

47
2e3



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA

SOLIDIFICACION DE RESIDUOS CONTENIENDO
METALES PESADOS, EN MORTEROS.

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERA QUIMICA

PRESENTA
GRISELA FRANCO GARCIA

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Mexico, D.F., 1993



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

INDICE.

INTRODUCCION	1
2. ANTECEDENTES	4
2.1 Alternativas de disposición de residuos sólidos	5
2.1.1. Tiradero a cielo abierto	5
2.1.2. Enterramiento controlado	6
2.1.3. Relleno Sanitario	6
2.1.4. Vertido al mar	7
2.1.5. Incineración	7
2.1.6. Confinamiento de residuos peligrosos	7
2.1.7. Otras	8
2.2 Procesos de solidificación-estabilización.	9
2.2.1. Clasificación	9
2.2.2. Factores para seleccionar el proceso	11
3. CONCRETO	14
3.1 Cemento	15
3.1.1. Componentes	15
3.1.2. Tipos	21
3.2 Destrucción del concreto	26
3.2.1. Erosión	26

3.2.2. Corrosión química	27
3.3. Protección del concreto	32
3.3.1. Relación agua/cemento	33
3.3.2. Selección de materiales	33
3.3.3. Protección superficial	36
3.3.4. Aditivos	36
4. EXPERIMENTACION	43
4.1 Condiciones experimentales	43
4.1.1. Características de los residuos	44
4.1.1.1 Lodos	44
4.1.1.2 Cenizas	46
4.1.2. Solidificación	48
4.1.2.1 Materiales	49
4.1.2.2 Proporcionamiento	52
4.1.2.3 Mezclado, moldeado y curado	56
4.2 Pruebas	59
4.2.1 Resistencia mecánica	60
4.2.2 Extracción de lixiviados	61
4.2.3 Erosión	62
4.2.4 Solubilidad	63
4.2.5 Observación al microscopio	64

5. RESULTADOS	65
5.1 Lodos residuales	65
5.1.1 Resistencia mecánica	66
5.1.2 Extracción de lixiviados	66
5.1.3 Erosión	71
5.1.4 Solubilidad	76
5.2 Cenizas	79
5.2.1 Resistencia mecánica	79
5.2.2 Extracción de lixiviados	80
5.2.3 Erosión	100
5.3 Observación al microscopio	105
5.3.1 Mortero con lodo residual	106
5.3.2 Mortero con cenizas	111
CONCLUSIONES	115
BIBLIOGRAFIA	119

INTRODUCCION.

Actualmente, el confinamiento o disposición sin control de los residuos es un importante problema ambiental y económico, debido a los graves da os que puede causar a la salud y al medio ambiente por la posible contaminación del suelo, aire y agua. Las prácticas más comunes de confinamiento de residuos sólidos en nuestro país son^(1,2): el tiradero a cielo abierto, enterramiento controlado, relleno sanitario e incineración; sin embargo, por las características particulares de disposición en el suelo hay producción de lixiviados, estos son los líquidos que se escurren o percolan de los residuos, ya sea por naturaleza del residuo o por su eventual inundación con aguas subterráneas y lluvia.

El lixiviado puede tener una composición muy variable ya que, depende de

las características del residuo y de las condiciones físicas, químicas y biológicas de exposición. Los metales pesados en particular, son considerablemente solubles en medio ácido y, como el pH del agua de lluvia se encuentra en un ámbito de 4.5 a 5.5, la presencia de estas especies tóxicas en los lixiviados es motivo de preocupación si éstos están en contacto con el nivel freático y contaminan los mantos acuíferos, importante fuente de agua potable para las zonas urbanas.

El grado de contaminación de un manto acuífero dependerá de la autodepuración que se pueda conseguir durante la infiltración del lixiviado en medio no saturado del suelo, del flujo de agua subterránea y de la propia cantidad del lixiviado. La contaminación generalmente se percibe cuando se han alcanzado captaciones en explotación y, considerando el gran volumen de estos recursos, la detección de contaminación representa, para entonces, un importante desarrollo en extensión.^(3,4)

En el caso de la incineración, paralelamente a las ventajas de reducir el volumen de los residuos y transformar la materia orgánica, es un proceso costoso y también se generan gases de combustión y cenizas, las cuales requieren también de disposición final como residuos que son.

De lo anterior se puede decir que no todos los desechos deben disponerse en forma común, ya que debido a la peligrosidad de su composición y a las condiciones de la disposición final, las consecuencias ambientales y económicas pueden ser totalmente perjudiciales. De esta manera, el analizar y probar nuevas opciones de confinamiento de residuos peligrosos puede ayudarnos a enfrentar el problema.

Este trabajo presenta las pruebas realizadas y los resultados obtenidos del confinamiento por "solidificación/estabilización"⁽⁵⁾ de lodos residuales con cromo y cenizas con contenido de metales pesados. En esta práctica de confinamiento, se seleccionó al cemento en mortero como material en que se incluye el desecho ya que, por su estado físico final (sólido) y sus condiciones de alta alcalinidad (pH alto), solidifica y estabiliza al elemento tóxico. Los bloques de mortero fueron fabricados con diferentes proporciones del residuo incluido, se probaron mecánicamente a los 28 días de edad y se sometieron a pruebas de ataque químico en condiciones que pretenden simular desde un ataque común con agua superficial, de lluvia, estancada y con sulfatos, hasta las condiciones más severas de pH, para evaluar la capacidad y la efectividad de retención de los metales pesados en morteros como una alternativa de disposición.

OBJETIVOS.

- Analizar la conveniencia de solidificar en cemento lodos residuales conteniendo cromo y cenizas conteniendo residuos de metales pesados, como una alternativa de disposición final.
- Analizar la evolución de la capacidad de retención de las especies tóxicas introducidas en el mortero.

2. ANTECEDENTES.

La actividad humana y el propio desarrollo tecnológico han traído consigo la producción de residuos de diversa índole, dentro de los cuales se encuentran los desechos sólidos o semi-sólidos. Conforme se adquiere mayor conciencia sobre la contaminación del medio ambiente se desarrolla tecnología de tratamiento y disposición de residuos, así como la normatividad correspondiente. En términos generales los residuos se pueden clasificar dentro de dos grupos principales: peligrosos y no peligrosos^(6,7). Los residuos peligrosos son considerados de origen industrial, con elevado potencial contaminante y poca degradabilidad. Algunos ejemplos de ellos los representan residuos orgánicos e inorgánicos como subproductos de proceso, solventes, materiales radiactivos, etc. Los residuos no peligrosos corresponden principalmente a aquellos de origen

doméstico e incluso industrial, biodegradables o inertes; ejemplos de éstos los representan residuos de alimentos, papel, vidrio, etc.

De una u otra forma, sea cual fuere el grado de toxicidad de un residuo aún después de un tratamiento, éstos deben disponerse de la forma más apropiada.

2.1 Alternativas de disposición de residuos sólidos.

Conforme crece la población y se logran avances tecnológicos, los desechos se vuelve notorios y es indispensable disponerlos de manera controlada por el deterioro ambiental que causan a la naturaleza y, en particular, al ser humano. Así, se identifican y habilitan alternativas de disposición.

2.1.1 Tiradero a cielo abierto.

Consiste en depositar los desechos en el suelo y dejarlos ahí, el terreno puede ser llano, excavaciones o depresiones (barranca, cause de río, etc.). Debido al crecimiento de número de habitantes de las poblaciones, los tiraderos cada vez se encuentran más cerca de las zonas habitadas y la cantidad de desechos aumenta también. En esta práctica no existe ningún control para evitar los riesgos de lixiviación por corrientes de agua y ocasiona serios problemas de salud a las comunidades, fauna indeseable, malos olores, etc. ^(1,4,7)

2.1.2 Enterramiento controlado.

Consiste en hacer una excavación en sitios disponibles lejos de poblaciones y con acceso libre todo el año, cuando se termina la capacidad de disposición se cubre con tierra y se busca otro sitio para el mismo fin. A pesar de que este método reduce los factores de contaminación del aire cuando se cubre finalmente, persisten los problemas de ruptura del paisaje, contaminación del agua y suelo, así como los riesgos de formación de fauna nociva y organismos transmisores de enfermedades^(1,8,9).

2.1.3 Relleno sanitario.

Es una alternativa de disposición de residuos, preferentemente sólidos, en el suelo; consiste básicamente en la selección de un sitio que debe estar alejado de poblaciones y de ríos, lagos o cualquier otra fuente de agua potable; así también debe prepararse físicamente distribuyendo el área disponible y planeando las zonas para disponer los residuos clasificados. Los residuos son esparcidos en capas delgadas, compactados al menor volumen y cubiertos con tierra cada día de trabajo. El sitio está preparado para la circulación del flujo de los lixiviados que se producen, éstos se acumulan y almacenan, y periódicamente se analiza su composición^(1,2,6); sin embargo, estos se infiltran y la contaminación no se hace esperar.

2.1.4 Vertido al mar.

Consiste en un vertido discontinuo, esta elección necesita un examen previo de las corrientes superficiales y profundas, así como estudios bacteriológicos y químicos, para evaluar los efectos del ecosistema y asegurar la estabilidad física, química y biológica del residuo en el medio^(9,10).

2.1.5 Incineración.

Consiste en la combustión total de los residuos. Algunos autores^(6,11,12,13,14) aún consideran a esta alternativa de disposición como la única que cumple con las características deseables de todo método de disposición: reducir la toxicidad, la movilidad y el volumen del residuo; pero en realidad, la movilidad de los elementos tóxicos no ha sido restringida si aún se encuentran en las cenizas y se disponen sin ningún control.

2.1.6 Confinamiento de residuos peligrosos.

En el confinamiento de residuos peligrosos se pretende la máxima seguridad en el aislamiento; sin embargo, generalmente son destinados a esta práctica sólo residuos radioactivos. Los procedimientos más comunes son el confinar en vidrio, cápsulas de concreto, polímeros y en terrenos estables como yacimientos de sal^(11,12,15); cuando es producido un sólido, se dispone en

cementerios radioactivos o en abismos submarinos⁽¹⁰⁾.

2.1.7 Otras.

Estas alternativas de disposición de residuos tienen un enfoque hacia el reuso; sin embargo, no se han desarrollado debido a la gran cantidad de residuos que se producen, por la falta de clasificación adecuada y por falta de tecnología^(16,17).

a) *Abono de suelos.* Se aprovechan las materias húmicas que aportan los residuos, por la mejora del poder de retención del agua más que por su aportación de materias nutritivas. Se utilizan en cultivos de flores, césped, etc.. Las limitaciones de empleo se derivan del riesgo de altas concentraciones de metales pesados, contenido bacteriológico y olores pútridos.⁽¹⁶⁾

b) *Recuperación de productos.* Este aspecto incluye no solo la recuperación física del producto con o sin tratamiento previo, como material reciclado, sino también el aprovechamiento económico de los mismos. Por ello, esta alternativa se aplica solo a algunos elementos o residuos porque la calidad y la cantidad de producto recuperable, así como el costo del tratamiento de recuperación, son factores que determinan su aplicación. Algunos ejemplos que los representan son el papel, vidrio, metales pesados de lodo, etc.^(18,19)

c) *Recuperación de energía*. Generalmente es la optimización del proceso de incineración de los residuos, el aprovechamiento de la energía calorífica en la incineración; aunque el uso de los residuos como combustible es limitado porque depende de su capacidad calorífica, contenido de materia orgánica y humedad^(13,16).

2.2 Procesos de solidificación-estabilización.

En el manejo de desechos, la solidificación-estabilización es un término utilizado para designar una tecnología que emplea aglutinantes, con el objeto de reducir la movilidad de los contaminantes y poder cumplir con los requerimientos de disposición en el suelo. Estos procesos están diseñados para mejorar el manejo de desechos, disminuir el área superficial a través de la cual los contaminantes se pueden infiltrar, limitar su solubilidad o eliminar los constituyentes peligrosos^(17,20,21,22).

2.2.1 Clasificación.

La tecnología solidificación-estabilización puede clasificarse por el tipo de proceso^(17,23,24) o por el aglutinante empleado⁽²⁵⁻²⁸⁾.

a) *Clasificación por el tipo de proceso*.

1. Solidificación, es un proceso en que ciertos materiales se adicionan al

residuo para generar un sólido. Puede o no presentar enlaces químicos entre el contaminante tóxico y el aglutinante.

2. Estabilización. Se refiere al proceso por el que un residuo se convierte a una forma químicamente más estable. El término comprende la solidificación y el uso de una reacción química para transformar al contaminante en nuevas sustancias no tóxicas.

3. Encapsulación. Es un proceso que comprende el recubrimiento total o parcial de una partícula tóxica o un aglomerado de residuos con un aglutinante.

b) Clasificación por el aglutinante empleado.

Los aglutinantes son aquellas sustancias que atrapan al residuo sin que reaccionen con él necesariamente, de esta manera lo estabilizan o minimizan su movimiento, de tal forma que resulta un producto sólido considerablemente inerte.

Los procesos de solidificación-estabilización se clasifican por uso de aglutinantes inorgánicos y orgánicos⁽²⁵⁻²⁸⁾. La mayoría de los sistemas aglutinantes inorgánicos incluyen varias combinaciones de cementos hidráulicos: cal, materiales puzolánicos, sulfato de calcio (yeso) y silicatos. Los aglutinantes orgánicos más usados son: poliésteres, poliolefinas (polietileno y polietileno-polibutadieno) y urea-formaldehído. También se han utilizado sistemas combinados de aglutinantes orgánicos e

inorgánicos como: tierras diatomáceas con cemento y poliestireno, poliuretano y cemento, etc.

2.2.2 Factores de selección del proceso.

Dentro de los factores de selección del proceso de solidificación se identifican: las características químicas y físicas del residuo, los requerimientos del manejo del producto, requerimientos de reglamentación y la economía.

El objetivo del tratamiento en esta investigación, como se indicó, es tratar a un residuo tóxico para convertirlo en un material no peligroso y disponerlo como tal.

a) Las características del desecho es un factor muy importante que afecta en la solidificación, generalmente el residuo debe ser compatible con el aglutinante; por ejemplo, los compuestos inorgánicos se solidifican más fácilmente que los compuestos orgánicos, tal parece que los compuestos orgánicos no presentan las reacciones químicas que formen compuestos orgánicos- inorgánicos o complejos, para que puedan enlazar químicamente los contaminantes orgánicos^(25,26).

Adicionalmente a los efectos químicos, también son importantes la temperatura y las condiciones de humedad durante el mezclado residuo-aglutinante; cuando se utiliza cemento como aglutinante, temperaturas inferiores a 0 °C causan un retardo en la fijación, mientras

que si son superiores a 30 °C la aceleran, y el agua contenida en el residuo se remueve en la hidratación del cemento pero debe mantenerse una proporción⁽²⁹⁾. Las características físicas del desecho, como el tamaño y la forma, también son importantes; la viscosidad de las mezclas puede cambiar con el tamaño y la forma de la partícula y afectar el agua disponible para las reacciones. Los procesos más empleados para residuos inorgánicos son la solidificación por adición de cemento, por adición de cal o de materiales puzolánicos^(17,20,21).

En los procesos basados en cemento, generalmente se utiliza cemento Portland con aditivos para mejorar las características físicas y reducir el lixiviado proveniente del residuo solidificado resultante. El desecho tóxico se mezcla en una suspensión con agua y polvo de cemento anhidro. El mecanismo de estabilización es la formación de productos de hidratación a partir de compuestos de silicato y agua, produciéndose un gel de silicato de calcio hidratado que va creciendo y forma la matriz de cemento compuesta de fibras de silicato entrelazadas y productos de hidratación⁽³⁰⁾. Algunos compuestos como las sales solubles de manganeso, estaño, cobre y plomo, interfieren con los procesos de solidificación, incrementando los tiempos de fraguado y reduciendo de una forma considerable las fuerzas físicas. Impurezas como materia orgánica, sedimentos y algunas arcillas también pueden ocasionar un retraso considerable en el fraguado⁽³¹⁾.

b) El manejo del residuo tratado es también importante, su transporte, almacenamiento, disposición en relleno sanitario, producto comercial, etc., se basa en la normatividad establecida de manejo y disposición de residuos tóxicos o peligrosos.^(27,32)

c) Economía. El costo de estos procesos de tratamiento se considera bajo comparado con otras técnicas de tratamiento, porque la materia prima es económica, los procesos son sencillos y el equipo necesario es fácilmente accesible^(20,21).

El desarrollo de esta alternativa de tratamiento de residuos dependerá notablemente de la normatividad establecida para disponer los residuos y de la capacidad del proceso para cumplir con los criterios de reglamentación en un futuro; así, debido a los problemas que presenta el relleno sanitario, que es el método más empleado para la disposición de desechos en el suelo, estos procesos se han aplicado a varios desechos industriales: de la industria de acabado de metales y galvanoplastia, lodos residuales, sedimentos, cenizas, desechos radioactivos, etc.^(23,24,33-42), pero las pruebas a las que se ha sometido el material solidificado involucran pruebas normales para concreto, como son pruebas de tensión, de humedad y secado, de congelado y deshielo, y leves pruebas de ataque químico.

De esta manera, dados los antecedentes de estos procesos de disposición de residuos inorgánicos, y el objetivo prioritario de este trabajo de disposición ambiental segura de lodos y cenizas que contienen metales pesados a un mínimo costo, se eligió un proceso de solidificación basado en cemento (mortero).

3. CONCRETO.

El producto obtenido del proceso de solidificación seleccionado y empleado en este trabajo es un mortero, que se identifica como la mezcla de cemento, agua, aditivo y agregado fino (arena, tamaño máximo igual o menor a 9.5 mm), el cual se diferencia del concreto porque no contiene agregado grueso (grava, tamaño mayor de 9.5 mm y menor de 64.0 mm)⁽⁴³⁾. Aunque la solidificación en concreto hubiera generalizado más la investigación, no fue posible fabricarlo porque los bloques o especímenes requeridos para la experimentación son pequeños y la grava ocuparía mucho volumen. Sin embargo, los límites de especificación mortero-concreto son convencionales, así que en este capítulo, la palabra concreto designará al mortero y concreto.

El proceso de solidificación-estabilización que se aplica a los objetivos de este trabajo, requiere seleccionar los materiales cementantes que favorezcan física y químicamente la estabilidad del residuo adicionado; para ello es necesario tener conocimiento de los mismos. Así también se debe definir el manejo y destino del producto final obtenido, lo cual depende de sus características y de la normatividad establecida. En este capítulo, en principio, se resumen los principales componentes del cemento, se enlistan los tipos de cemento disponibles en el mercado, su composición y sus características físicas y químicas; posteriormente, se revisan en términos generales condiciones de destrucción del concreto, los fundamentos de su protección y los aditivos más comúnmente utilizados.

3.1 Cemento.

El cemento es un conglomerante hidráulico, es decir, un material finamente pulverizado que al agregarle agua tiene la propiedad de fraguar tanto en el aire como en el agua y formar una masa endurecida. Químicamente es la mezcla minuciosa de materiales calcáreos, arcillosos y otros materiales que contienen sílice, alúmina y óxidos de hierro, que calcinados a temperatura de formación del clinker, se pulverizan y homogenizan^(44,45).

3.1.1 Componentes.

Se consideran cuatro componentes principales del cemento^(45,46), tabla 3.1, entre otros de menor porcentaje en peso.

TABLA 3.1.- COMPOSICION DEL CEMENTO.

NOMBRE	NOTACION	FORMULA	%
Silicato tricálcico	C ₃ S	3CaO.SiO ₂	70.0
Silicato dicálcico	C ₂ S	2CaO.SiO ₂	
Aluminato tricálcico	C ₃ A	3CaO.Al ₂ O ₃	
Aluminoferrito-tetracálcico.	C ₄ AF	4CaO.Al ₂ O ₃ .4CaO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃	20.0
Otros	Óxidos	MgO, Na ₂ O, K ₂ O, CaO, etc.	10.0

a) Silicato tricálcico (C₃S).

Este compuesto desarrolla gran cantidad de calor de hidratación, así como elevadas resistencias a corto plazo y libera abundante cantidad de cal (cal de hidrólisis). Por lo tanto, para grandes masas de concreto con pequeña relación de superficie a volumen, se calientan demasiado y sometidas a choques térmicos se fisuran y agrietan; así también, el fuerte calentamiento provoca una desecación si no se evita con un curado adecuado lo que puede intensificar la fisuración o el agrietamiento. En lo relativo a la abundante cal liberada, ésta es sensible al ataque y disolución de aguas ácidas, puras o carbónicas agresivas⁽⁴⁶⁾.

b) Silicato dicálcico (C₂S).

Es el constituyente principal de los cementos Portland de los llamados de endurecimiento lento, desarrolla mucho menos calor de hidratación que el

tricálcico, libera menor cantidad de cal y da menor resistencia mecánica a corto plazo⁽⁴⁶⁾.

En el cemento Portland los silicatos tricálcico y dicálcico se pueden considerar como valores a parámetros conjugados cuya suma es constante, aproximadamente el 70% de la composición del cementos, de tal manera que el aumento de uno implica la correspondiente disminución del otro⁽⁴⁶⁾.

En la tabla 3.2 se comparan algunas características de los cementos dependiendo de las proporciones de los silicatos.

TABLA 3.2.- COMPARACION ENTRE EL CONTENIDO DE SILICATOS EN EL CEMENTO PORTLAND.

CEMENTOS PORTLAND	
Ricos en C ₃ S : 50%	Pobres en C ₃ S : 30%
Pobres en C ₂ S : 20%	Ricos en C ₂ S : 40%
más resistentes	menos protectores (de armaduras)
más fisurables	menos atacables
más atacables	menos fisurables
más protectores (de armaduras)	menos resistentes

c) Aluminato tricálcico (C₃A).

Posee una gran velocidad de hidratación, en la cual desarrolla mucho calor, es el constituyente que más calor desprende, colabora moderadamente a las resistencias a corto plazo y no libera cal en su hidratación, sino al

contrario, fija en cierta proporción la cal liberada por los dos silicatos. Es muy sensible a los sulfatos en general, con los que reacciona dando lugar a productos expansivos que provocan la destrucción del concreto. Es el constituyente causante del fraguado rápido del cemento y el que exige que se añada yeso; en general, es conveniente agregar una o varias formas de sulfato cálcico al cemento para retardar, regular y normalizar el fraguado^(46,47).

d) Aluminio-ferrito tetracálcico (C4AF).

Se caracteriza por una lenta velocidad de hidratación, en la que se desarrolla poco calor, escasa contribución a la resistencia y buena durabilidad frente a los ataques químicos de los sulfatos. Sus características se contraponen, en cierta forma, a las del aluminato tricálcico⁽⁴⁶⁾. En la tabla 3.3 se describen algunas características del cemento al variar las proporciones de los aluminatos, cuya suma de tantos por ciento se puede considerar aproximadamente constante al 20 % de la composición total del cemento.

