura. Si la reacción se lleva a cabo solamente entre sólidos, la acción se ve enfocada en la superficie de los granos y la difusión del sólido fresco a la superficie se realiza lentamente.

La producción de cemento Pórtland por un proceso de clinkerización gira en torno a que solo una pequeña parte de la mezcla llegue a ser líquida; para que esto se lleve a cabo correctamente se tienen que cuidar varios factores tales como:

- ✦ La composición química de la mezcla.
- ✦ El estado fisicoquímico de los constituyentes crudos.
- ✦ La temperatura y el periodo de quemado.

Otro factor que se debe cuidar es la tasa de enfriamiento. Las mezclas con pequeñas cantidades de óxidos, o de cal y arcilla, pueden ser incineradas en hornos de pequeños laboratorios. Las mezclas pueden ser hechas a cualquier composición deseada y por el uso de cubiertas de platino cualquier tipo de contaminación de los materiales con el horno puede ser evitada. El uso de energía eléctrica o de hornos de gas además evita cualquier contaminación de la carga con cenizas, como ocurre en los hornos grandes de carbón. La temperatura debe ser medida cuidadosamente y la tasa de calentamiento y el periodo de la temperatura máxima también deben ser controlados.

Los datos termoquímicos se mencionan a grandes rasgos a continuación

<b>Temperatura</b>	<b>Reacción</b>	<b>Tipo de reacción</b>
100°C	Evaporación de agua libre	Endotérmica
500°C	Eliminación de agua en arcilla	Endotérmica
900°C	Cristalización de los productos amorfos de la deshidratación de la arcilla	Endotérmica
900°C-1200°C	Reacción entre cal y arcilla	Endotérmica
1250°C-1280°C	Inicio de formación de líquido.	Exotérmica
Arriba de 1280°	Mayor formación de líquido y formación de compuestos del cemento.	En balance puede ser endotérmica.

Tabla 18. Datos termodinámicos del cemento. Modificada de LEA (1971, p.123)

## **4.4. CONCRETO**

### *4.4.1 Características Generales*

El concreto esta formado básicamente por una mezcla de dos componentes: los agregados y la pasta; la pasta es la composición de Cemento y agua, y los agregados que están formados por la arena y la grava; al unirse estos dos componentes mediante la reacción química; se forma una masa de características semejantes a la de una roca.

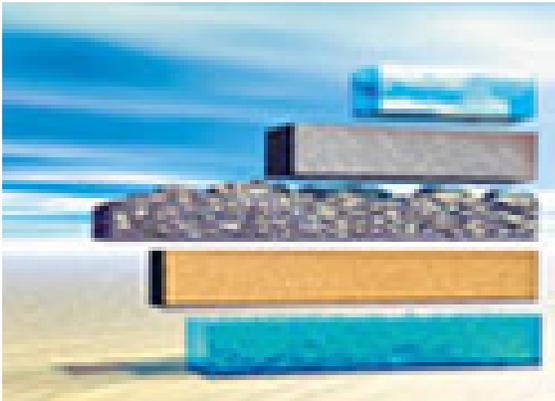
La pasta está compuesta de Cemento, agua y un poco de aire que puede ser atrapado o que puede ser incluido intencionalmente; esta pasta constituye aproximadamente del 25 al 40% del volumen total del concreto.

Los agregados están divididos en dos grupos, los finos y los gruesos; los agregados finos están constituidos por arenas que pueden llegar hasta 1 centímetro y los agregados gruesos pueden llegar hasta 15.2 centímetros. Normalmente el tamaño máximo de agregados que se usa es de 2 a 2.5 centímetros.

Debido a que los agregados constituyen la fase mayoritaria del total de la mezcla (60 a 75%), es importante realizar una buena selección, deben consistir en partículas con resistencia adecuada así como resistencias a condiciones de exposición a la intemperie, además de que no debe contener materiales que pueda deteriorar el concreto.

La calidad del concreto esta totalmente relacionada con la calidad de la pasta. Para que la calidad del concreto sea buena es necesario que cada

partícula y los espacios entre estas estén cubiertos con la pasta. Una mezcla típica de concreto, está dada por las composiciones siguientes:



<b>Aire</b>	<b>6%</b>
<b>Cemento</b>	<b>11%</b>
<b>Agregado grueso</b>	<b>41%</b>
<b>Agregado fino</b>	<b>26%</b>
<b>Agua</b>	<b>16%</b>

Imagen 2. Composición típica de concreto    Tabla 19. Composición típica de concreto

La cantidad de agua juega un papel bastante importante dentro de la formación de mezclas de concreto, debido a que las condiciones del concreto se ven directamente afectadas por la cantidad de agua en relación a la cantidad de cemento. Algunas ventajas que se obtienen al reducir el contenido de agua se muestran en la tabla siguiente.

* Se incrementa la resistencia a la compresión y a la flexión.
* Se tiene menor permeabilidad, y por lo tanto mayor hermeticidad y menor absorción
* Se incrementa la resistencia al intemperismo.
* Se logra una mejor unión entre capas sucesivas y entre el concreto y el esfuerzo
* Se reducen las tendencias de agrietamientos por contracción

Tabla 20 Ventajas al disminuir la cantidad de agua en el concreto.

Al disminuir la cantidad de agua, la calidad del concreto aumenta, la rigidez del concreto esta directamente relacionada con menores cantidades de agua de mezclado. Las propiedades del concreto en estado fresco y endurecido se puede modificar agregando aditivos al concreto, usualmente líquidos durante su dosificación. Los aditivos tienen varias funciones:

- Ajustar el tiempo de fraguado o endurecimiento
- Reducir la demanda de agua
- Aumentar la trabajabilidad
- Incluir intencionalmente aire
- Ajustar otras propiedades del concreto.

Una vez que se tiene un proporcionamiento adecuado del concreto, así como dosificación, mezclado, colocación, consolidación, acabado y curado, se obtiene un material de construcción resistente, durable, no combustible, con resistencia al desgaste y prácticamente impermeable.

#### *4.4.2 Agua de mezclado en el concreto.*

Casi cualquier agua natural que sea potable y no tenga ningún olor o sabor puede usarse para producir concreto. Las impurezas excesivas en el agua no pueden afectar solamente el tiempo de fraguado y la resistencia del concreto, sino puede ser causa de manchado, inestabilidad volumétrica y menor durabilidad

El agua con menos de 2000 partes por millon de sólidos disueltos totales generalmente puede ser utilizada de manera satisfactoria para elaborar concreto. El agua con más de 2000ppm de sólidos disueltos deberá ser

ensayada para investigar su efecto sobre la resistencia y tiempo de fraguado, como en el caso de esta tesis en particular, en el cual se utilizan soluciones muy concentradas de metales que fácilmente sobrepasan las 2000ppm.

