

239408

BIBLIOTECA
INSTITUTO DE ECOLOGIA
UNAM

240

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO**



FACULTAD DE INGENIERIA

DONACION

"TESIS DONADA POR LA
BIBLIOTECA CENTRAL U.N.A.M.
PARA USO EXCLUSIVO DE BIBLIOTECAS"

"APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS SOLIDOS
EN LA CONSTRUCCION PARA AGREGADOS"

TESIS PROFESIONAL
PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO CIVIL
P R E S E N T A :
JOSE EDUARDO CARBALLIDO LOPEZ

DIRECTOR DE TESIS
ING. FERNANDO FAVELA LOZOYA

MEXICO, D. F.

1996

UNAM
**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**





Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES Y ENSEÑANZA
EN CIENCIAS QUÍMICAS
LIBRERÍA DE LA BIBLIOTECA



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA
DIRECCION
60-1-021/96

Señor
JOSE EDUARDO CARBALLIDO LOPEZ
Presente.

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor **ING. FERNANDO FAVELA LOZOYA**, que aprobó esta Dirección, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de **INGENIERO CIVIL**.

"APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS SOLIDOS EN LA CONSTRUCCION PARA AGREGADOS"

- I. CARACTERISTICAS DE LOS RESIDUOS SOLIDOS
- II. PANORAMA GENERAL DE LOS RESIDUOS SOLIDOS EN LA CONSTRUCCION
- III. POSIBILIDAD TECNOLOGICA DEL RECICLADO DEL CONCRETO
- IV. TECNOLOGIA DEL RECICLAJE
- V. VENTAJAS DEL RECICLAJE DEL CONCRETO

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Cd. Universitaria, a 22 de febrero de 1996.
EL DIRECTOR.



ING. JOSÉ MANUEL COVARRUBIAS SOLIS

JMCS/GMP*nl

Dedicatorias

A Dios por su Amor

A mi mamá por darme su amor y libertad para escoger mi camino.
A mi papá por estar conmigo.

A Beti y al Güero por apoyarme en mis decisiones.
A mis hermanos Selene, David, Dulce, Cesar por estar presente siempre.

A mi tía Dulce y a mi tío Lalo por darme cariño y atención.

A Didier por ayudarme haber en los demás a Dios.

A Lupita por su amor

Agradecimientos

A la Universidad Nacional Autónoma de México por abrirme todas sus puertas

A todos los maestros que hicieron posible esta meta

Al Ing. Fernando Fabela Lozoya por su apoyo e interés para desarrollar este trabajo

A Rocio, china, Pablo y a todos los que han estado cerca para apoyarme y hacer posible mis sueños

D O N A C I O N
"TESIS DONADA POR LA
BIBLIOTECA CENTRAL U.N.A.M.
PARA USO EXCLUSIVO DE BIBLIOTECAS"

INDICE

	PÁGINA
Objetivos	1
Introducción	2
1. Características de los residuos sólidos	
1.1. Definición de residuo sólido	4
1.2. Clasificación de los residuos sólidos de acuerdo a su fuente generadora	5
1.2.1. Residuos sólidos municipales	5
1.2.2. Residuos sólidos comerciales	5
1.2.3. Residuos sólidos industriales	6
1.3. Manejo, tratamiento y minimización de los residuos	10
1.3.1 Manejo y tratamiento de los residuos sólidos municipales y comerciales	11
1.3.2. Manejo y tratamiento de los residuos industriales	12
1.4. Definición de los residuos sólidos de la construcción	15
2. Panorama general de los residuos sólidos en la construcción	17
2.1. Composición y características de los residuos sólidos de la construcción	18
2.2. Flujo de los residuos sólidos de la construcción	20
2.3. Generación de los residuos sólidos de la construcción	23
2.4. Manejo de los residuos sólidos de la construcción	24
2.4.1 Disminución	25
2.4.2 Almacenamiento	25
2.4.3 Transporte	26
2.4.4 Reciclaje y reuso	26
2.4.5 Disposición final	27

	Página
3. Posibilidad tecnológica del reciclado de concreto	31
3.1. Calidad del agregado reciclado	
3.1.1. Gradiente del agregado reciclado	31
3.1.2. Adherencia al mortero	32
3.1.3. Densidad	33
3.1.4. Absorción de agua	33
3.1.5. Contaminantes	35
3.2. Aplicación del Agregado reciclado grueso	41
3.3. Concreto de agregado reciclado	43
3.3.1. Propiedades mecánicas	43
3.3.2. Durabilidad	50
3.3.3. Propiedades y diseño de mezclas	53
3.4. Aplicación del agregado reciclado fino	59
4. Tecnología del reciclaje	62
4.1. Procesamiento en sitio	63
4.2. Procesamiento centralizado	64
4.3. Procesamiento mecánico o manual	64
4.4. Procesamiento del escombros limpio y contaminado	65
4.5. Etapas del proceso	65
4.6. Aspectos económicos del proceso del reciclado	74
4.7. Equipo	79

5. Ventajas del reciclaje de concreto	
5.1. Energéticas	83
5.2. Ambientales	83
5.3. Económicas	84
5.4. Otras	84
6. Conclusiones	87
7. Bibliografía	90

OBJETIVOS

Dar a conocer las posibles alternativas del aprovechamiento de los residuos sólidos de la construcción para la producción de agregado.

Concientizar a las personas involucradas en la construcción para proteger el medio ambiente, aprovechando los desperdicios generados en la construcción.

Dar a conocer los beneficios que esta alternativa nos puede proporcionar como ahorro de recursos naturales y disminución de residuos sólidos que se traducen en beneficios económicos.

INTRODUCCIÓN

El reaprovechamiento de los residuos sólidos se considera como el conjunto de acciones, donde los subproductos son transformados mediante procesos específicos para que estos vuelvan a formar parte como materia prima para producir bienes similares o iguales a los inicialmente producidos. La diferencia existente entre el reaprovechamiento y el reuso directo de los residuos sólidos, es que en el primero los subproductos son transformados mediante técnicas para su reutilización, mientras que en el reuso directo no existe modificación química del desecho y su empleo es por lo general no permanente.

El reciclaje de los residuos sólidos de la construcción, toma importancia como una necesidad después de la Segunda Guerra Mundial, por un lado para satisfacer la enorme demanda de materiales de construcción así como también, para remover los escombros de las ciudades destruidas. Usando este escombro fue posible no solo reducir costos de limpieza de lugares, sino que también contribuir considerablemente para satisfacer las necesidades de materiales para la construcción. La experiencia adquirida en este suceso, fue importante para la conexión de reciclaje de escombros de escombro, para usarse como agregado para la producción de nuevo concreto.

En la actualidad se ha estimado que en Europa, aproximadamente 50 millones de toneladas de concreto son demolidas, en el Reino Unido 11 millones de ton, Francia 13 millones ton, Japón 10-12 millones de ton y en E.U. 60 millones de ton cada año; y sólo pequeñas cantidades son recicladas ó reusadas. La que es recuperada se utiliza como base o sub-base en la construcción de carreteras y el resto es tirado o depositado como relleno.

El desarrollo del reciclaje puede ser impulsado por diversos factores como son : la escasez de agregado natural, las distancias cada vez mas grandes entre depósitos de material natural y los lugares de construcciones, los insuficientes rellenos sanitarios, fenómenos naturales como sismos, huracanes. Pero también existen otros que lo frenan como son: un alto costo de inversión para plantas de reciclado, el desconocimiento y desconfianza del proceso y producto reciclado.

Donde se han realizando estudios relativos al reciclado de escombros de la construcción es en los países desarrollados E.U., Japón, Alemania; en estos países la tecnología en materia de procedimientos constructivos y en equipos es avanzada, domina la utilización de prefabricados y llevan un control de los residuos, así como también de las materias primas que se utilizan para los insumos de la construcción, por lo que basados en todos estos conocimientos les es factible reciclar un alto porcentaje de residuos de la construcción. Además cuentan con reglamentos para el control de los residuos sólidos de la construcción.

En lo que respecta a México el gobierno y la iniciativa privada continúan construyendo, lo que hace que aumenten los volúmenes de residuos sólidos de la construcción. Además existen materiales y métodos tradicionales, y solo un bajo porcentaje es de prefabricación, por lo que los residuos generados en la construcción en su mayoría van a ocupar espacios en los sitios de disposición final de los residuos sólidos municipales ; lo que no permiten que se presenten las condiciones para un mayor desarrollo en el área del reciclaje

Por lo que México requiere un impulso para el inicio y posterior desarrollo de la industria del reciclaje de los residuos sólidos de la construcción.

1. CARACTERÍSTICAS DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS.

1.1. DEFINICIÓN DE RESIDUO SÓLIDO

De acuerdo a la Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección del Ambiente define a un residuo como "cualquier material generado en los procesos de extracción, beneficio, transformación, producción, consumo, utilización, control o tratamiento cuya calidad no permita usarlo nuevamente en el proceso que lo generó".¹

La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (Environmental Protection Agency. EPA) menciona: "Se entiende como residuo sólido cualquier basura, desperdicio, lodo y otros materiales sólidos de desecho, resultantes de las actividades industriales, comerciales y de la comunidad. No incluye sólidos o materiales disueltos en las aguas domésticas servidas o cualquier otro contaminante significativo en los recursos hídricos, ni los sólidos suspendidos o disueltos en los afluentes de aguas servidas industriales, ni los materiales disueltos en los canales de retorno o irrigación, ni otros contaminantes comunes en el agua".²

Antes de referirnos al manejo adecuado de los residuos consideramos importante hacer una clasificación de los mismo, la cual nos ayudará a entender las diferencias que se requieren en su manejo.

1. Ley General para el Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente. Diario Oficial. Enero 1988.
2. Documentos relativos al manejo de residuos sólidos (Compilado por la Dirección Técnica de Desechos Sólidos) Agosto 1992

1.2. CLASIFICACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS DE ACUERDO A SU FUENTE GENERADORA

1.2.1. Residuos sólidos municipales

La norma 83-ECOL-1994 aprobada por el Comité Nacional de Normalización, define como residuo sólido municipal aquel que proviene de actividades que se desarrollan en casa habitación, sitios y servicios públicos, demoliciones, construcciones, establecimientos comerciales y de servicios, así como residuos industriales que no se deriven de un proceso. Esto implica que todos los aspectos relacionados con el manejo, transporte y disposición de los residuos generados en las obras, deben atenerse a lo previsto por la normatividad vigente.

La característica principal de estos residuos es la diversidad de materiales que los conforman. Cabe hacer notar que entre ellos se encuentran en ocasiones residuos peligrosos que aunque requieren un tratamiento especial, no se ha podido implementar un programa permanente para el manejo adecuado de los mismos, debido a que su fuente generadora es muy dispersa y a la falta de conciencia de los generadores, para lograr esto es necesario crear una cultura ecológica de protección al ambiente, en el que prevalezca la actitud participativa de la comunidad.

1.2.2. Residuos sólidos comerciales

Su nombre se debe a que proviene de comercios y debido a sus características se pueden manejar como los residuos sólidos municipales.

1.2.3. Residuos sólidos industriales

Prácticamente todas las industrias generan residuos, los llamados "Residuos industriales", los cuales se pueden clasificar de acuerdo a sus características.

Clasificación de los residuos industriales:

- **Residuos industriales de características semejantes a los residuos municipales**

Son residuos que se producen en los comedores, servicios de empaquetación, limpieza, oficinas, etc. y por sus características la solución más idónea para estos residuos es su recolección y tratamiento como los residuos municipales. En este grupo se pueden incluir: restos de comidas, trapos, telas, madera, cartones, papeles, recortes o botellas de plástico, etc.

- **Residuos industriales peligrosos.**

En general, estos residuos por sus características suponen un grave riesgo al medio ambiente, requiriendo por lo tanto, un manejo particular y específico, así como un continuo control en su transporte, tratamiento, eliminación o confinamiento. Por tanto, no deben ser arrojados a los colectores de aguas residuales ni depositados en tiraderos municipales.

Por lo anterior, el manejo y disposición de los residuos considerados peligrosos por la legislación mexicana, deben hacerse estrictamente conforme a la Ley General del Equilibrio Ecológico, El Reglamento de Materia de Residuos Peligrosos y Las Normas Oficiales Mexicanas correspondientes.

Ley General para el Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, define como residuo peligroso a "Todos aquellos residuos, en cualquier estado físico, que por sus características corrosivas, tóxicas, venenosas, reactivas, explosivas, inflamables, biológicas, infecciosas o irritantes, representen un peligro para el equilibrio ecológico o el ambiente".

La EPA establece: "Se entiende como residuo peligroso cualquier residuo o combinación de residuos, que representen un peligro inmediato o potencial para la salud humana o para otros organismos vivos por desecho no degradables o persistentes en la naturaleza o porque pueden magnificarse biológicamente, o por ser letales o porque de cualquier otra forma pueden causar o tender a causar efectos acumulativos perjudiciales

Generalmente en la práctica se disponen estos residuos en tiraderos municipales, no cumpliendo con las reglamentaciones en vigor y tiene serias consecuencias aún cuando muchos de los residuos sean productos de uso común como son solventes usados, aceites gastados tintas, pinturas y productos químicos en general.

NOM-CRP-001-ECOL/93 identifica a los residuos industriales de acuerdo al giro industrial y a los residuos peligrosos de fuentes no conocidas. Sin embargo, aún cuando sus residuos no estén identificados se requiere realizar una prueba CRETIB, que es el código de clasificación de las características que exhiben los residuos peligrosos y que significan, como sus siglas lo indican: corrosivo, reactivo, explosivo, tóxico, inflamable y biológico infeccioso.

De acuerdo con lo anterior, un residuo peligroso es un material que presenta una o varias de las siguientes características:

Corrosivo

Cuando el material es ácido o alcalino, y tiene la capacidad de desgastar o socavar metales, otros materiales como: telas, plásticos, etc. y quemar la piel.

Reactivo

Cuando se combinan violentamente y pueden crear gases vapores y humos tóxicos.

Explosivo

Que es capaz de producir reacción detonante o explosiva a 25° C y 1.03 kg/cm² de presión.

Tóxico

Son peligrosos al ser ingeridos o absorbidos, se incluyen aquí todos los desechos que su extracto contiene grandes concentraciones de metales pesados como son: mercurio, cadmio, plomo o pesticidas.

Inflamable

Que puede crear fuego.

Biológico infeccioso

Es capaz de producir efectos nocivos en los seres vivos por su contenido de microorganismos patógenos lo que los convierte en un foco infeccioso.

La generación, almacenaje, manejo, transporte, y disposición final de "desechos industriales peligrosos" están estrictamente regulados y sancionados por la Ley General de Equilibrio Ecológico.

Es necesario, que todo empresario tome conciencia de la necesidad de evitar que "residuos industriales peligrosos" permanezcan sin control y que su disposición se haga en sitios inadecuados sin autorización expresa para este tipo de actividad, por parte de las autoridades competentes.

- **Residuos industriales no peligrosos**

Se agrupan aquí todos los residuos que no pueden ser incluidos en ninguno de los dos puntos anteriores, estos aun cuando son no peligrosos y en ocasiones inertes (no reaccionan en condiciones normales, temperatura 25°C y una atm, de presión) no se pueden dejar al ambiente sin control alguno ya que pueden causar entre otro problemas un mal aspecto del lugar o inclusive hacer un volumen grande que afecte al ambiente ya que es un elemento extraño al ecosistema; por lo que es necesario darles un manejo adecuado. Entre estos residuos se tienen fibras sintéticas, residuos sólidos de la construcción, etc.