TABLA 3.3.- COMPARACION ENTRE EL CONTENIDO DE ALUMINATOS EN EL CEMENTO PORTLAND.

CEMENTOS PORTLAND	
Ricos en C3A : 15% pobres en C4AF : 5%	Pobres en C3A : 5% ricos en C4AF : 15 %
más atacables mayor retracción mayor calor de hidratación	menos atacables menor retracción menor calor de hidratación

e) Cal libre (CaO).

Este es un constituyente frecuente pero no normal del cemento. Su existencia es un defecto de fabricación que puede atribuírsele a diferentes causas.

La hidratación de la cal libre es expansiva, dando lugar a cuarteamientos superficiales del concreto e incluso debilitamiento y destrucción de éste. Es atacable por aguas puras, ácidas y carbonatadas^(46,47).

f) Magnesia (MgO).

La magnesia como la cal libre puede también ser expansiva, aunque a largo plazo. Tanto el hidróxido de calcio como la magnesia pueden reaccionar dentro del concreto con silicatos finos dispersos, formando compuestos insolubles que contribuyen a la resistencia conocida como "acción puzolánica".

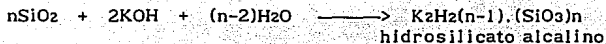
g) Compuestos alcalinos (Na₂O y K₂O).

Los álcalis del cemento se encuentran combinados con C₂S y C₃A o en forma de sulfato potásico o sódico. Con la lixiviación el agua produce una cantidad considerable de compuestos alcalinos solubles que influyen sobre la composición de la solución en la pasta seca del cemento. Los álcalis reducen la solubilidad de la cal libre e incrementan la de los aluminatos y

de los silicatos, aumentando de este modo el ritmo de la hidratación de los principales constituyentes del cemento^(46,48).

Los álcalis pueden reaccionar con concreto endurecido con algunos tipos de agregados reactivos que forman un gel voluminoso (*reacciones álcali-sílice*). En forma simplificada generalmente se aceptan los siguientes comportamientos:

Para silicatos reactivos:



Para dolomita:



h) Yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$).

El yeso del cemento Portland, que generalmente se le añade para controlar el fraguado acelerado provocado por el C_3A , es dosificado en mayor o menor cantidad de acuerdo con el contenido de C_3A , de álcalis y la finura del cemento.

El yeso agregado eleva la temperatura del clinker en los molinos de cemento; así, el yeso crudo añadido se deshidrata en parte y se convierte

en yeso cocido; cuando esto sucede, y el cemento se amasa, se observa un entumecimiento o rigidización pasajera de la pasta, que desaparece al seguir amasando. El fenómeno es conocido como falso fraguado y no influye en la resistencia ni en las demás características del cemento, solo exige un amasado más prolongado y enérgico. Cuando el falso fraguado se produce en una masa de concreto, la tendencia es deshacer el efecto, añadiendo más agua a la masa para aumentar su fluidez, resultando al final un concreto más fluido, pero con una relación agua/cemento más elevada que la prevista; es decir, un concreto de peor calidad, menos resistente, más heterogéneo, menos compacto y, por lo tanto, más poroso y permeable y menos duradero^(47,48).

3.1.2 Tipos.

De acuerdo a las proporciones de los componentes del cemento, éste presenta características diferentes que permiten aprovecharse de conforme a los requerimientos que se le exigen al concreto.

A continuación se presenta un resumen de los tipos de cemento más comunes y sus características.

a) Cemento Portland.

Es el cemento más utilizado entre los de uso común y se clasifica aún en 5 diferentes tipos de acuerdo a su proporcionamiento de materiales

(composición química), ensayos de resistencia mecánica y estabilidad de volumen⁽⁴⁷⁻⁵⁰⁾.

Tipo I. De uso común, utilizable en las construcciones normales de concreto, identificado como cemento Portland normal.

Tipo II. Modificado, destinado a construcciones de concreto expuestas a una acción moderada de sulfatos o cuando se necesita un calor de hidratación moderado. Su propiedad característica es que su contenido de C₃A no debe superar el 8 %.

Tipo III. De rápida resistencia. Para elaboración de concretos en los que se requiera alta resistencia a temprana edad.

Tipo IV. De bajo calor de hidratación. Se emplea para la elaboración de concretos en épocas o climas muy cálidos, o para ejecutar obras con grandes masas de concreto.

Tipo V. De alta resistencia a la acción de los sulfatos, se emplea en el caso concreto en contacto con aguas subterráneas.

En la tabla 3.4 se resumen las características químicas y físicas de cada tipo de cemento Portland.

TABLA 3.4 - CARACTERISTICAS DE CEMENTOS PORTLAND.

CARACTERISTICAS.	TIPO I	TIPO II	TIPO III	TIPO IV	TIPO V
CONDICIONES QUIMICAS:					
SiO ₂ , % mínimo.....	---	21	---	---	---
Al ₂ O ₃ , % máximo.....	7.5	6	7.5	6	---
Fe ₂ O ₃ , % máximo.....	6	6	6	6.5	---
MgO, % máximo.....	5	5	5	5	4
SO ₃ , si el C3A no supera el 8 %.....	2.5	2.5	3.9	2.3	2.3
SO ₃ , si el C3A supera el 8 %.....	3	---	4	---	---
Pérdida al fuego, % máximo.....	3	3	3	2.5	3
Residuo Insoluble, % máximo.....	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
C ₃ S, % máximo.....	50	50	60	30	30
C ₂ S, % mínimo.....	20	20	10	40	40
C ₃ A, % máximo.....	15	8	15	7	5
C ₃ S + C ₃ A, % máximo.....	65	58	75	37	35
C ₃ AF + C ₃ A, % máximo.....	20	20	20	20	20
Alcalis (% Na ₂ O + 0.658 % K ₂ O) % máximo.....	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
CONDICIONES FISICAS:					
Finura, superficie específica, cm ² /g determinada por turbidímetro de Wagner:					
valor medio.....	1600	1600	---	1600	1600
valor mínimo.....	1500	1500	---	1500	1500
Ensayo de permeabilidad al aire:					
valor medio.....	2600	2600	---	2600	2600
valor mínimo.....	1800	1800	---	1800	1800
Estabilidad, expansión en autoclave, % máximo.....					
	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
Tiempo de fraguado:					
a) Método de Gillmore					
Principio, en minutos (mínimo).....	60	60	60	60	60
Final, en horas (máximo).....	10	10	10	10	10
b) Método de Vicat					
Tiempo mínimo, en minutos.....	45	45	45	45	45

b) Cemento puzolánico.

Es el cemento hidráulico que se obtiene de la molienda conjunta del clinker portland, puzolana y sulfato de calcio natural, que le imparten un calor de hidratación moderado. El clinker portland contiene como máximo 8 % de aluminato tricálcico (C₃A) y la puzolana constituirá del 15 al 20 % en peso. Este cemento presenta una resistencia moderada a los sulfato. La tabla 3.5 resume las características de este cemento^(46,50).

c) Cemento Portland de escoria de alto horno.

Este conglomerante hidráulico resulta de la molienda conjunta de clinker de Portland, escoria granulada de alto horno y sulfato de calcio natural. Tabla 3.5^(46,50)

d) Cemento de escoria.

Este cemento resulta de la mezcla de escoria granulada de alto horno y cal hidratada finamente pulverizados, en que la escoria representa entre el 65 y 90 % en peso del cemento. La tabla 3.5 resume sus características^(46,47).

e) Cemento Aluminoso.

También conocido como cemento fundido de alúmina. Este conglomerante está formado por una mezcla de piedra caliza y bauxita, pulverizadas y homogenizadas; mezcla que es calcinada hasta su fusión o sinterización y

TABLA 3.5 - CARACTERISTICAS DE ALGUNOS CEMENTOS.

CARACTERISTICAS.	B	C	D	E
CONDICIONES QUIMICAS:				
SiO ₂ , % mínimo.....	21	21	21	3
Al ₂ O ₃ , % máximo.....	6	6	6	42
Fe ₂ O ₃ , % máximo.....	6	6	6	11
MgO, % máximo.....	4	5	5	1.5
SO ₃ , si el C3A no supera el 8 %.....	4	4	4	---
SO ₃ , si el C3A supera el 8 %.....	---	---	---	1.2
Pérdida al fuego, % máximo.....	5	3	3	---
Residuo insoluble, % máximo.....	0.75	1	1	---
C3S, % máximo.....	30	50	50	---
C2S, % mínimo.....	40	---	---	---
C3A, % máximo.....	5	7	8	---
C3S + C3A, % máximo.....	35	57	58	---
C3AF + C3A, % máximo.....	20	20	20	---
Alcalis (% Na ₂ O + 0.658 % K ₂ O) % máximo.....	0.6	0.6	0.6	---
CONDICIONES FISICAS:				
Finura, superficie específica, cm ² /g determinada por turbidímetro de Wagner:				
valor medio.....	---	---	---	---
valor mínimo.....	---	---	---	---
Ensayo de permeabilidad al aire:				
valor medio.....	2800	2600	4200	---
valor mínimo.....	3000	2800	4700	---
Estabilidad, expansión en autoclavo, % máximo.....	0.6	0.2	0.6	---
Tiempo de fraguado:				
a) Método de Gillmore				
Principio, en minutos (mínimo).....	45	45	45	---
Final, en horas (máximo).....	7	7	7	---
b) Método de Vicat				
Tiempo mínimo, en minutos.....	30	30	30	---

NOTAS:

B: Cemento puzolánico

C: Cemento portland de escoria de alto horno

D: Cemento de escoria

E: Cemento aluminoso

molido conforme a las normas, su composición normal es CaO, de 35 a 41 %; SiO₂, de 3 a 6 %; Al₂O₃, de 36 a 42 %; Fe₂O₃, de 3 a 11 %; FeO, de 3 a 8 % y MgO, de 0.2 a 1.5 %, carece por completo de cal libre. Este cemento es de fraguado rápido, de gran calor de hidratación y de alta resistencia a los sulfatos^(46,50), tabla 3.5.

3.2 Destrucción del concreto.

La intención en este trabajo de revisar en términos generales las causas y efectos de la destrucción del concreto tiene el objeto de fundamentar la selección del tipo y calidad de los materiales a utilizar como cementantes, proporciones, condiciones de preparación y aditivos adecuados para proteger al concreto; previniendo el consecuente arrastre o liberación del desecho tóxico incluido en él. Así también, ha permitido seleccionar las pruebas a las que es necesario someter el concreto para evaluar la capacidad de retención de metales y la posible aplicación de este método de disposición para los residuos tratados.

En general, se distinguen dos formas de destrucción del concreto: erosión⁽⁴⁸⁻⁵⁰⁾ y corrosión química⁽⁴⁴⁻⁴⁷⁾.

3.2.1 Erosión.

Para describir el comportamiento del concreto endurecido cuando se le somete a acciones que ponen a prueba su resistencia a la erosión, primero

es necesario establecer cómo actúan estas sobre el material. Pueden distinguirse dos clases principales de acciones erosivas: erosión mecánica y erosión hidráulica.

1.-*Erosión mecánica o abrasión.* Causada principalmente por el desgaste mecánico, efecto de heladas, etc. La respuesta del concreto a la abrasión depende fundamentalmente de su resistencia mecánica y de los factores que contribuyen a incrementarla.

2.-*Erosión hidráulica.* Debida a la acción del agua que se desplaza con cierta velocidad sobre la superficie del material.

3.2.2 Corrosión química o ataque químico.

El concreto endurecido puede ser afectado por diversos procesos que involucran reacciones químicas, algunas de ellas se presentan en su interior o son propiciadas por agentes externos del medio que le rodea.

Entre las reacciones de carácter interno, la más conocida es la llamada reacción *álcali-sílice*, que puede ocurrir entre ciertos agregados silíceos y álcalis (óxidos de sodio y potasio) que provienen del cemento; las reacciones más representativas se presentan en 3.1.1 inciso (g). El ataque de agentes corrosivos externos o corrosión química del concreto puede ser de dos clases: ataque por disolución, fenómeno de deslave o lixiviación y ataque por descomposición química.

a) *Ataque por disolución, fenómeno de deslave o lixiviación.*

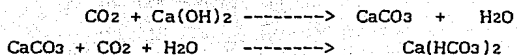
Consiste en la remoción paulatina del hidróxido de calcio que se libera durante la hidratación del cemento como resultado de la acción disolvente del agua que se encuentra en contacto con el concreto. Aún cuando el hidróxido de calcio es soluble en cualquier clase de agua (1.85 g/l), lo es más en aguas muy puras (ávidas de iones) o en aquellas que tienen carácter ácido⁽⁴⁴⁻⁴⁶⁾.

En la lixiviación causada por las aguas blandas, los aluminatos cálcicos reaccionan rápidamente con el agua constituyendo nuevos compuestos hidratados. Dependiendo de la composición de la pasta de cemento, la presencia de iones extra os y la temperatura, se forman varias combinaciones hidratadas inestables, pero que tienen una mayor solubilidad que los silicatos hidratados; el contacto permanente con al agua agresiva acaba por destruirlos, quedando una costra fina de hidróxido de aluminio⁽⁴⁴⁾.

La acción agresiva del agua aumenta cuando se infiltra por efecto de la presión. El agua filtrada, rica en hidróxido de calcio, se carbonata al contacto con el aire por efecto del anhídrido carbónico (CO₂) de éste (carbonatación), precipitando el carbonato de calcio en forma de eflorescencias blancas. La influencia del aumento de temperatura en la disolución agresiva de aguas blandas sobre el cemento es muy limitada. La corrosión producida por agua a 70 °C sólo es ligeramente superior a la causada por agua a 20 °C⁽⁴⁶⁾.

Entre los ácidos contenidos en aguas agresivas al concreto se identifican

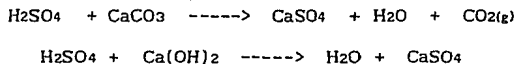
los siguientes: el CO₂ disuelto en el agua que reacciona inicialmente con el hidróxido de calcio libre para producir carbonato (carbonatación); también es posible que el carbonato vuelva a reaccionar con la solución de CO₂ para producir bicarbonato de calcio.



El bicarbonato de calcio es muy soluble en agua y puede removerse con facilidad. Una reacción continua de esta naturaleza incrementa progresivamente la porosidad del concreto, pudiendo llegar a debilitarlo, e incluso destruirlo. La lixiviación se puede observar por la presencia de manchas blancas en la superficie del concreto.

El ácido sulfúrico disuelve los carbonatos del cemento y agregados, los daños se presentan en partes donde no corre el agua y se identifican por desprendimiento de agregado.

Reacción de ácido sulfúrico:



El sulfato así obtenido puede gradualmente atacar al C₃A del aglomerante (ver reacciones de los sulfatos) por lo que es necesario usar cementos de bajo contenido de aluminato tricálcico; se requiere además que el material se encuentre en un lugar ventilado que prevenga condensaciones.

Los ácidos húmicos son poco peligrosos para el concreto endurecido; su presencia en pequeñas cantidades en el concreto fresco, dificulta su fraguado o endurecimiento. Los ácidos orgánicos más agresivos son el acético, el láctico, los grasos y los tartáricos^(49,50).

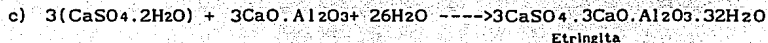
b) Ataque por descomposición química.

Existen algunas sustancias cuya agresividad al concreto es consecuencia de su reacción química con algunos compuestos del cemento. Como frecuentemente el producto de la reacción ocupa mayor volumen, el efecto resultante es una expansión interna que provoca la desintegración del concreto. Entre este tipo de agentes agresivos destacan por sus efectos los sulfatos y cloruros (sales de ácido inorgánicos); siendo los primeros los más agresivos.

El efecto perjudicial de los sulfatos en el concreto se atribuye a su reacción con el aluminato tricálcico (C_3A) del cemento para formar sulfoaluminato de calcio, que cristaliza con gran número de moléculas de agua, provocando fuertes expansiones que pueden desintegrar al concreto. Su efecto es especialmente intenso si el nivel del agua es variable o si existe flujo.

El sulfato de calcio y de magnesio, atacan directamente al aluminato y silicato tricálcico (C_3A), respectivamente, sin necesidad de combinarse previamente con el hidróxido de calcio, como ocurre con el sulfato de sodio; esta característica limita el uso de cemento puzolánico para protección, ya que la reacción se lleva a cabo aún en ausencia del $Ca(OH)_2$, quedando como una alternativa la impermeabilidad del material^(44,46).

Reacciones de los sulfatos:



Las sales magnésicas, ya sean sulfatos o cloruros, son perjudiciales para el concreto. Por una reacción de intercambio de iones, sustituyen la cal del cemento por el magnesio formando hidróxido de magnesio que se deposita entre los agregados en forma de masa blanda y gelatinosa, sin propiedades hidráulicas; la reacción continúa hasta que se gasta todo el hidróxido de calcio y se transforma en una sal soluble que es arrastrada. En el caso de sulfato magnésico se forma simultáneamente yeso y, con cloruro magnésico se forma cloruro cálcico⁽⁴⁶⁾.

Las sales amónicas, a excepción de los carbonatos, oxalatos y fluoruros, son perjudiciales para el concreto. La sal amónica es descompuesta por la cal libre, formándose amoniaco y un radical ácido que se combina con la cal como si el ácido libre actuase directamente con el concreto⁽⁴⁶⁾.

Las grasas y aceites vegetales y animales son descompuestos por la cal, liberando ácidos grasos que reaccionan con más cal para formar sales poco resistentes⁽⁴⁶⁾. El agua de mar contiene como componentes perjudiciales

para el concreto, sales de magnesio y cloruros los cuales aumentan considerablemente la solubilidad del yeso y la etringita, por lo que se lavan por la acción del oleaje presentando el concreto pérdida de resistencia⁽⁴⁹⁾.

El efecto destructivo de las aguas depende de los siguientes factores⁽⁴⁶⁾:

- _ El tipo de cemento utilizado, sus propiedades físicas y químicas.
- _ La calidad de los agregados, propiedades físicas y químicas.
- _ El método utilizado en la preparación del concreto, relación agua/cemento, su compactación y edad del cemento.
- _ La condición de la superficie expuesta al agente agresivo.
- _ La composición y concentración del agente agresivo, así como su manera de actuar sobre la estructura del concreto.

3.3 Protección del concreto.

Al igual que en cualquier reacción química, el contacto íntimo de los compuestos a combinarse favorece la rapidez de formación de los nuevos compuestos y, en este caso particular, la facilidad con que el agua penetre a los poros del concreto será un factor importante en el avance del ataque y deterioro.

La porosidad del concreto depende de la relación agua/cemento, de la riqueza de la mezcla, de la granulometría de los agregados y de la compactación que se logre durante la preparación. Cuanto más compacto sea

el hormigón, concreto o mortero, y más apropiado sea el tipo de cemento elegido, mayor será la capacidad de resistencia del material frente a agentes agresivos.

El endurecimiento previo del material, el mayor tiempo posible fuera del alcance del agua agresiva, aumenta su capacidad de resistencia⁽⁴⁶⁾.

3.3.1 Relación agua/cemento.

Las propiedades de una pasta de cemento dependen principalmente de su relación agua/cemento y de su contenido de vacíos. La proporción relativa entre los dos primeros determina la viscosidad de la pasta fresca, e influye en sus propiedades mecánicas, estabilidad dimensional y durabilidad de la pasta endurecida⁽⁵⁰⁾. La ley de la relación agua/cemento dice que, "para agregados y cementos iguales, la resistencia potencial a compresión del concretos es prácticamente constante, cuando la relación entre agua y cemento se mantiene constante". Para materiales expuestos a aguas agresivas se recomienda una relación agua/cemento no mayor de 0.5⁽⁴⁶⁾.

3.3.2 Materiales, elección y calidad.

La práctica ha demostrado la eficacia de la adición de puzolanas, independientemente del tipo de cemento empleado y de las adiciones de otros materiales; la cantidad adicionada no se toma en cuenta como el conglomerante para el cálculo de la relación agua/cemento⁽⁴⁶⁾.

Un medio posible de protección del concreto contra sulfatos, consiste en utilizar un cemento con bajo contenido de aluminato tricálcico; así el cemento Portland tipo II y tipo V se recomiendan por su contenido de 8 y 5 %, respectivamente. En aguas con contenido de hasta 1 200 mg/l de ión sulfato deben emplearse cementos Portland con menos de 5% de aluminato tricálcico (tipo V); también podría utilizarse en estos casos el cemento siderúrgico sobresulfatado, pero si también existen en el agua más de 600 mg/l de iones magnesio o amonio, el empleo de éste no es apropiado, además de que no puede ser puesto en contacto con agua que contenga ácido carbónico (disolvente de la cal), o cuyo pH sea inferior a 6⁽⁴⁶⁾.

Cuando el material se pone en contacto con aguas con pH menor a 6 o con más de 10 mg/l de ácido carbónico, se recomienda aumentar la dosificación de cemento⁽⁴⁶⁾. Otro medio de protección consiste en evitar la presencia de hidróxido de calcio libre como resultado de la hidratación del cemento, en esta acción fundan su efecto protector los cementos Portland puzolánico y el de escoria de alto horno (siderúrgico).

No existe ningún cemento Portland resistente al ácido sulfúrico, pero se recomienda usar agregados calizos que neutralizan la acción del ácido. También existen tratamientos a base de resinas y vinilos que son muy efectivos pero muy costosos⁽⁴⁶⁾.

Respecto a la protección contra dióxido de carbono (CO₂), existen dos medios de protección :

a) Impedir que se forme hidróxido de calcio durante la hidratación del

cemento, puede conseguirse con el empleo de un cemento especial, aluminoso, de escoria de alto horno o puzolánico.

b) Evitar la penetración de agua agresiva a través del concreto, fabricando un concreto muy denso, compacto e impermeable, o recurrir a una protección adicional con aditivos.

Los agregados deben también cumplir con determinadas características de resistencia por ser parte integral del concreto, ya que existe la posibilidad del ataque de soluciones alcalinas derivadas de la hidratación del cemento hacia dos tipos de agregados: algunas rocas silíceas y ciertas calizas dolomíticas, con las cuales se llevan a cabo reacciones álcali-sílice y álcali-carbonato, respectivamente (ver inciso 3.1.1). No todas las rocas que contienen sílice se consideran reactivas, las más comunes son el ópalo (sílice amorfa), calcedonia y tridimita.