#### *4.4.3 Curado de concreto.*

El curado es el mantenimiento de un adecuado contenido de humedad y temperatura en el concreto, aun cuando se encuentra en edades tempranas, de manera que sea posible alcanzar las características para las cuales ha sido desarrollado. Una vez que se ha vaciado la mezcla el curado es comenzado de inmediato para que se alcance la resistencia y la durabilidad deseada.

Si no se presenta una adecuada humedad en los materiales que conforman la matriz de concreto no se hidratan totalmente y no se obtiene un producto de calidad.

La temperatura es un factor de enorme importancia para un curado apropiado, debido a que las resistencias más altas se pueden desarrollar más fácilmente a temperaturas altas.

La temperatura del concreto es necesario mantenerla a una temperatura mayor a los 10°C para que se tenga un ritmo adecuado en el desarrollo de la resistencia, es necesario que se mantenga una temperatura uniforme a través de la superficie del concreto para evitar grietas por choque térmico.

La importancia del curado radica en varias razones que pueden dividirse en 3 importantes:

- a) La ganancia de resistencia predecible: en laboratorio se ha determinado mediante ensayos que el concreto en condiciones secas puede perder hasta un 50% de la resistencia potencial que posee en

comparación con uno que es curado en condiciones húmedas. Bajo condiciones de altas temperaturas, el concreto gana alta resistencia inicial, pero puede que después sean reducidas.

- b) Durabilidad mejorada: cuando un concreto se cura bien, alcanza mejor dureza superficial y resistirá mejor el desgaste superficial y la abrasión. Además de que se hace más impermeable, lo que incrementa la durabilidad y la vida en servicio.
- c) Mejores condiciones de servicio y apariencia: cuando una loza de concreto se le permite que seque demasiado temprano, tendrá una superficie frágil con pobre resistencia al desgaste y la abrasión. Un buen curado reduce el desquebrajamiento, cuarteo, la pulverización y el descascaramiento.

El concreto debe ser protegido de la pérdida de humedad hasta concluir el acabado empleando métodos adecuados para evitar la fisuración por retracción plástica.

#### *4.4.4. Velocidad de secado del concreto*

Cuando el concreto es secado, no se endurece ni se cura. Para que el concreto se hidrate y se endurezca, es necesario que éste adquiera un poco de humedad; cuando el concreto se seca, la resistencia se mantiene constante., una vez que esta seco se espera que la hidratación haya sido suficiente para garantizar que las propiedades físicas sean las deseadas.

El saber a que velocidad se seca el concreto, nos da un panorama amplio de sus propiedades finales. Para que el concreto se seque completamente, es necesario dejar pasar mucho tiempo, para que la humedad relativa del concreto descienda a 50% es necesario esperar 850 días.

Muchas otras propiedades del concreto endurecido se ven también afectadas por su contenido de humedad; en ellas incluye la elasticidad, flujo plástico, valor de aislamiento, resistencia al fuego, resistencia al desgaste, conductividad eléctrica, durabilidad.

#### *4.4.5 Hidratación y reacciones.*

Los cementos hidráulicos, fragua y endurecen cuando son mezclados con agua a temperatura ambiente. Las reacciones que producen el fraguado y el endurecimiento, son descritas colectivamente como reacciones de hidratación exotérmicas.

La reacción de los compuestos del cemento Pórtland con agua es exotérmica, esto quiere decir que el calor es generado de la reacción, el promedio se encuentra en 120 calorías por gramo durante la hidratación completa del cemento. En construcción normal, los miembros estructurales tienen relaciones de superficie-volumen, relativamente grandes por lo que la disipación del calor no representa ningún problema. Si se pudiera aislar este calor, podría ser usado de manera ventajosa durante clima frío para mantener la temperatura adecuada de curado. Sin embargo para otros fines, como otras estructuras de concreto, es necesario reducir o remover calor mediante un diseño apropiado o métodos de construcción. Estos métodos pueden incluir, un recirculamiento de agua fría en alguna tubería. Otro método para controlar la generación de calor, es reducir el porcentaje de compuestos con un alto calor de hidratación, como  $C_3A$  y  $C_3S$ .

La hidratación del cemento es un proceso en el cual el agua de amasado se combina con las sustancias anhidras, formándose nuevos compuestos, acompañados de absorción de agua y liberación de calor de hidratación. Estos compuestos son silicatos, aluminatos y ferritos hidratados, así como otros hidratos complejos.

En la hidratación del cemento tiene lugar una consolidación; es decir, el paso de un sistema inicialmente líquido o plástico, a un estado sólido.

La hidratación se puede dividir en dos fases: fraguado y endurecimiento.

Durante el fraguado, que transcurre en horas, se disuelven en la fase líquida de la pasta los componentes del cemento más fácil y rápidamente solubles en agua. Este proceso transcurre con desprendimiento de calor y la pasta va perdiendo plasticidad y adquiriendo rigidez, hasta que al final la pasta queda totalmente consolidada.

Durante el endurecimiento, que tiene lugar a continuación y que se prolonga durante muchísimo más tiempo (días, meses y años) continúan los procesos de hidratación y consolidación, a ritmo continuo pero decreciente, aumentando paulatinamente la rigidez, dureza y resistencias mecánicas de la pasta y disipándose el calor hidratación.

Existe un efecto que puede aparecer al amasar con agua un cemento, que se conoce como "falso fraguado", consiste en un agarrotamiento prematuro de la masa, que tiene lugar de uno a cinco minutos después de comenzar a de amasado. No altera las propiedades del cemento, por lo que es inofensivo; se soluciona continuando el amasado del cemento.

Diversos factores influyen en la duración del fraguado:

- Cemento: el fraguado es tanto más rápido cuanto más fino es el cemento. Los cementos meteorizados aumentan su rapidez de fraguado.
- Agua: cuanto menos agua, más rápido es el fraguado. Las materias orgánicas que contenga retardan el fraguado. En ambientes húmedos, el fraguado es más tardío que en ambientes secos.
- Áridos: no deben tener materias orgánicas ni humus, porque retrasan el fraguado.
- Temperatura: la elevación de temperatura disminuye el tiempo de fraguado y por el contrario, una disminución de temperatura aumenta el tiempo de fraguado. Nunca debe amasarse a temperaturas inferiores a 0 °C sin precauciones especiales.

Los tipos de hidratación que se dan en el cemento son:

Hidratación real.- adición directa de algunas moléculas de agua con el cemento, es la que sucede casi de inmediato y dura un periodo relativamente corto de tiempo, sucede en el fraguado, es una reacción básicamente de origen químico

Hidrólisis.- esta es la que se da posteriormente de la hidratación química, sucede en un periodo largo de tiempo y es la que permite el endurecimiento del material

Hidratación y fraguado de los componentes del cemento

Las reacciones en los elementos principales del cemento Pórtland se dan como siguen:

C<sub>3</sub>S .- Silicato tricálcico.- primero en reaccionar junto al C3A y C2S

C<sub>2</sub>S .- Silicato dicálcico .- reacciona mas lentamente que el C3S

C<sub>3</sub>A .- Aluminato tricálcico .- reacción violenta que lleva a un endurecimiento rápido conocido como fraguado relámpago, es un fundente

CAAF .- Aluminoferrito tetracálcico .- fundente

La ecuación para la hidratación del silicato tricálcico está dada por:



cuando el agua es añadida, el silicato tricálcico rápidamente reacciona para soltar los iones de calcio, iones hidróxido y una gran cantidad de calor. El pH se incrementa debido a la alcalinidad de los iones hidróxido. Esta hidrólisis inicial, disminuye rápidamente trayendo consigo el decremento de calor desarrollado inicialmente.