A Continuación se presenta una clasificación de los residuos:

Tabla 1. Clasificación de los Residuos Sólidos

NO PELIGROSOS	POTENCIALMENTE PELIGROSOS	PELIGROSOS
Vidrio	Excremento	Substancias químicas de
Papel	Secreciones	Lab. de enseñanza
Cartón	Toallas sanitarias	Animales de investigación
Plástico	Algodón Contaminado	Residuos de
Tetrapack	Aceites y grasas	medicamentos
Chatarras	Autos abandonados	Solventes
Material inerte	Pañales	Papel con excremento de
Textil natural	Envases de plaguicidas	contagio
Textil sintético	Envases de aerosoles	Cuerpos de animales
Residuos Alimenticios	Material no ferrosos	muerdos enfermos
Residuos de jardinería	Papel carbón	Medicinas caducadas
Enseres domésticos	Animales muertos	Alimentos enlatados o
Material ferroso		agranel caducos
Material no ferroso		
Madera		
Hueso		
Flores (desecho)		

1.3. MANEJO, TRATAMIENTO Y MINIMIZACIÓN DE LOS RESIDUOS

Se entiende por tratamiento, a las operaciones cuya finalidad es reducir o anular las características de toxicidad y de peligrosidad para la salud humana y al ambiente, así como facilitar el transporte, almacenamiento, eliminación y recuperación de los recursos contenidos en los residuos.

Se entiende por eliminación todo procesamiento, que no implique la recuperación de los residuos, como es el relleno sanitario, la incineración sin recuperación de energía, etc.

1.3.1. Manejo y tratamiento de los residuos sólidos municipales y comerciales

Debido principalmente a la diversidad de los materiales que contienen los residuos municipales, los tratamientos que se conocen presentan dificultades económicas y de participación de los involucrados para lograr el éxito esperado.

En la mayoría de los casos la solución más viable y de menor costo es el relleno sanitario controlado. El cual es un lugar autorizado en el que se disponen los residuos sólidos no peligrosos; éste debe estar localizado, diseñado, construido, operado y cerrado en forma tal que evite su impacto ambiental en la zona. Sin embargo, si éste no se maneja adecuadamente se presentarán problemas de contaminación durante su uso o inclusive después de cerrado, haciéndose necesario trabajos de remediación que son muy costosos.

La mejor solución para el manejo adecuado de estos residuos es no generarlos o reducir su volumen de generación, para ello se requiere la participación activa de toda la comunidad.

Esto se puede lograr realizando los siguientes principios básicos para la no generación de residuos:

- Reducir el volumen de generación de residuos.
- Reutilizar, aprovechando al máximo los productos.
- Reciclar, prolongar la vida útil de los materiales.
- Rechazar los productos que tengan muchos empaques.

1.3.2. Manejo y tratamiento de los residuos industriales

Los métodos de tratamiento y/o de eliminación de los residuos industriales son los siguientes.

- Para residuos industriales semejantes a los residuos municipales.

Deben tratarse y eliminarse en rellenos sanitariamente controlados, conjuntamente con los residuos municipales.

- Para residuos industriales peligrosos.

En términos generales se puede afirmar que las tres grandes líneas de tratamiento de residuos industriales peligrosos son las siguientes: reciclaje, incineración, disposición o confinamiento.

- Para residuos industriales no peligrosos.

Deben tratarse y eliminarse en confinamientos controlados para este tipo de residuos, en caso de que en la región no se cuente con uno, lo más conveniente es tratarlos y manejarlos en rellenos sanitariamente controlados, conjuntamente con los residuos municipales. Sin embargo es recomendable en toda empresa contar con un plan de minimización de residuos, para ello es conveniente seguir los siguientes pasos:

Reducción

Se debe buscar aprovechar al máximo los recursos de la planta, así como también, integrar una parte de los remanentes del proceso al mismo (en ocasiones se tienen los mismos componentes pero en distintas concentraciones), con el fin de minimizar la fuente generadora del desecho.

Reciclaje-reuso

En ocasiones los materiales pueden servir no como materia prima de un proceso, pero si como fuente de combustible alterna ya que hay materiales con capacidad calorífica tal, que permite que sirvan como combustible de otros procesos por ejemplo : aceite, llantas usadas para la fabricación del cemento, etc..

Incineración

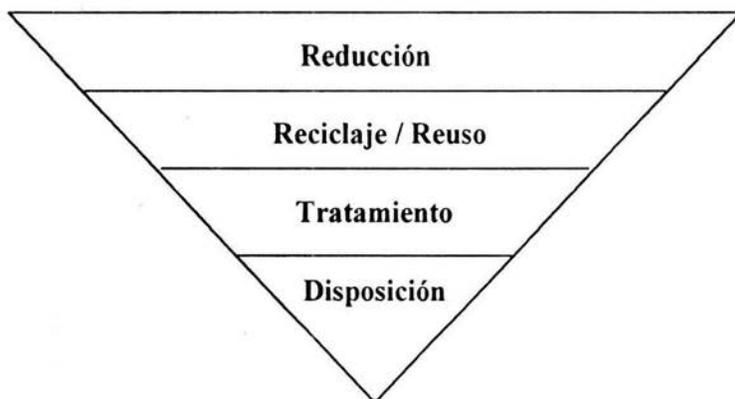
Los materiales pueden ser incinerados buscando disminuir el volumen a manejar, sin embargo, las cenizas resultantes de los residuos peligrosos difícilmente dejan de ser residuos peligrosos a través de este procedimiento. Al disminuir el volumen tiene la ventaja de facilitar el manejo en la siguiente etapa: la disposición final. Los residuos no peligrosos pueden ser incinerados pero es necesario realizar un estudio de factibilidad económica, ya que se requiere que el manejo de los residuos además de ser adecuado se adapte a la capacidad económica del generador, en su defecto se debe buscar aquella solución que sea además de confiable, segura, adecuada y económica para el residuo. La incineración es más utilizada para el manejo de residuos peligrosos.

Disposición

Es un depósito de seguridad en donde se confinan los residuos. Para confinarlos es necesario realizar un tratamiento previo, se utiliza en muchos casos tratamiento físico-químico para su neutralización. Además se debe considerar las afinidades de los residuos, para evitar problemas posteriores por contacto de residuos no compatibles, por ejemplo reacciones explosivas, gases tóxicos, etc.

A continuación se presenta en la figura 1 la jerarquía conveniente para el manejo de los residuos sólidos.

Figura 1. Jerarquía de manejo.



Al seguimiento de estos pasos se le conoce como el método del embudo para el manejo de residuos, ya que se maneja como una pirámide invertida en la que se busca que la mayor parte de los residuos se maneje en el primer paso: reducción, disminuyendo su volumen hasta llegar a la disposición, siendo esta última etapa la que debe manejar el volumen menor de los desechos.

1.4. DEFINICIÓN DE RESIDUO SÓLIDO DE LA CONSTRUCCIÓN

En general, se define como residuo de la construcción, a todo el residuo que se genera de las varias actividades de construcción y de demolición de edificios, caminos, infraestructura y otras obras.

Ciertamente, la mayor parte de los residuos generados por la industria de la construcción, corresponde a la categoría de no peligrosos encontrándose constituidos por materiales tales como concreto, tabique, madera, acero, cartón, plásticos, cerámica, vidrio, polvo etc.. Sin embargo, dentro de estos materiales se encuentran residuos que de acuerdo a la normatividad vigente en México, pueden ser catalogados como peligrosos.

Los residuos sólidos de la construcción pueden estar constituido por uno o varios de los siguientes materiales: de despojo, de residuos inertes y residuos peligrosos.

- **Despojo**

Es el material natural que es removido del terreno en el sitio de construcción. El despojo esta compuesto de tierra, roca, arena, grava, arcilla y otros materiales no contaminados. Estos residuos generalmente estan suficientemente limpios para ser reusado sin tratamiento para el cultivo, para áreas verdes o para material de relleno.

- **Residuos Inertes**

Incluye materiales, hechos por el hombre, que son químicamente inertes tales como: concreto (sin armadura), ladrillos y mampostería. Los materiales

de esta categoría se pueden almacenar sin causar impactos negativos al medio ambiente y sin tener que ser procesados. Estos materiales pueden ser utilizados para reemplazar ciertos materiales de construcción, por ejemplo, la grava.

- **Residuos Peligrosos**

Este grupo de residuos consiste de materiales contaminados con elementos químicos orgánicos o inorgánicos peligrosos (pinturas, solventes, fungicidas y otros). También incluye materiales que normalmente se reconocen como altamente contaminados, como por ejemplo, los alrededores de un transformador defectuoso o el piso de un taller de galvanoplastia.

2. PANORAMA GENERAL DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS EN LA CONSTRUCCIÓN

Los residuos sólidos de la construcción, comienzan a ser un gran problema, ya que cada día se generan grandes volúmenes provenientes tanto de la obra privada como pública, y desgraciadamente no existen un buen manejo en su almacenamiento, transportación y disposición final, esta última es la más problemática ya que los residuos son depositados en la vía pública, barrancas, tiraderos clandestinos y en el mejor de los casos con un mínimo porcentaje en tiraderos municipales donde ocupan una gran área la cual podría ser utilizada para otros fines.

Se ha considerado que la generación de residuos es una actividad única de ciertas industrias como la minera, química, petroquímica, etc. Sin embargo, la industria de la construcción también genera residuos, pero a diferencia de los demás giros sus residuos tienen características particulares, y que de acuerdo con la normatividad vigente de México algunos de ellos son considerados peligrosos.

A diferencia de otras, la Industria de la Construcción cuenta con ubicación y periodos temporales, por lo que el control sobre los residuos generados en la construcción es complejo, ya que las fuentes generadoras de residuos cambian constantemente su ubicación y composición, que dependen básicamente de la magnitud de la obra en cuestión. Además, el sitio de la construcción no se delimita a una "zona industrial" con uso de suelo establecido, sino que se ubica en cualquier sitio donde la obra cuente con la autorización y permisos correspondientes, independientemente de que se trate de zonas urbanas, suburbios o áreas completamente rurales.

2.1. COMPOSICIÓN Y CARACTERÍSTICAS DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS

La composición de los residuos de la construcción varían ampliamente de lugar a lugar, por estación del año y especialmente durante y después de un desastre natural. La composición de estos residuos también es afectada por la economía del país y de la región donde se generan, así como por el número y tipo de proyectos de la construcción. Por ejemplo: la composición de los residuos generados de la construcción de una carretera pueden ser muy diferentes a la de un hospital o una planta industrial cualquiera.

En la tabla 2 se muestra la composición más común de los residuos de la construcción que ingresan a un relleno sanitario. Como puede apreciarse, respecto a los porcentajes promedio destacan los materiales de excavación con un 43.16%, el concreto con el 24.38%, así como el block y tabique con un 23.33%, representando en conjunto más del 90%; de la misma manera destaca el hecho de que la madera y la varilla participan con el 1.52% y 0.48% respectivamente para una participación conjunta menor al 2%, lo cual es un reflejo de los altos índices de recuperación de estos últimos materiales.

Tabla 2. Composición de los Residuos Sólidos de la Construcción

	MATERIAL DE EXCAV. %	CONCRETO %	BLOCK TABIQUE %	TABLARO CA YESO %	MADERA %	CERAMICA %	PLASTICO %	PIEDRA %	PAPEL %	VARILLA %	ASFALTO %	LAMINA %	TOTAL %
VIAS TERRESTRES	64.12	2.94	23.53	2.00	3.53		3.88						100
OBRAS HIDRAULICAS	52.41	37.93	9.66										100
URBANIZACION	42.75	29.77	14.09	6.12	0.81	1.60	1.10	1.91	0.30	0.02	1.53		100
INSTALACIONES	28.57	40.82	30.61										100
EDIFICACION NO RESIDENCIAL		1.79	70.46	24.30	0.77		1.02		1.02	0.64			100
VIVIENDA	85.94	3.52	2.64		4.22	0.88			1.22	0.36	0.53	0.69	100
ESCOMBRO EN VIA PUBLICA	45.23	39.64	7.38		1.53	2.09	0.14	3.02	0.97				100
OTROS	26.28	38.62	28.24		1.33	2.24	0.07		0.42	2.80			100
TOTAL	345.30	195.03	186.61	32.42	12.19	6.81	6.21	4.93	3.93	3.82	2.06	0.69	800
PORCENTAJE PROMEDIO	43.16	24.38	23.33	4.05	1.52	0.85	0.78	0.62	0.49	0.48	0.25	0.09	100

La amplia gama de valores de densidad que presentan los residuos de la construcción indican la variación de la composición de éstos. Estos residuos, por un lado, son difíciles de manipular y relativamente costosos de transportar, pero por otro lado, son potencialmente ricos en materiales que tienen alto valor comercial, dicho valor es proporcional al de los materiales vírgenes. Por lo tanto, los residuos de la construcción son los primeros que se pueden identificar para procesar y reciclar. En la tabla 3 se presenta la densidad de los materiales más comunes en la industria de la construcción.

Tabla 3. Densidades de los Residuos de Construcción

Material	Densidad (kg/m³)
Ladrillos (enteros)	715 - 1795
Concreto	705 - 1100
Metales No Ferrosos	535
Metales (Acero)	650
Madera	235

2.2. FLUJO DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS DE LA CONSTRUCCIÓN

El flujo de los residuos de la construcción se origina en las fuentes de generación de la obra pública como de la privada, las cuales se subclasifican en cinco tipos: urbanización, construcción industrial, edificios no residenciales, vivienda y otras construcciones, según la Cámara Nacional de la Industria de la Construcción.

En las mismas obras se efectúa una primera selección la cual corre a cargo de las empresas constructoras y los empleados, quienes reutilizan los materiales recuperados en sus propias obras o los comercializan.

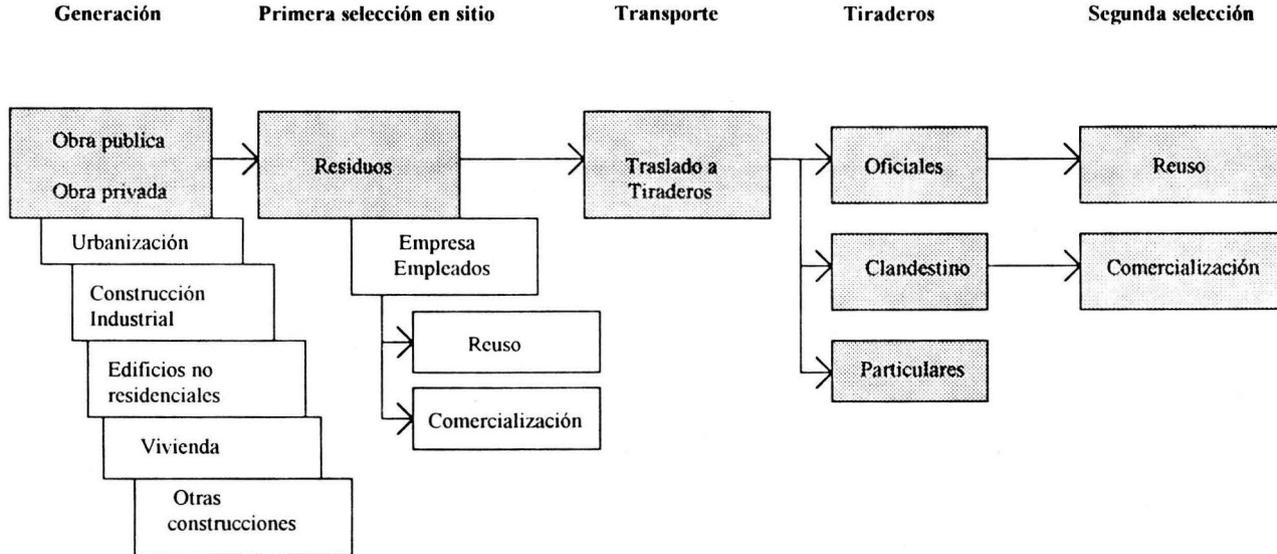
Una vez realizada la primera selección el remanente de los residuos es transportado a los tiraderos, los cuales pueden ser oficiales, clandestinos y particulares.

Generalmente en los tiraderos oficiales se efectúa una pepena controlada y en los tiraderos clandestinos se efectúa una pepena libre. En ambos casos el material recuperado se comercializa o se reutiliza directamente por los pepenadores.

En algunos casos se realiza una segunda selección; dejando al material apto para ser utilizado para conformación de caminos. En otros casos sólo es utilizado para rellenar oquedades o barrancas, sin ningún control técnico.

En la figura 2 se muestra el flujo de los residuos de la construcción.