La sanidad de los agregados define su aptitud para resistir y permanecer inalterables bajo condiciones de servicio que generan acciones destructivas. Estas condiciones generalmente están representadas por efectos de congelación y deshielo, periodos alternados de humedecimiento, secado y variaciones extremosas de temperatura, relacionadas con el medio ambiente que rodea al concreto. El método usual consiste en someter los agregados a periodos sucesivos de inmersión y secado, empleando una solución sobresaturada de sulfato de sodio o de magnesio. Su tamaño y forma influye en la compactación y fluidez de la pasta.

3.3.3 Protección superficial.

Además de proteger al concreto contra el ataque químico mediante la selección de sus componentes y la elaboración de un concreto de máxima calidad, denso, compacto y resistente, es posible darle mayor preservación con el empleo de recubrimientos adecuados.⁽⁴⁹⁾ Recubrimientos termoplásticos, recubrimientos de termofraguado, tratamientos inorgánicos de superficie, cerámicas, etc.

3.3.4 Aditivos.

Cuando se requiere de un comportamiento especial de un concreto en su estado fresco o endurecido, y los materiales de los que se dispone adolecen de deficiencias y no son apropiados, o cuando las condiciones ambientales a las que se expondrá el material son en especial rigurosas, entonces se utilizan productos que inducen el comportamiento requerido; tales productos se conocen como aditivos para concreto. Un aditivo es una sustancia orgánica o inorgánica que al adicionarse en pequeñas cantidades al cemento modifica las propiedades y cualidades del concreto.^(48,49)

De las características principales que debe tener el concreto, unas son necesarias al fabricarlo y colocarlo en los moldes, y otras son propias del concreto endurecido. De las primeras, la más importante es la manejabilidad, enseguida las que puedan oponerse al sangrado (segregación de agua de mezclado) y a la clasificación o segregación de los materiales. De las características del concreto endurecido son importantes: la

resistencia a la compresión, a la abrasión, al ataque de sales y ácidos, al paso del agua a través de la estructura, y además la dureza, ligereza o mayor peso y menor costo. Entre ambos extremos se encuentran el proceso de fraguado y de endurecimiento⁽⁵¹⁾.

Los aditivos se clasifican, de acuerdo a las propiedades que proporcionan, en: acelerantes, retardantes, fluidizantes, inclusores de aire, estabilizadores de volumen, expansores, impermeabilizantes y puzolanas entre otros. Algunos aditivos producen efectos más o menos proporcionales a las cantidades que se emplean, además pueden presentar efectos secundarios que no siempre son deseables; por tales motivos, es conveniente ensayar cualquier aditivo.

a) Impermeabilizantes.

La permeabilidad de un material es la propiedad según la cual puede ser atravesado por un fluido. En el caso del concreto, interesa su permeabilidad al agua.

Cuando el concreto se encuentra en contacto con agua sin presión, tiende a saturarse por capilaridad; el grado de saturación dependerá principalmente de la forma, cantidad y dimensiones de los poros.

Se distinguen tres clases de porosidad:

_ Porosidad cerrada, en que los vacíos no se comunican entre sí.

- _ Porosidad abierta, vacíos comunicados por conductos capilares de diámetro reducido.
- _ Porosidad abierta con vacíos comunicados por conductos capilares de diámetro mayor.

De lo anterior se deduce que un concreto denso y compacto debe resultar impermeable, por lo que debe evitarse la formación de conductos capilares de cualquier diámetro. Es importante no emplear agua en exceso durante la elaboración de la mezcla, pues el agua, por su menor densidad, tiende a ascender dentro de la masa creando dichos conductos.

Cuando un concreto está en contacto con agua a presión se prueba verdaderamente su impermeabilidad. Puede decirse que en ningún caso el concreto es impermeable en forma absoluta debido a su heterogeneidad. Si los agregados, principalmente la grava, son de calidad, la permeabilidad del concreto depende de la pasta, la cual requiere de la menor cantidad de agua, que se logra reduciendo al mínimo la relación agua/cemento.

Algunos de los factores que mejoran la impermeabilidad del concreto son: la baja relación agua-cemento, la consistencia poco fluida de la mezcla, su máxima compactación y el curado con suficiente cantidad de agua.

Aditivos impermeabilizantes.

Los aditivos impermeabilizantes integrales del concreto, repelentes a la absorción capilar o hidrófugos, alteran la superficie del concreto de tal

forma que llega a ser repelente al agua o menos humedecible; son sustancias químicas que comprenden los grupos estearatos, oleatos y algunos derivados del petróleo⁽⁴⁹⁾.

Los impermeabilizantes forman una delgada capa hidrofóbica dentro de los poros y sobre la superficie del concreto endurecido de la siguiente forma: reaccionan con los productos de hidratación del cemento forman emulsiones y se incorporan en una forma finamente dividida.

El cemento ya endurecido contiene una distribución de poros y tubos capilares que dependen de la relación agua-cemento. Los poros del concreto endurecido son del orden de 0.05 a 1 micra de diámetro y, a través de ellos, el agua penetra por capilaridad o permeabilidad. La presencia de estos aditivos cubre la superficie interna de los poros, formando una capa repelente al agua con un ángulo de contacto grande, impidiendo así el mojado⁽⁴⁸⁾.

Los impermeabilizantes afectan tanto las propiedades mecánicas del concreto endurecido como la resistencia a la compresión, módulo de elasticidad, etc., pero no afecta las propiedades en estado plástico. Sin embargo, se incrementa la resistencia al ataque de sulfatos y otras sales^(48,49).

La presencia de estearatos en altas concentraciones puede inhibir por completo las corrosión de las armaduras del concreto contra altos niveles de cloruros; por lo tanto, estos aditivos evitan el deterioro de las estructuras de concreto e incrementan las cualidades estéticas del mismo en términos de mantenimiento. Así también, afectan las reacciones de

hidratación actuando como acelerante, contribuyendo de esta manera en las propiedades fisicoquímicas del cemento como tiempo de fraguado y resistencia a la compresión. La disminución de la resistencia a la compresión se debe a que este aditivo además es incluso de aire medio, que origina la formación de burbujas de aire que permiten una pasta más fluída^(48,49).

Los aditivos impermeabilizantes, repelentes a la absorción capilar, protegen al concreto del deterioro químico que sufre con el medio ambiente, porque disminuye la entrada de agentes químicos agresivos, aumentando su durabilidad.

b) Puzolanas.

Las puzolanas son materiales silicosos o silicoaluminosos que en sí tienen poco o ningún valor cementante pero, finamente molidas y en presencia de agua, reaccionan con el hidróxido de calcio a temperaturas ordinarias para formar compuestos cementantes que aportan resistencia mecánica y de baja solubilidad en el agua⁽⁴⁴⁻⁴⁶⁾.

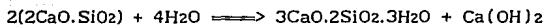
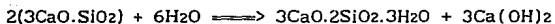
Las puzolanas pueden ser naturales o artificiales:

_ Puzolanas naturales. Principalmente son cenizas volcánicas, las cuales durante las erupciones volcánicas han sido granuladas por el agua del vapor condensado o de la lluvia, solidificando en masas resistentes: basalto pulverizado, fonolita, pedernal, calcedonia, arena de cuarzo molida y el polvo de caliza.

_ Puzolanas artificiales. Son más hidráulicas que las naturales y de mejor calidad: Son cenizas volantes como residuo de la combustión de carbón en centrales termoeléctricas, de cámaras de fusión de hogares de calderas, escorias de alto horno, arcilla calcinada, ladrillo molido, pizarra aluminosa calcinada, entre otras.

La aplicación de la puzolana puede ser de dos maneras: como aditivo (hasta 5 %), en el momento de preparar la mezcla o integrada al clinker y yeso durante su molienda, dando lugar al llamado cemento puzolánico.

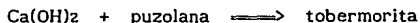
Durante las reacciones químicas del cemento con el agua, que conducen a la adquisición de resistencia, los silicatos de calcio, C_2S y C_3S , se hidratan formando disilicato tricálcico hidratado, $C_3S_2H_3$, liberando cierta cantidad de hidróxido de calcio ($Ca(OH)_2$) conforme a las siguientes reacciones:



El $3CaO.2SiO_2.3H_2O$ es una pasta coloidal conocida como tobermorita y, aunque no es producto final de la hidratación, se separa en forma de gel e interviene directamente en la adquisición posterior de resistencia. En tanto, el hidróxido de calcio permanece libre y cristaliza gradualmente en la solución, sin aportar casi nada a la resistencia y, por su solubilidad en aguas puras y ácidas, representa un aspecto débil del cemento.

Debido a que es común en la puzolana el contenido de ácido silícico, éste se combina con el hidróxido de calcio y se convierte en hidrosilicato de

calcio, siendo esta propiedad el valor de la puzolana que se conoce como actividad puzolánica. De esta manera, el mecanismo de la actividad puzolánica consiste en la transformación del hidróxido de calcio (cal libre) en un silicato cálcico hidratado (tobermorita), mediante la participación de la puzolana:



Así, cuando se incluye la puzolana como aditivo, se desea conseguir alguna de las siguientes finalidades:

- _ Convertir en compuestos estables el hidróxido de calcio, Ca(OH)_2 , que se libera durante la hidratación del cemento. Esta capacidad de la puzolana se conoce como actividad puzolánica del material, y sus efectos en el concreto se traducen en mayor resistencia al ataque de aguas y suelos agresivos.
- _ Reducir el calor de hidratación.
- _ Inhibir una posible expansión por reacción entre los álcalis del cemento y los agregados con sílice activa.
- _ Influir en las propiedades reológicas y de retención de agua de las mezclas en su estado fresco.

4. EXPERIMENTACION.

4.1 Condiciones experimentales.

En este capítulo, después de hacer la revisión bibliográfica sobre el tema, se definen e identifican las condiciones de pruebas y se hace la descripción experimental del estudio, esto es, la caracterización posible de los residuos, el análisis cuantitativo de su contenido de metales pesados, la solidificación-estabilización de residuos y pruebas al producto solidificado (mortero), para evaluar la capacidad de retención de metales pesados.

4.1.1 Características de los residuos.

Los residuos con contenido de metales pesados incluidos en el mortero fueron lodos residuales conteniendo cromo y cenizas de basura. Ambos residuos pueden considerarse como peligrosos; los lodos residuales por su contenido de cromo (Tabla 4.1), y las cenizas porque después de la prueba de extracción⁽⁵²⁾ para determinar su toxicidad, resultó con un contenido de plomo y cromo arriba de los límites permisibles⁽⁵²⁾ (Tabla 4.4). A continuación se describen algunas de las características generales de ambos residuos.

4.1.1.1 Lodos residuales.

Las sustancias contaminantes y sus productos de transformación retirados de la fase líquida en cualquier tratamiento de aguas, como suspensiones mas o menos concentradas, constituyen los lodos residuales que, por la gran variedad de contaminantes y tecnologías de tratamiento, sus características y cantidad de los lodos producidos son marcadamente diferentes en cada planta y proceso, por lo que su tratamiento (estabilización, espesamiento, secado y disposición final) es específico para cada caso. Por ello existen varias alternativas para el tratamiento de lodos; decidir el tipo de tratamiento a utilizar depende de muchas variables, incluyendo aspectos políticos. En el análisis de las opciones se debe considerar los efectos en el ambiente, las alternativas tecnológicas y las bases económicas^(53,54).

De entre las aguas residuales, cuyo tratamiento produce lodos que

comúnmente contienen metales pesados, se encuentran los residuos corrosivos y licores de baños químicos de metales. Las principales industrias que producen tales desechos son las de galvanizado de metales, de acero, pigmentos inorgánicos e industrias electrónicas entre otras⁽⁵²⁾. El método más utilizado para la remoción de metales pesados es la precipitación química, los metales pesados precipitan como hidróxidos; sin embargo, el manejo y disposición de estos lodos representa un problema ambiental, ya que son removidos sin un secado previo adecuado, y generalmente, dispuestos en el suelo como residuo sólido común.

El tratamiento de efluentes acuosos contaminados con cromo consiste en la reducción con hierro de la especie cromo VI a cromo III, para posteriormente precipitarlo en forma de hidróxido; para propósito de desarrollo de este trabajo, el agua residual tratada procede de las tinas de enjuague de un proceso de cromado. La concentración inicial de cromo VI en la solución fue de 300 mg/l con un pH= 5. La reducción se llevó a cabo a pH= 2, dosificando aproximadamente 1.5 ml de ácido sulfúrico concentrado (H_2SO_4), por litro de efluente. Al hacer la evaluación experimental, resultó más eficiente utilizar fibra comercial de hierro, 2 g/l de efluente, como especie reductora en el tratamiento. Aunque teóricamente la reacción es instantánea^(55,56,57) se mantuvo la prueba durante 30 minutos aproximadamente hasta lograr un notable cambio de color en el agua, de amarillo-naranja a un azul-violeta. Enseguida se dosificó hidróxido de calcio, $Ca(OH)_2$, en suspensión para modificar el pH a 8 y precipitar el hidróxido de cromo. La selección de esa base se hizo tomando en cuenta el costo, disponibilidad y, especialmente, porque los lodos producidos presentan alta densidad y compactación, lo que significa una ventaja para

su manejo. Finalmente, la sedimentación durante 20 minutos produce de 180 a 200 ml/l de sólidos; los cuales se recolectan mediante decantación y secado. Aproximadamente 200 ml de lodo producido pesan de 2 a 2.5 g. En la tabla 4.1 se presentan las características del lodo residual.

TABLA 4.1: LODO RESIDUAL CON CROMO.

S. Se ^a	200 ml/l de efluente.
HUMEDAD	98 %
PESO	2 g/l de efluente.
CROMO	13 % en peso
HIERRO	15 % en peso

a: sólidos sedimentables.

4.1.1.2 Cenizas.

Las cenizas utilizadas en este estudio son producto de un proceso de incineración de basura municipal. Están clasificadas principalmente en dos tipos: cenizas volantes y de fondos; las primeras, muy finas y ligeras, son arrastradas por los gases durante la combustión y retenidas en los filtros de salida de gases; la ceniza de fondo, es la ceniza gruesa, que por su peso y volumen, se acumula en el fondo del incinerador, es apagada y enfriada con agua para transportarla a su destino final. Aproximadamente se producen 1.5 Kg de ceniza gruesa/Kg de ceniza volante en cada lote de incineración⁽⁶²⁾. En las tablas 4.2 y 4.3 se presenta la granulometría y el contenido de metales pesados.

TABLA 4.2 .- GRANULOMETRIA DE CENIZAS

<u>CENIZA DE FONDOS.</u>			<u>CENIZA VOLANTE.</u>		
mallá No.	% parcial	% acumulado	mallá No.	% parcial	% acumulado
Charola	13.7	100	Charola	48.1	100
100	8.7	86.3	200	28.2	51.9
50	11.8	77.6	100	16.4	23.7
30	14.4	65.8	50	3.4	7.3
16	17.1	51.3	30	1	3.9
8	19.7	34.2	16	0.9	2.9
4	14.5	14.5	8	1	2
			4	1	1

TABLA 4.3 - METALES PESADOS EN CENIZAS (mg/g)

METAL	TIPO DE CENIZA	
	VOLANTE	FONDOS
ARSENICO	0.00149	0.082
CADMIO	0.498	0.471
COBRE	1.611	5.015
CROMO	0.548	0.233
HIERRO	45.90	54.30
NIQUEL	0.364	0.891
PLOMO	1.656	1.643
SODIO	41.600	23.500

Debido a que las cenizas son el producto de un proceso de incineración, el cual a su vez es una alternativa de tratamiento de residuos, éstas pueden resultar peligrosas por su contenido⁽⁵⁸⁾ de metales; por ello, se les aplicó la prueba de extracción⁽⁵²⁾ para determinar su toxicidad; los resultados obtenidos se presentan la tabla 4.4, se observa que el plomo rebasa el límite permisible⁽⁵²⁾ (5.0 mg/l) en ambos tipos de ceniza.

TABLA 4.4 - METALES PESADOS EN LIXIVIADOS DE CENIZAS.

METAL	L.P* (mg/l)	LIXIVIADOS			
		CEN.VOLANTE		CEN.FONDOS	
		(mg/l)	(mg/g)	(mg/l)	(mg/g)
CADMIO	1.0	16.050	0.321	0.409	0.00818
COBRE	--	32.660	0.653	0.290	0.0058
HIERRO	--	10.500	0.210	297.20	5.944
NIQUEL	--	1.200	0.022	0.769	0.0153
CROMO	5.0	0.906	0.018	0.690	0.0138
PLOMO	5.0	48.700	0.974	73.60	1.472
ARSENICO	5.0	0.019	0.00038	0.042	0.00084

*L.P = Límite permisible

4.1.2 Solidificación.

Las mezclas de mortero fueron preparadas de acuerdo a procedimientos y proporciones estándares para especímenes de mortero y pruebas de laboratorio⁽⁵⁰⁾.

Se prepararon mezclas con proporciones diferentes de residuo, las cuales van desde 5 hasta 20 % en peso respecto al contenido de cemento. Se utilizaron estas proporciones considerando para la cantidad mínima que las cantidades estándar de aditivos sólidos van de 2 a 5 % en peso de

cemento⁽⁴⁸⁾; para las proporciones superiores se consideró duplicar las cantidades, hasta 20 % en el caso de lodo ya que con cantidades superiores la pasta adquiriría una consistencia menos manejable. Con las cenizas, la mezcla sólo permitió incluir hasta 20 % porque con 30 % los bloques preparados se hincharon y disgregaron durante el curado (Tabla 4.5).

TABLA 4.5 – PROPORCIONES DE RESIDUO SOLIDIFICADO.
(% en peso respecto al cemento)

MEZCLAS	g. RESIDUO / 100 g CEMENTO	MORTERO CON:		
		LODO	CEN. VOLANTE	CEN.FONDO
AL 2.5 %	2.5	sí		
AL 5 %	5	sí	sí	
AL 10 %	10	sí	sí	sí
AL 20 %	20		sí	sí

Dado el objetivo de la aplicación del proceso de solidificación en esta investigación, se pretendió tener como única variable el contenido de residuo incluido, para ello se fijaron las siguientes variables: Materiales, relación agua-cemento 0.46, dimensiones de muestra: cubos 5 cm por lado (std.), proporciones de materiales, procedimiento de mezclado, procedimiento de moldeado (compactación) y tiempo de curado.

4.1.2.1 Materiales.

Los materiales componentes de la mezcla cementante preparada son: cemento, agregados y agua.

— El cemento utilizado fue seleccionado buscando la máxima estabilidad física y química del residuo a tratar. El cemento Portland tipo tipo II puzolánico cumple con requisitos en su composición, que permiten proteger del ataque químico al producto solidificado (mortero):

a) El bajo contenido de C₃S (30%) y la alta proporción de C₂S (40%), permiten una resistencia mecánica moderada a corto plazo, pero la liberación de cal es controlada así como el calor de hidratación; de esta manera se limita la fisuración y se procura la resistencia química.

b) El bajo contenido de C₃A (5%) y el alto porcentaje de C₄AF (15%), permiten una buena resistencia a los sulfatos, un bajo calor de hidratación y un fraguado a velocidad media.

c) El contenido de puzolana colabora con las ventajas mencionadas en 3.4 (b), destacando el control en el contenido de hidróxido de calcio.

— Agregado: se usó arena natural la cual fue saturada antes del mezclado, sus características son:

% de absorción : 3.47

Peso volumétrico del sólido suelto: 1478 Kg/m³

Peso volumétrico del sólido compactado: 1606 Kg/m³

Densidad = 2.46

Superficie específica = 47.7 cm²/g.

Los resultados de la granulometría se presentan en la tabla 4.6, además se comparan con los límites estándar de ASTM⁽⁵⁰⁾ en la fig.4.1.

TABLA 4.6- GRANULOMETRIA DE ARENA.
LÍMITES ASTM C-33

MALLA	% EN PESO ACUMULADO.		
	LIM. MIN.	LIM. MAX.	ARENA
CHAROLA	100	100	100
100	90	98	93.9
50	70	90	81
30	40	75	62.7
16	15	50	41.4
8	0	20	18.1
4		5	0

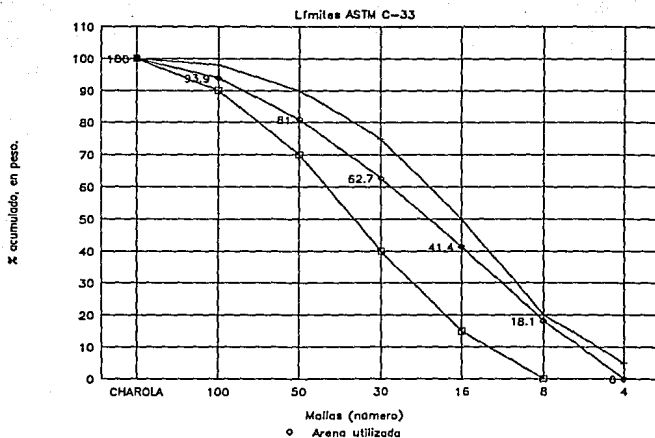


Fig. 4.1: Granulometría de arena (agregado).

— Se utilizó agua potable suministrada por la red general al Instituto de Ingeniería, con pH de 8.4 y 18 °C. En el análisis de metales pesados sólo se detectó cinc (0.1 mg/l).

4.1.2.2 Proporcionamiento.

A pesar de que el cemento es el componente más caro, la proporción cemento-arena-agua no debe variarse en cada mezcla que se prepare porque se alteran las propiedades físicas.

Las proporciones utilizadas corresponden a los estándares indicados⁽⁵³⁾; una parte de cemento por 2.75 partes de arena. Se recomienda que la cantidad de agua requerida para el mezclado debe procurar que la mezcla tenga la consistencia más seca que sea posible que permite manipularla, ya que esto facilita una mejor compactación y un menor contenido de vacíos, que repercute en una mayor resistencia mecánica y mayor impermeabilidad (3.3.1). Una medida cuantitativa de la proporción de agua más adecuada se determina evaluando la fluidez⁽⁵⁰⁾ de la mezcla fresca; esta determinación requiere de una mesa de fluidez con molde, el cual se llena y apisona con mezcla fresca, posteriormente se levanta y retira el molde, se deja caer la mesa desde 1.27 cm 25 veces en 15 segundos (figs. 4.2 y 4.3). La fluidez es el incremento que resulta en el diámetro promedio de la base de la pasta, medido en 4 diámetros en intervalos equidistantes expresado como un porcentaje del diámetro original de la base y se considera un valor óptimo entre 110 y 115.



Fig. 4.2 - Mesa para la prueba de fluidez.



Fig. 4.3 - Prueba de fluidez.