Esta reacción continúa produciendo calcio e iones hidróxido, hasta que el sistema se satura; cuando esto pasa, el hidróxido de calcio comienza a cristalizarse, simultáneamente, se comienza a formar el hidrato de silicato de calcio. Los iones precipitan fuera de la solución acelerando la reacción del silicato tricálcico hacia calcio y hacia iones hidróxido. La formación de hidróxido de calcio y cristales de silicato de calcio hidratados, sirven de semillero para que puedan formarse mas hidratos de silicato de calcio. Estos cristales crecen más densamente haciendo más complicado para las moléculas de agua rechazar el silicato tricálcico sin hidratar. La velocidad de las reacciones esta en este momento controlada por la tasa a la cual las moléculas de agua se difunden a través de la capa de silicato de calcio. Esta

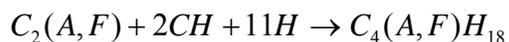
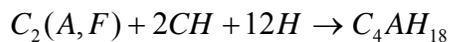
capa densa produce silicato de calcio continuamente lo que hace que la reacción sea cada vez más lenta.

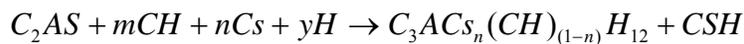
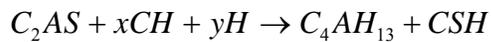
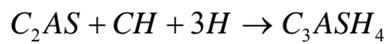
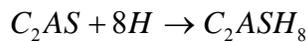
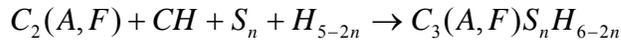
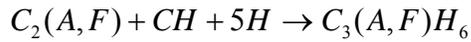
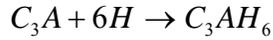
La hidratación continuara tanto como el agua esté presente y existan compuestos no hidratados en la pasta de cemento.

El silicato dicálcico además afecta la resistencia del concreto mediante su hidratación. El silicato dicálcico reacciona con agua en una manera similar al silicato tricálcico, pero de manera más lenta. El calor rechazado es menor que el de la hidratación del silicato tricálcico debido a que el silicato dicálcico es mucho menos reactivo. Los productos de la hidratación de silicato dicálcico son los mismos que para el silicato tricálcico.



los otros componentes mayoritarios del cemento Pórtland, aluminato tricálcico y aluminoferrita tetracálcica son reactivos también con agua. Su química de hidratación es más complicada ya que también envuelven reacciones con el yeso. Dado que estas reacciones no contribuyen significativamente a la fuerza, no se tomarán en cuenta en este trabajo. Las reacciones completas se muestran a continuación.





#### 4.4.5.1 .Calor de hidratación

Las reacciones de la hidratación del cemento son exotérmicas, es decir, desprenden calor. El desprendimiento de calor en el endurecimiento de un cemento llega a alcanzar su máximo al cabo de 1 a 3 días.

El desprendimiento de calor es rápido durante el fraguado y parte del endurecimiento, disminuyendo progresivamente al hacerse la hidratación

cada vez más lenta y desprender menos calor los últimos constituyentes que se hidratan.

#### 4.4.5.2 Estabilidad física contra temperatura.

El frío retrasa el fraguado. Bajo cero, éste se detiene.

El hielo disgrega la masa, al aumentar de volumen el agua; sin embargo, el cemento ya endurecido resiste bien las heladas.

El calor acelera el fraguado. Una vez endurecido, el cemento resiste bien bajo temperaturas de hasta los 100°C.

#### 4.4.5.3 Estabilidad de volumen

Las reacciones de la hidratación del cemento son exotérmicas, es decir, desprenden calor. El desprendimiento de calor en el endurecimiento de un cemento llega a alcanzar su máximo al cabo de 1 a 3 días.

El desprendimiento de calor es rápido durante el fraguado y parte del endurecimiento, disminuyendo progresivamente al hacerse la hidratación cada vez más lenta y desprender menos calor los últimos constituyentes que se hidratan.

Para que un cemento sea aceptable, es preciso que ninguno de sus constituyentes mineralógicos sufra, una vez puesto en obra, una expansión perniciosa y destructiva.

Esta es, probablemente, la propiedad tecnológica de mayor importancia de un cemento Pórtland, dado que es una de las características que mayor influencia tienen en la durabilidad de los mismos.

A pesar de todas las variaciones de volumen de los distintos componentes mineralógicos, las variaciones reales de volumen de un cemento Pórtland no son muy importantes y se deben principalmente a:

- La expansión producida por las propias reacciones de hidratación de cada uno de los componentes mineralógicos.
- La dilatación producida por el aumento de temperatura generado en las reacciones de hidratación.
- La retracción que se produce por la evaporación del agua durante el fraguado y endurecimiento.
- La retracción térmica producida por el enfriamiento tras los procesos de fraguado y endurecimiento.

#### 4.4.5.4 Estabilidad química

Son innumerables las sustancias que puedan influir sobre el cemento endurecido. Las principales causas de destrucción pueden agruparse en:

- Descomposición de los constituyentes del hormigón, disolución y arrastre de CH (hidróxido cálcico), debida a las aguas puras, por su gran poder de disolución.

- Formación de sales fácilmente solubles. Las aguas ácidas disuelven los constituyentes del cemento y los transforman en sales solubles, que se eliminan por lavado.
- Formación de nuevos compuestos en los poros, ocupando un volumen mayor que los productos iniciales de reacción, provocando tensiones internas en el hormigón y por consiguiente su agrietamiento.
- Destrucción debida a sustancias orgánicas: los ácidos orgánicos, igual que los inorgánicos, destruyen rápidamente el hormigón. Los ácidos acéticos, lácticos y potásicos son muy peligrosos por su gran agresividad. En general aceites, grasas, combustibles, nitratos y algunos abonos.
- Gases contenidos en la atmósfera o humos ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ , etc.).

#### *4.4.5.5 Finura del molido*

Cuanto más fino es un cemento, más delicada es la regulación de su fraguado, se requieren más regulador de fraguado y existe mayor peligro de que aparezca el "falso fraguado".

Las ventajas de los cementos de gran finura son:

- El número de partículas conglomerantes es muy elevado y por tanto, también lo es el número de uniones, dando lugar a un conjunto más resistente e impermeable.
- Las partículas de cemento se hidratan más rápidamente cuanto más finas sean.