Figura 2. Flujo de los residuos de la construcción



2.3. GENERACION DE RESIDUOS SÓLIDOS DE LA CONSTRUCCIÓN

Dado que no existe un organismo que estime la generación de residuos, algunas dependencias del gobierno se han dado a la tarea de recabar información respecto a esto, para ello han recurrido a varios factores como son: la superficie construida, volumen de obra, entre otros, para obtener una aproximación de los residuos generados en una área y periodo determinado. Para lograr esto se contabiliza el volumen de escombros que llega a los diferentes tiraderos.

En función de lo anterior se obtuvo la tabla 4 que señala la generación de los residuos hasta 1995.

Tabla 4. Generación de Residuos Sólidos de la Construcción en el D.F.

Concepto	1990	1991	1992	1993	1994	1995	
Superficie Construida m ²	15,213,700.9	14,096,623.2	15,733,504.2	23,283,658.0	38,525,457.0	22,159,394.0	
Volumen Estimado m ³	12,931,645.7	11,982,129.7	13,373,478.5	19,791,109.0	32,746,638.0	18,835,485.0	
Generación de Residuos Estimada m ³	872,886.08	808,793.7	902,709.8	1,335,900.0	2,210,398.0	1,271,395.0	
Generación de residuos Estimada ton.	Año	1,309,329.0	1,213,191.0	1,354,065.0	2,003,350.0	3,315,597.0	1,907,092.0
	Día	3,587.0	3,324.0	3,710.0	5,490.0	9,084.0	5,225.0

En esta tabla se muestra que existe una relación proporcional entre el volumen total de construcción y la generación de residuos, es decir al existir un mayor volumen de construcción se genera un mayor volumen de residuos. Además se muestra que el volumen de construcción va en aumento a través de los años, esto se debe al incremento de la población que cada vez requiere más vivienda,

servicios, vías de comunicación, etc., por lo tanto también hay un aumento en la generación de estos residuos. También la economía del país ha sido un factor importante puesto que al existir una estable economía, la construcción y generación de residuos aumentan considerablemente, de lo contrario ambas son afectadas negativamente, lo cual se ve claramente en el año de 1995 donde la crisis económica del país frenó la industria de la construcción.

2.4. MANEJO DE RESIDUOS SÓLIDOS DE LA CONSTRUCCIÓN

El actual manejo de los residuos, particularmente en las obras urbanas, se reduce a la comercialización de algunos cuantos materiales; chatarra, desperdicios de estructuras metálicas y armado del acero de refuerzo, madera producto del desperdicio de obra falsa y cimbra. El resto de los residuos se retira de las obras sin ningún control respecto a su disposición final, ocupándose en el mejor de los casos, como relleno de sitios autorizados, el resto en tiraderos clandestino determinados al libre juicio de fleteros y una última parte en los tiraderos municipales.

Para un adecuado manejo de los residuos sólidos de la construcción se proponen las siguientes etapas:

- Disminución de residuos de la construcción
- Almacenamiento
- Transportación
- Reciclaje y Reuso
- Disposición Final

2.4.1. Disminución

La disminución de residuos de la construcción y demolición, en la fuente de producción, está íntimamente asociada al sistema y a los materiales de construcción; ambos pueden ser regulados por medio de normas que desarrollen nuevas especificaciones técnicas, que permitan el uso de materiales secundarios y elementos modulares en los que se puedan integrar tanto estructura, como acabados en instalaciones para un ahorro de desperdicio; siempre y cuando no se comprometa la seguridad ni la vida útil de la obra.

Uno de los factores más importantes que limitan el reuso o reciclaje de estos residuos es la desconfianza de que ciertos materiales no tengan un rendimiento predecible, por ejemplo, el concreto. Los ingenieros no pueden correr el riesgo de utilizar materiales de construcción que no se adecuan a las especificaciones mínimas requeridas para la seguridad de la obra.

Otra limitación importante es que los materiales no son uniformes. Esta situación es el resultado de que éstos proceden de una mezcla de residuos de diferentes fuentes, los cuales contienen diversos materiales en varias proporciones. La falta de confiabilidad del suministro contribuye también al menor uso de materiales reciclados y, por lo tanto, no contribuye a la reducción de la generación de residuos de la construcción.

2.4.2. Almacenamiento

En esta etapa se retienen los desechos sólidos de la construcción en un recipiente seguro y adecuado en espera de ser recolectados por el servicio de limpia, barrido, recolección y transporte. Dichos desechos son concentrados en vehículos destinados para tal propósito y transportados a estaciones de transferencia, plantas de tratamiento o sitios de disposición final.

2.4.3. Transportación

Esta etapa, tiene como propósito reducir los grandes recorridos de los vehículos recolectores y con ello los tiempos no productivos. De esta forma, los residuos son transferidos a vehículos de mayor capacidad, que los transporta a las plantas de tratamiento o sitios de disposición final.

2.4.4. Reciclaje y Reuso

El reciclaje es el tratamiento que reciben los residuos sólidos de la construcción para poder ser utilizados como agregados, pasando por varias etapas específicas por ejemplo: separación, trituración, cribado, entre otras; estas están basados en las características de los residuos que van a ser procesados. Debido a que varios sistemas utilizan equipos móviles, la selección inicial de los sistemas de alimentación, descarga y reciclaje puede ser modificada a medida que las características de los materiales a procesar cambien.

El reuso se limita a seleccionar el material para puede ser utilizado o comercializado para otros fines, algunos de estos materiales son los metales, madera, cartón, etc..

El reciclaje de los residuos sólidos es realizado con procesos muy costosos, por lo se ha originado que no sea tomado con la importancia que merece, haciendo que este proceso sólo sea exclusivo de países desarrollados. En el tabla 5 se muestra el reciclaje de los residuos sólidos a nivel mundial.

Tabla 5. Porcentaje de volúmenes de residuos reciclados

PAIS	% RECICLAJE
E.U	12
Japón	46
Alemania	15
Francia	<3
Suecia	<4

2.4.5. Disposición Final

Es la última etapa, en la que los residuos sólidos de la construcción son depositados en rellenos sanitarios ya que, debido a su composición, muchas veces son inadecuados para otras opciones de tratamiento, como el compostaje o la incineración.

Los residuos de la construcción son casi siempre pesados y voluminosos por lo que su transporte es costoso, consumen bastante combustible y, obviamente, genera emisiones que contaminan la atmósfera. Generalmente, los costos de manipulación, transporte y tratamiento o disposición final de los residuos durante un proyecto de construcción o de demolición, representan un monto bastante elevado en el presupuesto del proyecto y es muy posible que estos costos continúen incrementándose.

Además, el volumen disponible en los rellenos sanitarios es cada vez más escaso y más costoso. En ciertos casos, los rellenos tienen permiso para disponer residuos de la construcción y demolición debido a que estos materiales son inertes y hay bajo riesgo de contaminar las fuentes de agua subterránea. Esta actitud podría cambiar, debido a que los estudios realizados sobre la cantidad y la calidad de los lixiviados generados en los rellenos sanitarios que sólo aceptan

residuos de la construcción y demolición indican que los lixiviados podrían, potencialmente, contaminar los cuerpos de agua.

En la siguiente tabla se muestra la composición más común de los lixiviados de los rellenos sanitarios con residuos de la construcción

Tabla 6. Análisis del Lixiviado de los residuos de la construcción

Parámetro	Promedio (mg/l)	Rango mg/l
pH (unidades)	6.75	6.3 - 7.3
Alcalinidad	320	170 - 550
Cloruro	45	17 - 120
Cadmio	0.0064	0 - 0.02
Cromo	0.005	0 - 0.04
Cobre	0.08	0.02 - 0.62
Plomo	0.056	0.04 - 0.1
Arsénico	0.007	0 - 0.02
Mercurio	0.00	0.00
Hierro	26	3.6 - 88
Manganeso	3.4	2.2 - 6.3
Sulfatos Complejos	60	21 - 140

Por otro lado, un gran porcentaje de los operadores de rellenos sanitarios usan materiales inertes, como son los residuos de la construcción y demolición, para la construcción de caminos, la construcción de muros de contención de las celdas y para la cobertura final del relleno. En ciertos casos, las empresas que generan estos residuos se benefician por los acuerdos de vertido gratuito o de vertido a bajo costo, debido al valor que los residuos representan para el operador del relleno. Pero desgraciadamente, no todos los residuos de la construcción se usan de forma provechosa en la operación de los rellenos sanitarios.

Lo anterior implica que se requieren acciones inmediatas y otras de aplicación gradual. En esto intervienen diversas instancias que abarcan desde los aspectos jurídicos y políticos, hasta la formulación de los proyectos y la propia ejecución de las obras, las cuales permitirán conjuntar las acciones para reducir la generación de residuos, aprovechar los que sean susceptibles de ello y disponer de manera segura los restantes.

En cuanto al primer punto, se requiere, además de una adecuación al marco legal que de manera efectiva dé un cumplimiento a lo establecido por las leyes y reglamentos, en cuanto a la obligatoriedad por parte de constructores y dueños de las obras de recolectar y transportar sus residuos o, en su caso, cubrir el costo correspondiente, y en lo referente al propio reglamento de las construcciones, promover la instalación de dispositivos para almacenamiento provisional de residuos, así como otras acciones más concretas que eviten el desperdicio de material.

En todo sistema el manejo de residuos sólidos debe acompañarse de un programa de sensibilización y capacitación del personal que labore en las obras en construcción, dicho programa tendrá que considerar: el diseño de una estrategia de promoción y difusión entre el personal, y la capacitación a los diferentes niveles ocupacionales (Directivos, Medios y Operativos).

En general no se está en favor de la interferencia del gobierno, pero hay que reconocer que la regulación gubernamental de tiraderos para desechos de construcción y demolición es indispensable, ya que al regular los tiraderos las empresas se van a preocupar por reciclar sus residuos sólidos y de esta manera impulsar a las plantas recicladoras. También se recomienda promover con algunos requisitos los productos reciclados para que no sean superfluos y queden abandonados.

3. POSIBILIDAD TECNOLÓGICA DEL RECICLADO DE CONCRETO

Existe la posibilidad tecnológica de que los residuos sólidos de la construcción puedan ser procesados para ser utilizados como agregado; este agregado debe cumplir con determinadas especificaciones de calidad (dureza, absorción de agua, gradiente etc.), para ser utilizado como relleno, material de sub-base y base de carreteras o para concreto.

En este trabajo se enfocara al estudio del agregado reciclado para concreto, ya que es el que debe cumplir con las especificaciones de calidad mas estrictas y por lo tanto un agregado reciclado apto para concreto, lo sera también para las demás aplicaciones; además este es el uso que justifica económicamente el proceso de reciclado.

3.1. CALIDAD DEL AGREGADO RECICLADO

3.1.1. Gradiente del agregado reciclado

Se entiende por gradiente, la forma de la partícula y textura en la superficie de agregado reciclado.

Dado que el agregado reciclado fino consiste también de partículas angulares, no es sorprendente que el concreto hecho con agregado reciclado grueso y fino tienda a ser áspero y no muy trabajable. Con la adición de cierta cantidad de arena natural muy fina es posible tener un agregado fino reciclado aceptable. Al mismo tiempo, la trabajabilidad del concreto es altamente mejorada.

El agregado de concreto reciclado será adecuado para la producción de nuevo concreto, sólo si se elimina la porción de las partículas de tamaño menor de 2 mm.

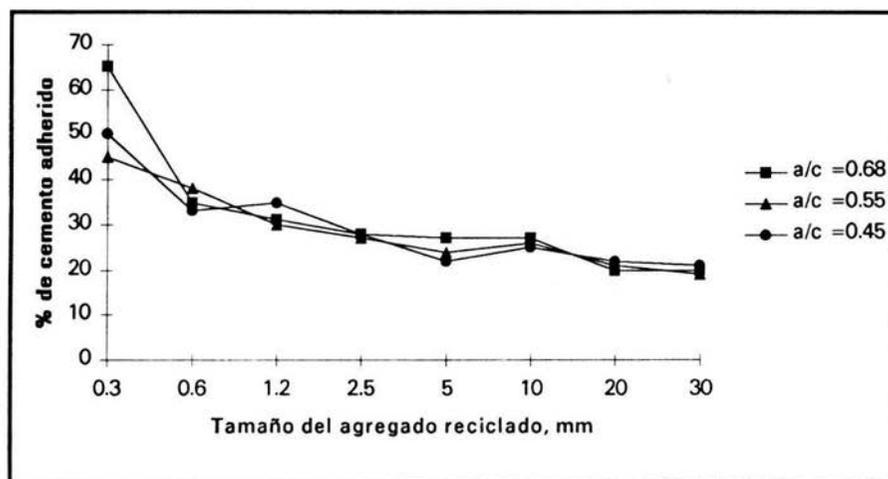
3.1.2. Adherencia al mortero

Cuando el concreto viejo es triturado, una cierta cantidad de mortero del concreto original queda adherido a algunas partículas de piedra en el agregado reciclado.

La pasta de cemento viejo y mortero afecta desfavorablemente la calidad de concreto reciclado, por lo que debe evitarse usar la fracción fina menor de 2 mm que es la fracción con mayor cantidad de mortero adherido, como se muestra en la gráfica 1.

En ocasiones la resistencia no se ve afectada utilizando agregado reciclado o agregado natural, siempre que la adherencia pasta-agregado continúe siendo el enlace más débil. Cuando el escombro reciclado es rico en mortero, constituye, el eslabón más débil del nuevo concreto y reduce su resistencia.

Gráfica 1. Porcentaje de la pasta cemento adherida a las partículas de agregado reciclado con diferentes relaciones a/c.



3.1.3. Densidad

La densidad del agregado reciclado es ligeramente más baja que la densidad del agregado convencional, esto se debe a la relativa baja densidad del mortero viejo el cual es adherido a las partículas del agregado original. La densidad de concreto convencional comparada con el concreto de agregado reciclado no varía significativamente, por la gran diferencia de la relación agua/cemento del concreto convencional. La densidad del agregado reciclado debe ser determinada en el laboratorio antes de que sea designada para una mezcla de agregado de concreto reciclado.

3.1.4. Absorción de agua

Algunos estudios han revelado que no debe usarse un agregado reciclado para la producción de concreto, cuando la absorción de agua es mayor de 7% para agregado grueso y más del 13% para agregado fino, ya que, al tener un valor de absorción de agua muy alto la relación agua/cemento aumenta lo que significa un requerimiento de cemento aumentando por tanto el costo del concreto de agregado reciclado.

La absorción de agua de agregado grueso y fino debe ser determinada en el laboratorio antes de hacer cualquier mezcla de concreto de agregado reciclado. Por experiencia se sabe que la absorción de agua es mayor para el agregado reciclado que para el agregado natural.

Es más difícil la determinación de la capacidad de absorción del agua y contenido de agua en el agregado fino reciclado que en el agregado reciclado grueso. Debido a la falta de métodos precisos, es complicado controlar la efectividad en la determinación de relación agua/cemento en el concreto hecho con agregado reciclado fino. Dado que el agregado reciclado fino incrementa la demanda de

agua del concreto fresco, existe una disminución de la resistencia y de la durabilidad del concreto endurecido. Es por esto que no es recomendable el uso de agregado reciclado fino para la producción de concreto. En la tabla 6 se muestran los valores que se han obtenido de las mas importantes propiedades del agregado natural y reciclado

Tabla 7. Propiedades del agregado natural y reciclado

Tipo de agregado	Densidad kg/m ³	Absorción de agua %	Perdida de la resistencia por sulfato de sodio %	Contenido de mortero viejo %
Agregado natural grueso Tamaño max 15 mm	2700	1.14		
Agregado reciclado Tamaño max 25 mm a/c=0.42	2430	6.76	23.9	38.4
Agregado reciclado Tamaño max 25 mm a/c=0.53	2430	6.93	23.1	36.7
Agregado reciclado Tamaño max 25 mm a/c=0.74	2430	7.02	28.6	35.5
Agregado reciclado Fino <5 mm	2310	10.9		

3.1.5. Contaminantes

Uno de lo problemas inherentes en el uso de agregado reciclado para la manufactura del nuevo concreto es la posibilidad de que existan contaminantes en los residuos sólidos de la construcción pasando estos al nuevo concreto. Los contaminantes pueden ser arcilla, yeso, ladrillo, cloruros, materiales orgánicos, mezclas químicas, acero y otros metales, vidrio, ladrillos, concreto ligero, residuos oxidados o dañados por el fuego, partículas susceptibles al congelamiento o a las

reacciones alcalinas, arena industrial química, sustancias reactivas y un alto contenido de aluminio en el concreto.