Deben prepararse mezclas con agua al tanteo hasta obtener la fluidez esperada, cada intento debe hacerse con mezcla nueva. La cantidad de agua empleada para la preparación del mortero testigo de los experimentos del presente trabajo corresponde a una relación agua cemento de 0.46 (115 ml/250 g de cemento), la cual produce una fluidez de 111. Las proporciones de los materiales del mortero testigo preparado se resumen en la tabla 4.7, y en la tabla 4.8 se presenta el balance del cromo incluido en el mortero.

TABLA 4.7 – PROPORCION DE MATERIALES.(b)

CUBOS No.	CEMENTO (g)	ARENA (g)	AGUA (ml)	RESIDUO (g)
3	250	687.5	115	0

(b): muestra testigo

TABLA 4.8 – CONTENIDO DE CROMO EN MORTERO.

MORTERO	CEMENTO	LODO	CUBOS No.	CEMENTO	LODO	CROMO	PESO	mg Cr/ g MORTERO
	(g)	(g)		g/cubo	g/cubo	g/cubo	g/cubo	
TESTIGO	250.00	0.000	3.500	71.429	0.000	0.000	260.60	0.000
2.5% LODO	250.00	6.200	3.625	68.966	1.710	0.171	261.30	0.655
5.0% LODO	250.00	12.500	3.750	66.667	3.333	0.333	256.40	1.300
10 % LODO	250.00	25.000	4.000	62.500	6.250	0.625	251.00	2.490

4.1.2.3 Mezclado, moldeado y curado.

Para fines de este trabajo, se prefirió que la mezcla cementante preparada se moldeara en cubos de 5 cm de lado, ya que este tamaño se utiliza en pruebas de resistencia⁽⁵⁰⁾ y porque facilita su manejo en las pruebas de ataque. La cantidad de lodos y cenizas adicionadas se reporta como un por ciento en peso del cemento (4.1.2); el residuo se mezcla previamente con el cemento y posteriormente se realiza la siguiente secuencia de mezclado.

Procedimiento de mezclado. Los materiales necesarios se vierten en un tazón de acero inoxidable y se homogenizan con la mezcladora en el orden siguiente⁽⁵⁰⁾ (Figs. 4.4 y 4.5):

1. Adicionar en el tazón toda el agua de mezclado.
2. Agregar el cemento al agua e iniciar el mezclado a baja velocidad (140 rpm) durante 30 seg.
3. Agregar lentamente la cantidad total de arena en un lapso de 30 segundos mientras se efectúa el mezclado a baja velocidad.
4. Cambiar el mezclado a velocidad media (285 rpm) durante 30 segundos.
5. Detener el mezclado y reposar el mortero 1.5 minutos. Durante los primeros 15 segundos de este intervalo, desprender con la espátula el mortero adherido a la pared del tazón. El resto de los 1.5 min. cubrir el tazón con su tapa.
6. Terminar el mezclado a velocidad media (285 rpm) durante 1 minuto.



Fig. 4.4 Materiales para mezclado.
Mezcladora.

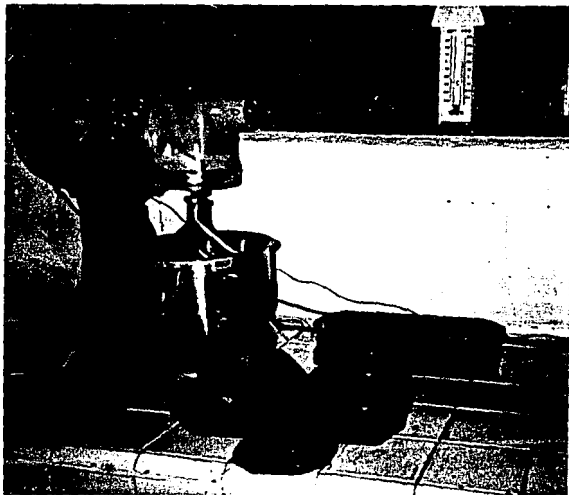


Fig. 4.5 Materiales para mezclado.
Mezcladora y moldes.

Moldeado de especímenes. Se coloca una capa de mortero de aproximadamente 2.5 cm. de espesor en todos los compartimientos cúbicos, y se apisona cada compartimento 32 veces en 25 segundos proxímadamente (fig. 4.6), la presión en el apisonamiento deberá ser suficiente para asegurar que los moldes se llenen uniformemente; el apisonamiento debe completarse en cada cubo antes de pasar al siguiente. Al terminar, se alisan los cubos con una espátula para nivelar el mortero, de tal modo que forme una superficie plana.



Fig. 4.6 - Moldeado de especímenes .

Curado. Se le asigna este nombre al periodo posterior al moldeado, en el que los especímenes se mantienen en un ambiente húmedo saturado, para favorecer las reacciones de hidratación del cemento y permitir así el fraguado. El tiempo de curado de las muestras que se seleccionó para hacer las pruebas, fue de 28 días⁽⁵⁰⁾.

4.2 Pruebas.

Los especímenes preparados con los residuos, se sometieron a las pruebas descritas a continuación. Las soluciones agresivas seleccionadas para hacer las pruebas fueron: agua desionizada (pH= 5) y solución saturada de sulfato de magnesio. Debe aclararse que los especímenes que fueron preparados con cenizas, no se sometieron a la prueba de solubilidad, y en la de erosión, sólo se probó agua desionizada ácida como solución agresiva.

a) *Agua desionizada.* Esta por ser muy pura, ávida de iones, ataca al concreto disolviendo al hidróxido de calcio, con lo cual aumenta la porosidad del concreto y lo debilita. El carácter ácido acelera esta lixiviación y la extiende a la solubilización y arrastre de carbonatos contenidos en algunos agregados⁽⁴⁶⁾.

b) *Solución de sulfato de magnesio.* El sulfato de magnesio, así como el de sodio y calcio (3.2.2), reaccionan con un componente del cemento conocido como aluminato tricálcico (C₃A), formando un producto que cristaliza con varias moléculas de agua, que ocupan mayor volumen y provocan expansiones que destruyen el concreto. Esta sal además, en su reacción, forma yeso o

sulfato de calcio, que intensifica la acción destructiva, e hidróxido de magnesio, cuya consistencia es blanda y gelatinosa. De esta manera, al utilizar esta sal ($MgSO_4$) para la solución agresiva puede evaluarse el ataque por cristalización o acción expansiva y por descomposición química. La solución se utilizó saturada (300 g/l)⁽⁴⁶⁾.

4.2.1. Resistencia mecánica.

Esta prueba permite evaluar la influencia del desecho incluido en la estructura del sólido (mortero) producido, ya que se comparan los resultados de muestras testigo (sin residuo incluido) y muestras con las diferentes cantidades y tipos de residuos agregados.

Los especímenes (cubos) deben ensayarse inmediatamente después de retirarlos del medio de curado o dentro de las tolerancias permisibles⁽⁵⁰⁾ siguientes:

Edad de prueba	Tolerancia permisible (hrs.)
24 horas	1/2
3 días	1
7 días	3
28 días	12

Cada cubo se limpia y seca superficialmente, se coloca sobre la placa inferior del equipo alineado con el centro de ésta, se baja la placa superior lentamente hasta lograr un contacto uniforme con el bloque. La

carga se aplica en forma continua hasta que el cubo falle. Se registra la carga máxima soportada; la resistencia a la compresión se calcula dividiendo la carga máxima soportada entre el área promedio de la sección y se reporta en Kg/cm².

4.2.2 Extracción de lixiviados.

El objetivo de esta prueba es limitar la disposición de los residuos solidificados donde la lixiviación podría causar condiciones peligrosas^(39,59,60,61) debido su composición. Se decidió someter al mortero a esta prueba en base a la consideración de que éste puede presentar características de toxicidad ya que los residuos que contiene son peligrosos; el lodo residual por su contenido de cromo y las cenizas por el contenido de cadmio y plomo que presentan sus lixiviados después de la prueba de extracción⁽⁵²⁾.

La prueba pretende simular la infiltración que resulta cuando se combinan los metales pesados contenidos en dichos residuos con aguas de lluvia o escurrimientos, produciendo así lixiviados tóxicos; se requiere de una muestra representativa de sólido para mezclarse con la solución acuosa. Después de un tiempo de extracción específico, se analiza el líquido y de acuerdo con la concentración de metales que se presente, el sólido se clasificará como peligroso si ésta excede los límites reglamentados.

El procedimiento y condiciones de prueba, se definieron en base a la norma técnica ecológica NTE-CRP-002/88⁽⁵²⁾ que establece los procedimientos para

llevar a cabo la prueba de extracción para determinar los constituyentes que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente y a las referencias 39, 59, 60 y 61.

1. Obtener una muestra representativa del desecho sólido. Las partículas deberán tener un diámetro menor o igual $3/8$ ".
2. Sumergir la muestra en agua desionizada en una relación en peso sólido:agua de 1:16 a 1:20 partes.
3. Iniciar la extracción ajustando el pH de la mezcla a 5.0 con ácido acético 0.5 N.
4. Mantener la muestra en agitación durante 24 horas.
5. Filtrar la mezcla y colectar el filtrado.
6. Preservar el lixiviado y someter a análisis.

Dada la irregularidad de los tamaños del sólido, se realizó esta prueba con tamaños diferentes, dentro del límite máximo indicado de $3/8$ ", observándose a la vez la influencia del tamaño o la distribución del residuo en el sólido.

4.2.3 Erosión.

Esta prueba pretende simular el ambiente que puede desarrollarse cuando el mortero se disponga en el suelo; contacto del sólido con flujo de solución agresiva⁽⁴⁶⁾.

El procedimiento siguiente fue el desarrollado para esta prueba:

1. El cubo de sólido preparado se suspende en la solución, de tal forma que se cubra totalmente. La relación sólido:líquido es aproximadamente 1:20⁽⁴⁶⁾.
2. Agitar la solución a 30 rpm, durante 9 días.
3. Muestrear alícuotas de la solución cada tercer día, preservar y analizar el contenido de metales.

4.2.4 Solubilidad.

Esta prueba pretende reproducir las condiciones naturales del medio ambiente a las que se expone el material solidificado al contacto con aguas pluviales y subterráneas⁽⁴⁶⁾.

También, como en la prueba anterior (4.3.3), se utilizan dos soluciones agresivas: agua desionizada ácida (pH= 5) y solución saturada de sulfato de magnesio.

Procedimiento:

1. Se sumergen cinco cubos preparados en un litro de agua desionizada cada uno y se agita el extracto a baja velocidad durante 20 minutos.
2. Los frascos se mantienen cerrados en reposo durante 1, 3, 5, 7, y 9 días.
3. Después de cada periodo de prueba correspondiente, la solución se filtra, se preserva y se analiza para determinar su contenido de metales.

4.2.5 Observación al microscopio

Esta evaluación puede suministrar información para estimar el comportamiento del residuo incluido o el del sólido como tal. Aunque la técnica no está estandarizada, permite efectuar observaciones relativas a características de los agregados empleados, forma y proporción de vacíos y estado general de la pasta de cemento⁽⁵⁰⁾.

Lineamientos para el examen al microscopio:

- a) Agregado: forma, tamaño y uniformidad o distribución.
- b) Matriz: color al contacto con el agregado, próximo al agregado, con los diferentes tipos y cantidades de residuo; aberturas entre superficies, lleno, firme, vacío, fisuras.
- c) Vacíos: graduación, forma, coloración entre matriz y superficie; lustre de la superficie, mate o brillante.

5. RESULTADOS.

A continuación se presentan los resultados experimentales obtenidos de las pruebas a las que se sometió el producto solidificado con los residuos. La presentación es en dos partes, de acuerdo con el residuo procesado: lodos residuales y cenizas.

5.1 Lodos residuales.

Para el mortero con lodo residual, los resultados por cada prueba son los siguientes:

5.1.1 Resistencia mecánica.

Esta prueba es la más común para morteros y concretos, ya que es una medida indirecta de la calidad del producto como tal; sin embargo, en esta investigación es un argumento para comparar el efecto físico de la inclusión de los residuos. La tabla 5.1 muestra los resultados.

TABLA 5.1 – RESISTENCIA A COMPRESION (Kg/cm²) DE MORTEROS CON LODO RESIDUAL (28 días)

CONTENIDO	CUBO 1	CUBO 2	CUBO 3	PROMEDIO	% DE AUMENTO
Testigo	320.00	315.00	317.00	317.33	---
2.5 % lodo	419.00	430.00	416.00	421.67	32.881
5.0 % lodo	390.00	368.00	372.20	376.73	18.719
10 % lodo	371.20	376.40	350.00	365.87	15.296

Se observa un aumento en la resistencia del material con el residuo incluido respecto al mortero testigo; resistencia que disminuye al aumentar la cantidad de lodo incluido. El máximo incremento de resistencia obtenido, con los morteros preparados, lo registra la muestra con 2.5 % de lodo, con un incremento promedio de 32.9 %.

5.1.2 Extracción de lixiviados.

Los resultados de esta prueba corresponden a miligramos de cromo extraído de 10 gramos de mortero en 200 ml de agua desionizada acidificada a pH = 2 (relación 1:20); se presentan en mg de cromo/l y en mg de cromo/gramo de

mortero a diferentes tiempos de prueba y con 5 tamaños de mortero menores de 3/8", excepto la mezcla al 10 % que solo se probó con 4 tamaños, ver tablas 5.2 a 5.4.

TABLA 5.2- PRUEBA DE EXTRACCION. MEZCLA CON 2.5 % DE LODO RESIDUAL.

mg cromo / g de mortero								
TAMAÑO DE PARTICULA x (mm)	TIEMPO DE PRUEBA (hrs.)							
	0	0.5	1.0	2.0	5.0	17.0	24.0	46.0
9.52>x>6.35	0.000	0.010	0.015	0.017	0.023	0.051	0.071	0.138
6.35>x>4.75	0.000	0.010	0.013	0.023	0.023	0.062	0.072	0.142
4.75>x>2.36	0.000	0.017	0.022	0.024	0.029	0.064	0.076	0.143
2.36>x>1.18	0.000	0.022	0.027	0.033	0.043	0.086	0.098	0.144
1.18>x>0.59	0.000	0.011	0.011	0.015	0.018	0.023	0.073	0.110
mg de cromo/l								
9.52>x>6.35	0.000	0.514	0.766	0.840	1.160	2.551	3.550	6.890
6.35>x>4.75	0.000	0.505	0.660	1.160	1.150	3.100	3.600	7.110
4.75>x>2.36	0.000	0.850	1.114	1.221	1.462	3.200	3.800	7.125
2.36>x>1.18	0.000	1.083	1.331	1.634	2.172	4.300	4.900	7.195
1.18>x>0.59	0.000	0.545	0.550	0.770	0.905	1.155	3.650	5.505

TABLA 5.3 - PRUEBA DE EXTRACCION. MEZCLA CON 5 % DE LODO RESIDUAL.

mg cromo / g de mortero								
TAMAÑO DE PARTICULA x (mm)	TIEMPO DE PRUEBA (hrs.)							
	0	0.5	1.0	2.0	5.0	17.0	24.0	46.0
9.52>x>6.35	0.000	0.023	0.025	0.029	0.032	0.125	0.165	0.181
6.35>x>4.75	0.000	0.026	0.030	0.039	0.045	0.137	0.178	0.185
4.75>x>2.36	0.000	0.026	0.032	0.041	0.055	0.148	0.188	0.198
2.36>x>1.18	0.000	0.032	0.040	0.050	0.067	0.160	0.200	0.247
1.18>x>0.59	0.000	0.012	0.021	0.048	0.049	0.141	0.182	0.203
mg de cromo/l								
9.52>x>6.35	0.000	1.165	1.240	1.460	1.615	6.255	8.265	9.030
6.35>x>4.75	0.000	1.320	1.510	1.930	2.230	6.865	8.875	9.255
4.75>x>2.36	0.000	1.300	1.600	2.025	2.745	7.380	9.390	9.920
2.36>x>1.18	0.000	1.590	1.990	2.520	3.365	7.990	10.005	12.355
1.18>x>0.59	0.000	0.620	1.030	2.380	2.435	7.065	9.080	10.146

TABLA 5.4- PRUEBA DE EXTRACCION. MEZCLA CON 10 % DE LODO RESIDUAL.

mg cromo / g de mortero								
TAMAÑO DE PARTICULA x (mm)	TIEMPO DE PRUEBA (hrs.)							
	0	0.5	1.0	2.0	5.0	17.0	24.0	46.0
9.52>x>6.35	0.030	0.125	0.130	0.138	0.144	0.215	0.234	0.263
6.35>x>4.75	0.036	0.148	0.150	0.159	0.163	0.274	0.301	0.301
4.75>x>2.36	0.039	0.139	0.153	0.160	0.166	0.277	0.304	0.309
2.36>x>1.18	0.039	0.145	0.149	0.163	0.172	0.292	0.312	0.325
mg de cromo/l								
9.52>x>6.35	0.000	1.475	1.903	2.183	2.547	6.255	8.481	11.265
6.35>x>4.75	0.000	2.515	3.020	3.170	3.700	7.410	10.030	11.550
4.75>x>2.36	0.000	1.970	2.935	3.285	3.830	7.670	10.380	13.525
2.36>x>1.18	0.000	2.110	2.830	8.150	8.600	14.623	15.600	16.250

Con el objeto de analizar la variación de la concentración de cromo extraído con respecto al tiempo, se presentan los datos de la tabla 5.5. Dichos datos representados en la fig. 5.1 muestran una clara disminución del elemento.

TABLA 5.5 - VARIACION DE LA EXTRACCION RESPECTO AL TIEMPO.(mg de Cr/g de mortero)

TAMAÑO DE PARTICULA x(mm)	COMPOSICION	TIEMPO (hrs)						
		0.5	1	2	5	17	24	46
2.36>x>1.18	2.5 % de lodo	0.04330	0.00994	0.00605	0.00359	0.00355	0.00171	0.00209
2.36>x>1.18	5 % de lodo	0.06360	0.01600	0.01060	0.00563	0.00771	0.00576	0.00214
4.75>x>2.36	10 % de lodo	0.20080	0.02800	0.00660	0.00190	0.00924	0.00391	0.00023

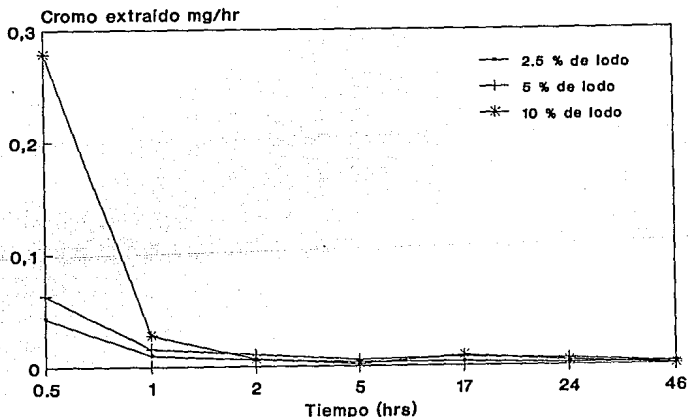


FIG. 5.1 - Extracción respecto al tiempo mortero con lodo residual.

El tamaño de las partículas de mortero también influye en la lixiviación de cromo; conforme disminuye el tamaño, aumenta la concentración del metal en solución; sin embargo, en el caso de partículas menores de 0.6 mm, la pérdida de cromo disminuye notablemente, esto puede deberse a que sean partículas de arena lo que se esté probando, ya que ésta tiene un importante porcentaje de este tamaño como lo indica su granulometría (Tabla 4.2); este aspecto es importante porque, en las referencias para esta prueba, sólo se indica el peso y el tamaño máximo del sólido a probar, y no se considera que la heterogeneidad en los tamaños de la muestra, aún con el límite indicado, influyen en los resultados; es decir, no es posible considerar una muestra representativa si ésta tiene características heterogéneas de tamaños, por lo que resulta conveniente evaluar la extracción en algunos tamaños de partícula, dentro del intervalo indicado.

La comparación de las concentraciones de los lixiviados extraídos con los límites permisibles permiten evaluar en cierta forma la efectividad del proceso para retener cromo, aunque esta comparación no puede ser muy estricta porque esta prueba sólo es semejante a la indicada por la norma respectiva. Por tal motivo, es interesante analizar la extracción del cromo en mg/g de mortero, expresado como % de cromo extraído del mortero respecto a la cantidad incluida en peso. En la tabla 5.6 se resumen los resultados, observándose un aumento en el porcentaje que se extrae respecto al tiempo de prueba (Fig. 5.2).

TABLA 5.6 - EXTRACCION DE CROMO RESPECTO A LA CANTIDAD INCLUIDA.
(% EN PESO)

TAMAÑO DE PARTICULA x(mm)	COMPOSICION	TIEMPO (hrs)						
		0.5	1	2	5	17	24	46
2.36>>>1.18	2.5 % de lodo	3.305	4.064	4.988	6.632	13.130	14.962	21.969
2.36>>>1.18	5 % de lodo	2.446	3.062	3.877	5.177	12.292	15.392	19.008
4.75>>>2.36	10 % de lodo	5.598	6.161	6.426	6.655	11.108	12.209	12.410

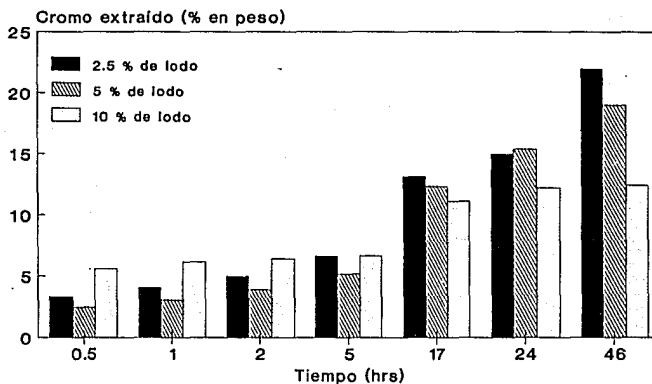


FIG. 5.2 - Extracción de cromo respecto a la cantidad incluida, mortero con lodo residual.

5.1.3 Erosión.

En esta prueba se emplearon ambas soluciones agresivas mencionadas en (4.2). Las tablas 5.7 y 5.8 muestran los resultados, en el ataque con agua desionizada acidificada fue necesario hacer una réplica debido a la dificultad de mantener el pH controlado durante el tiempo de prueba.