- La resistencia a compresión de los cementos en las primeras edades (hasta los 7 días) crece casi linealmente con la finura.

Los aspectos negativos de los cementos de gran finura son:

- Disminución de la resistencia al hielo.
- Excesiva retracción.
- Excesivo calor de hidratación.
- Poca defensa a las aguas agresivas.
- Aumento de la absorción capilar.

#### **4.5. PRUEBAS APLICABLES.**

En este tipo de procesos, el monitoreo de su correcto funcionamiento, mediante la aplicación de ciertas pruebas; juega un papel determinante en cuestión de aplicabilidad de la técnica.

Estas pruebas representan la diferencia, en cuestión del contraste, que puede existir en la caracterización del residuo antes y después de la aplicación del tratamiento. Este tipo de pruebas están basadas, en su mayoría, por una validez estadística; por lo que es necesario un número suficiente de replicas de cada prueba; para demostrar el éxito o el fracaso de la técnica. Las pruebas mencionadas a continuación son referidas al documento “Physical Tests, Chemical Testing Procedures, Technology Screening, and Field Activities. Stabilization / Solidification of Wastes. Mayo 1989. EPA”.

##### *4.5.1 Pruebas físicas.*

Según el “EPA Testing” (1989, p. 25); “las pruebas físicas proveen de información básica en la tratabilidad del material de desecho y permite realizar algunos estimados acerca del costo del manejo y tratamiento de los desechos”.

Las pruebas físicas que se enumeran de la manera siguiente son útiles tanto para desechos peligrosos no tratados como para desechos ya estabilizados / solidificados; aunque las pruebas no fueron creadas primordialmente para este uso.

Las pruebas físicas que la EPA arroja como “paquete” en EPA TESTING (1989, p.25) para la evaluación de la técnica están divididas en 5 tipos; como se menciona en la tabla siguiente:

<b>Tipo de prueba</b>	<b>Descripción</b>
Prueba de Índice de Propiedades	Proveen información de las características físicas usadas para relacionarlas hacia parámetros del proceso
Pruebas de Densidad	Usada para determinar la relación Peso/Volumen
Pruebas de Permeabilidad	Para determinar la facilidad de permeabilidad
Prueba de Fuerza	Juzgar la efectividad técnica bajo stress mecánico
Pruebas de Durabilidad	Determinación de resistencia a ciclos de congelado y descongelado.

Tabla 21 Tipos de pruebas físicas aplicables al desecho tanto sin tratamiento como tratado.

#### 4.5.1.1 Pruebas de índice de propiedades.

Este tipo de pruebas determina varios parámetros que son usados para relacionar las características físicas con las condiciones de operación que podrían suscitarse; factores como la distribución de tamaño de partícula, pH y el contenido de humedad son señalados como factores críticos en el proceso de estabilización / solidificación.

##### 4.5.1.1.1 Análisis de tamaño de partículas.

El análisis de distribución de tamaño de partículas en el agua o suelo; nos otorga el conocimiento de algunas características tales como la textura, la uniformidad y el tamaño promedio de grano, y el tamaño máximo y mínimo de partículas.

La distribución de tamaño de grano puede ser usada para predecir un rango amplio de características, nos indica el posible potencial del movimiento de agua a través del material así como su compresibilidad. Se ha demostrado que con la presencia de materiales de granos muy finos se producen materiales pobremente estabilizados; es necesario entender que el mejor material para formar una matriz de fuerza elevada es con partículas de tamaño promedio, con pocas partículas en tamaños extremos.

El análisis de tamaño de grano puede ser realizado por un análisis de tamiz o por un análisis hidrométrico.

El análisis de tamiz es usado para definir el rango de distribución de los materiales que va desde arenas hasta grava, de 0.1 mm y más grandes.

El análisis hidrométrico es usado típicamente para definir el rango de distribución de material, este va desde arena fina y de limo a arcilla, de .1mm y más chicas.

Debido a que los procesos usados son mecánicos las fuentes de error son comunes debido al muestreo inapropiado del material, por lo que es necesario utilizar técnicas de muestreo como el cuarteo o el uso de muchas muestras para comparar sus distribuciones de tamaño.

Existen circunstancias en las que resulta bastante complicado tener una correcta aplicación de la prueba, casos como la contaminación por aceites o algunas sustancias orgánicas ocasionan aglomeración de las partículas.

El tamaño absoluto y la forma de las partículas de residuo afectan la capacidad de los procesos de Solidificación / Estabilización y la última resistencia del producto ya solidificado y estabilizado. Como ya se ha mencionado los materiales muy finos o muy gruesos (Fig. 2.b) representan dificultades en la estabilización / solidificación de los desechos. La fuerza de

la matriz formada por la interacción de una diversidad de tamaños de partículas (Fig. 2.a.) muy continuamente produce características como fuerza elevada, baja permeabilidad y baja lixiviabilidad.

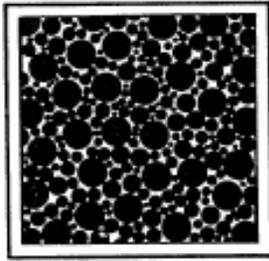


Fig. 3. a. Matriz rica en su Distribución de tamaños.

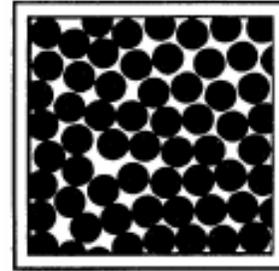


Fig. 3. b. Matriz pobre en su distribución de partículas.

#### 4.5.1.1.2 Límites de Atterberg.

Los límites de Atterberg son una serie de pruebas inicialmente creadas para la clasificación y caracterización de arcillas usadas en cerámica.

Estos límites representan el contenido de humedad que diferencia un material de su estado líquido o plástico. El límite líquido es la cantidad de humedad que hace que fluya como un líquido viscoso y el límite plástico es la cantidad de humedad que existe entre el estado plástico y el quebradizo. El índice de plasticidad es la diferencia entre los límites plástico y líquido. Esta prueba además de estimar propiedades como compresibilidad, fuerza y expansión, nos prevé el comportamiento del material cuando sea sometido a stress. Según los resultados de esta prueba nos dará un indicativo acerca de la cantidad de agente solidificante / estabilizante necesaria para el desecho.

Según el EPA Testing (1989, p 30); la determinación de los límites se realiza de la manera siguiente:

Para determinar el límite líquido se tiene que mezclar el material con agua, en un recipiente de latón, dividido por un canal. El límite líquido es el agua contenida a la cual la muestra dividida fluye junto al vaso el cual es goteado por un aparato 25 veces desde una altura de 10 centímetros.

En el caso del límite plástico; una muestra es presionada alternativamente y enrollada en una rosca. La muestra es secada lentamente hasta que la rosca no pueda ser presionada o enrollada, el agua contenida es el límite plástico.