Deben establecerse estrictos límites en la cantidad total de impurezas en los agregados reciclados.

Yeso

La presencia de yeso (sulfato de calcio, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) en el escombros de edificios, está relacionado directamente con la cantidad de yeso presente e inversamente con el tamaño de las partículas de yeso, ya que éstas reaccionan con el aluminato tricálcico (C_3A), principalmente en la superficie del cemento y entre más finas son las partículas mayor es el área de superficie. Por lo que sólo se permite 5% de yeso en el agregado del concreto, ya que esta cantidad es suficiente para producir expansión interna nociva en un concreto con elevado contenido de C_3A . Además se ha observado que conforme el yeso substituye al agregado se presenta una declinación en la resistencia, por ejemplo, el concreto con 3% de yeso reduce la resistencia en un 15%, cuando el concreto es curado en seco y de aproximadamente 50% cuando es curado en húmedo. Esto se debe a que el yeso sufre una expansión y debilitamiento por la inmersión en agua.

Sustancias orgánicas

Muchas sustancias orgánicas como madera, textiles, papel y otros materiales polímeros son inconvenientes en el concreto cuando son sometidos al secado, mojado, congelamiento y descongelamiento. Otras sustancias orgánicas como pintura pueden introducirle considerables cantidades de aire al concreto.

Como una consecuencia, rigurosos límites en el contenido de contaminantes orgánicos deben de ser impuestos en las especificaciones para agregado reciclado y agregado de concreto reciclado; una norma señala como límite 2 kg/m³ (2 kg/m³ corresponden a aproximadamente 0.15% de sustancias orgánicas en peso del agregado) para sustancias ligeras de 1200 kg/m³ de densidad. En general las sustancias orgánicas reducen la resistencia del concreto.

Cloruros

Los cloruros en el concreto pueden provocar una severa corrosión de las varillas. El concreto convencional puede ser contaminado de varias maneras con cloruro ionico que puede penetrar desde afuera, como es el caso de las estructuras marinas, estructuras de puentes, estructuras de estacionamientos y pavimentos, los cuales han sido expuestos a sales. Los cloruros pueden estar presentes en el concreto fresco por el uso de mezclas o agregados de desechos marinos o arenas.

Es recomendado que existan límites estándares del contenido de cloruros para agregado reciclado y concreto de agregado reciclado para evitar cualquier falla en estos materiales. Los límites deben ser por abajo de las concentraciones que causan riesgo para la corrosión de varillas. Algunas sugerencias pueden ser las que se muestran en la tabla 8.

Tabla 8. Concentración Máxima de Cloruros

TIPO DE CONCRETO	CONCENTRACIÓN (MÁXIMA)
Concreto convencional	0.06%
Concreto convencional reforzado expuesto al medio ambiente húmedo para cloruros	0.10%
Concreto convencionalmente reforzado expuesto al ambiente húmedo pero no a los cloruros	0.15%
Construcciones donde el concreto estará seco	no hay limite

Mezcla química y mineral

La presencia de estas mezclas en el agregado reciclado no tiene un efecto significativo sobre la resistencia a la compresión del agregado del concreto reciclado endurecido. Aparentemente estas mezclas no deben ser consideradas como contaminantes dentro de las especificaciones del agregado reciclado.

Algunos estudios reportan que la presencia de mezclas minerales comunes como cal, ceniza de combustible o sílica condensada en concreto original no tiene ningún efecto deteriorante sobre el agregado reciclado

Arcilla

La arcilla es particularmente difícil de remover ya que se incorpora en el material, además contiene minerales que pueden ser deteriorantes. El agregado reciclado

y el agregado convencional generalmente están contaminados con arcilla por lo que se comportamiento es similar.

Metales

Pequeñas cantidades de varillas de acero, o pedazos de alambre en agregados reciclados pueden causar daños en la superficie oxidándola cuando se endurece el concreto del agregado reciclado particularmente si están presentes cloruros, zinc, aluminio, armazones y conductores que pueden causar problemas, liberando hidrógeno en el concreto fresco o provocar el agrietamiento por expansiones internas. Existe la probabilidad de que cantidades significativas de acero u otros metales puedan mejorar la resistencia del agregado reciclado. El acero puede ser removido por una separación magnética la que se hace generalmente para no dañar las trituradoras. Se recomienda remover los metales de lámparas, estructuras y conductos, antes de cualquier demolición .

Vidrio

Los desperdicios de vidrio son un problema por que causan una reacción alcalina con la pasta de cemento bajo condiciones húmedas, que puede llegar a deteriorar al concreto de agregado reciclado, por lo que es importante asegurarse que el vidrio no este presente en los desechos; recomendando que el vidrio de ventanas sea siempre removido de las construcciones antes de ser demolidas.

Fragmentos de ladrillo y concreto ligero

Cuando el concreto agregado reciclado es contaminado con menos del 5% de escombros de ladrillo fragmentado o concreto ligero, es probable que existan cambios significativos en las propiedades mecánicas del concreto de agregado reciclado.

Existe un serio problema con los ladrillo refractarios triturados, con un alto contenido de periclase. El problema se presenta cuando los fragmentos de ladrillo se expanden y las partículas de periclase se aflojan causando estallamiento en el concreto en un diámetro de 35 cm y 5 cm de profundidad.

La densidad del cemento mortero y del agregado reciclado, es menor de 2000 kg/m³, y la densidad del ladrillo común es por arriba de 1900 kg/m³. De este modo es posible separar mas escombros de ladrillo, concreto ligero y otras partículas potencialmente deteriorantes de los residuos sólidos de la construcción.

Se sugiere que las especificaciones del agregado reciclado deban incluir límites máximos de contenidos de escombros de ladrillo y concreto ligero fragmentado por abajo de 1950 kg/m³.

Partículas dañadas por el ambiente o el fuego

El agregado reciclado producido con concreto convencional, el cual ha sido severamente dañado por reacciones alcalinas o de sulfato, al congelamiento u otros agentes del ambiente, al fuego u otros agentes deteriorantes químicos o físicos, da como resultado agregados inconvenientes para la producción de concreto con agregado reciclado, desde el punto de vista de propiedades mecánicas.

La industria química y sustancias radioactivas

El concreto de agregado reciclado no debe contener sustancias tóxicas, radiactivas, sustancias químicas como aceite, ya que la resistencia del concreto con agregado reciclado es reducida o la durabilidad del concreto está en peligro.

Las especificaciones para concreto convencional, normalmente toman en cuenta pocos contaminantes, generalmente se han encontrado en el agregado natural, cloruros y sulfatos. De cualquier modo cuando se toma concreto demolido de plantas químicas u otras plantas industriales donde se han empleado sustancias químicas, los agregados reciclados pueden estar contaminados por una variedad de sustancias las cuales, si son solubles pueden afectar las propiedades del concreto de agregado reciclado, o causar riesgos para la salud. Las especificaciones podrían incluir límites máximos de contaminación de agregado reciclado, para una gran variedad sustancias químicas, las cuales son utilizadas en la industria como se muestran en la tabla 8. En la mayoría de los casos es probable encontrar que sólo la superficie de la capa del concreto viejo sea afectada, es por esto que los contaminantes potencialmente peligrosos puedan ser encontrados en el concreto de agregado reciclado. El concreto original de algunas plantas donde hay material químico radioactivo que vayan ha ser usado debe ser considerado como peligroso hasta no comprobar su inocuidad.

Tabla 9. Máxima cantidad de impurezas en el agregado reciclado

Tipo de agregado	Límites máxma	contaminantes
	Yeso arcilla y otras impurezas de densidad < 1950 kg/m ³	Asfalto, plástico, pintura, residuos textiles, papel, madera y materiales similares retenidos en la criba de 1.2 mm También otras impurezas de densidades menores de 1200 kg/m ³
Reciclado grueso	10 kg/m ³	2 kg/m ³
Reciclado fino	10 kg/m ³	2 kg/m ³

3.2. APLICACIÓN DEL AGREGADO RECICLADO GRUESO

Los residuos sólidos de la construcción que han sido triturados, cribados y descontaminados pueden tener diversas aplicaciones como:

- Relleno común
- Relleno de drenaje
- Material de base y sub-base en la construcción de carreteras
- Agregado para nuevo concreto

El material usado como relleno debe ser duro, granular y de partícula bastante larga que consolide fácilmente y libre de restos de sedimentos. Debe ser químicamente inerte y no debe cambiar significativamente en dimensión con cambios de contenido de humedad

La utilización de agregado reciclado en la construcción de la sub-base de carreteras parece ser muy aceptado, en la mayoría de las ciudades por que contiene un gradiente normal y los niveles de contaminación son aceptables.

El agregado reciclado aceptado para la producción de concreto nuevo, depende de que éste satisfaga ciertas especificaciones, esto puede variar de ciudad a ciudad pero es posible un número general de requerimientos. Primeramente, el agregado debe ser lo suficientemente resistente para el grado de concreto requerido y debe ser estable con los cambios de contenido de humedad. Segundo, el agregado no debe reaccionar con el cemento o acero reforzado, no contener impurezas reactivas. Finalmente, el agregado debe tener una forma y tamaño de partícula conveniente para producir una trabajabilidad aceptable del concreto en la mezcla.

El grado de limpieza del agregado reciclado determina su utilización; frecuentemente es usado en la construcción de cimientos para casas y otras construcciones ligeras. El concreto triturado con alto contenido de sulfato y residuos de madera deben ser evitados para aplicaciones críticas.

Para que el agregado reciclado sea comercializado los productos se han clasificado en cuatro categorías:

Escombros demolido triturado

Es agregado reciclado mezclado con ladrillo que ha sido cribado y limpiado manualmente para remover la contaminación excesiva, pero aún contiene una proporción de madera y otras impurezas.

Escombros limpio

Es el agregado reciclado con ladrillo clasificado, que contiene pequeñas cantidades de contaminantes.

Ladrillo limpio clasificado

Ladrillo limpio clasificado y triturado, es el que contiene menos del 5% de otros materiales rocosos y pequeñas cantidades de contaminantes. El material rocoso es usado como soporte de concreto, ladrillo, piedra natural y materiales cerámicos.

Agregado reciclado limpio clasificado

Es agregado reciclado limpio clasificado y triturado que contiene menos del 5% de ladrillo u otro material rocoso y pequeñas cantidades de contaminantes o sin contaminantes.

El agregado reciclado limpio clasificado cubre todos los requerimientos por lo que es altamente cotizado para relleno en drenaje, como sub-base y en la

construcción de carreteras. El ladrillo limpio clasificado es también muy conveniente como material de relleno tiene suficiente dureza y durabilidad. Los ladrillos con una significativa cantidad de yeso adherido o contenido de ácido soluble (sulfato) en exceso de 0.5% no debe ser usado. Los ladrillos refractarios no son recomendables por que el contenido de periclase puede causar una significativa expansión cuando se moja. El escombros clasificado limpio y triturado de escombros demolido es usualmente utilizado como relleno, pero en ocasiones contienen inaceptables niveles de contaminación.

3.3. CONCRETO DE AGREGADO RECICLADO

Una aplicación del agregado reciclado que cumple con las anteriores características de calidad, es la manufactura del concreto por lo que se analizaran sus propiedades.

3.3.1. Propiedades mecánicas

Antes de mencionar las propiedades mecánicas y de durabilidad del concreto agregado reciclado cabe mencionar que el agregado natural puede ser reemplazado en un 30% por agregado reciclado sin mostrar cambios significativos en las propiedades del nuevo concreto. Esta es la manera más sencilla y económica de obtener concreto reciclado de uso general.

Resistencia a la compresión

La resistencia a la compresión del producto reciclado está entre 64 y 100% de la del concreto de agregado natural. Sin embargo, la mezcla del producto reciclado puede alcanzar la resistencia total del concreto de agregado natural aumentando el contenido de cemento del primero.

Concreto de agregado reciclado hecho con agregado reciclado grueso y arena natural

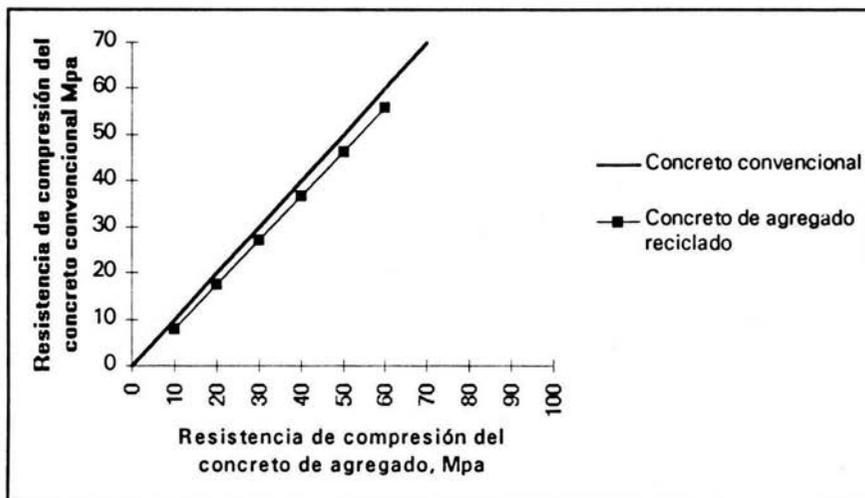
Aparentemente existe una relación entre la resistencia a la compresión del concreto agregado reciclado y el convencional. El concreto de agregado reciclado tiene aproximadamente el 10% menos resistencia que el concreto hecho con agregado convencional.

La resistencia a la compresión de concreto reciclado depende de la resistencia del concreto convencional y esto, a su vez está controlado por la relación agua/cemento del concreto convencional y la relación agua/cemento del concreto reciclado; en caso de que la relación agua/cemento del concreto convencional sea la misma o menor que la del concreto de agregado reciclado, la resistencia del concreto de agregado reciclado puede ser tan buena o mas alta que la resistencia del concreto convencional.

Respecto a esto se ha encontrado que es factible hacer un concreto de agregado reciclado con una relación agua/cemento de 0.40 dando al rededor de 34 Mpa ⁽³⁾ de resistencia a la compresión después de 14 días de curado. Esto confirma que es posible hacer un concreto de agregado reciclado tan resistente como el concreto original. En la gráfica 2 se muestra la diferencias de las resistencias del los dos concretos.

3. Mpa es equivalente a 981 Kg/cm²

Grafica 2. Resistencia a la compresión del concreto de agregado reciclado como una función de la resistencia del concreto convencional



Concreto agregado reciclado hecho con agregado reciclado fino y grueso

Generalmente en condiciones semejantes la relación agua/cemento del agregado reciclado fino y grueso reduce la resistencia a la compresión del concreto reciclado en aproximadamente 30%, comparado con el concreto hecho con grava y arena natural. De este modo el uso de agregado fino siempre ha tenido un efecto perjudicial sobre la resistencia a la compresión de concreto reciclado. Por lo que el efecto perjudicial del uso de agregado reciclado fino pueden ser evitado, reemplazandolo parcialmente con arena natural.

En general la resistencia a la compresión del concreto de agregado reciclado hecho con agregado reciclado grueso y una mezcla de agregado fino y arena natural, reduce la resistencia de concreto reciclado hecho con agregado reciclado grueso y arena natural, cuando el concreto de agregado reciclado es hecho con

agregado reciclado grueso y fino la resistencia a la compresión disminuye casi al doble que en el primer caso comparado con un concreto de agregado reciclado hecho con agregado reciclado grueso y arena natural.