TABLA 5.7 – PRUEBA DE EROSION CON AGUA DESIONIZADA.

mg de cromo/g de mortero					
COMPOSICION	TIEMPO (días)				
	1	3	5	7	9
2.5 % de lodo	0.0010	0.0011	0.0015	0.0016	0.0016
5 % de lodo	0.0010	0.0011	0.0012	0.0035	0.0036
10 % de lodo	0.0086	0.0133	0.0146	0.0146	0.0147
mg de cromo/ litro					
2.5 % de lodo	0.0508	0.0570	0.0741	0.0806	0.0812
5 % de lodo	0.0501	0.0566	0.0579	0.1727	0.1813
10 % de lodo	0.4335	0.6656	0.7308	0.7322	0.7382
REPLICA					
mg de cromo/g de mortero					
2.5 % de lodo	0.0011	0.0012	0.0015	0.0016	0.0016
5 % de lodo	0.0018	0.0024	0.0033	0.0035	0.0046
10 % de lodo	0.0089	0.0146	0.0157	0.0200	0.0231
mg de cromo/ litro					
2.5 % de lodo	0.0574	0.0616	0.0770	0.0820	0.0820
5 % de lodo	0.0910	0.1180	0.1640	0.1770	0.2275
10 % de lodo	0.4455	0.7320	0.7865	0.9990	1.1525

TABLA 5.8 – PRUEBA DE EROSION CON SULFATO DE MAGNESIO (MgSO₄).

COMPOSICION	TIEMPO (días)				
	1	3	5	7	9
mg de cromo/g de mortero					
2.5 % de lodo	0.0027	0.0027	0.0027	0.0027	0.0030
5 % de lodo	0.0027	0.0028	0.0028	0.0029	0.0030
10 % de lodo	0.0134	0.0135	0.0135	0.0136	0.0138
mg de cromo/ litro					
2.5 % de lodo	0.1330	0.1330	0.1335	0.1345	0.1477
5 % de lodo	0.1365	0.1395	0.1410	0.1440	0.1520
10 % de lodo	0.6700	0.6725	0.6760	0.6805	0.6895

Se observa que en el caso de ataque con sulfato de magnesio la pérdida de cromo en morteros con 2.5 y 5% es prácticamente la misma y, en morteros con 10 % de lodo esta pérdida se incrementa pero no de forma considerable. En el caso del ataque con agua desionizada es posible observar el efecto del pH, ya que en la primera prueba el pH aumenta hasta un valor de 7.5 y en la réplica se controla estrictamente esta variable en 5. De esta forma se logra que las concentraciones de cromo obtenidas en la réplica sean mayores que en la primera prueba.

Las pérdidas de cromo son considerablemente menores respecto a los resultados de la prueba anterior cuando el ataque se realiza con agua desionizada y, definitivamente la pérdida es mínima cuando se ataca con sulfato de magnesio, ver tablas 5.9 y 5.10, y las figuras 5.3 a 5.6.

TABLA 5.9 – PERDIDA DE CROMO RESPECTO AL TIEMPO(mg/g mortero)/día.

COMPOSICION	TIEMPO (días)				
	1	3	5	7	9
ATAQUE CON AGUA DESIONIZADA.					
2.5 % de lodo	1.14E-03	4.50E-05	1.55E-04	5.00E-05	0.00E+00
5 % de lodo	1.82E-03	2.70E-04	4.60E-04	1.30E-04	5.05E-04
10 % de lodo	8.91E-03	2.87E-03	5.45E-04	2.13E-03	1.53E-03
ATAQUE CON SULFATO DE MAGNESIO					
2.5 % de lodo	0.0027	0.00E+00	5.00E-06	1.00E-05	1.32E-04
5 % de lodo	0.0027	3.00E-05	1.50E-05	3.00E-05	8.00E-05
10 % de lodo	0.0134	2.50E-05	3.50E-05	4.50E-05	9.00E-05

TABLA 5.10 - PERDIDA DE CROMO RESPECTO AL INCLUIDO (% EN PESO)

COMPOSICION	TIEMPO (días)				
	1	3	5	7	9
ATAQUE CON AGUA DESIONIZADA					
2.5 % de lodo	0.1542	0.1740	0.2275	0.2458	0.2473
5 % de lodo	0.1573	0.1725	0.1756	0.5267	0.5527
10 % de lodo	1.3130	2.0305	2.2290	2.2290	2.2443
ATAQUE CON SULFATO DE MAGNESIO					
2.5 % de lodo	0.4061	0.4061	0.4076	0.4107	0.4510
5 % de lodo	0.2100	0.2146	0.2169	0.2215	0.2338
10 % de lodo	0.5382	0.5402	0.5430	0.5466	0.5538

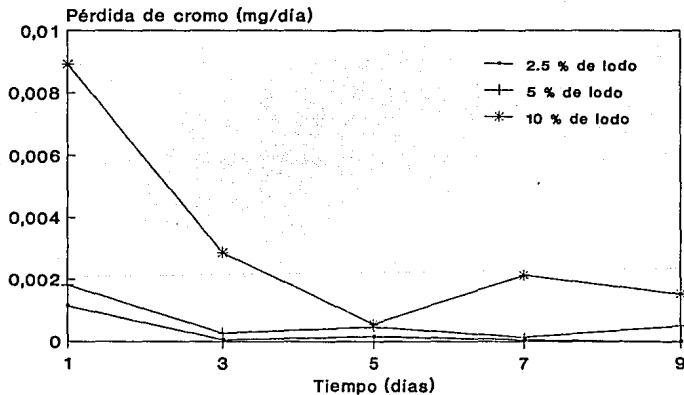


FIG. 5.3 - Prueba de erosión con agua desionizada, mortero con lodo residual. (mg Cr/día)

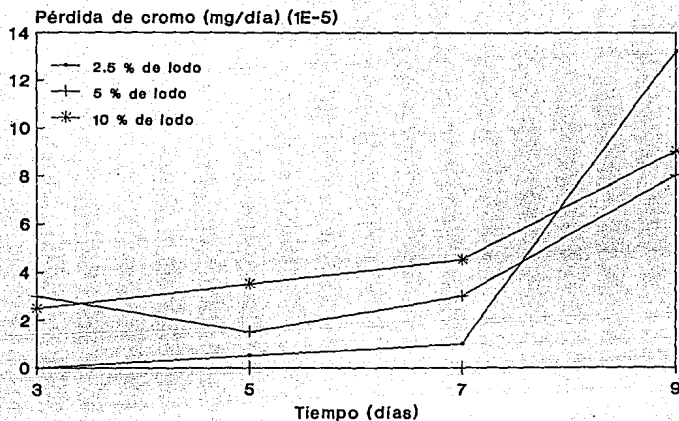


FIG. 5.4 - Prueba de erosión con $MgSO_4$, mortero con lodo residual. (mg Cr/día)

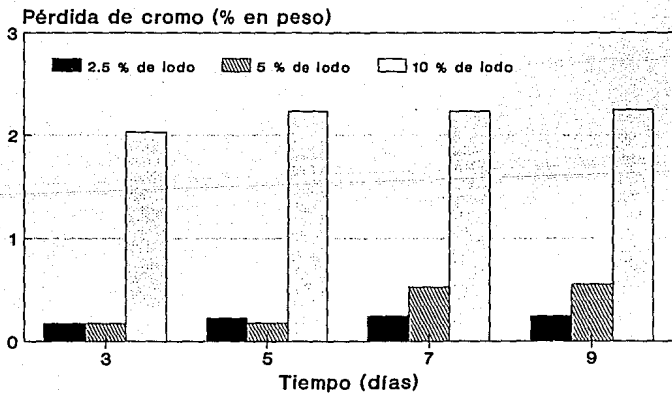


FIG. 5.5 - Prueba de erosión con agua desionizada, mortero con lodo residual.

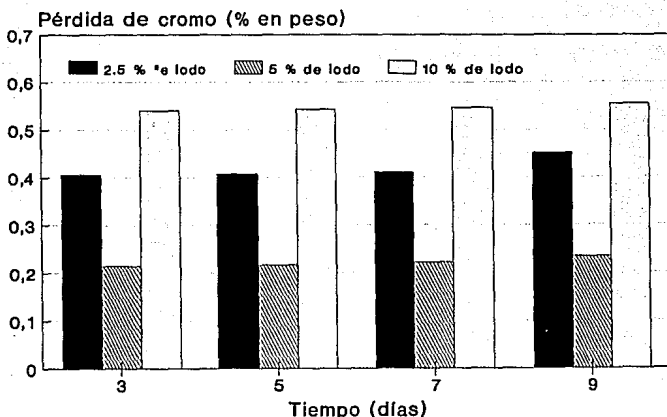


FIG. 5.6 - Prueba de erosión con $MgSO_4$, mortero con lodo residual.

5.1.4 Solubilidad.

Esta prueba es la menos agresiva de todas las realizadas, sólo fue utilizada agua desionizada con un pH inicial de 5 y los resultados muestran una pérdida de cromo muy pequeña. En estas pruebas los valores presentados en mg/l consideran el peso del cubo correspondiente en un litro de solución, consultar inciso 4.2.4. También se reporta en mg de cromo/g de mortero, por la importancia de evaluar la pérdida del metal como un porcentaje del contenido inicial en el mortero. Las tablas 5.11 a 5.13 muestran los resultados, observándose el comportamiento en las figuras 5.7 y 5.8.

TABLA 5.11 – PRUEBA DE SOLUBILIDAD CON AGUA DESIONIZADA.

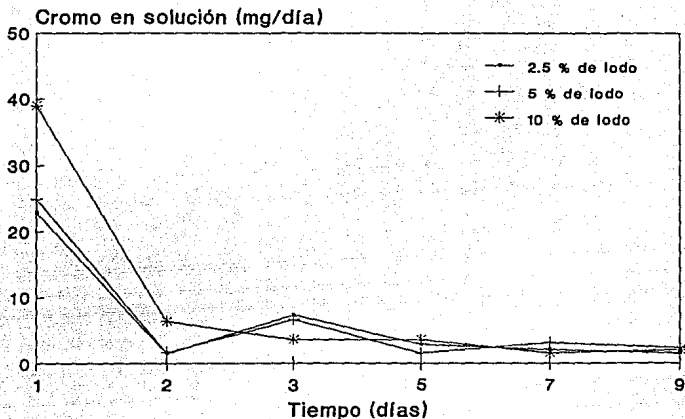
COMPOSICION	TIEMPO (días)					
	1	2	3	5	7	9
mg de cromo/g de mortero						
2.5 % de lodo	0.000229	0.000244	0.000317	0.000375	0.000417	0.000447
5 % de lodo	0.000249	0.000265	0.000331	0.000362	0.000425	0.000471
10 % de lodo	0.00139	0.001454	0.00149	0.001562	0.001593	0.001633
mg de cromo/ litro						
2.5 % de lodo	0.066249	0.070589	0.091708	0.108487	0.120638	0.129317
5 % de lodo	0.071438	0.076028	0.094963	0.103857	0.121932	0.135129
10 % de lodo	0.394899	0.413081	0.423309	0.443764	0.452571	0.463935

TABLA 5.12 – PERDIDA DE CROMO RESPECTO AL TIEMPO (mg/día)

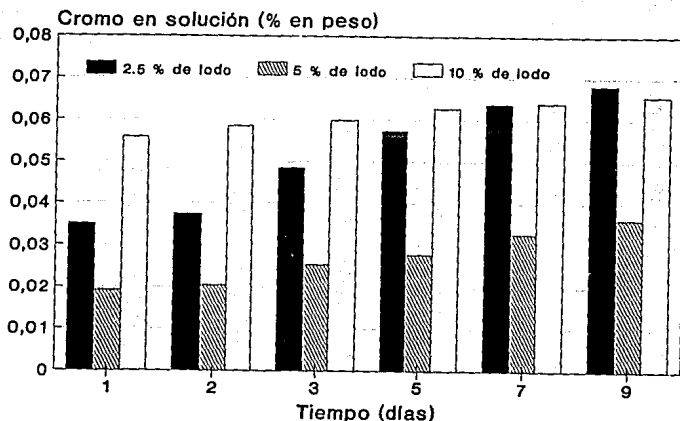
COMPOSICION	TIEMPO (días)					
	1	2	3	5	7	9
2.5 % de lodo	2.29E-04	1.50E-05	7.30E-05	2.90E-05	2.10E-05	1.50E-05
5 % de lodo	2.49E-04	1.60E-05	6.60E-05	1.55E-05	3.15E-05	2.30E-05
10 % de lodo	3.90E-04	6.40E-05	3.60E-05	3.60E-05	1.55E-05	2.00E-05

TABLA 5.13 – PERDIDA DE CROMO RESPECTO AL INCLUIDO (% en peso)

COMPOSICION	TIEMPO (días)					
	1	2	3	5	7	9
2.5 % de lodo	3.50E-02	3.73E-02	4.84E-02	5.73E-02	6.37E-02	6.82E-02
5 % de lodo	1.92E-02	2.04E-02	2.55E-02	2.78E-02	3.27E-02	3.62E-02
10 % de lodo	5.58E-02	5.84E-02	5.98E-02	6.27E-02	6.40E-02	6.56E-02



**FIG. 5.7 - Prueba de solubilidad
mg de Cr / día**



**FIG. 5.8 - Prueba de solubilidad
% en peso**

5.2 Cenizas.

A continuación se presentan los resultados obtenidos al someter los morteros con ceniza a las pruebas especificadas.

5.2.1 Resistencia mecánica.

En esta prueba la ceniza proporciona una respuesta semejante a la de los lodos residuales; aumenta la resistencia mecánica respecto a la muestra testigo, que disminuye cuando se agrega un mayor porcentaje de ceniza. Comparando ambos tipos de residuos, la ceniza proporciona mayor resistencia al mortero que los lodos residuales, atribuyéndose este comportamiento a su supuesto contenido de silicatos, ver fig.5.9.

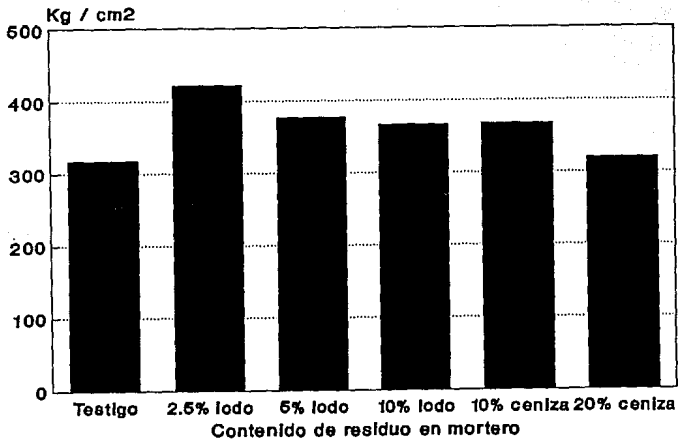


FIG. 5.9 - Resistencia a compresión.

La ceniza volante proporciona mayor resistencia al mortero que la ceniza de fondo cuando se agregan en la misma proporción, tabla 5.14. Al parecer las cenizas aportan características de cenizas de alto horno o las puzolanas naturales que se utilizan en forma comercial como aditivos del cemento desde su fabricación.

TABLA 5.14 – RESISTENCIA A COMPRESION (Kg/cm²) DE MORTEROS CON CENIZA(28 días)

CENIZA VOLANTE					
CONTENIDO	CUBO 1	CUBO 2	CUBO 3	PROMEDIO	% DE AUMENTO
Testigo	320.00	315.00	317.00	317.33	---
5 % ceniza	411.6	428	401.2	413.60	30.338
10 % ceniza	396.4	382	392.5	390.30	22.995
20 % ceniza	322.4	329.8	322.8	325.00	2.417
CENIZA FONDOS					
Testigo	320.00	315.00	317.00	317.33	---
10 % ceniza	381.2	350.8	368.4	366.80	15.589
20 % ceniza	302.4	338.8	315.6	318.93	0.505

5.2.2 Extracción de lixiviados.

Los morteros con ceniza no pueden considerarse como un residuo peligroso a pesar de que contienen cenizas con alta concentración de plomo entre otros metales (tablas 4.3 y 4.4), porque el contenido de ceniza es tal que aún cuando se lixiviera todo el metal que contienen, el resultado no rebasaría el límite permisible como lo indica el balance en las tablas 5.15 y 5.16; sin embargo, esta prueba se aplicó a los morteros porque se esperaba obtener resultados que proporcionaran cierta información sobre la extracción de varios metales contenidos en un producto solidificado.

TABLA 5.15 – CONTENIDO DE CENIZA EN MORTERO (g/g).

COMPOSICION	CUBOS No.	CENIZA (g)	CENIZA/ CUBO	CUBO (g)	g DE CENIZA/ g DE MORTERO
20 % CENIZA VOLANTE	3.63	12.50	3.45	261.9	0.0131
10 % CENIZA VOLANTE	3.75	25.00	6.66	254.9	0.0261
5 % CENIZA VOLANTE	4.00	50.00	12.50	248.1	0.0504
10 % CENIZA FONDOS	3.75	25.00	6.66	353.0	0.0188
20 % CENIZA FONDOS	4.00	50.00	12.50	347.8	0.0360

TABLA 5.16 – CONTENIDO DE METALES POR GRAMO DE MORTERO (mg/g).

CONTENIDO DE METALES PESADOS EN CENIZAS (mg/g)			COMPOSICION DEL MORTERO				
METAL			CENIZA VOLANTE			CENIZA FONDOS	
	VOLANTE	FONDOS	5 %	10 %	20 %	10 %	20 %
CADMIO	0.498	0.471	0.00652	0.01301	0.02509	0.00885	0.01696
COBRE	1.611	5.015	0.02110	0.04209	0.08116	0.09428	0.18054
HIERRO	45.900	54.300	0.60129	1.19930	2.31240	1.02084	1.95480
NIQUEL	0.364	0.891	0.00477	0.00951	0.01834	0.01675	0.03208
CROMO	0.548	0.233	0.00718	0.01432	0.02761	0.00438	0.00839
PLOMO	1.656	1.643	0.02169	0.04323	0.08329	0.03089	0.05915

De esta manera, los resultados obtenidos se presentan por cada metal en las tablas 5.17 a 5.22, analizando los siguientes aspectos: *Influencia del tamaño de sólido probado, variación de la extracción respecto al tiempo (comportamiento de cada metal e influencia del tipo de ceniza) y porcentaje de extracción.*

TABLA 5.17 – PRUEBA DE EXTRACCION. MORTEROS CON GENIZA.

C A D M I O						
(mg de metal lixiviado / g de mortero)						
TAMAÑO DE PARTICULA x(mm)	TIEMPO DE PRUEBA (hrs)					
	0.5	1.0	2.0	5.0	18.0	24.0
Mezcla con 20 % ceniza volante						
9.52 > x > 6.35	0.0026	0.0036	0.0049	0.0079	0.0118	0.0123
4.75 > x > 2.36	0.0035	0.0049	0.0058	0.0082	0.0135	0.0140
1.18 > x > 0.59	0.0080	0.0106	0.0121	0.0140	0.0146	0.0149
Mezcla con 10 % de ceniza volante						
9.52 > x > 6.35	0.0021	0.0030	0.0004	0.0058	0.0064	0.0069
4.75 > x > 2.36	0.0031	0.0048	0.0057	0.0073	0.0087	0.0089
1.18 > x > 0.59	0.0076	0.0102	0.0108	0.0124	0.0127	0.0128
Mezcla con 5 % de ceniza volante						
9.52 > x > 6.35	0.0017	0.0025	0.0033	0.0051	0.0056	0.0060
4.75 > x > 2.36	0.0024	0.0029	0.0037	0.0060	0.0067	0.0069
1.18 > x > 0.59	0.0025	0.0054	0.0060	0.0062	0.0069	0.0070
Mezcla con 10 % de ceniza de fondos						
9.52 > x > 6.35	0.00160	0.00168	0.00182	0.00260	0.00310	
4.75 > x > 2.36	0.00180	0.00188	0.00242	0.00298	0.00334	
1.18 > x > 0.59	0.00270	0.00350	0.00392	0.00408	0.00420	
Mezcla con 20 % de ceniza de fondos						
9.52 > x > 6.35	0.00160	0.00176	0.00194	0.00286	0.00370	
4.75 > x > 2.36	0.00170	0.00210	0.00234	0.00354	0.00480	
1.18 > x > 0.59	0.00290	0.00482	0.00548	0.00620	0.00664	

TABLA 5.18 – PRUEBA DE EXTRACCION. MORTEROS CON CENIZA.

C O B R E (mg de metal lixiviado / g de mortero)						
TAMAÑO DE PARTICULA x(mm)	TIEMPO DE PRUEBA (hrs)					
	0.5	1.0	2.0	5.0	18.0	24.0
Mezcla de 20 % de ceniza volante						
9.52 > x > 6.35	0.00838	0.00948	0.01072	0.01618	0.02714	0.0282
4.75 > x > 2.36	0.0085	0.00964	0.0115	0.01644	0.029	0.03342
1.18 > x > 0.59	0.0184	0.01872	0.02388	0.02756	0.03458	0.03567
Mezcla de 10 % de ceniza volante						
9.52 > x > 6.35	0.00710	0.00787	0.00959	0.01346	0.01932	0.02013
4.75 > x > 2.36	0.00790	0.00951	0.01110	0.01373	0.01981	0.02061
1.18 > x > 0.59	0.01020	0.01756	0.01962	0.02225	0.02873	0.02913
Mezcla con 5 % de ceniza volante						
9.52 > x > 6.35	0.00636	0.00658	0.00849	0.01062	0.01204	0.01222
4.75 > x > 2.36	0.00640	0.00808	0.00940	0.01119	0.01260	0.01462
1.18 > x > 0.59	0.01210	0.01546	0.01890	0.02730	0.03010	0.03026
Mezcla con 10% de ceniza de fondos						
9.52 > x > 6.35	0.00371	0.00441	0.00558	0.00619	0.00628	
4.75 > x > 2.36	0.00550	0.00582	0.00732	0.00859	0.00868	
1.18 > x > 0.59	0.00680	0.00912	0.01081	0.01406	0.01416	
Mezcla con 20% de ceniza de fondos						
9.52 > x > 6.35	0.00920	0.01048	0.01198	0.01209	0.01251	
4.75 > x > 2.36	0.00960	0.01320	0.01776	0.02345	0.02773	
1.18 > x > 0.59	0.01220	0.01724	0.02264	0.03654	0.03679	

TABLA 5.19 – PRUEBA DE EXTRACCION. MORTEROS CON CENIZA.