Los resultados de las pruebas caracterizan las propiedades de manejo de material y la variación de propiedades como función del contenido de agua. El límite líquido y plástico son usados individualmente o juntos con otras propiedades del suelo para relacionarlas con algunas conductas tales como compresibilidad, permeabilidad, compactibilidad, contracción e hinchazón

Los límites líquidos para varias mezclas de agentes solidificantes / estabilizantes, regularmente están dentro de un rango entre 40 y 55% de contenido de agua. Típicamente los límites plásticos para varias mezclas de agentes de solidificación / estabilización están entre 20 y 50% de contenido de agua.

#### 4.5.1.1.3 Contenido de humedad.

Esta prueba determina la cantidad de agua u otro fluido libre en una cierta cantidad de material y se lleva a cabo para juzgar si es necesario algún pretratamiento, tal como secado de lodos o desaguado. La humedad en un desecho no siempre resulta ser perjudicial.

Para llevar a cabo la técnica es necesario un “pre pesado” de la muestra, la cual es secada durante 24 horas a una temperatura constante de 110 °C o a una temperatura por debajo de la temperatura de deshidratación, posteriormente se coloca en un desecador para que se enfríen, una vez realizado esto, se pesa nuevamente y con la diferencia de pesos se obtiene el contenido de humedad. El resultado de esta prueba es expresado como un porcentaje de la masa total. El exceso de humedad se puede reducir mediante la remoción por filtración y el bajo contenido de humedad puede indicar que será necesario la adición de agua para la correcta estabilización.

#### 4.5.1.1.4 Sólidos suspendidos.

Este es un término utilizado generalmente en la calidad del agua residual. Los sólidos totales, incluye todos los sólidos, tanto suspendidos como disueltos. Los sólidos suspendidos son los que pueden ser removidos por filtración; a la diferencia entre los sólidos suspendidos y los totales se le conoce como sólidos disueltos. Esta técnica se lleva a cabo filtrando una muestra bien mezclada a través de un filtro de fibra de vidrio. Este filtro es secado y llevado a peso constante. Los sólidos suspendidos son representados como el incremento en peso del filtro. La importancia de esta prueba radica en la determinación de algunos requerimientos de manejo de los materiales tal como saber si el desecho puede ser bombeado.

#### 4.5.1.2 Pruebas de densidad.

La densidad total es la relación del peso total de la muestra con el volumen total. Junto con la gravedad específica y el contenido de humedad sirve para calcular la porosidad del material. Este valor es comúnmente usado para convertir el peso en volumen y es esencial para caracterizar las tasas a las cuales será excavado el suelo, además se provee una comparación entre los residuos estabilizados y no estabilizados. Existen varios métodos para la determinación de este valor.

##### 4.5.1.2.1 Método del cilindro.

Está diseñado para determinar la densidad y el contenido de humedad, este método está limitado a materiales no deformables. Un cilindro delgado es introducido en el suelo para obtener una muestra y se determina el peso por unidad del volumen de la muestra y el valor de densidad es determinado.

##### 4.5.1.2.2 Método del cono de arena.

Para el uso de este método, una plantilla es colocada a un nivel superficial del desecho no estabilizado / solidificado y el material es excavado a través de un hoyo hecho en la plantilla. Se excava típicamente alrededor de 1000 a 2500 cm<sup>3</sup> a través del hoyo de 165 mm de diámetro en la plantilla. Un aparato llenado con una arena de densidad conocida es pesado y colocado en la plantilla sobre el hoyo hecho por la excavación. La arena sale del aparato y se permite que llene el hoyo, entonces se vuelve a pesar el aparato. Con la

arena que permanece en el aparato; se calcula el volumen de arena necesario para llenar el hoyo. La relación del peso del material removido del hoyo y el volumen de la arena necesitado para llenar el hoyo es la densidad.

#### 4.5.1.2.3 Método Nuclear.

La densidad del suelo puede ser medida en el sitio mediante métodos nucleares. La densidad total o húmeda del material es determinada por la colocación de una fuente gamma y un detector gamma, adyacente al material que será medido. La amplitud de la radiación gamma depende de la concentración del electrón en el material que está siendo medido y esto es proporcional a la densidad del material.

#### 4.5.1.2.4 Desecho estabilizado.

Para la determinación de un desecho estabilizado monolítico un cubo curado o un cilindro de los sólidos es pesado y medido. La densidad es calculada dividiendo el volumen sobre la masa.

Estos medidas son las más usadas para los cálculos de manejo como el volumen removido, volumen estabilizado, y el volumen regresado al sitio.

#### 4.5.1.3 Pruebas de compactación-humedad/ densidad de las mezclas de suelo-cemento

Con esta prueba se determina la relación entre el contenido de humedad y la densidad del material. Es aplicada cuando el material no ha sido estabilizado / solidificado; con esta prueba se determina el contenido de humedad que permite la compactación máxima.

Para llevar a cabo esta prueba se tienen que tomar varias muestras con cantidades variables de contenido de agua; después de esto se comprimen y se secan por alrededor de 12 horas, posteriormente a esto se miden las densidades y se busca la densidad mayor según el contenido de humedad y se obtiene el punto óptimo de contenido de humedad y la densidad correspondiente es llamada “densidad óptima”

#### 4.5.1.3.1 Prueba de permeabilidad.

Esta prueba es referida a la resistencia de cierto material a que el agua pase a través de él; estas pruebas son hechas para determinar la cantidad y el flujo de agua que pasa a través de un material bajo condiciones de saturación. La prueba consiste en dejar caer una carga de agua y medir el flujo que pasa a través de la muestra.

Existen dos tipos de pruebas básicas de permeabilidad, la carga constante y carga cayendo. La carga constante permite relativamente el flujo de cantidades grandes de agua que fluyan a través de la muestra y la posibilidad de que éstas sean medidas; esta prueba resulta aplicable para materiales con una permeabilidad mayor a  $10^{-6}$  cm./s.

La carga cayendo permite la medición de cargas más pequeñas de agua; resulta más factible para materiales con una permeabilidad menor a  $10^{-4}$  cm./s.

En la prueba de permeabilidad por carga cayendo, la muestra es sellada por una membrana impermeable y colocada en una cámara llena de fluido; esta cámara es sometida a presión para crear una diferencia de cargas para forzar que el agua fluya a través de la muestra.

En la prueba de permeabilidad por carga constante, la muestra es colocada en un baño de agua y es conectada a una columna de agua libre de aire en un tubo de vidrio con la carga de agua mantenida a un valor constante. El agua fluye a través de la muestra por gravedad y se procede a su cuantificación registrando el tiempo que tardó en recolectarse el agua.