Por esto se deduce que en la medida que se reemplaza agregado reciclado fino por arena natural, la resistencia a la compresión decrece. La pérdida de la resistencia es mucho más severa cuando la arena natural es reemplazada con agregado fino que cuando se reemplaza tomando lugar en la fracción gruesa. La fracción fina de 2 mm del agregado reciclado es la que genera reducciones más severas de resistencia del concreto agregado reciclado.

El agregado fino reciclado también tiene una tendencia a reducir la resistencia al congelamiento del concreto de agregado reciclado, por lo que es recomendable quitar el desperdicio menor de 2 mm del agregado reciclado para evitar el uso de agregado fino menor de 4 a 5 mm, como se ve en la tabla 10.

Tabla 10. Resistencia a la compresión del concreto convencional y concreto de agregado reciclado con diferentes proporciones.

Relación Agua/Cemento	Resistencia a la compresión del concreto (mpa)			
	Agregado natural fino y grueso	Agregado reciclado grueso y arena natural	Agregado reciclado grueso y fino con arena natural	Agregado reciclado grueso y fino
0.45	37.5	37.0	34.0	30.0
0.55	28.9	28.5	25.0	21.5
0.68	22.0	21.0	17.5	13.0

Coefficiente de variación de resistencia de compresión.

Cuando el concreto de agregado reciclado es hecho de concreto convencional de diferentes calidades, el coeficiente de variación de la resistencia de compresión es más alta que cuando el mismo agregado reciclado es hecho con concreto de un solo origen.

En las plantas recicladoras que utilizan una mezcla de escombros de las construcciones, pavimentos, carreteras etc., para producir concreto de agregado reciclado se presenta un coeficiente de variación alto. Consecuentemente una gran desviación de los estándares, ocasiona un aumento en el costo ya que se tiene que invertir tiempo y trabajo para conocer los requerimientos de cemento para las características de resistencia en las especificaciones de concreto

Módulos de elasticidad

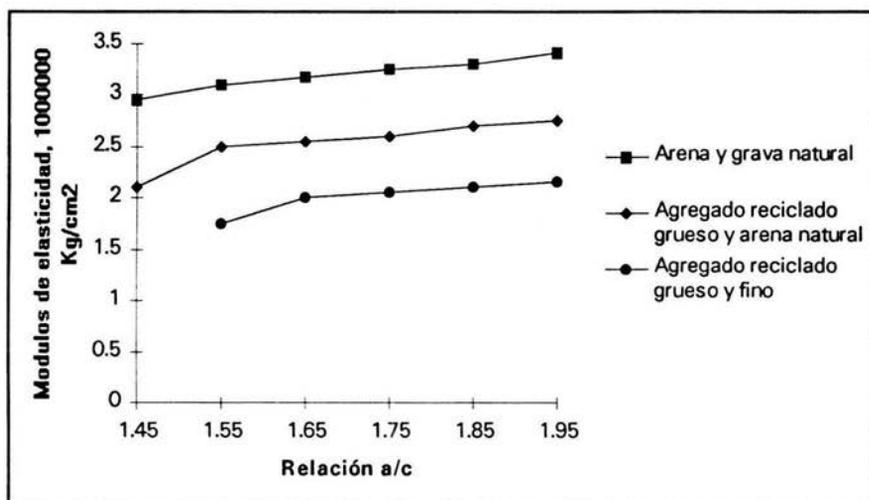
Los módulos de elasticidad del concreto de agregado reciclado, son siempre más bajos que el concreto convencional, debido a la gran cantidad de mortero viejo con bajos módulos de elasticidad, que está adherido a las partículas de agregado reciclado, como se puede apreciar en la gráfica 3.

Los módulos de elasticidad para concreto de agregado reciclado hecho con agregado reciclado grueso y arena natural son más bajo que los módulos de elasticidad del concreto convencional. Cabe mencionar que dependiendo de la calidad del concreto convencional será la variación de los módulos de elasticidad del concreto reciclado.

Por lo anterior se puede inferir que los módulos de elasticidad de concreto de agregado reciclado son menores a los módulos de elasticidad del concreto convencional.

La capacidad de humedecerse presenta un decremento logarítmico para el concreto de agregado reciclado que para concreto convencional. Se ha reportado que existe una relación casi lineal entre la resistencia a la compresión y los módulos de elasticidad del concreto de agregado reciclado.

Gráfica 3. Módulos de elasticidad como una función agua/cemento del concreto de agregado reciclado y convencional



Revenimiento

El revenimiento del concreto de agregado reciclado, hecho con agregado reciclado grueso y arena natural, es alrededor de 30% a 60% mayor que el revenimiento del concreto convencional. Esto es considerando el hecho de que el concreto de agregado reciclado contiene 50% más de mortero que las mezclas convencionales. El revenimiento del concreto es proporcional al contenido de cemento en la pasta del concreto.

El revenimiento del concreto reciclado podría ser mucho mayor, si el concreto fuera producido con agregado fino y agregado reciclado.

Encogimiento al secado

El encogimiento al secado del concreto de agregado reciclado hecho con agregado grueso reciclado y arena natural, es más alto que el encogimiento del concreto convencional. Cuando se utiliza agregado reciclado grueso y fino, el encogimiento al secado del concreto agregado reciclado es todavía mayor, que el encogimiento de concreto hecho con agregado convencional.

El agregado reciclado fino reduce los módulos de elasticidad e incrementa el encogimiento al secado.

Resistencia a la tensión, flexión y fatiga

Acerca de la resistencia a la flexión y tensión se han hecho varios experimentos en donde generalmente se llega a la conclusión de que existe una reducción de ambas, de aproximadamente el 10% o más en el concreto de agregado reciclado, que en el concreto con agregado natural.

La resistencia a la fatiga del concreto hecho con arena natural y agregado reciclado grueso es más alta que en el concreto de agregado natural, esto es debido a que existe una fuerza entre el mortero y las partículas de agregado reciclado. La fractura en la superficie es más propensa en el concreto de agregado natural, ocurriendo a lo largo de la interface entre el cemento de mortero y granos de agregado.

Generalmente, cuando un pavimento es sometido a un gran tráfico, gradualmente es reducida la resistencia debido a la fatiga por el tránsito pesado.

Concreto reforzado

La resistencia al enlace entre el acero y el concreto de agregado reciclado puede ser equivalente con la resistencia al enlace del concreto convencional.

El agregado reciclado grueso puede ser usado en el concreto reforzado sin muchos inconvenientes, siendo factible reemplazar hasta un 30% de agregado natural grueso por agregado reciclado grueso sin que se presente algún efecto negativo. El uso de agregado reciclado fino con agregado reciclado grueso incrementa el riesgo de corrosión en el acero del nuevo agregado de concreto reciclado por lo que se sugiere no utilizarlo.

3.3.2. Durabilidad

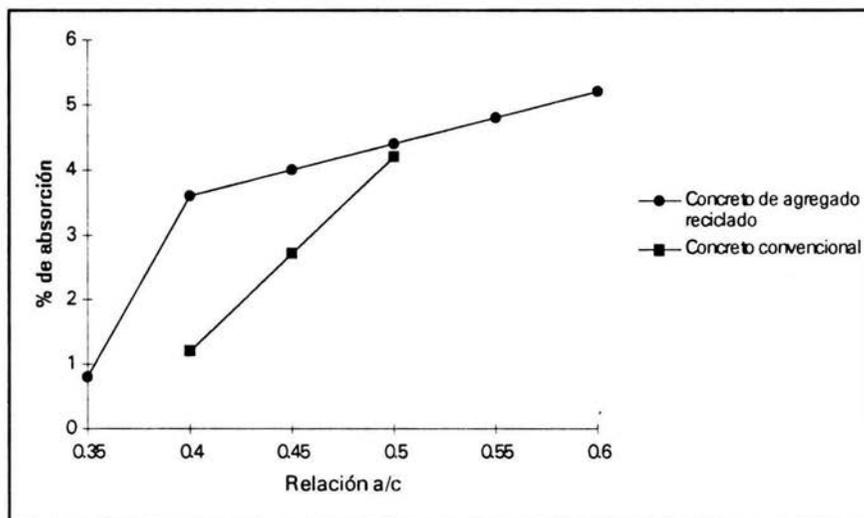
Permeabilidad y absorción de agua

El rango de deterioro de la mayoría de los tipos de concreto depende de la permeabilidad. Esto se debe a que la absorción de agua está directamente relacionada con la permeabilidad del concreto endurecido, que permite la penetración del agua que se requiere para los mecanismo de deterioro del concreto.

La permeabilidad de agua en el concreto de agregado reciclado es de 2 a 5 veces más que en el concreto convencional ya que la absorción de agua es mas grande como se muestra en la gráfica 4.

En general una baja resistencia, una correspondiente alta absorción de agua y presumiblemente una alta permeabilidad del agregado reciclado grueso puede ser compensado, produciendo concreto de agregado reciclado con una relación agua/cemento de 0.05 a 0.10 menor que la relación agua/cemento del concreto convencional.

Gráfica 4. Absorción de agua del concreto de reciclado reciclado y convencional



Resistencia al congelamiento

La resistencia al congelamiento y al descongelamiento del concreto de agregado reciclado es significativamente más baja que en el concreto convencional, pero en algunos casos ésta puede ser mayor. La resistencia al congelamiento del concreto reciclado aumenta con el decremento de tamaño de agregado grueso.

Es necesario mencionar que en algunos casos las mezclas del agregado reciclado, tienen una mejor durabilidad que en el concreto hecho con material virgen.

Cuando es usado agregado reciclado fino y grueso la resistencia al congelamiento y al descongelamiento del concreto agregado reciclado decrece significativamente.

El concreto de agregado reciclado comparado con el concreto hecho con arena natural y agregado reciclado grueso, empieza a deteriorarse después de pocos ciclos de congelamiento y descongelamiento, llegando a fallar completamente. Generalmente se presenta una fractura en la superficie del concreto de agregado reciclado que toma lugar a lo largo de la interfase entre cemento de mortero y las partículas de agregado original o cemento mortero sobre los granos de agregado original.

Debido a que existe una gran contradicción, en los resultados de varios estudios sobre este tema, es recomendable que se realicen más experimentos para obtener una conclusión general.

Corrosión del reforzamiento

El concreto de agregado reciclado reforzado puede corroerse más rápido que el concreto convencional reforzado. De cualquier modo, el riesgo de corrosión se incrementa en el concreto de agregado reciclado y puede reducirse con una baja relación de agua/cemento.

Reacciones alcalinas del agregado

Tres factores son necesarios para causar reacciones alcalinas en el agregado del concreto.

1. Un agregado con suficiente cantidad de elementos reactivos que sean altamente solubles en soluciones alcalinas.
2. Suficiente agua alcalina soluble, procedente de alguna fuente (usualmente el cemento) para mantener el valor de pH en el líquido del concreto, por arriba de 14 a 15 para permitir la expansión del gel alcali-silica que es producido.

3. Suficiente agua para mantener la solución y proveer de humedad para la expansión del gel.

Aunque no existen indicios exactos del efecto que puedan causar estas reacciones es recomendable evitar este tipo de material.

En caso de que la petrográfica u otros exámenes indiquen la presencia de componentes reactivos que no hayan sido utilizados (que estén presentes), es recomendable no utilizarlos, por que aún una baja cantidad de álcali en el nuevo concreto podrá provocar futuras reacciones álcali-agregado en el material reciclado, ya que la reacción puede continuar con el material reciclado entre el mortero y el agregado.

La manera de estar seguro es separar materiales con problemas particulares y hacer pruebas para determinar el nivel de álcali que es aceptable. Pero aún existen limitantes, ya que en la actualidad no sea ha reconocido un método para determinar la reactividad álcali del concreto de agregado reciclado.

3.3.3. PROPIEDADES Y DISEÑO DE MEZCLAS DE CONCRETO DE AGREGADO RECICLADO FRESCO

Requerimientos de agua y trabajabilidad

La producción de concreto reciclado utilizando agregado reciclado grueso y arena natural requiere aproximadamente 10 litros o más del 5% de agua libre por metro cúbico que el concreto producido con agregado natural. En caso de utilizar agregado reciclado grueso y fino se requiere aproximadamente 25 litros o más del 15% de agua libre por metro cúbico de concreto.

La trabajabilidad del concreto de agregado reciclado hecho con agregado reciclado grueso y arena fina es sensiblemente mejor que la trabajabilidad del concreto convencional, pero la sustitución de agregado grueso por agregado reciclado fino reduce la trabajabilidad.

El concreto producido con agregado de concreto reciclado seco pierde trabajabilidad en comparación con el agregado de concreto reciclado mojado.

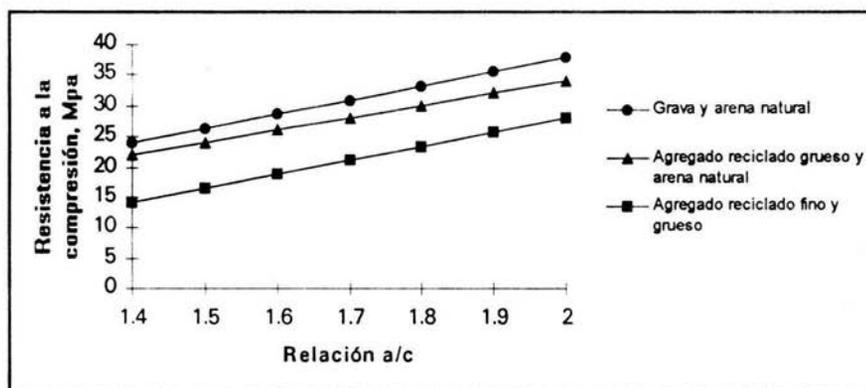
Por lo anterior en la producción de concreto es necesario premojar los agregados de concreto reciclado, por lo que es conveniente hacer una inmersión del agregado en agua por una hora, para que la resistencia a la compresión de concreto de agregado reciclado duro no tenga significativas diferencias con el concreto convencional.

Relación agua-cemento

Existe una relación lineal entre la relación agua/cemento y la resistencia a la compresión y tensión de concreto de agregado reciclado grueso-arena natural, y con agregado reciclado grueso-fino, como se aprecia en la gráfica 5.

La relación básica agua-cemento, la cual es fundamental para todas las mezclas de concreto, es aplicable sin modificación para todos los tipos de concreto reciclado.

Grafica 5. Relación agua/cemento y resistencia a la compresión de concreto hecho con agregado reciclado y natural



Contenido de cemento

La resistencia a la compresión del concreto de agregado reciclado hecho con agregado reciclado grueso y arena natural es similar a la resistencia de un concreto convencional con la misma relación agua/cemento. El concreto de agregado reciclado requiere aproximadamente 5% de cemento extra y posiblemente más cuando se utiliza agregado reciclado grueso y arena natural, para obtener la misma resistencia que el concreto convencional. Y se requiere más del 15% extra de cemento para mantener la misma resistencia a la compresión que el concreto convencional, cuando agregado reciclado fino y grueso son usados. Esto se debe a que el agregado reciclado fino baja la resistencia del concreto en un 10% en el mejor de los casos y hasta el 50% en el peor de los casos.

El concreto de agregado reciclado fino, siempre requiere mas cemento que el concreto convencional para una resistencia equivalente. Esto puede llegar a ser perjudicial en el aspecto económico, por requerir excesivas cantidades de cemento

Densidad y contenido de aire

El contenido de aire en el concreto de agregado reciclado fresco es muy alto y variable en comparación con el contenido de aire en mezclas frescas hechas con agregado convencional. La densidad de concreto agregado reciclado grueso varía de 2020 a 2210 kg/m³.

El contenido de aire del concreto de agregado reciclado es un poco mayor que el del concreto convencional. La densidad del concreto de agregado reciclado es menor que el concreto convencional. El decremento en la densidad puede variar de 5% hasta más del 15%.