HIERRO (mg de metal / g de mortero)						
TAMAÑO DE PARTICULA x(mm)	TIEMPO DE PRUEBA (hrs)					
	0.5	1.0	2.0	5.0	18.0	24.0
Mezcla con 20 % de ceniza volante						
9.52 > x > 6.35	0.0215	0.0279	0.0343	0.0773	0.0995	0.1002
4.75 > x > 2.36	0.0261	0.0364	0.0469	0.0824	0.0968	0.1056
1.18 > x > 0.59	0.0948	0.1410	0.1403	0.1410	0.1506	0.1523
Mezcla con 10 % de ceniza volante						
9.52 > x > 6.35	0.0150	0.0185	0.0268	0.0297	0.0314	0.0315
4.75 > x > 2.36	0.0257	0.0285	0.0401	0.0432	0.0437	0.0447
1.18 > x > 0.59	0.0366	0.0399	0.0452	0.0546	0.0560	0.0561
Mezcla con 5 % de ceniza volante						
9.52 > x > 6.35	0.0165	0.0167	0.0219	0.0279	0.0298	0.0314
4.75 > x > 2.36	0.0201	0.0245	0.0293	0.0306	0.0307	0.0310
1.18 > x > 0.59	0.0361	0.1288	0.1486	0.1943	0.2128	0.2129
Mezcla con 10 % de ceniza de fondos						
9.52 > x > 6.35	0.0089	0.0156	0.0271	0.02811	0.0283	
4.75 > x > 2.36	0.0149	0.0264	0.0321	0.03331	0.0339	
1.18 > x > 0.59	0.0254	0.0406	0.0448	0.04531	0.0454	
Mezcla con 20 % de ceniza de fondos						
9.52 > x > 6.35	0.0185	0.0194	0.0277	0.02973	0.0302	
4.75 > x > 2.36	0.0197	0.0219	0.0285	0.07097	0.0714	
1.18 > x > 0.59	0.0289	0.0411	0.0553	0.17386	0.1743	

TABLA 5.20 – PRUEBA DE EXTRACCION. MORTEROS CON CENIZA.

NIQUEL (mg de metal / g de mortero)						
TAMAÑO DE PARTICULA x(mm)	TIEMPO DE PRUEBA (hrs)					
	0.5	1.0	2.0	5.0	18.0	24.0
Mezcla con 20 % de ceniza volante						
9.52 > x > 6.35	0.0000	0.0000	0.0017	0.0038	0.0054	0.0061
4.75 > x > 2.36	0.0000	0.0030	0.0035	0.0041	0.0082	0.0085
1.18 > x > 0.59	0.0132	0.0183	0.0237	0.0240	0.0241	0.0242
Mezcla con 10 % de ceniza volante						
9.52 > x > 6.35	0.00000	0.00000	0.00000	0.00276	0.00345	0.00368
4.75 > x > 2.36	0.00000	0.00000	0.00312	0.00381	0.00403	0.00417
1.18 > x > 0.59	0.00000	0.00378	0.00478	0.00547	0.00571	0.00583
Mezcla con 5 % de ceniza volante						
9.52 > x > 6.35	0.00000	0.00000	0.00217	0.00262	0.00298	0.00322
4.75 > x > 2.36	0.00000	0.00000	0.00236	0.00288	0.00304	0.00412
1.18 > x > 0.59	0.01268	0.03502	0.04860	0.06430	0.08252	0.08554
Mezcla con 10 % de ceniza de fondos						
9.52 > x > 6.35	0.00000	0.00000	0.00000	0.00550	0.00640	
4.75 > x > 2.36	0.00000	0.00000	0.00000	0.00618	0.00708	
1.18 > x > 0.59	0.00000	0.00736	0.00952	0.01175	0.01256	
Mezcla con 20 % de ceniza de fondos						
9.52 > x > 6.35	0.00000	0.00000	0.00312	0.00732	0.00772	
4.75 > x > 2.36	0.00000	0.00000	0.00312	0.00846	0.00888	
1.18 > x > 0.59	0.00450	0.01060	0.01384	0.01519	0.01561	

TABLA 5.21 – PRUEBA DE EXTRACCION. MORTEROS CON CENIZA.

C R O M O (mg de metal / g de mortero)						
TAMANO DE PARTICULA x(mm)	TIEMPO DE PRUEBA (hrs)					
	0.5	1.0	2.0	5.0	18.0	24.0
Mezcla con 20 % de ceniza volante						
9.52 > x > 6.35	0.00660	0.00667	0.00759	0.00614	0.01034	0.01050
4.75 > x > 2.36	0.00780	0.00913	0.00941	0.00990	0.01344	0.01396
1.18 > x > 0.59	0.00890	0.00976	0.01108	0.01204	0.01272	0.01296
Mezcla con 10 % de ceniza volante						
9.52 > x > 6.35	0.00000	0.00000	0.00300	0.00427	0.00471	0.00533
4.75 > x > 2.36	0.00000	0.00441	0.00481	0.00607	0.00698	0.00714
1.18 > x > 0.59	0.00810	0.00866	0.00942	0.01053	0.01144	0.01207
Mezcla con 5 % de ceniza volante						
9.52 > x > 6.35	0.00000	0.00000	0.00000	0.00216	0.00320	0.00346
4.75 > x > 2.36	0.00000	0.00366	0.00412	0.00435	0.00570	0.00594
1.18 > x > 0.59	0.00843	0.00945	0.01060	0.01031	0.01075	0.01102
Mezcla con 10 % de ceniza de fondos						
9.52 > x > 6.35	0.00000	0.00429	0.00487	0.00706	0.00721	
4.75 > x > 2.36	0.00570	0.00578	0.00650	0.00879	0.00914	
1.18 > x > 0.59	0.00840	0.00944	0.01166	0.01210	0.01250	
Mezcla con 20 % de ceniza de fondos						
9.52 > x > 6.35	0.00700	0.00708	0.00768	0.00801	0.00856	
4.75 > x > 2.36	0.00750	0.00774	0.00852	0.00972	0.01020	
1.18 > x > 0.59	0.01110	0.01160	0.01274	0.01301	0.01380	

TABLA 5.22 – PRUEBA DE EXTRACCION. MORTEROS CON CENIZA.

P L O M O (mg de metal / g de mortero)						
TAMAÑO DE PARTICULA x(mm)	TIEMPO DE PRUEBA (hrs)					
	0.5	1.0	2.0	5.0	18.0	24.0
Mezcla con 20 % de ceniza volante						
9.52 > x > 6.35	0.00158	0.00158	0.00158	0.00354	0.00502	0.00590
4.75 > x > 2.36	0.00230	0.00402	0.00432	0.00364	0.00654	0.00684
1.18 > x > 0.59	0.00208	0.00220	0.00246	0.00364	0.00654	0.00684
Mezcla con 10 % de ceniza volante						
9.52 > x > 6.35	ND	ND	0.00158	0.01740	0.00184	0.00220
4.75 > x > 2.36	ND	ND	0.00158	0.00158	0.00182	0.00206
1.18 > x > 0.59	ND	ND	0.00158	0.00158	0.00162	0.00180
Mezcla con 5 % de ceniza volante						
9.52 > x > 6.35	ND	ND	ND	ND	ND	ND
4.75 > x > 2.36	ND	ND	ND	ND	ND	ND
1.18 > x > 0.59	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Mezcla con 10 % de ceniza de fondos						
9.52 > x > 6.35	ND	ND	0.00240	0.00270	0.00282	
4.75 > x > 2.36	0.00158	0.00158	0.00206	0.00254	0.00352	
1.18 > x > 0.59	ND	ND	ND	0.00172	0.00228	
Mezcla con 20 % de ceniza de fondos						
9.52 > x > 6.35	0.01946	0.01960	0.02200	0.02570	0.03142	
4.75 > x > 2.36	0.00158	0.02560	0.0280	0.01124	0.01338	
1.18 > x > 0.59	0.00158	0.00166	0.00922	0.01124	0.01338	

ND = No detectado

a) *Influencia del tamaño del sólido probado.* Los resultados indican que el sólido triturado al menor tamaño es más fácilmente atacado ya que se expone un área superficial por gramo mayor que cuando el trozo de mortero es más

grande. Podría suponerse que el mortero no es tan poroso como para que la solución penetre hasta su interior y extraiga el metal; sin embargo, es notable el comportamiento que presenta la mezcla al 5 % de ceniza volante en la que para cobre, hierro y níquel presenta niveles de extracción muy superiores a los esperados respecto a las mezclas con 10 Y 20 % de ceniza volante; estos resultados pueden deberse a un probable descontrol del pH de la prueba, a la compactación del mortero o a error en la determinación analítica por absorción atómica. En la tabla 5.23 se resumen las máximas concentraciones obtenidas en los lixiviados de cada mortero preparado y a partir de estos valores se realizan los análisis posteriores.

TABLA 5.23 – MAXIMAS CONCENTRACIONES DE LIXIVIADOS EN CADA MEZCLA.
(mg de metal/g de mortero)

COMPOSICION	CADMIO					
	TIEMPO (hrs)					
	0.5	1	2	5	18	24
20 % DE CENIZA VOLANTE	0.0080	0.0106	0.0121	0.0140	0.0146	0.0149
10 % DE CENIZA VOLANTE	0.0076	0.0102	0.0108	0.0124	0.0127	0.0128
5 % DE CENIZA VOLANTE	0.0025	0.0054	0.0060	0.0062	0.0069	0.0070
10 % DE CENIZA FONDOS	0.00270	0.00350	0.00392	0.00408	0.00420	
20 % DE CENIZA FONDOS	0.00290	0.00482	0.00548	0.00620	0.00664	
COBRE						
20 % DE CENIZA VOLANTE	0.0184	0.01872	0.02388	0.02756	0.03458	0.03567
10 % DE CENIZA VOLANTE	0.01020	0.01756	0.01962	0.02225	0.02873	0.02913
5 % DE CENIZA VOLANTE	0.01210	0.01546	0.01890	0.02730	0.03010	0.03026
10 % DE CENIZA FONDOS	0.00680	0.00912	0.01081	0.01406	0.01416	
20 % DE CENIZA FONDOS	0.01220	0.01724	0.02264	0.03654	0.03679	
HIERRO						
20 % DE CENIZA VOLANTE	0.0948	0.1410	0.1403	0.1410	0.1506	0.1523
10 % DE CENIZA VOLANTE	0.0366	0.0399	0.0452	0.0546	0.0561	0.0561
5 % DE CENIZA VOLANTE	0.0361	0.1288	0.1486	0.1943	0.2128	0.2129
10 % DE CENIZA FONDOS	0.0254	0.0406	0.0448	0.04531	0.0454	
20 % DE CENIZA FONDOS	0.0289	0.0411	0.0553	0.17386	0.1743	

Continuación...

TABLA 5.23 – MAXIMAS CONCENTRACIONES DE LIXIVIADOS EN CADA MEZCLA.
(mg de metal/g de mortero)

NIQUEL						
20 % DE CENIZA VOLANTE	0.0132	0.0183	0.0237	0.0240	0.0241	0.0242
10 % DE CENIZA VOLANTE	0.00000	0.00378	0.00478	0.00547	0.00571	0.00583
5 % DE CENIZA VOLANTE	0.01268	0.03502	0.04860	0.06430	0.08252	0.08554
10 % DE CENIZA FONDOS	0.00000	0.00736	0.00952	0.01175	0.01256	
20 % DE CENIZA FONDOS	0.00450	0.01060	0.01384	0.01519	0.01561	
CROMO						
20 % DE CENIZA VOLANTE	0.00890	0.00976	0.01108	0.01204	0.01272	0.01296
10 % DE CENIZA VOLANTE	0.00810	0.00866	0.00942	0.01053	0.01144	0.01207
5 % DE CENIZA VOLANTE	0.00843	0.00945	0.01031	0.01060	0.01075	0.01102
10 % DE CENIZA FONDOS	0.00840	0.00944	0.01166	0.01210	0.01250	
20 % DE CENIZA FONDOS	0.01110	0.01160	0.01274	0.01301	0.01380	
PLOMO						
20 % DE CENIZA VOLANTE	0.00208	0.00220	0.00246	0.00364	0.00654	0.00684
10 % DE CENIZA VOLANTE	ND	ND	0.00158	0.00158	0.00162	0.00180
5 % DE CENIZA VOLANTE	ND	ND	ND	ND	ND	ND
10 % DE CENIZA FONDOS	ND	ND	ND	0.00172	0.00228	
20 % DE CENIZA FONDOS	0.00158	0.00166	0.00922	0.01124	0.01338	

ND = No detectado

b) Variación de la extracción de los metales respecto al tiempo.

Comportamiento de cada metal. En la tabla 5.24 se resumen resultados con respecto al cambio de la cantidad de metal extraído en cada intervalo de la prueba. Se observa un decremento en la cantidad que se extrae conforme transcurre el tiempo de prueba; es decir, aún cuando durante todo el tiempo que se atacó al mortero hay extracción de metales, la cantidad que se extrae es menor conforme el tiempo transcurre. (Figs. 5.10 y 5.11).

TABLA 5.24 - EXTRACCION RESPECTO AL TIEMPO. MORTEROS CON CENIZA (mg/hr).

C A D M I O .						
CONTENIDO	TIEMPO (Hrs.)					
	5	1	2	5	18	24
20 % CENIZA VOLANTE	8.00E-03	5.12E-03	1.56E-03	6.13E-04	5.23E-05	4.33E-05
10 % CENIZA VOLANTE	7.60E-03	5.28E-03	5.40E-04	5.33E-04	2.31E-05	2.33E-05
5 % CENIZA VOLANTE	2.46E-03	5.92E-03	5.40E-04	9.33E-05	5.38E-05	1.67E-05
10 % CENIZA FONDOS	2.70E-03	1.60E-03	4.20E-04	5.33E-05	9.23E-06	
20 % CENIZA FONDOS	2.90E-03	3.84E-03	6.60E-04	2.40E-04	3.38E-05	
C O B R E .						
20 % CENIZA VOLANTE	1.84E-02	6.40E-04	5.16E-03	1.23E-03	5.40E-04	1.82E-04
10 % CENIZA VOLANTE	1.02E-02	1.47E-02	2.06E-03	8.77E-04	4.98E-04	6.67E-05
5 % CENIZA VOLANTE	1.21E-02	6.72E-03	3.44E-03	2.80E-03	2.15E-04	2.67E-05
10 % CENIZA FONDOS	6.80E-03	4.64E-03	1.69E-03	1.08E-03	7.69E-06	
20 % CENIZA FONDOS	1.22E-02	1.01E-02	5.40E-03	4.63E-03	1.92E-05	
H I E R R O .						
20 % CENIZA VOLANTE	9.48E-02	7.32E-02	8.90E-03	2.33E-04	7.38E-04	2.83E-04
10 % CENIZA VOLANTE	3.66E-02	6.60E-03	5.25E-03	3.13E-03	1.16E-04	1.33E-05
5 % CENIZA VOLANTE	3.61E-02	1.85E-01	1.98E-02	1.52E-02	1.42E-03	1.33E-05
10 % CENIZA FONDOS	2.54E-02	3.04E-02	4.20E-03	1.70E-04	6.92E-06	
20 % CENIZA FONDOS	2.89E-02	2.44E-02	1.42E-02	3.95E-02	3.38E-05	

Continuación...

TABLA 5.24 - EXTRACCION RESPECTO AL TIEMPO. MORTEROS CON CENIZA (mg/hr).

NIQUEL.						
CONTENIDO	TIEMPO (Hrs.)					
	.5	1	2	5	18	24
20 % CENIZA VOLANTE	1.32E-02	1.02E-02	5.38E-03	1.00E-04	7.69E-06	1.33E-05
10 % CENIZA VOLANTE	0.00E+00	7.56E-03	1.00E-03	2.30E-04	1.85E-05	2.00E-05
5 % CENIZA VOLANTE	1.27E-02	4.47E-02	1.36E-02	5.23E-03	1.40E-03	5.03E-04
10 % CENIZA FONDOS	0.00E+00	1.47E-02	2.16E-03	7.43E-04	6.23E-05	
20 % CENIZA FONDOS	4.50E-03	1.22E-02	3.24E-03	4.50E-04	3.23E-05	
CROMO.						
20 % CENIZA VOLANTE	8.90E-03	1.72E-03	1.32E-03	3.20E-04	5.23E-05	4.00E-05
10 % CENIZA VOLANTE	8.10E-03	1.12E-03	7.60E-04	3.70E-04	7.00E-05	1.05E-04
5 % CENIZA VOLANTE	8.43E-03	2.04E-03	8.60E-04	9.67E-05	1.15E-05	4.50E-05
10 % CENIZA FONDOS	8.40E-03	2.08E-03	2.22E-03	1.47E-04	3.08E-05	
20 % CENIZA FONDOS	1.11E-02	1.00E-03	1.14E-03	9.00E-05	6.08E-05	
PLOMO.						
20 % CENIZA VOLANTE	2.08E-03	2.40E-04	2.60E-04	3.93E-04	2.23E-04	5.00E-05
10 % CENIZA VOLANTE	ND	ND	ND	0.00E+00	3.08E-06	3.00E-05
5 % CENIZA VOLANTE	ND	ND	ND	ND	ND	ND
10 % CENIZA FONDOS	ND	ND	ND	1.72E-03	4.31E-05	
20 % CENIZA FONDOS	1.58E-03	1.60E-04	7.56E-03	6.73E-04	1.65E-04	

ND = No detectado

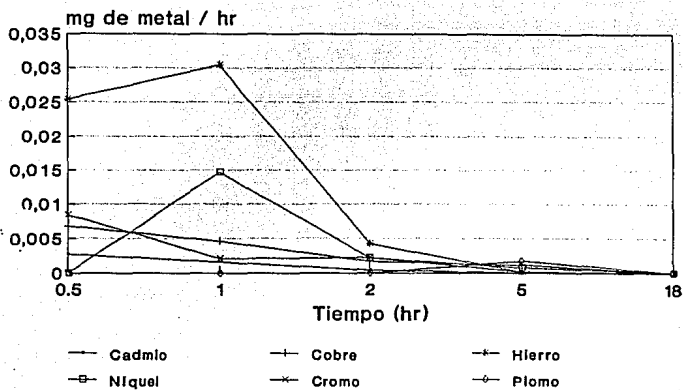


FIG. 5.10 - Extracción en morteros con 10 % de ceniza de fondo.

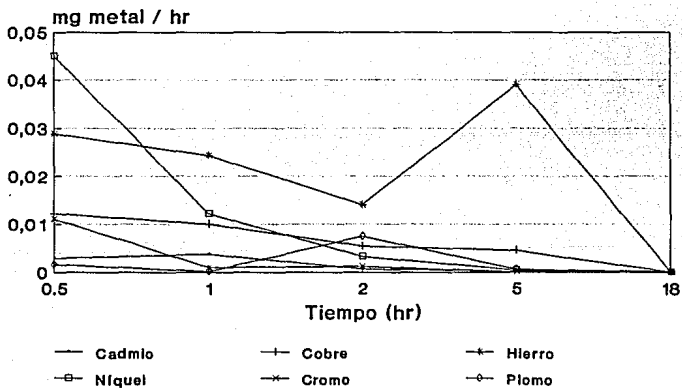


FIG. 5.11 - Extracción en morteros con 20 % de ceniza de fondos.

Hierro, cobre y níquel presentan las mayores velocidades de extracción, del orden de $1 \cdot 10^{-3}$ a $3 \cdot 10^{-3}$ mg de metal/hr, aunque el hierro se encuentra en las mas altas concentraciones en el mortero (Tabla 5.16), pero el níquel se encuentra en cantidades de 4 a 5 veces menores que el cobre y de 120 a 60 veces, aproximadamente, menos que el hierro; por ello no puede considerarse que para la extracción de níquel sea importante el efecto de gradiente de concentración.

Cromo y cadmio presentan variaciones muy semejantes en su extracción, valores del orden de 10^{-3} hasta 10^{-5} mg de metal/hr durante las pruebas. En el caso de plomo, las velocidades de extracción son las más pequeñas detectadas, prácticamente este metal no es extraído.

Efecto del tipo de ceniza. De acuerdo con el tipo de ceniza incluida en los morteros, en la tabla 5.16 se puede observar que algunos especímenes con diferentes proporciones de ceniza contienen la misma cantidad de metal por gramo. Ante tales características de contenido de metales, se realizaron las comparaciones siguientes:

Para el caso de cadmio, se puede comparar el mortero con 5 % de ceniza volante con el de 10 % de ceniza de fondos, los cuales contienen 0.00652 y 0.00885 mg de cadmio por gramo de mortero, respectivamente; aunque a los primeros 30 minutos la extracción ocurre con la misma rapidez en ambos morteros, posteriormente la extracción en el mortero con ceniza de fondos disminuye respecto al mortero con ceniza volante. Para este metal también se puede comparar el mortero con 10 % de ceniza volante (0.013013 mg/g de

mortero) con el de 20 % de ceniza de fondos (0.016956 mg/g de mortero); en este caso, hasta la primera hora de prueba, la extracción es más rápida en el mortero con ceniza volante para después disminuir las velocidades de extracción en ambos morteros a valores muy semejantes.

En el caso de cobre, comparando el mortero con 20 % de ceniza volante y el que contiene 10 % de ceniza de fondos (0.0811 y 0.0942 mg/g de mortero, respectivamente) se observa en general, que la extracción es más rápida en el mortero con ceniza volante que en el de ceniza de fondos.

Para analizar la extracción del hierro se comparan los morteros con 10 % de ceniza volante y el de 10 % de ceniza de fondos. En este caso también se observa que la extracción es más rápida en el mortero con ceniza volante.

El cromo presenta un comportamiento diferente, comparando el mortero con 5 % de ceniza volante y el de 20 % de ceniza de fondos (0.00718 y 0.00838 mg/g de mortero), se observa que la extracción es irregular aunque la tendencia en ambos morteros es la de disminuir la velocidad de extracción respecto al tiempo de prueba.

La extracción de níquel, al comparar el mortero con 20 % de ceniza volante y el de 10 % de ceniza de fondos, no indica un comportamiento específico de acuerdo al tipo de ceniza, sólo se observa en ambos casos la tendencia a disminuir la extracción respecto al tiempo.

En el caso de plomo, a pesar de que no fue posible comparar el efecto del tipo de la ceniza en la extracción porque cada mezcla tiene una cantidad

diferente (Tabla 5.16), si se ordenan las mezclas de mayor a menor contenido de plomo en mg/g de mortero se tendrfa la siguiente secuencia:

Mortero con 5 % de ceniza volante.

" " 10 % de ceniza de fondos.

" " 10 % de ceniza volante.

" " 20 % de ceniza de fondos.

" " 20 % de ceniza volante.

Y de acuerdo con los resultados de la tabla 5.24, no hay dependencia del tipo de ceniza en la rapidez de extracción , sólo de la cantidad de plomo contenido en el mortero.

c). Porcentaje de extracción (% en peso). Evaluando la cantidad de metal que se extrae respecto a lo que se incluyó en cada mortero (Tabla 5.25), el plomo es el único metal de los considerados tóxicos que no se extrae de los morteros probados, esto presumiblemente se debe a su estabilización con reacción química entre él y el cemento porque aún cuando se encuentra, después del hierro, en la mayor proporción que los demás metales en el mortero, su concentración en lixiviados es casi imperceptible.