La permeabilidad de un desecho estabilizado representa un factor muy importante ya que mediante esto podemos evaluar si existe pérdida de contaminantes del material estabilizado hacia el medio ambiente. Esta prueba junto con de lixiviabilidad nos dan a conocer el potencial de seguridad que nos ofrece esta técnica en cuestión de no liberar el contaminante atrapado.

Es recomendable tener valores cercanos a  $10^{-5}$  cm/s para desechos estabilizados destinados para ser enterrados.

El problema de la permeabilidad no es radical, simplemente si el material no resulta muy impermeable, y si el agua que atravesó la muestra no posee rastros del material contaminante lixiviado, no existe problema.

Para efectos de esta tesis, esta prueba no se llevará a cabo.

4.5.1.4 Pruebas de resistencia a la compresión.

Los resultados obtenidos de la aplicación de estas pruebas indican que tan bien puede un material resistir bajo stress mecánico. Las pruebas de resistencia son usadas regularmente para dar una línea base de comparación entre los materiales estabilizados como en los no estabilizados. En el caso de los materiales no estabilizados generalmente no presenta buena resistencia, en el caso de los materiales estabilizados la resistencia aumenta de manera significativa. Aunque no se ha demostrado completamente que un material muy resistente evita la lixiviación, un material resistente otorga mayor seguridad en la aplicación de la técnica.

La prueba consiste en colocar la muestra en el centro de un aparato con dos placas, una superior y una inferior, con este aparato se aplica una carga axial hasta que el espécimen se rompa.

Para residuos estabilizados en matriz de cemento esta prueba provee información tal como: la capacidad de los desechos estabilizados para resistir sobrecargas; las relaciones óptimas de agua / aditivo y los tiempos de curado para que las reacciones del cemento se lleven a cabo de manera correcta y completa; las mejoras en cuestión de las características de resistencia del material ya estabilizado en comparación al material no estabilizado.

Esta prueba consiste en colocar una muestra cilíndrica con relaciones de altura / diámetro de 1.15 y 2. La muestra cilíndrica debe ser curada bajo tiempos específicos en un medio contenido 100% de humedad. Los tiempos de curado para el cemento son 1, 7, 14 y 28 días. Usando la relación de 1.15 se obtienen valores más rigurosos que los encontrados si se usa la relación

de 2. Para llevar a cabo la prueba se utiliza una máquina de compresión que es comúnmente encontrada en los laboratorios de mecánica de suelos, con esta máquina se puede controlar la tasa de carga aplicada. La fuerza es aplicada de manera axial y el plato superior se baja y se pone en contacto con el ensayo mientras la carga se aplica continuamente sin chocarla. Según la EPA se considera que los materiales solidificados / estabilizados con una fuerza de 50 psi tienen una fuerza de compresión satisfactoria

Una construcción típica y un equipo de compactación pueden generar presiones de contacto de hasta 1000psi o más pero las presiones de contacto de 50 a 100psi resultan ser más comunes. La carga de superficie es atenuada con la profundidad, por lo que la presión se “acolchona” y reduce los valores de 10 a 20 psi a una profundidad de 2 pies y a una profundidad de 3 a 7 psi a una profundidad de 5 pies abajo. Alrededor de .75 a 1 psi es la cantidad de presión que se disminuye por cada pie de profundidad.

#### 4.5.1.3 Fuerza de flexión.

Esta prueba es una medida de la capacidad de algún material para soportar cargas aplicadas en tensión. En esta prueba las cargas se aplican a los ejes pequeños de la muestra.

Para la aplicación de la técnica la muestra debe estar húmeda después del curado y debe ser sometida lo más pronto posible después de haber sido sacada del agua. La muestra debe ser soportada por ambos extremos y con dos soportes en la base de ambos extremos; la parte superior del aparato es colocada en el centro de la muestra. Los soportes de ambos extremos y la parte superior son los puntos de contacto con la muestra. La carga es aplicada desde la parte superior del aparato el cual produce un stress en el

centro de la muestra. Esta fuerza se aplica de manera perpendicular a lo largo del eje de la muestra para probar la flexibilidad del espécimen. La carga, a la que es sometida la muestra, es lentamente aplicada al espécimen hasta su ruptura.

El valor obtenido de la aplicación de esta prueba otorga la resistencia de ruptura de un residuo estabilizado / solidificado ante la aplicación de fuerza aplicada de manera axial. Un ejemplo de la importancia de la aplicación de esta prueba es determinar los límites de la sobrecarga de materiales sobre la mezcla en el momento de su disposición después de haber sido estabilizado / solidificado.

#### 4.5.1.6 La prueba del cono índice.

El Índice del cono de un material es un indicativo de la estabilidad de dicho material y de su capacidad de amortiguamiento. Esta prueba nos otorga valores de resistencia a la penetración del material ya estabilizado / solidificado. Las pruebas de penetración de cono son aplicadas a materiales estabilizados como lodos u otros desechos que serán enviados a rellenos sanitarios. Con esta prueba se pueden hacer supuestos acerca de la determinación de los tipos de vehículos necesarios para mover y colocar el material.

Para la aplicación de esta prueba se pueden utilizar varios tipos de penetración. Una de las más comunes esta basada en la colocación de una muestra del material solidificado / estabilizado en el fondo un recipiente de un aparato y con una especie de paleta acuchillada va raspando la tapa del recipiente. El cono de metal estándar en un eje es sostenido en el sitio por una abrazadera. Al inicio de la prueba el cono solamente toca la superficie

de la muestra pero cuando la abrazadera se suelta el cono penetra la muestra. Después de 5 segundos la abrazadera vuelve a cerrarse y la penetración se detiene y se mide la distancia penetrada por el cono. Esta prueba fue creada para medir la “traficabilidad” en los materiales compactados, o sea la capacidad de resistencia al soporte de equipo de construcción. Los resultados obtenidos determinan si el material es capaz de resistir la carga de algún equipo de construcción. La prueba en sí no resulta cara y es muy práctica y esta prueba puede ser realizada con un Penetrómetro de bolsillo que es un aparato que se basa en el mismo principio que el cono índice.

#### 4.5.1.7 Pruebas de durabilidad.

Esta prueba evalúa la resistencia de una mezcla de materiales estabilizados / solidificados a la degradación dada por factores externos. La prueba está diseñada para someter a la muestra a ciclos de condiciones naturales como congelación, descongelación, humidificado y secado; las propiedades de resistencia a la compresión, a la flexión, permeabilidad y otras pruebas pueden verse modificadas después de cada ciclo, así como algunas de sus propiedades físicas.