Diseño de mezclas para concreto de agregado reciclado

Las mezclas diseñadas de concreto de agregado reciclado no difieren de las mezclas diseñadas para concreto convencional, y puede ser usado el mismo método de mezcla. En la práctica, son requeridas pequeñas modificaciones, como por ejemplo:

1. Para determinar el rango de la resistencia en base a sus características, un alto estándar de desviación debe ser empleado, cuando se designa a un concreto de agregado reciclado, hecho con agregado reciclado de calidad variable, que cuando el agregado reciclado de uniforme calidad o de agregado convencional es usado.
2. El diseño de la relación agua/cemento que se requiere para una determinada resistencia a la compresión, será aproximadamente la misma para concreto de agregado reciclado como para concreto convencional, siempre y cuando se utilice agregado reciclado grueso y arena natural. En caso de que la

mezcla muestre que la resistencia a la compresión es más baja que la especificada, debe hacerse un ajuste de la relación agua/cemento.

3. El agua libre requerida para el concreto de agregado reciclado es aproximadamente 10 L/m^3 o mas alta, que el concreto convencional.
4. Por razones de durabilidad el máximo tamaño del agregado reciclado debe ser de 16-20 mm.
5. El contenido de cemento calculado será mayor para concreto de agregado reciclado que el contenido de cemento para concreto convencional.
6. La mezcla diseñada debe ser basada sobre la densidad del agregado reciclado.
7. Cuando se estime la relación de agregado fino y grueso, debe ser asumido que el óptimo gradiente de agregado reciclado es el mismo que para el agregado convencional.
8. Deben hacerse tres mezclas: una de ellas para ajustar el contenido de agua libre y para obtener el requerimiento de revenimiento; la otra para determinar la relación agua/cemento ya que es necesaria para obtener la resistencia requerida, y la última para determinar la relación entre agregado fino y grueso y obtener la mejor economía y cohesión de la mezcla fresca.

Producción de concreto de agregado reciclado

La experiencia práctica ha mostrado que el concreto de agregado reciclado es fácil para mezclar, transportar, compactar y utilizarlo como concreto convencional. Pero a causa de la relativa alta absorción de agua del agregado reciclado,

algunas veces se recomienda utilizar el agregado reciclado premojado, para saturar en la medida que sea posible la superficie seca. Esto se logra con la inmersión del agregado en agua por una hora antes de la mezcla. Más de 24 horas del inmersión en agua son necesarias para completar la saturación de agregado.

No existe diferencia alguna entre la resistencia a la compresión o módulos de elasticidad del concreto hecho con agregado reciclado seco o saturado mientras sea manufacturado con la misma relación agua/cemento.

En Alemania se permite 20% de agregado reciclado en el nuevo concreto para darle consistencia al concreto de agregado reciclado. En general se sugiere un 30% de agregado en mezclas de concreto sin que exista algún efecto negativo.

Por razones económicas y técnicas es recomendado producir concreto de agregado reciclado con agregado reciclado grueso mayor de 2 mm y arena natural fina. Usando concreto triturado fino menor de 2 mm se tiene un efecto perjudicial sobre el aspecto económico, así como también sobre muchas propiedades de técnicas del concreto. Se ha reportado que cuando se sustituye el 30% del agregado grueso con agregado reciclado, la permeabilidad, la resistencia a la compresión, el módulo de elasticidad y la resistencia al congelamiento y desgaste, cambian significativamente en comparación con el concreto convencional.

Cuando se mezcla agregado reciclado grueso con arena natural, existe una diferencia pequeña entre la resistencia a la compresión del concreto convencional. Cuando el agregado reciclado fino y grueso son usados, la resistencia a la compresión del concreto generalmente se reduce aún mas.

Diversas pruebas concluyen que:

- La mezcla con concreto agregado reciclado puede ser manejada de la misma manera que el concreto convencional.
- El concreto de agregado reciclado puede ser comercializado como una mezcla lista, de la misma manera que se maneja el concreto convencional.
- La compactación del concreto de agregado reciclado designado como bueno no tiene ninguna diferencia de compactación con el concreto convencional.
- Las características de resistencia de concreto de agregado reciclado son reportadas sin cambios en las estructuras que llegan a formar.

El concreto de agregado reciclado no da problemas en lo que se refiere a la trabajabilidad y resistencia cuando este es hecho y utilizado por métodos similares como en el concreto convencional.

3.4. APLICACIÓN DEL AGREGADO RECICLADO FINO

El uso de agregado reciclado fino menor de 2 mm tiene un efecto negativo sobre las propiedades económicas, así como también, sobre las características técnicas de concreto de agregado reciclado. Desde el punto de vista de producción del concreto de agregado reciclado, el agregado reciclado fino menor de 2 mm debe de ser desechado. Por tal razón se ha estudiado el agregado triturado fino para que sea usado para otros propósitos diferentes a la producción de nuevo concreto.

Endurecimiento del agregado reciclado fino

El agregado reciclado fino no tiene propiedades hidráulicas debido a los posibles remanentes de cemento portland deshidratado, el cual causa una deficiente compactación de las masas granulares.

El agregado reciclado fino contiene de 2% a 4% de hidróxido de calcio dependiendo del contenido de cemento del concreto convencional. Por lo que al mezclarse con agua, puede endurecerse de la misma manera que un mortero de cal débil, por lo que, el proceso de endurecimiento del concreto de agregado reciclado podría aumentar por la adición de cal.

Considerando que el agregado reciclado fino contiene cierta cantidad de hidróxido de calcio, puede esperarse que el material sin la adición de cal obtenga propiedades hidráulicas a temperatura ambiente cuando es mezclado con agua y materiales puzolánicos como cenizas volátiles y sílica.

Agregado reciclado fino usado para propósitos especiales

El agregado reciclado fino hace un excelente mezcla la cual es libre de olor, probablemente debido a la presencia de cantidades pequeñas de cal (hidróxido de calcio) en las finas partículas.

El concreto triturado fino puede ser usado para la neutralización de tierra ácida o desperdicios de agua. En Australia se usó en 1983 cuando, se cubrió la superficie de un bosque con arena en polvo de aproximadamente 2 mm de tamaño. Después de un tiempo esta área se convirtió en una área reforestada, es decir este agregado triturado fino funcionó como un fertilizante para la tierra que neutralizó el ácido de la lluvia, por lo que al fin de este proceso se concluyó que:

1. Este material que no es producto de combustible fósil
2. El proceso de reforestación se extiende a lo largo de un período mayor a un año sin afectar el sistema de alimento de los arboles. Posiblemente conociendo mejor estos beneficios podría ser de interés comercial en la industria y en el cultivo para reducir costos y mejorar la producción, aplicando grava fina.

Otra posibilidad de uso del agregado reciclado fino incluye filtros para tratar el agua residual .



BIBLIOTECA
INSTITUTO DE ECOLOGIA
UNAM

4. TECNOLOGÍA DEL RECICLAJE

Para producir agregado reciclado que pueda ser utilizado como relleno, material de sub-base y base de carreteras y concreto, se requiere de una tecnología de reciclaje. En esta parte se mencionara el proceso y equipo mas común que existe en la actualidad.

Cabe mencionar que la calidad del agregado reciclado esta en función del proceso al que se someten los residuos sólidos de la construcción, es por esto, que el proceso debe de ser adecuado para cada tipo de residuo siendo mas estricto cuando estos estén contaminados.

El método básico de reciclado es utilizando una trituradora, la cual produce un producto granular de tamaño de partícula establecido.

El grado de procesamiento será determinado por el nivel de contaminación de los residuos sólidos en la construcción y la aplicación final del material reciclado.

Las operaciones se realizan mediante plantas portátiles ó estacionarias alimentadas por un cargador frontal que comprende un triturador de quijada, algunas veces un triturador secundario de cono, un tamiz vibrador y una banda transportadora.

El proceso de recuperación tiene que ser bien planificado, para que la remoción de los materiales se lleve a cabo de una manera segura y sin que afecte el proceso de demolición. Los materiales como puertas, ventanas y vigas pueden ser retirados antes del proceso de demolición. Otros materiales de alto valor, como son las tuberías de cobre, pueden ser recuperados después que se ha realizado un cierto grado de demolición. Al final del proceso, los ladrillos y otros materiales similares pueden ser recuperados para su reuso.

Dependiendo del sitio donde se lleve a cabo el reciclado, se clasifica en procesamiento en sitio o fuera del sitio. Y se clasifica en manual y mecánica, desde el punto de vista de maquinaria; y como escombro limpio y contaminado dependiendo de su composición.

4.1. PROCESAMIENTO EN EL SITIO

El procesamiento en el sitio ofrece varias ventajas que contribuyen al incremento del reciclaje de materiales procedentes de proyectos de construcción y demolición. En estos casos, y dependiendo del tipo de proyecto, se puede exigir que la mayor parte de los residuos sean reusados o reciclados en la nueva obra. Para ello, es necesario realizar una buena evaluación de la calidad y de la cantidad de materiales disponibles. En base a ese análisis, es posible determinar cómo se pueden utilizar los materiales y cuáles serían los procesos necesarios para obtenerlos. Es necesario asignar suficiente espacio para los equipos y para el almacenamiento de los materiales procesados. Además, el diseño de estas plantas debe considerar la generación de ruido y polvo.

Existen varios tipos de equipos móviles para procesar los residuos de la construcción. Algunas de las ventajas que se derivan de los procesos en el sitio incluyen:

- Se evita el transporte de materiales
- Se evita la doble manipulación (menos costos, menos contaminación atmosférica).
- Se cuenta con más flexibilidad en el uso del equipo.

4.2. PROCESAMIENTO CENTRALIZADO

En ciertos casos, el procesamiento y la recuperación de los residuos procedentes de construcciones y demoliciones debe realizarse en plantas centralizadas. En general, los materiales se pueden transportar desde obras situadas dentro de un radio de 50 km a partir del sitio donde se ubica la planta.

Algunas de las ventajas del uso de los procesos centralizados incluyen:

- Ahorro en el transporte de equipo pesado.
- Permite un constante mantenimiento de los equipos, lo cual resulta en mayor disponibilidad y confiabilidad del agregado reciclado.
- Mejor control de los impactos ambientales.

4.3. PROCESOS MECÁNICOS Y MANUALES

Los procesos mecánicos implican procesos en los cuales los operadores usan maquinarias para efectuar la separación. La diferencia entre los procesos mecanizados y los procesos manuales se centra fundamentalmente en la automatización de los primeros.

Algunas ventajas de los procesos manuales incluyen:

- Los trabajadores pueden seleccionar materiales que son difíciles de separar por medios mecánicos;
- Disposición de fuerza laboral para otras tareas.
- Relativamente baja inversión de capital para el proceso.

Las ventajas de los procesos mecánicos incluyen:

- Las tasas de producción elevadas.

- Mayor seguridad laboral.
- Menor mano de obra que en los procesos de separación manual.

4.4.PROCESAMIENTO DE ESCOMBRO LIMPIO Y CONTAMINADO

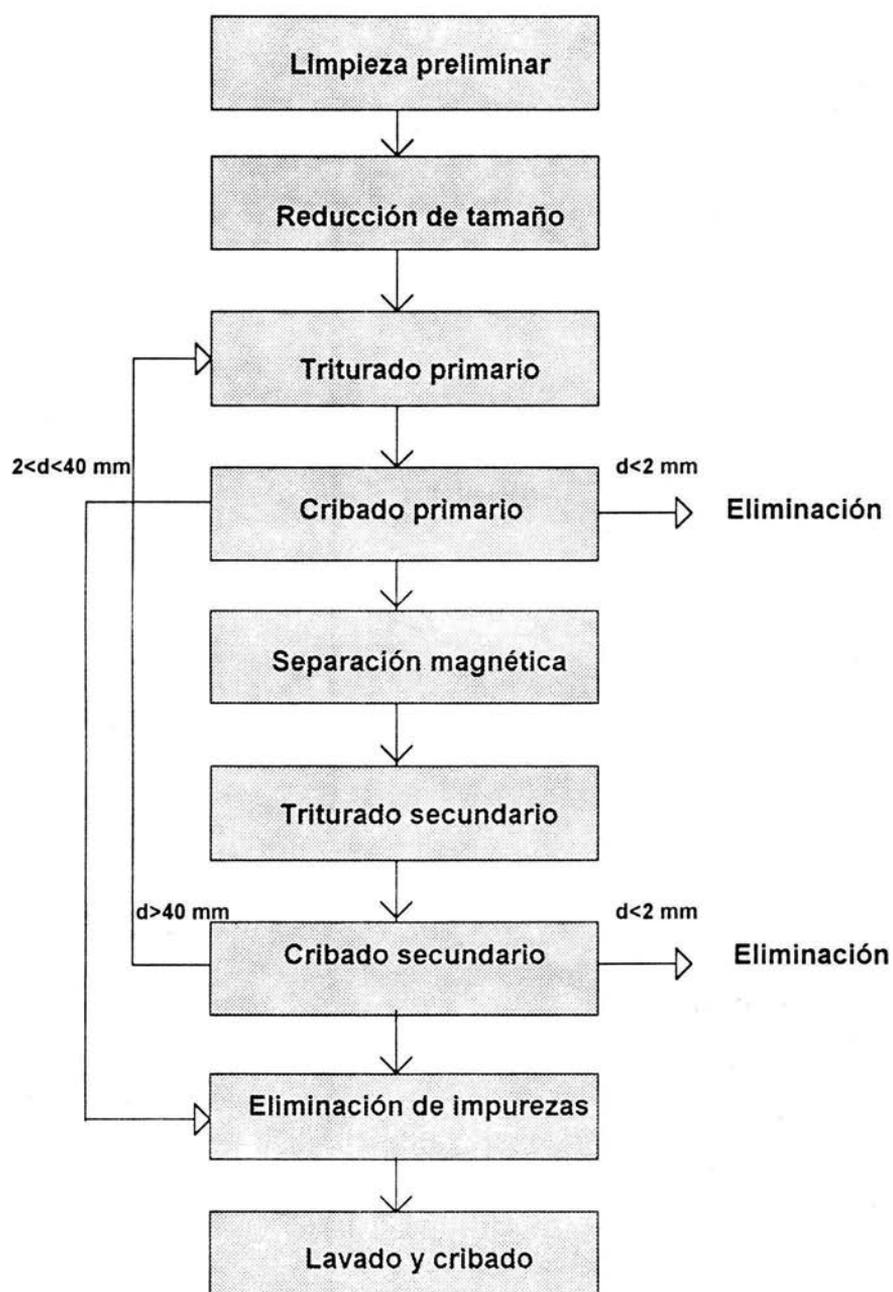
Los sistemas para procesar residuos limpios pueden ser relativamente simples y con una elevada capacidad de producción. Estos son procesados para la recuperación de productos finos y gruesos, utilizando principalmente operaciones basadas en la trituración y el cribado. Los productos del proceso pueden ser utilizados en la construcción de caminos, material de relleno y para la producción de concreto.

En cambio los residuos sólidos de la construcción contaminados basa la separación de los contaminantes por la diferencia de la densidad, de modo que este método permite incrementar el rendimiento y la calidad del producto final, ya que la planta recibe generalmente residuos sólidos de la construcción que tiene una gran cantidad de contaminantes. Las siguientes etapas están diseñadas para recuperar varias clases de materiales incluyendo tierra, combustible sólido y compost. Por ejemplo son la trituración, el cribado y la separación por flotación. La flotación se usa para concentrar la madera para su posterior uso como combustible o en cultivos .

4.5. ETAPAS DEL PROCESO DE RECICLADO

En una planta de reciclado la secuencia del proceso comprende una limpieza preliminar, reducción de tamaño, trituración primaria, cribado primario, separación magnética y manual de elementos ferrosos, trituración secundaria, cribado secundario, selección de impurezas ligeras y por último un lavado y cribado. En la figura 3 se muestran las etapas del proceso del reciclado de residuos sólidos de la construcción.

Figura 3. Esquema del proceso de reciclaje de residuos de la construcción



Limpieza preliminar

La primera operación del proceso en una planta de reciclado, es remover cantidades pequeñas de contaminantes y piezas grandes de material extraño, ya que los residuos sólidos de la construcción que se llevan al sistema de reciclado, están compuestos en su mayor parte por trozos de concreto con incrustaciones de varillas de refuerzo o de mallas de alambre, conteniendo cantidades considerables de madera, asfalto, vigas, residuos textiles, láminas y tabiques, así como pequeñas cantidades de yeso, plástico y vidrio.