Es importante indicar que aunque el hierro no está considerado como tóxico, también esta fuertemente estabilizado en el mortero, porque sus lixiviados presentan sólo del 1.5 al 9 % de total contenido en el mortero (sin considerar el lixiviado de la mezcla con 5 % de ceniza volante).

TABLA 5.25 – METAL EXTRAIDO RESPECTO A LA CANTIDAD INCLUIDA. (% EN PESO)

COMPOSICION	METAL INCLUIDO mg/g mortero	TIEMPO (hrs)					
		0.5	1.0	2.0	5.0	18.0	24.0
	CADMIO						
20 % CENIZA VOLANTE	0.0250892	31.89	42.09	48.31	55.64	58.35	59.39
10 % CENIZA VOLANTE	0.0130127	58.41	78.70	82.85	95.14	97.45	98.52
5 % CENIZA VOLANTE	0.006523	37.71	83.09	91.37	95.66	*	*
10 % CENIZA FONDOS	0.008854	30.49	39.53	44.27	46.08	47.44	
20 % CENIZA FONDOS	0.016956	17.10	28.43	32.32	36.57	39.16	
	COBRE						
20 % CENIZA VOLANTE	0.081162	22.67	23.06	29.42	33.96	42.61	43.95
10 % CENIZA VOLANTE	0.04209	24.23	41.72	46.61	52.86	68.26	69.21
5 % CENIZA VOLANTE	0.021104	57.34	73.26	89.56	*	*	*
10 % CENIZA FONDOS	0.094282	7.21	9.67	11.47	14.91	15.02	
20 % CENIZA FONDOS	0.18054	6.76	9.55	12.54	20.24	20.38	
	HIERRO						
20 % CENIZA VOLANTE	2.31242	4.10	5.68	6.07	6.10	6.51	6.59
10 % CENIZA VOLANTE	1.1993	3.05	3.33	3.76	4.55	4.67	4.68
5 % CENIZA VOLANTE	0.60129	6.00	21.42	24.71	32.32	35.40	35.41
10 % CENIZA FONDOS	1.02084	2.49	3.98	4.39	4.44	4.45	
20 % CENIZA FONDOS	1.9548	1.48	2.10	2.83	8.89	8.92	

* = 100 %

TABLA 5.25 – METAL EXTRAIDO RESPECTO ... CONTINUACION.

COMPOSICION	METAL INCLUIDO (mg/g mortero)	TIEMPO (hrs)					
		0.5	1.0	2.0	5.0	18.0	24.0
	NIQUEL						
20 % CENIZA VOLANTE	0.018338	71.98	99.90	*	*	*	*
10 % CENIZA VOLANTE	0.009511	0.00	39.74	50.26	57.51	60.04	61.30
5 % CENIZA VOLANTE	0.004768	*	*	*	*	*	*
10 % CENIZA FONDOS	0.01675	0.00	43.94	56.84	70.15	74.99	*
20 % CENIZA FONDOS	0.032076	14.03	33.05	43.15	47.36	48.67	*
	CROMO						
20 % CENIZA VOLANTE	0.027608	32.24	35.35	40.13	43.61	46.07	46.94
10 % CENIZA VOLANTE	0.0143192	56.57	60.48	65.79	73.54	79.89	84.29
5 % CENIZA VOLANTE	0.0071788	*	*	*	*	*	*
10 % CENIZA FONDOS	0.0043804	*	*	*	*	*	*
20 % CENIZA FONDOS	0.008388	*	*	*	*	*	*
	PLOMO						
20 % CENIZA VOLANTE	0.083429	2.49	2.64	2.95	4.36	7.84	8.20
10 % CENIZA VOLANTE	0.0432713	0.00	0.00	3.65	3.65	3.74	4.16
5 % CENIZA VOLANTE	0.0216936	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10 % CENIZA FONDOS	0.0308884	0.00	0.00	0.00	5.57	7.38	*
20 % CENIZA FONDOS	0.059148	2.67	2.81	15.59	19.00	22.62	*

* = 100 %

Cadmio, cobre, níquel y cromo desafortunadamente presentan grandes porcentajes de extracción respecto a la cantidad incluida. Esto quizá se deba a la heterogeneidad en la composición de las cenizas.

Se puede decir también que cadmio, níquel y cobre se extraen en mayor cantidad en los morteros con ceniza volante, mientras que cromo se extrae más de los morteros con ceniza de fondos. El hierro también es extraído independientemente del tipo de ceniza incluida en el mortero. (Figs. 5.12 - 5.15)

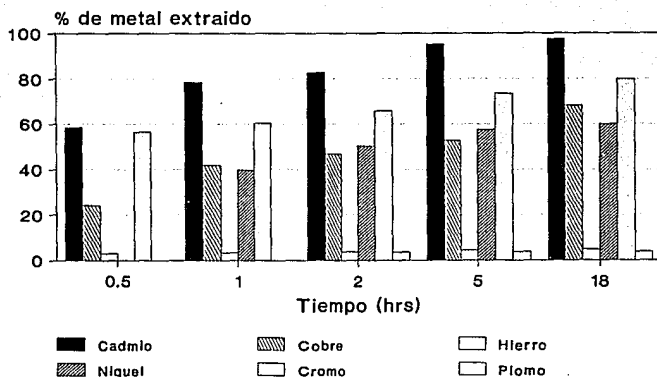


FIG. 5.12 - Extracción en morteros con 10 % de ceniza volante.

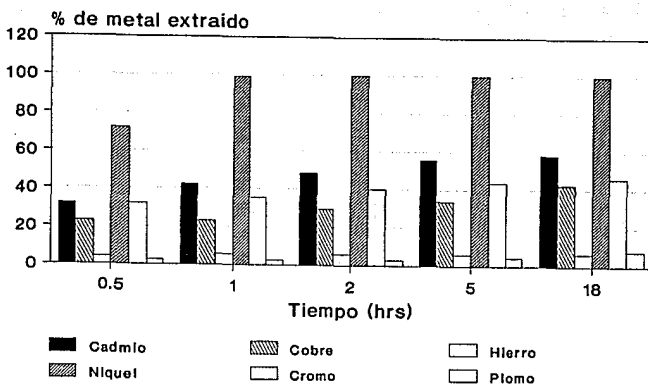


FIG. 5.13 - Extracción en morteros con 10 % de ceniza de fondos.

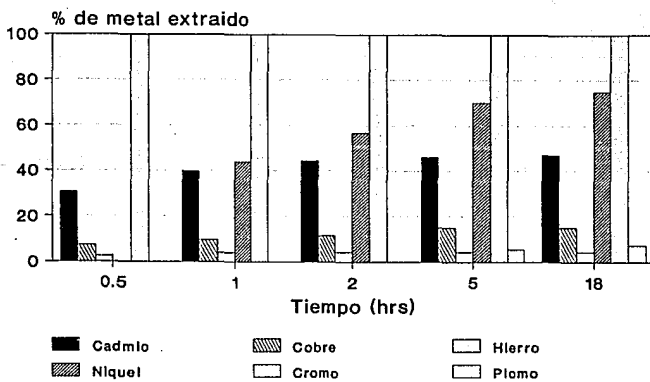


FIG. 5.14 - Extracción en morteros con 20 % de ceniza volante.

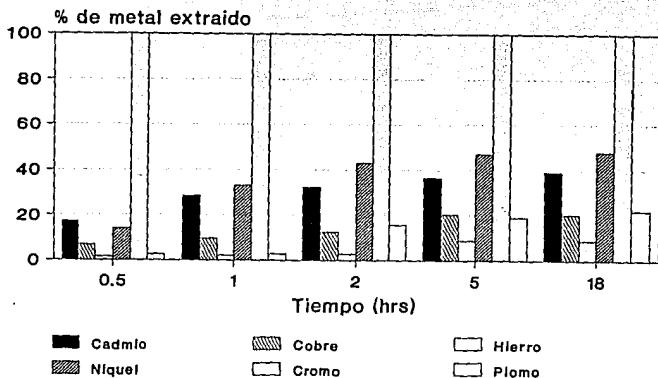


FIG. 5.15 - Extracción en morteros con 20 % de ceniza de fondo.

5.2.3 Erosión.

Los resultados de esta prueba se presentan a partir de la tabla 5.26; el agente agresivo fue agua desionizada con un pH controlado en 5 con ácido acético.

Se observa que la prueba es notablemente menos agresiva que la de extracción ya que los niveles de concentración de metal extraído son muy bajos (mg de metal/g de mortero).

Las figuras 5.16 y 5.17 presentan el porcentaje de metal liberado en esta prueba, respecto a la cantidad incluida, en morteros con 10 y 20 % de ceniza volante.

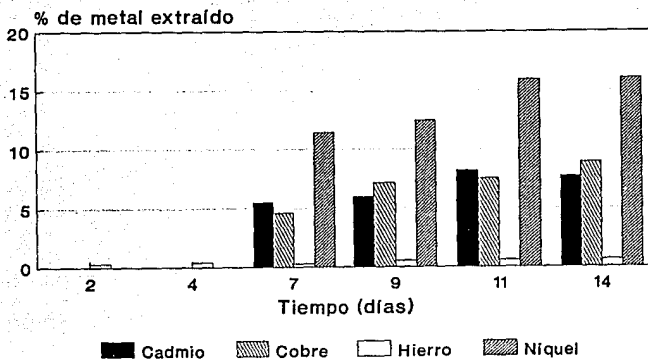


FIG. 5.16 - Prueba de erosión en morteros con 10 % de ceniza volante.

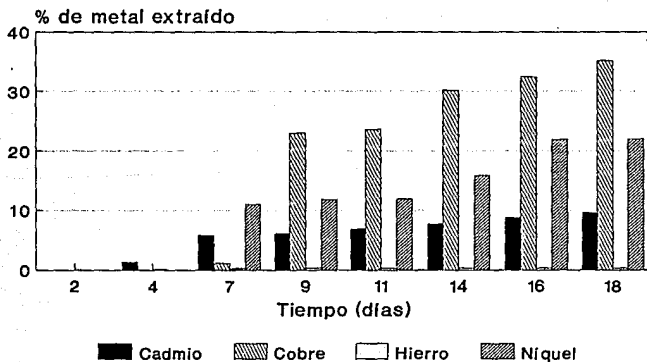


FIG. 5.17 - Prueba de erosión en morteros con 20 % de ceniza volante.

Y las figuras 5.18 y 5.19 presentan los resultados obtenidos en esta prueba, en morteros con 10 y 20 % de ceniza de fondos.

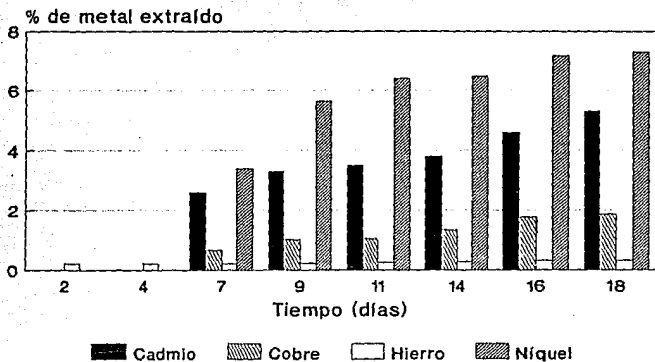


FIG. 5.18 - Prueba de erosión en morteros con 10 % de ceniza de fondo.

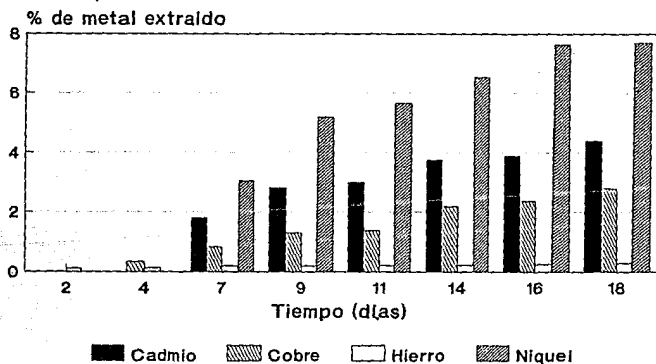


FIG. 5.19 - Prueba de erosión en morteros con 20 % de ceniza de fondos.

TABLA 5.26 – RESULTADOS DE PRUEBA DE EROSION. MORTERO CON CENIZA

	CADMIO	COBRE	ZINC	HIERRO	SODIO	NIQUEL
prueba (días)	mg de metal / g de mortero	mg de metal / g de mortero	mg de metal / g de mortero	mg de metal / g de mortero	mg de metal / g de mortero	mg de metal / g de mortero
Ceniza volante al 20 %						
2	ND	ND	3.470 E-3	1.18 E-3	12.45 E-2	ND
4	3.245 E-4	ND	5.230 E-3	2.39 E-3	17.69 E-2	ND
7	1.477 E-3	8.77 E-4	12.16 E-3	4.95 E-3	18.53 E-2	2.027 E-3
9	1.533 E-3	1.87 E-2		7.23 E-3	26.53 E-2	2.166 E-3
11	1.743 E-3	1.92 E-2		7.67 E-3	27.33 E-2	2.192 E-3
14	1.940 E-3	2.45 E-2				2.912 E-3
16	2.201 E-3	2.64 E-2				4.018 E-3
18	2.401 E-3	2.86 E-2				
Ceniza volante al 10 %						
2	ND	ND	1.79 E-3	4.00 E-3	13.25 E-2	ND
4	ND	ND	3.98 E-3	5.19 E-3	18.22 E-2	ND
7	7.149 E-4	1.94 E-3		6.34 E-2	18.22 E-2	1.084 E-3
9	7.811 E-4	3.014 E-3		6.81 E-3	25.61 E-2	1.184 E-3
11	10.66 E-4	3.15 E-3		7.06 E-3	20.00 E-2	1.511 E-3
14		3.77 E-3		8.02 E-3	30.87 E-2	
16		4.45 E-3		8.59 E-3	31.74 E-2	
18		4.58 E-3		8.76 E-3	33.43 E-2	
Ceniza volante al 5 %.						
2	ND	ND	4.93 E-4	1.57 E-3	ND	ND
4	ND	6.73 E-4	9.930 E-4	2.96 E-3	37.50 E-3	ND
7	6.398 E-4	7.530 E-4	32.24 E-4	3.23 E-3	48.12 E-3	ND
9	6.570 E-4	18.22 E-4	65.76 E-4	3.65 E-3	56.60 E-3	7.861 E-4
11	6.730 E-4	18.86 E-4	73.41 E-4	4.04 E-3	61.66 E-3	1.379 E-3
14	6.740 E-4			4.10 E-3	62.13 E-3	1.446 E-3
16	8.930 E-4			4.78 E-3	68.83 E-3	2.136 E-3
18	9.080 E-4			5.07 E-3	72.19 E-3	2.150 E-3

CONTINUACION...

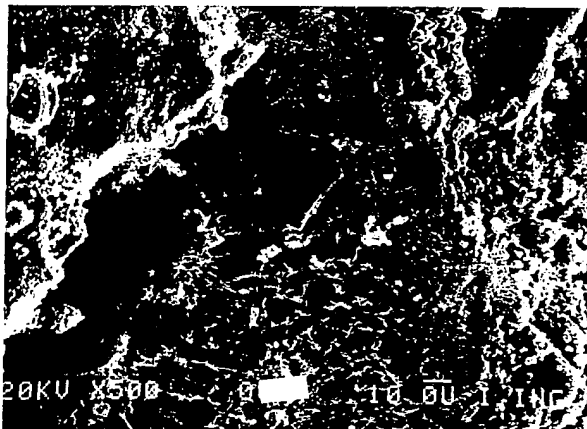
TABLA 5.26 – RESULTADOS DE PRUEBA DE EROSION. MORTERO CON CENIZA

	CADMIO	COBRE	ZINC	HIERRO	SODIO	NIQUEL
prueba (días)	mg de metal / g de mortero	mg de metal / g de mortero	mg de metal / g de mortero	mg de metal / g de mortero	mg de metal / g de mortero	mg de metal / g de mortero
Ceniza de fondos al 10 %						
2	ND	ND	4.630 E-4	2.18 E-3	27.65 E-3	
4	ND	ND	6.000 E-4	2.21 E-3	46.95 E-3	ND
7	2.34 E-4	6.24 E-4	7.170 E-4	2.24 E-3	60.35 E-3	ND
9	2.96 E-4	9.59 E-4	11.27 E-4	2.28 E-3	61.96 E-3	5.723 E-4
11	3.08 E-4	9.83 E-4	12.09 E-4	2.64 E-3	69.07 E-3	9.449 E-4
14	3.41 E-4	12.7 E-4	17.45 E-4	2.89 E-3	78.10 E-3	1.075 E-3
16	4.05 E-4	16.7 E-4	19.14 E-4	3.30 E-3	83.28 E-3	1.086 E-3
18	4.74 E-4	17.6 E-4		3.33 E-3	85.07 E-3	1.202 E-3
Ceniza de fondos al 20 %						
2	ND	ND	2.370 E-4	2.35 E-3	81.60 E-3	
4	ND	6.180 E-4	16.08 E-4	2.58 E-3	10.30 E-2	ND
7	3.14 E-4	15.03 E-4	27.34 E-4	3.91 E-3	12.81 E-2	ND
9	4.73 E-4	23.54 E-4	33.71 E-4	3.92 E-3	12.85 E-2	9.780 E-4
11	5.07 E-4	24.89 E-4	39.48 E-4	4.11 E-3	13.58 E-2	16.68 E-4
14	6.35 E-4	39.71 E-4	52.05 E-4	4.37 E-3	16.51 E-2	18.21 E-4
16	6.66 E-4	42.94 E-4	54.82 E-4	4.95 E-3	16.85 E-2	20.95 E-4
18	7.54 E-4	50.40 E-4		5.61 E-3	17.68 E-2	24.48 E-4

5.3 Observación al microscópio.

Con el objeto de obtener alguna información cualitativa de la apariencia estructural microscópica de los especímenes, se hicieron observaciones en microscópio electrónico.

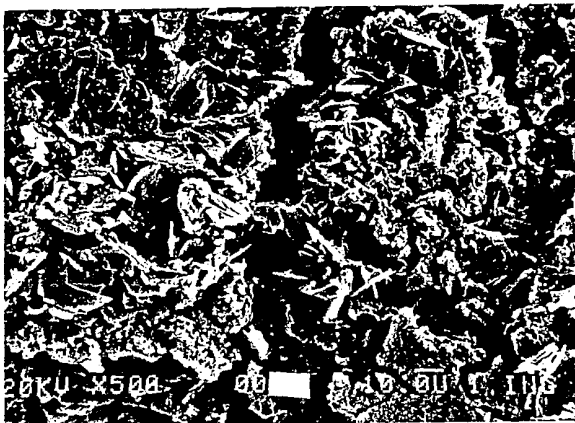
En la microfotografía 1 la cual presenta la imagen del mortero testigo en el que no se incluyó ningún residuo, se observa una grieta o espacio alrededor del agregado y la pasta en general presenta cristalización característica en forma de estrellas, así como también partículas blancas porosas e irregulares características del hidróxido de calcio. Esta microfotografía es comparada con las imágenes de mortero con lodo residual y con cenizas.



Fotografía 1 - Mortero testigo, sin residuo incluido.
(500X).

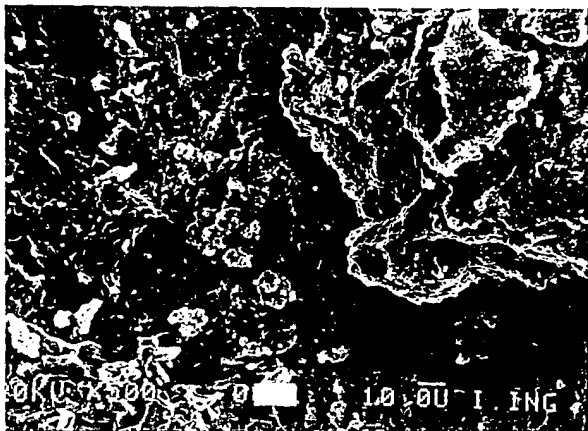
5.3.1 Mortero con lodo residual.

La microfotografía 2 presenta la imagen del lodo residual incluido.

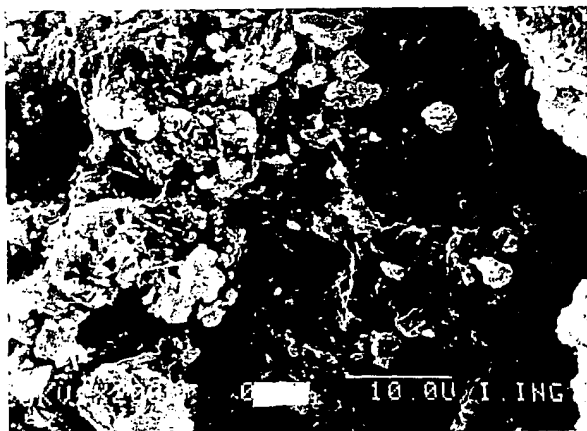


Fotografía 2 - Estructura microscópica del lodo residual. (500X).

En la microfotografía 3 se observa una imagen general del mortero con 10 % de lodo residual sin ataque química; presenta una cubierta homogénea y oscura en toda la superficie, también se reconocen partículas blancas como compuesto de calcio. La microfotografía 4 presenta un acercamiento a la superficie de esta muestra.

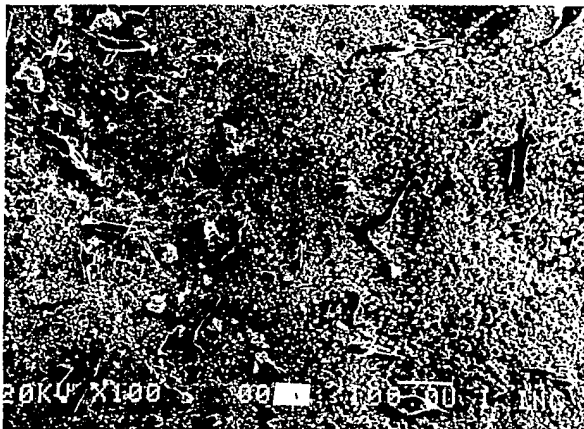


Fotografía 3 - Mortero con 10 % de lodo residual, sin ataque químico. Vista general. (500X).

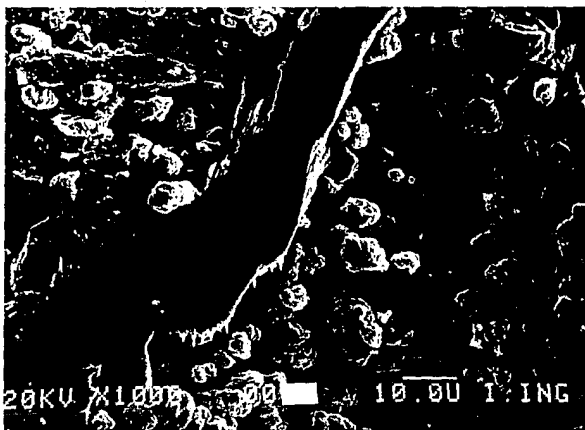


Fotografía 4 - Mortero con 10 % de lodo residual, sin ataque químico, Acercamiento de vista general. (2000X).