Para realizar el ciclo de congelado y descongelado se toman 7 muestras (44 mm diámetro x 74 mm largo) curadas durante 28 días. Una de estas muestras es seleccionada para la determinación de contenido de humedad siendo secada hasta peso constante a una temperatura de 60°C. Tres muestras son sujetas a la prueba y otras tres se usan como control; las muestras son sometidas a congelamiento a -20°C durante 24 horas y los controles son mantenidos en los contenedores húmedos durante 24 horas. Después de este tiempo, las

muestras son cubiertas con agua destilada y se dejan descansar así durante 23 horas. Las muestras se retiran de sus moldes con unas pinzas y las partículas pegadas a las muestras se retiran mediante un esparado de agua destilada hacia la superficie de las muestras. Las muestras son observadas por su deterioro físico y su pérdida de peso son determinadas. El ciclo de deshielo es repetido para un total de 12 ciclos o hasta que la pérdida de peso de cualquier espécimen supere el 30%.

Para las pruebas de humedecimiento y secado se utilizan siete muestras ( 44 mm de diámetro x 74 mm de largo) que son curados 28 días en un contenedor húmedo. Una muestra es seleccionada para determinación de contenido de humedad mediante secado a 60°C hasta llevar a peso constante. Tres muestras son sujetas a pruebas y otras tres servirán como control, cada una de las muestras es pesada y sujeta a 24 horas de secado a 60°C. Después de estas 24 horas, se permite que las muestras descansen por una hora y se cubren con agua destilada durante 23 horas. Estas muestras se remueven de sus moldes mediante pinzas y las partículas libremente pegadas a la muestra se remueven mediante el rociado de agua destilada hacia la superficie del espécimen. Este ciclo se realiza por 13 veces o hasta que la pérdida de su peso rebase el 30%.

Estas pruebas no dan conocimiento de la estabilidad de la muestra a largo plazo. Si los resultados muestran poca pérdida de peso y la integridad física del material se mantiene, entonces quiere decir que la elección de la cantidad de agente solidificante fue la adecuada; pero si se registrara una pérdida de peso considerable es necesario revisar la cantidad de agente solidificante o buscar otro tipo de agente que nos provea de la estabilidad necesaria.

No se tiene un estándar completamente definido acerca del límite de aceptabilidad aunque se sugiere alrededor de un 15% de pérdida de peso como aceptable.

#### *4.5.2 PRUEBAS QUÍMICAS*

Las pruebas químicas son aplicables tanto a los desechos no tratados como para los desechos ya solidificados y estabilizados. Las cuales nos dan un panorama más amplio acerca de las características del material que estamos tratando, así como de las características que otorgaría la técnica de estabilización / cementación al material tratado.

Algunas de las pruebas químicas aplicables se enumeran a continuación.

##### *4.5.2.1 pH.*

Esta determinación esta dada por la medición de la actividad del ión hidrógeno ( $H^+$ ) e indica el equilibrio ácido base de un material. Es necesario realizar una medición de pH tanto en el material de desecho no tratado como en el solidificado / estabilizado, así como en sus lixiviados o suelos de disposición. Para la determinación de pH en suelos se obtienen pesos similares de suelo ó sólido y agua des ionizada se mezclan y se dejan reposar durante una hora, después de este tiempo se determina el pH del sobrenadante de manera electrométrica. Es importante el parámetro de pH debido a que la lixiviabilidad de muchos metales está directamente relacionado con su pH; adicionalmente a los mentales, las proporciones básicas, neutras y ácidas también pueden ser afectadas por el pH.

#### 4.5.2.2 Potencial de oxidación / reducción.

Con esta medición se calcula el potencial electroquímico del medio que se tiene. Es necesario realizar esta determinación a los desechos antes y después de su tratamiento así como a sus lixiviados o suelos después de que se ha realizado la disposición del material tratado. Este dato resulta de utilidad para determinar el estado de oxidación en que algunos metales se encuentran, ya que además de determinar sus propiedades toxicológicas, el potencial Reducción Oxidación de los metales esta relacionado directamente con su lixiviación; también es posible que se nos den datos acerca de la estabilidad química que poseen.

#### 4.5.2.3 Carbono orgánico total.

Este análisis determina el nivel global de compuestos orgánicos en un líquido, lodo o muestra de suelo. Este parámetro es determinado por combustión con infrarrojo, termo conductividad o algún otro método. Con esta determinación se puede tener un aproximado de la interferencia dada por los compuestos orgánicos que puede estar presente.

#### 4.5.2.4 Aceites y grasas.

Este análisis determina el contenido total de aceites y grasas en una muestra. Es necesario aplicar este análisis tanto antes como después de la estabilización debido a que con esto se puede tener un panorama acerca de la efectividad de la técnica en la estabilización / solidificación de estos compuestos orgánicos. Si existiera el caso de realizar alguna estabilización

por solidificación a un material como el asfalto, realizar este tipo de pruebas resultaría de suma importancia ya que otorgaría datos para saber que tipo de técnica sería la más adecuada a elegir. En el caso de la estabilización por cementación, las grasas y aceites representan una importante interferencia.

#### 4.5.2.5 Conductividad eléctrica.

Esta medición nos provee de información para acarrear corriente eléctrica. La conductividad varía con la concentración y el tipo de iones presentes. La conductividad de soluciones puede ser medida. La conductividad de lixiviados de desechos tanto tratados como no tratados pueden ser comparados para encontrar las concentraciones iónicas relativas en las dos soluciones. En adición, los resultados de las pruebas aplicados a los lixiviados de desechos tratados como no tratados pueden ser comparados con las conductividades de superficie y sub superficie del agua en las cercanías del sitio potencial de disposición.

#### 4.5.2.6 Sólidos totales disueltos.

Este análisis indica la cantidad total de material sólidos disuelto en cierta solución. En el caso de soluciones lixivadoras, estos niveles pueden ser usados para predecir la degradación de desechos sólidos tratados o de los lixiviados que forman parte de la muestra.

#### 4.5.2.7 Análisis de metales.

Este análisis puede ser aplicado a soluciones de lixiviados para determinar la concentración de metales lixiviados del desecho solidificado. Las pruebas de análisis de metales pueden ser llevadas a cabo mediante una digestión mediante un ácido fuerte para medir la concentración total de metales en el desecho no tratado ó solidificado.

#### *4.5.3 Pruebas de lixiviación.*

En cuestión de lixiviación, este es uno de los principales problemas que se tienen que tomar en cuenta cuando se quiere llevar a cabo alguna técnica de estabilización / solidificación, debido a que representa el índice más importante en el sentido de seguridad y garantía que otorga el éxito en la aplicación de la técnica.

La lixiviación de materiales peligrosos y dañinos depende directamente de las propiedades intrínsecas del tipo de desecho a manejar así como de las propiedades hidrológicas y geoquímicas del sitio al que se ha destinado como sitio de disposición. Una de los objetivos de las pruebas físicas y químicas aplicables son la de dar un panorama amplio de las propiedades intrínsecas del material, aunque las condiciones a las que estos materiales están expuestos en el ambiente no son siempre posibles de reproducir en el laboratorio; los datos de lixiviación en el laboratorio pueden darnos una idea simulada de cómo se comportaría el desecho a ciertas condiciones, que pueden ser tanto las condiciones ideales como las peores condiciones a las que el material se podría encontrar.