La eliminación de estos contaminantes puede hacerse mecánica o manualmente, antes de que el material sea triturado.

Es conveniente en este momento hacer una separación selectiva, que es la simple eliminación de materiales inconvenientes, separándolos en pilas de acuerdo a su tipo y grado de contaminación. Esto le da al operador de la planta la oportunidad de distribuir el material y separarlo de acuerdo a su tamaño. Se recomienda separarlo en pilas de material limpio, para optimizar la planta trituradora, ésto solo es práctico en lugares con suficiente espacio.

Reducción de Tamaño

La segunda operación de una planta es cortar las piezas largas de los residuos sólidos de la construcción, para que puedan ser reducidas a un tamaño máximo de 0.4 - 0.7 m para plantas móviles y de 1.2 m como máximo para plantas estacionarias, y así puedan ser introducidos en el sistema de reciclado.; esto se logra por medio de uno o más martillos hidráulicos. La mayoría de los sistemas existentes no aceptan varillas de refuerzo de más de 60 cm de longitud; las que son más largas deben cortarse mediante cortadoras de varillas.

Triturado Primario

El material que ha pasado por las dos etapas anteriores, se suministra a una trituradora primaria la cual es generalmente de quijada o de impacto.

Generalmente los residuos sólidos de la construcción que entran al triturador de quijadas llevan trozos de varillas; por lo que en estos casos se seleccionan trituradoras especiales para trabajo pesado, los que también cuentan con un dispositivo que libera la pedacería de fierro.

Para realizar este trabajo se cuenta con diferentes trituradoras como son las de quijada, impacto, martillo y de cono.

Las trituradoras de quijadas proporcionan la mejor distribución del tamaño de partícula del agregado reciclado para la producción de concreto. La trituradora de cono es propia para el triturado secundario acepta como tamaño máximo 200 mm como alimentación. Las trituradoras de impacto proporcionan la mejor distribución de tamaño de partícula del agregado, para la construcción de carreteras éstas son menos sensibles para el material que no ha sido triturado, como la varilla. El principal uso del material proveniente de las trituradoras de impacto es para la rehabilitación de pavimento. Las trituradoras de martillo son las menos usadas.

Las trituradoras de quijada son las mas recomendable para obtener una buena distribución del tamaño de la partícula triturada, ya que estas reducen de 1.2 a 1.5 veces el tamaño máximo del agregado original y son optimas para procesar concreto reforzado.

Las trituradoras de impacto son las mejores para procesar concreto simple, pero tiene dos desventajas la primera es que trituran el mortero viejo y partículas de

agregado original a partículas similares y de este modo producen un agregado grueso de baja calidad y otra es una alto deterioro y desgaste, lo que ocasiona un alto costo de mantenimiento.

Todas las trituradoras producen aproximadamente el mismo porcentaje de partículas cúbicas en los agregados reciclados y parece que las propiedades del agregado reciclado siempre son proporcionadas por una trituradora secundaria.

Una gran proporción de productos finales menores de 40 mm vienen directamente de la trituradora primaria. Pueden existir problemas, si la trituradora primaria proporciona un producto que no satisfaga los requerimientos para el consumidor, por lo que debe ser posible ajustar la trituradora primaria, ya que la relación entre grueso y fino de los productos puede ser reducida en el producto final. Esto impide que la trituradora secundaria deba tener una gran capacidad.

Económicamente la producción de agregado grueso puede ser maximizado por balanceo de las trituradoras. Las primarias deben ser puestas para reducir el material de gran tamaño que entrara a la trituradora secundaria.

Cribado Primario

Después de las operaciones de limpieza preliminar, de reducción de tamaño y triturado primario se deposita el escombros dentro de una tolva, de la cual pasa a un tamiz que lo separa en dos categorías: escombros mayores que 40 mm y que necesitan triturado secundario y escombros menores de 2 mm, que son eliminados ya que es la fracción que contiene una mayor cantidad de contaminantes como polvo y yeso, perjudiciales para el agregado reciclado.

El equipo de alimentación comprende cargadores frontales, además incluye grúas de arrastre con cucharones, que llevan el material hacia la tolva que vibran y regulan así el flujo de los residuos de la construcción hacia el tamiz, éste puede ser una placa perforada para seleccionar las varillas de acero que no están fijas en el material, antes de que este sea alimentado al triturador secundario.

El cribado simple sólo separa los residuos de acuerdo a su tamaño y forma, y funciona exitosamente separando el material triturado con trituradora de quijada, ya que una trituradora de impacto tritura de una manera no selectiva

Para una separación efectiva, el material grueso es separado por una malla inclinada vibratoria de bajas frecuencias y largas amplitudes; y para material fino es necesario una mallas vibratorias horizontales en altas frecuencias y pequeñas amplitudes. Para la separación de material ligero, las mallas planas son las mejores, dando pequeñas pérdidas del material y removiendo aproximadamente 80% de éste.

Separación Magnética

Después de separar las varillas de acero de los trozos de concreto mediante el triturador de quijadas, se seleccionan manualmente aquellos restos que son lo suficientemente largos, o bien, son separadas mediante una banda y polea magnética instalados al final de una larga y ancha banda transportadora que sirve como "mesa de selección".

Triturado Secundario

El material mayor de 40 mm es pasado a través de un trituradora secundaria ya sea de quijada, cono, martillo o impacto, para reducir todo el material a 40 mm como tamaño máximo.

Cribado Secundario

Después del triturado secundario, el material es pasado a un cribado secundario, el cual es más estricto que el primario, ya que no permite el paso de material mayor de 40 mm; la fracción mayor que este valor, es transportado por bandas hacia el triturado primario para que pase de nuevo por el ciclo.

Eliminación de impurezas

Esta etapa es determinante para la calidad del agregado reciclado, puesto que una alta concentración de contaminantes repercuten en sus propiedades, por esta razón es necesario eliminar la mayor cantidad de impurezas.

Las impurezas más comunes son: yeso, residuos de acero, metales, metales no ferrosos, vidrio, residuos de madera, y de éstas el yeso es la impureza mas difícil de eliminar en el proceso preliminar.

Existen dos procesos principales para remover impurezas, que generalmente se usan en combinación.

- **Proceso Seco**

Las partículas finas y contaminantes ligeros pueden ser removidos de los residuos por procesos de clasificación de aire. La técnica más frecuentemente usada es la llamada secado-separado, es un proceso por medio de aire a presión que jala el material en sentido vertical y horizontal, separando el material de acuerdo al peso del mismo. Una importante condición para obtener un suficiente grado de separación es que el producto triturado debe ser dividido en fracciones.

Una desventaja del método es la gran cantidad de polvo que se suelta, por lo tanto se requiere un sistema especial de protección.

- **Proceso Mojado**

En el proceso húmedo, el material es preparado para ser lavado, éste elimina impurezas de la superficie tales como arcilla y otros materiales solubles en agua. Por este método se recupera 80 al 90% más material que en el proceso seco.

Este método generalmente se utiliza en la actualidad, con un equipo llamado "aquamotor", el cual separa los contaminantes ligeros como residuos de madera, papel, plástico y concreto. Aplicando la técnica de flotación-débil; agregando directamente agua para separar los contaminantes ligeros por diferencia de densidad y jalándolos hacia una malla que los retiene y elimina.

Este equipo requiere aproximadamente 160 m³ de agua por tonelada de residuos sólidos de la construcción; desde que el agua es vaciada, muchos materiales flotan en un ciclón clasificador de recirculación para ser separados. Para un óptimo funcionamiento se requieren 2 m³/h.

El proceso en húmedo da buenos resultados para partículas de tamaño 10-40 mm, especialmente cuando contienen grandes cantidades de constituyentes ligeros. Las partículas finas de menos de 8 mm cuando son atrapadas, producen grandes cantidades de sedimentos, éste es inconveniente para la separación de fracciones.

Una de las más importantes ventajas de este proceso húmedo es que no suelta polvo con impurezas suspendidas. La desventaja es un consumo excesivo de agua y un alto costo, sin perder de vista que los sedimentos también deben ser tomados en cuenta en los costos.

Lavado y cribado

La última etapa incluye dos operaciones a la vez, pero ésta va estar condicionada por la anterior, ya que en caso de haber utilizado el proceso húmedo el lavado ya se realizó y sólo se cribará el material para clasificarlo en función de su tamaño y posteriormente comercializarlo.

En caso de que el material no haya pasado por algún método húmedo, es necesario lavar éste para eliminar las contaminantes que se encuentran en la superficie. Posteriormente el material limpio es cribado en varias fracciones de tamaño para su venta.

El producto final reciclado, debe cumplir con ciertas especificaciones para su comercialización, debe de estar libre de basura, arcilla, yeso, asfalto, madera, papel, pintura, textiles, concreto ligero y otras impurezas; como máximo se permiten el 1% de impurezas para considerarse suficientemente bueno para la construcción de carreteras, pero no necesariamente aceptable para agregado de concreto. Sin embargo cuando el agregado reciclado es hecho de materiales con más del 95% de concreto viejo, el producto final generalmente será adecuado para cubrir la especificaciones del agregado de concreto.

Con el fin de cumplir cada vez más con las especificaciones de impurezas, se ha recurrido a aplicar métodos específicos para evitar una excesiva contaminación, como es la demolición selectiva que permite recobrar la mayor cantidad de material relativamente limpio y descontaminado. Pero sólo es posible donde las condiciones de tiempo y financiamiento lo permitan. Es importante que las personas involucradas en la construcción y demolición tomen en cuenta el desmantelamiento de estructuras de un solo tipo de material, ya que éste permite un excelente limpiado de los residuos de la construcción y de esta manera se requiere una mínima cantidad de procesamiento.

4.6. ASPECTOS ECONÓMICOS DEL PROCESO DEL RECICLAJE

El procesamiento de reciclaje de los residuos sólidos de la construcción como cualquier otro proceso requiere ser rentable por lo que deben existir condiciones que lo impulsen. Por ejemplo algunas de estas son :

- Un costo elevado en la disposición final de los residuos sólidos de la construcción y demolición.
- Terreno disponible, preferiblemente cerca a un relleno sanitario.
- Carencia y alto costo de la arena natural, grava o piedra triturada de buena calidad.
- Mercado para los productos reciclados.
- Constante y abundante suministro de residuos sólidos de la construcción y demolición.

Considerando estos factores, no es sorprendente que grandes plantas de reciclado en el mundo estén localizadas en Berlín, Estados Unidos, Holanda, Bélgica, Alemania, y Japón, que han sido los primeros en considerar en gran escala el reciclado de los residuos de la construcción y demolición.

Las carreteras presentan casos favorables para reciclar significativas cantidades de residuos, ya que éstos generan grandes volúmenes en períodos cortos. Los residuos puede ser procesado en simples plantas que no cuenten con lavado y clasificador. En los casos prácticos donde el pavimento de concreto o carreteras han sido triturados, reciclados y transformados en un nuevo material que pueda ser utilizado como base o sub-base, o produciendo un nuevo concreto, se han obtenidos considerables ahorros comparados con el costo que causaría la disposición final del concreto viejo. Obviamente el gran ahorro se logra porque el agregado convencional es insuficiente en la localidad.

Para que las plantas de reciclado operen a su mayor capacidad, se requiere hacer un análisis de la economía de escala, ya que requieren grandes cantidades de escombros de concreto generado en la demolición y construcción de pavimentos, carreteras y construcciones viejas, etc., esto debe de ser procesado como agregado para la producción de nuevo concreto, el cual puede ser aceptado por la industria de la construcción como una alternativa.

La economía a gran escala del reciclado de residuos de la construcción en áreas metropolitanas, es muy diferente de la economía del reciclado de pavimentos en carreteras. Una de las razones que contribuye al problema de la contaminación en la demolición de escombros, es la mezcla con diversos materiales como: yeso, madera, plástico y acero, los cuales deben de ser removidos antes de que el material reciclado pueda ser usado para la producción de nuevo concreto.

Parte de la justificación económica del reciclado de residuos de la construcción, es la producción de grandes cantidades de éste en la zona, para que la planta recicladora opere a su mayor capacidad. Algunas investigaciones han reportado que las cantidades de escombros de concreto producido localmente en los Estados Unidos es en promedio de 0.27 ton de concreto de escombros per capital/año. En el Distrito Federal se estima una generación por año de 2 millones de toneladas, por lo que es factible que en México se considere la operación de plantas de reciclaje.

Para realizar una escala económica, se requiere hacer un análisis económico, para lo cual una planta debe procesar por lo menos de 110 a 275 ton de residuos de la construcción por hora y para recuperar razonablemente la inversión, la planta debe procesar y vender no menos de 200,000 ton de agregado reciclado por año.

Por lo que se ha sugerido que por razones económicas, la locación más favorable de una planta recicladora podría ser en una área cercana a una gran ciudad, preferiblemente en un tiradero sanitario municipal para que los camiones que transporten los desperdicios en su camino de regreso puedan acarrear el agregado. Así como también, es importante contar con un relleno sanitario contiguo, ya que éste reduce los costos de transportación del material contaminado.

Las máquinas portátiles de reciclaje de escombros tienen la ventaja de ser relocalizadas en diferentes sitios, cerca de un nuevo relleno sanitario donde sea necesario reciclar el escombros. El agregado de concreto reciclado puede ser vendido sólo si éste tiene las mismas características del agregado natural.

Los principales factores que intervienen en el costo del agregado reciclado son:

1. El trabajo extra en la demolición, que se requiere para preparar el escombros de demolición para reciclar, es equivalente al 25% del costo de la demolición.
2. El escombros disponible, depende de las circunstancias locales.
3. Costos extras para preparación, procesamiento, inspección, almacenaje y venta de agregado reciclado.
4. Costo de depreciación del equipo, amortización de costos de instalación, mantenimiento y reparaciones, combustible y lubricantes, gastos generales e intereses y seguros.

Los costos de producción para los materiales típicamente procesados varió entre 3.5 y 4.5 Dólares por tonelada en 1990. Para desperdicio demolido, limpiado y procesado, producido con una alta calidad en las plantas estacionarias, el costo

podría ser de 6.5 a 7.5 Dólares por tonelada y podría llegar a más de 10 Dólares por tonelada si la planta trabaja a una capacidad más baja que la óptima.

Dado que los gastos para captar los residuos sólidos de la construcción y el precio de ventas del producto final depende de las condiciones locales; si existe una gran distancia a un tiradero el costo por tonelada será mayor. Bajo condiciones de sitios favorables para recibir los residuos sólidos de la construcción el costo será menos que el anterior y el precio de venta para material procesado será más accesible.

En Europa el mercado de 1985 para agregado reciclado, aplica únicamente para agregado el que se usa como material de base de carreteras. Para este propósito el agregado de escombros es competitivo por que la roca natural triturada requerida para la construcción de carreteras es más cara. En 1985 aproximadamente 2 millones de toneladas de escombros de demolición fueron procesadas como agregado reciclado y usadas para la estabilización de base de carreteras en Alemania.

En 1982 el agregado de concreto reciclado producido, por la única planta en Francia, se vendió al doble del costo del material natural. En cambio en Estados Unidos el agregado reciclado se vende por abajo del 50% menos que el agregado natural con iguales características.

Sin embargo, aunque el costo pueda ser menor existen razones por las que una persona podría tener prejuicios contra el agregado reciclado. Primero, por que las experiencias son limitadas y es dudoso lo referente a la elaboración del concreto de agregado reciclado. Segundo, el costo extra por el uso de agregado reciclado para la producción de concreto como por ejemplo costos de premojado, inspección extra y costo de compensación por una baja resistencia, alto desgastamiento y una deformación elástica del concreto agregado reciclado.

Algunos de estos costos pueden ser compensados por una baja densidad o una mejor resistencia térmica de concreto de agregado reciclado. El precio de agregado reciclado tendría que ser revisado al día para que el material pueda ser competitivo con el agregado convencional.