La microfotografía 5 presenta la imagen del mortero con 10 % de lodo residual después de 18 horas prueba de extracción. La superficie se encuentra cubierta de minúsculas partículas blancas pero dejan entrever unos sólidos irregulares oscuros. La microfotografía 6 es un acercamiento a este sólido y la imagen presenta una condición de desgaste por erosión.



Fotografía 5 - Mortero con 10 % de lodo residual, después de 18 hrs. de prueba de extracción. (100x).

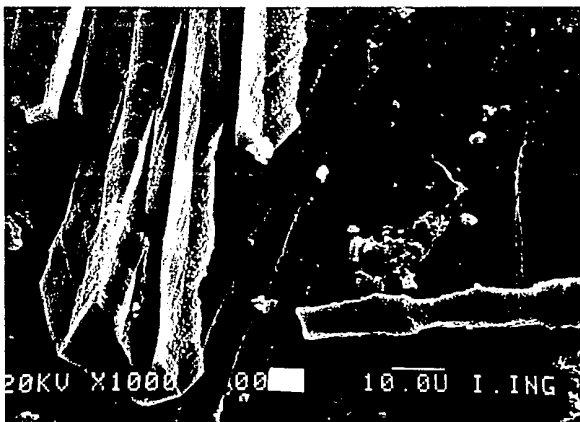


Fotografía 6 - Ampliación de fotografía 5 acercamiento de vista. (1000X).

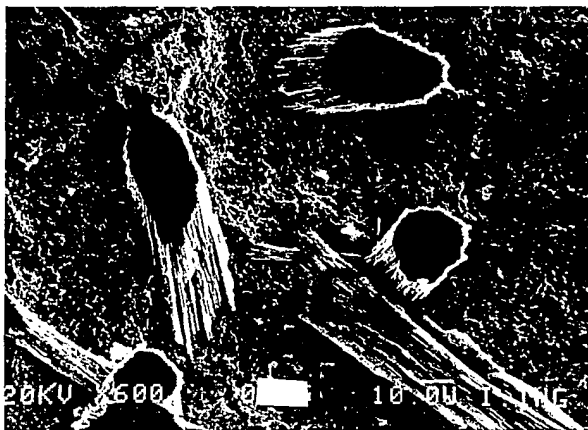
Las microfotografías 7, 8 y 9 presentan al mortero con 10 % de lodo residual después de 46 horas de prueba de extracción, ya no se observan las partículas blancas sobre la superficie y es clara la presencia de manchas del sólido irregular en los que ya se observa una forma cristalina como agujas aglomeradas. Este sólido está mezclado y distribuido en la pasta cementante, el aspecto de manchas se debe al desgaste paulatino del cristal que queda descubierto durante la lixiviación del sólido. Presumiblemente estos cristales sean algún compuesto de cromo.



Fotografía 7 - Mortero con 10 % de lodo residual y 46 horas de prueba de extracción. (100X).



Fotografía 8 - Mortero con 10 % de lodo residual y 46 horas de prueba de extracción. (1000X).



Fotografía 9 - Mortero con 10 % de lodo residual y 46 horas de prueba de extracción. (100X).

5.3.2 Mortero con ceniza.

El mortero sin ataque químico con 10 % de ceniza volante, se presenta en la microfotografía 10, en la cual se observa una cubierta reseca.

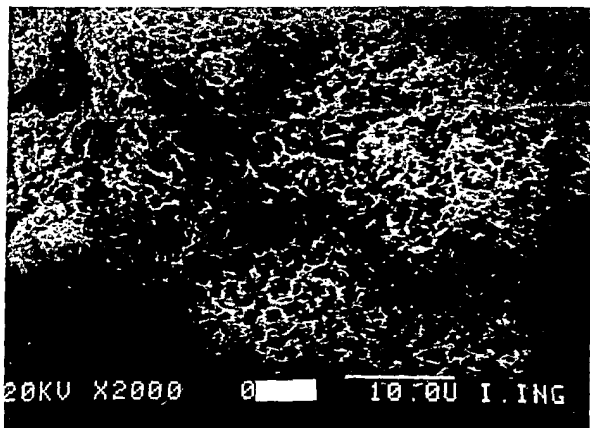


Fotografía 10 - Mortero con 10 % de ceniza volante sin ataque químico. (500X).

La microfotografía 11 presenta esta misma muestra después de 24 horas de extracción. La cubierta seca inicial se disuelve y la superficie es atacada presentando la imagen porosa de la microfotografía 12 que corresponde a una ampliación de la anterior.

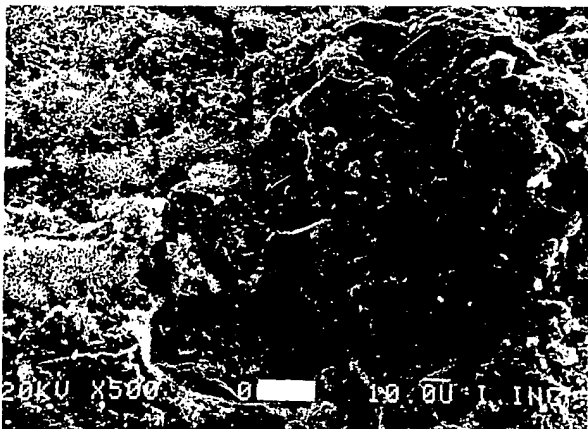


Fotografía 11 - Mortero con 10 % de ceniza volante, después de 24 hrs. de prueba de extracción. (500X).



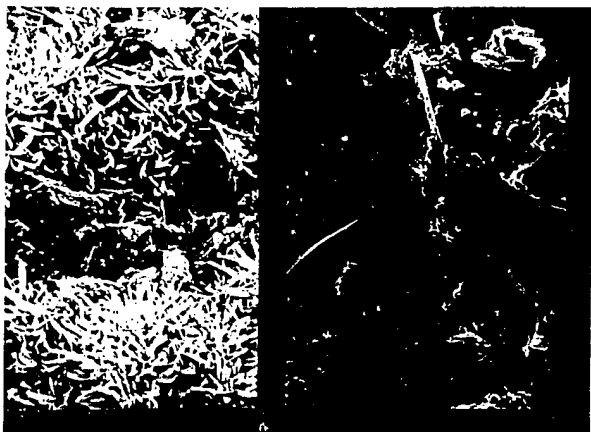
Fotografía 12 - Acercamiento de la muestra fotografía 11. (2000X).

Un aspecto general del mortero con 10 % de ceniza de fondos y sin ataque químico, se presenta en la microfotografía 13, observándose una notable diferencia entre la superficie interna y externa del mortero.



Fotografía 13 - Mortero con 10 % de ceniza de fondo, sin ataque químico. (500X).

La microfotografía 14 detalla y es fácilmente comparable la diferencia entre superficies. En el cuadro izquierdo se observa la superficie exterior y en el derecho se presenta la superficie interior. No fue posible observar esta muestra después de la prueba de extracción.



Fotografía 14 - Detalle comparativo, Mortero con 10 %
de ceniza de fondo, sin ataque químico
(1000X).

CONCLUSIONES.

El desarrollo de esta investigación, confinamiento y estabilización de lodo residual y cenizas, permitió analizar las ventajas y desventajas del proceso seleccionado (solidificación en cemento), y obtener las conclusiones siguientes.

_ Las pruebas químicas a las que fue sometido el sólido producido (mortero) pueden clasificarse de acuerdo a su agresividad, siendo la prueba de extracción la más agresiva ya que las condiciones ácidas y la erosión mecánica son constantes, por ello esta prueba, aplicada a todos los morteros preparados presenta los mas altos niveles de extracción. El nivel más alto de extracción de cromo en mortero con lodo residual, se obtuvo en la mezcla al 10%, con 13% de cromo extraído respecto a la cantidad

incluida. Los máximos valores de extracción en morteros con ceniza volante son independientes del porcentaje de ceniza incluida en cada mezcla: 97.5% de cadmio, 80% de cromo, 68% de cobre, 6,5% de hierro, 100% de níquel y 7.8% de plomo. En mortero con ceniza de fondos, los máximos valores corresponden a la mezcla con 20% de ceniza: 47.4% de cadmio, 20.4% de cobre, 8.92% de hierro, 75% de níquel, 100% de cromo y 22.6% de plomo.

Las pruebas de erosión hidráulica y solubilidad son notablemente menos agresivas y representan a la vez condiciones más reales de la exposición a la lluvia y corrientes de agua del ambiente natural, por esto es importante la evaluación de los resultados obtenidos: En el mortero con 10% de lodo residual y 9 días de prueba, se liberó 2.24% del cromo incluido. En morteros con 20 % de ceniza volante y 9 días de prueba, se liberó 6.1% de cadmio, 23% de cobre, 0.21% de hierro y 11.8% de níquel; en morteros con 20 % de ceniza de fondos la liberación de metales fue: 2.8 % de cadmio, 1.3 % de cobre, 0.2 % de hierro y 3.0 % de níquel.

_ El mortero por su naturaleza alcalina protege al metal incluido del ataque químico, amortiguando la acidez del medio agresivo exterior. Este fenómeno se aprecia fácilmente en las pruebas de erosión y solubilidad y esto explica en parte los mínimos niveles de extracción de cromo. Estas características permiten afirmar la conveniencia del uso de cemento como material aglutinante para la solidificación de los residuos utilizados.

_ El tamaño y la porosidad del mortero determinan el área superficial del sólido expuesta al ataque químico que, dependiendo de la magnitud de ésta, facilita o dificulta la extracción de los metales. A menor tamaño de

muestra probada, mayor extracción o liberación de metal incluido; esto complementa las razones de la agresividad de la prueba de extracción respecto a la de erosión hidráulica y solubilidad.

_ Los residuos confinados aumentan la resistencia mecánica del mortero; las cenizas proporcionan un mayor incremento en la resistencia mecánica que los lodos residuales, pero en ambos casos el aumento es contrario a la cantidad de residuo confinado por unidad de mortero.

_ El metal incluido o confinado definitivamente se extraerá en su totalidad si el ataque al mortero es continuo y persistente hasta la destrucción total del mortero; sin embargo, aún cuando esto parece una desventaja total de la técnica de confinamiento, es importante considerar el efecto de la cantidad de metal extraído en el volumen de lixiviado necesario; así, también debemos considerar que el proceso de erosión hidráulica es el principal responsable común del desgaste de rocas y minerales, y que de esta manera forma parte de los ciclos naturales de distribución y almacenamiento de los mismos. Por ello, se recomienda enfocar el uso o disposición final del sólido producido (mortero), en lugares en donde se restrinja su exposición directa a la lluvia (zona áridas o de mínima precipitación), evitar terrenos con corrientes de agua o expuestos a soluciones ácidas (interiores, núcleos de estructuras prefabricadas, etc.); además, es factible el uso de protección superficial como recubrimientos impermeabilizantes, polímeros o pinturas para evitar aún más el contacto del sólido con agentes agresivos.

Como ventajas del proceso con los residuos y materiales utilizados, puede

decirse que es relativamente económico, con materiales de fácil accesibilidad, que el residuo no requiere de un pretratamiento complejo y que principalmente convierte residuo con metales pesados solidificado, en un material seguro por la buena retención de tóxicos, aunque esto dependa en cierta forma de la cantidad de desechos incluida, además que el producto se puede formular para una resistencia excelente. Debe considerarse que los ácidos pueden reaccionar con el material solidificado y destruirlo, lo cual induce a la liberación del contaminante al ambiente.

La principal desventaja de este proceso es el aumento de volumen del residuo al convertirlo en el material final.

Particularmente recomendaría experimentar este proceso con residuos con mayor contenido de metales pesados, en los que se pueda evaluar con mayor exigencia la retención de éstos; además, se debe probar protección adicional para reducir la extracción como: impermeabilización, recubrimientos base resinas, etc. o encapsulamiento. Finalmente, es conveniente considerar la importancia de aprovechar este material de tal manera que represente un beneficio no sólo ambiental sino también económico.

BIBLIOGRAFIA.

1. Moreno R. A., 1991. *Manejo, tratamiento e industrialización de desechos sólidos en México*. Tesis profesional. Facultad de Química.
2. Granados R., Juárez S., 1989. *Estudio técnico para la disposición final de basura en el D. F.* Tesis Profesional. Facultad de Química, UNAM.
3. Huber A. W., Sands N. R., 1990. *Regulation the pollution of ground water: Responding to the NJPDS discharge to ground water permit fee regulations*. Hazardous and Industrial Wastes Proceedings of the twenty - two Mid-atlantic of the Industrial Wastes Conference. Edited by Joseph P. M. Shi-Chieh Cheng, et al. Drexel University.
4. Tena T. E., 1991. *Contaminación de suelos*. Tesis profesional. Facultad de Química.
5. Espíndola Zepeda M., Tellez Luna O., 1992. *Evaluación de tecnologías que emplean procesos fisicoquímicos para el tratamiento de residuos peligrosos*. Tesis profesional. Facultad de Química. .
6. Facultad de Química. 1993. *Manejo de Residuos Industriales*. Memorias. Depto. de vinculación profesional y apoyo a la titulación.
7. Zirschky, J., Junio 1989. *Hazardous and solid wastes*. Journal Water Pollution Control Federation (JWPCF) Vol. 61, No.6, (905-910).
8. Bowen T. P., 1989. *Sludge treatment, utilization and disposal* JWPCF, Vol 61, No.6, pp. 821-829.
9. Millano E. F., Ball O. R., 1991. *Storage, disposal, remediation and closure* Research JWPCF, Vol 63, No. 4, pp. 518-525.
10. Thompson B., 1989. *Radioactive wastes*. JWPCF, Vol., 61 No. 6, (901-905)
11. Gilbert G. W., Evans L. F., 1987. *Improved desing and operational practices for municipal sludge incinerator*. JWPCF, Vol. 59, No.11.

12. Russell L. D., Smith A. D., 1983. *Thermal sludge drying A look at drum dryer systems*. Proceeding of the 37th Industrial Waste Conference. Purdue University.
13. Bredtel H. E., 1990. *Improved efficiency of sewage sludge incineration by preceding sludge drying*. Wat. Sci. Tech. Vol. 22, No.12, (269 - 276). Printed Great Britain. .
14. Higgins E. T., 1991. *Hazardous waste minimization, Handbook*. Ed. Lewis Publishers.
15. Tourolle, C., 1991. *Conserve sus desechos en sal*. Ciencia y Tecnología de Francia. Interface. No. 37; Año IV.
16. Degremont, 1979. *Manual técnico del agua*. Degremont, 4a. edición. Vol.1 y 2
17. Doyle A. R., 1982. *Use of plastic solidification agents with the extruder-evaporator volume reduction and solidification (URS) system*. Edited by Pojasek B. Robert. Vol. 4.
18. Aziz M. A. and Lawrence C. Koe., 1990. *Potential utilization of sewage sludge*. Wat. Sci. Tech., Vol.22, No.12.
19. Elkins B. V., 1985. *Complete reclamation of waste-water end sludge*. Wat. Sci. Tech. Vol. 17, Amsterdam, pp. 1453-1454. Printed G. B., IAWPRC.
20. Krofchack D., 1989. *Solidification of wastes*. Proc. 44th. Industrial Wastes Conf. Purdue University.
21. Christensen D. C., Wakamiya W., 1982. *A solid future for solidification/fixation proceses*. Toxic and hazardous waste disposal. Edited by Pojasek B. Robert. Vol. 1.
22. Mulica S. W., Pojasek B. R., 1982. *Developing disposal site criteria for stabilized and solidified hazardous wastes*. Edited by Pojasek B. Robert. Vol. 2.

23. Johanesmeyes H. and Ghosh M., 1985. *Fixation of electroplating waste sludges*. Proc. 39th Industrial Waste Conf. Purdue University.
24. Smith L. C, Zenobia E. K., 1982. *Puzzolanic microencapsulation for enviromental of polycholynated biphenyl-contaminated sludges*. Proc. 37th Industrial Waste Conf. Purdue University.
25. Pichat P., 1984. *Tailor-Made processes for integrated stabilization - solidification of acid, basic and organic wastes*. Proc. 38th Ind. Waste Conf. Purdue University.
26. Mahloch L. J., 1982. *Leach testing of stabilized industrial sludges interpretation and application*. Edited by Pojasek B. Robert. Vol. 1.
27. McNeese J. A., Dawson G. W. and Christensen D. C., 1976. *Laboratory Studies of fixation of Kepone - Contaminated Sediments*. Copyright by Ann Arbor Science Publishers.
28. Baldwin N. P., 1984. *Cationic and anionic waste fixation generators' choices*. Hazardous and industrial wastes. Proc. 33th Mid-Atlantic Industrial Waste Conf. University of Pittsburgh
29. Fisher S., 1982. *The problems of developing consensus on methodology for predicting the leaching characteristics of deposited wastes*. Edited by Pojasek B. Robert. Vol. 1.
30. Claudio J. J., 1991. *Solidification of metal finishing slurry with cement*. Wat. Sci. Tech., Vol. 24, No. 12.
31. Claudio J. J., 1990. *Solidification of electroplating waste water treatment sludges whit cement*. Wat. Sci. Tech. Vol. 22, No. 12
32. Popovics S., 1990. *Test methods for the evaluation of treted sludges for construction purposes*. Hazardous Industrial Wastes. Proc. of the 22th Mid-Atlantic of the Industrial Waste Conf. Edited by Joseph P. M. Shi-Chieh Cheng, et al. Drexel University.
33. Sandesara T. J., 1982. *Fixation of heavy metals for secure landfill disposal*. Edited by Pojasek B. Robert. Vol. 4.

34. Turkman A. and Orhan U., 1991. *New Developments in Industrial waste water treatment*. NATO ASI Series. Applied Sciences, Vol.1.
35. García J. A., 1984. *Anteproyecto de tratamiento de sólidos de una planta de aguas negras del D.F. con radiación gama*. Tesis profesional. de Facultad de Química.
36. Brooks C. S., 1985. *Metal recovery from waste sludges*. Proceedings of the 39th. Industrial Waste Conference. Purdue University.
37. Wright P. A., Coates A. H., 1982. *Legislative initiatives for stabilization/solidification of hazardous wastes*. Edited by Pojasek B. Robert Vol. 4.
38. Schofiel T. J., 1982. *Fixation of heavy metals for secure landfill disposal*. Edited by Pojasek B. Robert Vol. 4.
39. Sonksen K. M., Lease A. J., 1982. *Evaluation of cement dust stabilization of polychlorinated byphenil - contaminated sludges*. Proc. 37th. Industrial Waste Conference. Purdue University.
40. Taha A. R., et al. 1990. *The use by products FGD gypsum in road construction*. Hazardous and Industrial Wastes Edited by Neufeld D. Ronald. Proc. of the 33th Mid-Atlantic Industrial Waste Conf. University of Pittsburgh.
41. Dusing C. D., et al. 1991. *Chemical fixation of coal power plants*. Hazardous and Industrial Wastes Edited by Neufeld D. Ronald. Proc. of the 33th Mid-Atlantic Industrial Waste Conf. University of Pittsburgh.
42. Hicke D., Larsen R. B., 1991. *On-site treatment of a surface impoundment liquid waste*. Hazardous and Industrial Wastes Edited by Neufeld D. Ronald. Proc. of the 33th Mid-Atlantic Industrial Waste Conf. University of Pittsburgh.
43. Mendoza C. J., 1976. Traducción de "Fundamental of prestressed concrete desing" *Principios fundamentales del diseño de concreto presforzado*. 2a. edición del IMCYC.
44. Pérez H. F., 1982. *Cemento puzolánico*. Tesis profesional Facultad de química.

45. Rincón G. L., 1982. *Papel del cromo en el proceso de clinkerización en la obtención del cemento Portland*. Tesis profesional Facultad de química.
46. I. Biczóck., 1978. *La corrosión del hormigón y su protección*. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto (IMCYC).
47. Eglinton M. S., 1987. *Concrete and its chemical behavior*. Ed. Thomas Telford.
48. Morales D. J., Rodríguez L. P., 1988. *Estudio del estearato de sodio en la hidratación de fenil-aluminato tetracálcico, clinker y cemento portland*. Tesis profesional. Facultad de química.
49. Rodríguez R. E., Huerta D. A., 1988. *Estudio de la hidratación del clinker y cemento en presencia de lignosulfato de calcio y estearato de aluminio*. Tesis profesional. Facultad de química.
50. Manual del concreto. 1970. Parte 1 y 2 Secretaría de Recursos hidráulicos. Dirección de proyectos. Departamento de Ingeniería Experimental. México.
51. American Society for Testing Materials. 1950. *Symposium on use of puzzolan materials in mortars and concretes*. Ed. Ann Arbor Sci. London.
52. SEDUE., Nov. 1990. *Normas técnicas ecológicas* NTE-CRP-001/88 y NTE-CRP-002/88. Gaceta Ecológica Vol. II, No. 11.
53. McClelland N. I., 1982. *Leachate testing of hazardous chemicals from stabilized automotive wastes*. Toxic and Hazardous Wastes Disposal Pojasek B. Robert Ed. Ann Arbor Sci.
54. Smith G., USA 1987. *Heavy metals in waste water and sludge treatment processes*. 2 vols.
55. Kennet H. L., 1977. *Heavy metals removal* Chemical engineering deskbook issue.

56. Patterson W. J., Herber e. A., 1977. *Carbonate precipitation for heavy metals pollutants*. Journal Pollution Control Federation.
57. Higgins T. E., Marshall B. R., 1985. *Combined treatment of hexavalent chromium whit other metals at alkaline pH*. Toxic and Hazardous Wastes. Edited by Irwin J. K. Proceedings of the 77 Mid-Atlantic Industrial Waste Conference.
58. Francis C. W., 1987. *Leaching of toxic metals from incinerator ashes*. JWPCF, Vol. 59, No. 11.
59. Mackenzie D., et al. 1989. *An abbreviated TCLP for stabilization studies*. Proc. of the 44th Ind. Waste Conf. Purdue University.
60. Côte L. P., 1983. *Leachability comparison of four hazardous waste solidification processes*. Proc. of the 38th Industrial Waste Conf. Purdue University.
61. Anderson A. M., 1982. *Test factors affecting the release of materials from industrial wastes in leaching tests*. Toxic and Hazardous Wastes Disposal Pojasek B. Robert Ed. Ann Arbor Sci.