Las pruebas que es posible realizar podrían ser usadas como punto de comparación entre las diferentes técnicas de estabilización / solidificación

existentes, pero resultaría complicado determinar o predecir la conducta, en cuanto a lixiviación, a largo plazo del material solidificado.

La lixiviación de un medio poroso en la práctica, es generalmente modelado mediante ecuaciones de transporte de solutos las cuales manejan factores tales como: Composición química del desecho y medio lixivante; propiedades físicas del desecho así como de los materiales que lo rodean y gradiente hidráulico a través del desecho.

En cuestión de la composición química del desecho, se manejan tanto las reacciones químicas como las cinéticas de reacción entre el desecho y el fluido lixivante que transforma el material contaminante de un estado inmóvil a una forma móvil.

Estos factores se usan para definir el transporte de fluidos y el movimiento contaminantes a través del desecho.

Las propiedades físicas del desecho así como el gradiente hidráulico determinan la forma en que la solución lixivante se pone en contacto con el material de desecho. El gradiente hidráulico junto con la porosidad y la permeabilidad del material serán los factores clave en la determinación de la velocidad y la cantidad de material lixivante que pueda atravesar el material solidificado. Por ejemplo si la permeabilidad o la porosidad del material solidificado es baja, entonces la solución que podría ocasionar lixiviados, no pasa a través del material sino que solo fluye alrededor de ella. La química del desecho y de la solución lixivante define el tipo y la cinética de las reacciones que movilizan o inmovilizan los contaminantes en los desechos estabilizados / solidificados. Las reacciones que pueden movilizar los contaminantes adsorbidos o precipitados del desecho estabilizado pueden incluir disolución y desorción. En condiciones de no-equilibrio, estas

reacciones compiten contra reacciones de no-movilización como precipitación y adsorción. Las condiciones de no-equilibrio generalmente ponen en contacto al material solidificado / estabilizado con la solución lixivante y puede resultar en una transferencia neta o en el movimiento de los contaminantes hacia la solución lixivante.

Algunos factores de la cinética química afectan la difusión molecular de contaminantes dentro del desecho; algunos de estos se mencionan a continuación:

- Acumulación de sustancias de desecho en el poro de la superficie de la partícula.
- Concentración de especies reactivas el poro de la superficie de la partícula.
- Difusión química del desecho o especies reactivas dentro de la solución lixiviadora o dentro del desecho.
- La polaridad de la solución lixiviadora y las especies de desecho.
- Las condiciones de oxidación / reducción y la competencia existente entre las cinéticas de reacción.

Al realizar experimentaciones en laboratorio resulta complicado poder tener condiciones duplicadas en la realidad debido al uso de soluciones acuosas estandarizadas o especiales. Los resultados obtenidos de estas pruebas solamente pueden considerarse válidos como punto de comparación cuando se presentan las mismas condiciones de trabajo en el campo. Las características físicas y químicas del desecho y la solución lixiviadora forman un punto esencial en la definición del transporte de lixiviados mediante mecanismos de advección, dispersión o de difusión. Advección se refiere al flujo hidráulico y al transporte de contaminantes altamente

solubles siguiendo el gradiente de flujo. La dispersión es el transporte de contaminantes por vía mecánica y la difusión es la transferencia de masa entre capas o fluidos adyacentes en flujo laminar.

Dada la baja permeabilidad de la mayoría de los materiales estabilizados / solidificados; la tasa de transporte de contaminantes para químicos adsorbidos es considerada para ser controlada por difusión molecular mas que por advección o por dispersión.

La tasa de lixiviación es la masa de desecho (M) que lixivia por unidad de área (SA) por unidad de tiempo (T) y puede ser determinada mediante la fórmula matemática siguiente:

$$(a) L=M / (SA \times T)$$

Y la velocidad de lixiviación (v) es definida como el volumen de solución lixivante (V) contactada con el desecho por unidad de área superficial (AS) por unidad de tiempo y se determina mediante la siguiente fórmula:

$$V = V / (SA \times T)$$

Es importante determinar tanto la concentración como la velocidad de las soluciones lixivadoras debido a que la relación entre estas dos características dirigen el comportamiento de la lixiviación.

El procedimiento usado para efectos de esta tesis, se describe en los Anexos.

#### 4.5.3.1 Procedimientos de lixiviación

Existe una gran cantidad de pruebas para determinar el índice de lixiviación en desechos sólidos incluyendo algunos que son específicos para residuos nucleares o peligrosos que ya están estabilizados / solidificados. La extracción, por ejemplo, es una prueba referida a la lixiviación, la cual involucra agitación de tierra o desechos pulverizados en una solución lixivadora. Esta solución puede ser ácida o neutra; las pruebas de extracción pueden involucrar una o más extracciones, en cualquiera de estos casos la lixiviación es asumida como el alcance de equilibrio al final de un periodo de extracción; por lo tanto esta prueba nos dé la determinación del punto máximo de concentraciones de lixiviados bajo ciertas condiciones.

Otro tipo de pruebas de lixiviación es las que no involucran agitación. La lixiviación de formas monolíticas de desecho se evalúan en esta prueba. La lixiviación puede realizarse bajo condiciones estáticas o dinámicas dependiendo de la frecuencia de renovación de la solución lixivadora. En pruebas estáticas, la solución no es reemplazada por una nueva, por lo que la lixiviación ocurre bajo condiciones estáticas hidráulicas, esto es debido a que se tienen bajas velocidades de lixiviación combinadas con altas concentraciones de formas monolíticas de desecho; en pruebas dinámicas, la solución lixivadora es renovada continuamente por lo que se simula la lixiviación bajo condiciones de no-equilibrio en las que no se alcanza el límite máximo de saturación y las tasas de lixiviado son altas. Cabe señalar que los términos estáticos y dinámicos solo involucran la velocidad de lixiviación.

La lixiviación en columna es otra prueba de tipo de laboratorio. En esta prueba se colocan desechos pulverizados en una columna donde se pone en contacto con la solución lixivante a una tasa especificada. Esta solución es

bombeada a través del desecho mediante una columna. Las pruebas de columna son más representativas en condiciones de campo que las pruebas de extracción en batch dado que se tiene una solución lixivadora en continuo a través del desecho. Esta prueba no es muy común debido a la complejidad de la reproducibilidad de los resultados debidos a factores como la no-uniformidad de empaque de desecho, crecimiento biológico, y la obstrucción de la columna.

Métodos para determinar lixiviación.

Existen diferentes pruebas de extracción y lixiviación entre las que se pueden destacar algunas como: Procedimiento para determinación de las características tóxicas de lixiviados (TCLP), Procedimiento para la prueba de toxicidad de extracción, Prueba para extracción de desechos California, Procedimiento de extracción múltiple y otros más. La prueba que será usada en esta tesis es la Extracción PECT según la NOM-052-SEMARNAT-1993; que es detallada en el Anexo.