Existen razones para impulsar el reciclaje como son:

1. El precio del agregado convencional continuará elevándose ya que los agregados naturales cada día son más escasos, además que los costos de transportación cada día son mas elevados. Las áreas de tiradero de escombros serán insuficientes, por que se espera que el volumen de residuos se incremente en las próximas décadas.
2. Los residuos sólidos de la construcción sin ningún tratamiento serán depositados en áreas que no serán convenientes para la construcción.

El costo de operación de las instalaciones para el procesamiento de residuos de la construcción y demolición está ligado a la factibilidad del proceso de reciclaje. Generalmente, sólo los procesos que son competitivos en términos de inversión de capital y costo de operación y mantenimiento son implementados. Los costos de capital para varios tipos y tamaños de instalaciones para el procesamiento de residuos se presentan en la Tabla 7. Los costos en la tabla son estimaciones basadas en diseños adecuados a las condiciones de los Estados Unidos de América. Las estimaciones utilizan costos de mano de obra y de equipos específicos para los Estados Unidos de América y no son representativos de las condiciones en países en vías de desarrollo.

Tabla 10. Costos de Capital Estimados para Diferentes Tipos de Instalaciones para el Reciclaje de Residuos de Construcción

Tipo de Instalación	Descripción	Capacidad (ton/día)	Costo (US\$)
Tecnología Simple	Separa y recupera sólo residuos de Construcción. No hay procesamiento in situ. Altamente manual.	50 a 500	500.000 a 1 millón
Tecnología Media	Acepta sólo dos tipos de residuos de Construcción. Incluye algún proceso mecánico	100 a 500	1 a 3 millones
Tecnología Elevada	Acepta todos los tipos residuos de Construcción. Altamente mecanizado.	500 a 1000	3 a 5 millones
Sistema Integrado	Acepta todos los tipos de residuos sólidos municipales, incluyendo los RSC. Incluye reciclaje, recuperación de materiales, relleno sanitario.	1000 a 2500	5 a 10 millones

4.7. EQUIPO

En el mercado existen una gran variedad de plantas para producir agregado reciclado, tanto móviles como estacionarias, las que cuentan con mayor adelanto tecnológico y que prometen más éxito, son la plantas móviles por su versatilidad. Esta plantas tienen relativamente poco tiempo en el mercado, pero su popularidad va en aumento ya que se ha despertado la inquietud y necesidad de dar veraces soluciones al problema de los residuos sólidos de la construcción.

A continuación se presentan algunos tipos de plantas portátiles que se están comercializando en el mundo.

Planta Jumbo 1400 High-Volumen

Este equipo se utiliza para trabajo pesado y difícil de reciclar, incluyendo concreto armado con acero, piedra, arena, grava, asfalto, escombros y mezclas de desechos sólidos municipales para producir una gran variedad de productos útiles.

Tiene una altura de 3.8 m, permitiendo la fácil transportación a cualquier lado, está equipada con inyección hidráulica, mecanismo de elevación que con grúas permite mover materiales. También cuenta con un soporte de estructura de acero para uso duradero, funcionan con diesel ó electricidad, su capacidad es de más de 600 TPH dependiendo de las condiciones y especificaciones del productor final.

Planta Jumbo 1200-25 Ultramax

Es una trituradora con circuito cerrado y cuenta con una planta cribadora que selecciona el material de acuerdo a su tamaño, combina las operaciones de tratamiento primario y secundario con trituradoras de impacto. Produce 4 diferentes productos al mismo tiempo .

Esta planta es ideal para operaciones triturado prolongado que proporciona un alto volumen, múltiple producción de producto, y habilidad para cambiar las especificaciones del producto rápidamente.

Sus dimensiones son de 6 m x 2.7 m, con un eficiente sistema de alimentación vibratorio. Es requerido una gran potencia para soportar 17 ton., tiene un alimentador de 1.2 m que se abre totalmente durante la máxima producción, además cuenta con un triturador primario, secundario y un sistema de cribado.

El Jumbo 1200-25 puede usarse en una gran variedad de procesamiento y operaciones de reciclado, maneja fácilmente grandes trozos de concreto reforzado, ladrillo, block, asfalto, escombros, arena, grava, madera y varillas, tiene una capacidad de 150 a 300 TPH dependiendo de las condiciones y especificaciones hechas para el producto.

Jumbo portátil 1000-15

Se compone de una trituradora y una cribadora para que el proceso sea "todo en uno", hace tres diferentes productos simultáneamente en un circuito cerrado y un cuarto producto en un circuito abierto, tritura asfalto, concreto escombros, grava y rocas.

Sus dimensiones son de 5.1 m x 2.2 m x 1.2 m. Esta planta puede ser convertida rápidamente a una trituradora secundaria con doble cribado, simplemente removiendo el sistema de alimentación y reemplazándolo con un sistema de cribado de doble placa. Es posible utilizarlo con energía eléctrica o con diesel ambos casos dan una capacidad de 100 a 200 TPH dependiendo de las condiciones y especificaciones que se le han hecho al producto.

También existen en el mercado una gran variedad de equipos para instalar una planta estacionaria, las cuales varían de acuerdo a su capacidad y características que se requieran y el costo está en función de esto.

A continuación se presenta una lista del equipo más común para la instalación de una planta de procesamiento de residuos de la construcción y demolición.

Equipo para Reducción de Tamaño

Molino a martillo

Triturador hidráulico o neumático montado en pluma articulada

Impactadora

Triturador de cuchillas rotativas

Trituradores a rosca

Molino de ramas

Molino Tubular

Equipo para Cribado

Criba a disco

Cernidora de barras

Trómel (criba giratoria)

Criba vibratoria

Barra oscilante

Otros Equipos

Clasificador de aire

Tanque flotador

Separador magnético

Transportadora a cinta o banda

Transportadora en bandejas de acero

5. VENTAJAS DEL RECICLADO DE CONCRETO

Una de las ventajas del agregado reciclado sobre el agregado natural es que al promover el uso del primero se aprovechan al máximo los residuos que se consideran inservibles, y con esto se controla la explotación de los recursos naturales, además se promueve la conciencia al no desperdicio. Pero no solamente se protege al ambiente, sino que también a los recursos energéticos y económicos; estos siempre y cuando se tenga un adecuado proceso y manejo.

5.1. Económicas

Aparentemente no existe un ahorro económico entre el agregado reciclado y el agregado natural, ya que su precio en el mercado es similar, por lo que es necesario optimizar las técnicas del reciclado para que llegue a ser una alternativa viable.

Realmente la competencia económica entre ambos agregado se basara en la disponibilidad de los residuos de la construcción, la escasez del agregado virgen y de la demanda de estos en la región, pudiendo alcanzar en algunos casos un ahorro de hasta el 50% por tonelada en el caso del agregado reciclado.

5.2. Energéticas

En promedio la energía que se requiere para obtener agregado natural es la misma que se necesita para reciclar residuos sólidos de la construcción y obtener un agregado reciclado. Sin embargo, significativos ahorros se obtienen cuando los residuos sólidos de la construcción son procesados en el sitio de la obra, ya que no existen gastos extras de energía por la transportación de los residuos a lugares distantes donde se encuentra la planta recicladora o bien a los tiraderos donde son depositados. Además la planta recicladora debe trabajar a su máxima

capacidad para contribuir al ahorro de energía, por lo que se debe tener datos aproximados de la cantidad de los residuos de la construcción que se genera en la región, para que de este modo se seleccione y diseñe la planta y se aproveche su máxima capacidad.

5.3. Ambientales

El reciclaje de los residuos sólidos de la construcción protege en gran medida al ambiente, ya que evita el aumento de áreas de tiraderos las cuales no pueden ser utilizadas para otros fines; contribuye a mantener el equilibrio ecológico reduciendo la inmoderada explotación de los recursos naturales como son los bancos de agregados, además evita la exposición de los residuos, que dan mal aspecto y que pueden ser perjudiciales para la población.

5.4. Otras

Otra de las ventajas, es que esta alternativa no es solamente experimental, en algunos países esta técnica, ya ha tenido una aceptación y aplicación mas concreta, que empezó después de la segunda guerra mundial y que ha tenido grandes avances hasta la fecha; desgraciadamente en nuestro país no se ha promovido este desarrollo, ya que por un lado no se cuenta con recursos económicos y por otro no se le ha dado la suficiente importancia a este problema, en el marco jurídico y ambiental. A continuación se mencionaran algunos casos donde el agregado reciclado ha sido utilizado con resultados exitosos.

En Europa por las grandes cantidades de residuos de la construcción y de demolición se ha recurrido al sistema de reciclado. Se ha estimado que aproximadamente 0.43 ton de escombros son generados per capita/año y existen mas de 60 plantas estacionarias y móviles recicladoras en éste continente. Estas plantas eliminan la madera del escombros, el cual es triturado, lavado, cribado y

por último es vendido para la construcción de carreteras; la madera es procesada en una planta de pirólisis que genera carbón de madera, alquitrán y humo de madera.

En Holanda a partir de enero de 1985, se permitió el uso de agregado reciclado para la producción de concreto, para la construcción en general. La primera vez que se utilizó concreto de agregado reciclado en esta región, fue usado para la construcción de muros de departamentos. El concreto de agregado reciclado fue producido con el mismo contenido de cemento del concreto convencional.

En Alemania existen 60 plantas recicladoras con una capacidad total de 10 millones de ton/año, pero solamente 2.7 millones de ton./año de agregado reciclado son utilizadas. El material reciclado es usado principalmente como sub-base. En este país todavía no está permitido usar concreto de agregado reciclado para la producción de concreto nuevo.

En Japón el agregado reciclado es utilizado para la construcción de carreteras. En este país no se produce de agregado reciclado para la manufactura de concreto, por que las autoridades no han aprobado los estándares. Pero se han realizado pruebas piloto en la construcción de casas pequeñas, reutilizando los residuos de la construcción.

En la Ex-U.R.R.S. las plantas de reciclado tienen una capacidad de 720 000 m³. Estas están localizadas en 18 diferentes fábricas de concreto precolado en varias partes de la país, incluyendo 4 en Moscú. En esta región el concreto de agregado reciclado grueso es usado para la producción de concreto estructural nuevo, el concreto de agregado reciclado fino es usado como relleno.

En México el reciclado de residuos sólidos de la construcción no ha tenido suficiente promoción para su desarrollo ya que no existe tecnología, economía y confianza para invertir en este sistema. En nuestro país se debe empezar emitiendo una clara legislación que controle el manejo de los residuos y constatar su cumplimiento. Es importante que el gobierno no quede al margen de esta alternativa en aspecto legal y económico.

Conclusiones

En México el reciclaje de residuos sólidos de la construcción debe ser una respuesta contundente, puesto que es uno de los países que genera grandes volúmenes y desgraciadamente no tiene un control sobre ellos, por falta de tecnología, de solvencia financiera y de responsabilidad de los generadores. Esto permitirá solucionar problemas como el aumento desconsiderado de áreas de tiraderos, explotación inmoderada de los recursos naturales y el mal manejo de los residuos.

Los residuos sólidos de la construcción están contaminados con yeso, acero, tierra, madera, plástico, vidrio, etc. éstos, deben ser removidos, especialmente el primero de ellos, para no afectar sus propiedades mecánicas; afortunadamente la tecnología actual, elimina considerablemente la mayor parte de los contaminantes

Los residuos sólidos reciclados pueden ser utilizados como relleno común, relleno de drenaje, material de base o sub-base en la construcción de carreteras y concreto; pero en todos los casos se deben cumplir con especificaciones bien definidas de sus propiedades mecánicas para no poner en riesgo las construcciones.

Desde el punto de vista técnico el agregado reciclado libre de contaminantes, es un agregado satisfactorio para la producción de concreto nuevo, éste tiene una resistencia relativamente menor que la del concreto de agregado natural de composición similar, afortunadamente se puede corregir esta propiedad manipulando el diseño de la mezcla, en cuanto a sus propiedades de durabilidad, trabajabilidad, son aceptables.

El uso de concreto de agregado reciclado para la construcción, en general todavía es muy costoso en ciudades donde todavía existen suficientes bancos de agregado natural, como es el caso de México. En la mayoría de las ciudades está situación esta gradualmente cambiando en favor del agregado reciclado. Los factores que están promoviendo éste cambio, es la reducción del costo del agregado reciclado, el aumento de precio del agregado convencional, la escasez de materiales vírgenes y el costo de transportación.

Las plantas que procesan los residuos de la construcción para que estos puedan ser utilizados como agregado, pueden estar compuestas en su totalidad, por equipo estándar de uso general (trituradoras, cribadoras, bandas transportadoras, etc.); de igual manera existen plantas portátiles que se montan rápidamente junto al sitio de acumulación de escombros; estas plantas pueden tener una capacidad pequeña, mediana y de gran capacidad; se encuentra en el mercado una gran variedad de equipo para satisfacer las necesidades que se requieran, cabe mencionar que el costo varía de acuerdo a su complejidad.

El agregado reciclado se ha utilizado en varios países con un gran éxito pero aun hay mucho por investigar en lo que respecta a sus propiedades, principalmente para establecer criterios universales de calidad que involucre los límites de sus propiedades mecánicas, como resistencia, contenido de contaminantes, durabilidad, absorción de agua, entre otros.

La reglamentación y normas vigentes para el manejo y reciclaje de los residuos sólidos de la construcción requieren de una adecuación, que de manera efectiva obligue a los constructores y dueños de las obras a cumplir lo establecido por éstas.

Es necesaria la promoción del agregado reciclado por medio de **información** masiva que llegue a la gente que está en la construcción, donde **se muestre de** una manera clara y objetiva las ventajas que el reciclaje ofrece, **para asegurar el** desarrollo y crecimiento de la industria del reciclaje de residuos sólidos; **además** se requiere del apoyo gubernamental para iniciar y crear **ayudas de diseño** referidas a esta industria.

BIBLIOGRAFÍA

Chávez, V. A., 1996. La Construcción y el Manejo de Residuos. Ingeniería Civil. 325, 23-30.

Cortés, C. R., Dominguez, B. M., 1996. Manejo y Tratamiento de los Residuos de la Construcción. Memorias del Simposio sobre la Construcción y el Manejo de Residuos Sólidos, Febrero 9-10, México, D.F., 1996.

Cruz, J. R., López, S. F., Valenzuela, L. A., 1996. La Generación de Residuos de la Construcción en el Distrito Federal. Ingeniería Civil. 325, 17-22.

De Vyncke, J., Vyncke, P., 1996. Developing new standars for Aggregate reuse. C & D Debris Recycling. Winter, 12-13.

Díaz, L. F., Savage, G. M., Ortellado, J.M., 1996. El Manejo de Residuos de Construcción y Demolición. Memorias del Simposio sobre la Construcción y el Manejo de Residuos Sólidos, Febrero 9-10, México, D.F., 1996.

Documentos Relativos al Manejo de Residuos Sólidos (Copilado por la Dirección Técnicas de Desechos Sólidos), Agosto 1992.

Eagle, Crusher Company, Inc., 1996. Eagle Crushing and Recycling Plants & Systems, 1996, Folleto Informativo.

Frondiston, J.F., 1981. Concreto Reciclado como un Nuevo Agregado. IMCYC. Vol. 19 (122), 28-45.

Gen Industria, 1995. Identificación y Minimización de Residuos Sólidos , Folleto Informativo, (1-5).

Hanse, T. C., 1992. Recycling of Demolished Concrete and Masonry, Ed. Rilem, Gran Bretaña, (12-101).

Ley General para el equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente. Diario Oficial. Enero 1988.

Pacheco, Y. J., Reuso de Residuos Sólidos, Tesis. UNAM, México 1994. 5-10.

Salas, J. F. Reciclaje del Concreto, Primer Simposio Nacional sobre Materiales de la Construcción. Mérida Yucatán, México

Schulz, R. R., 1992. Recycling of Masonry Rubble. Recycling of Demolished Concrete and Masonry, Ed. Rilem, Gran Bretaña, (176-180).

Simposio Sobre la Construcción y el Manejo de Residuos Sólidos. Febrero 9-10, 1996. México. D.F.

Solórzano, O. G., 1996. Los residuos Peligrosos en la Industria de la Construcción. Ingeniería Civil. 325, 13-16.