



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA.

Maestría y Doctorado en Ciencias e Ingeniería

TESIS DE MAESTRIA.

Reutilización de escombros de concreto hidráulico en nuevos procedimientos constructivos.

MAESTRÍA EN INGENIERÍA, ÁREA MEDIO AMBIENTE.

ING. JOSE MANUEL GUTIÉRREZ MORENO / 323085

Tutor: DR. ALEJANDRO MUNGARAY MOCTEZUMA

Mexicali, Baja California, A Agosto de 2014

Índice:

1	marco de la investigación.....	5
1.1	objetivo	5
1.2	Hipótesis.....	5
1.3	Justificación.....	5
1.4	Introducción.....	5
2	Antecedentes.....	6
2.1	la industria del concreto hidráulico y regulaciones.	6
	Definición.....	6
	Clasificación.....	8
2.2	Escombros y regulaciones.	9
	Definición.....	9
	Clasificación.....	10
	Estadísticas de generación de RCD.....	11
	Estadísticas de recuperación y reciclaje de RCD	13
3	revisión de literatura.....	16
3.1	Reutilización de los escombros; una práctica de sustentabilidad.....	16
3.2	Evaluación de características y comportamiento mecánico de concreto hidráulico, elaborado con agregados naturales y con sustitución parcial por agregados reciclados.....	18
	Características de los materiales.....	19
	Mezclas de concreto hidráulico reciclado.....	20
3.3	Revisión de normativa de materiales para concreto.....	22
	Agregados para concreto hidráulico:	23
	Análisis granulométrico:.....	23
	Coefficiente Volumétrico:.....	24
	Masa Volumétrica, método de prueba.....	24
	Determinación de la masa específica (densidad) y absorción de agua del agregado fino y grueso, métodos de prueba:	25
	Determinación del contenido de agua por secado, método de prueba:	25
	Determinación de la Densidad del cemento hidráulico:	25
3.4	Proporcionamiento, elaboración y curado de especímenes de concreto.	26
	Diseño de mezclas de concreto hidráulico.....	26
	Elaboración y curado de especímenes concreto hidráulico en el laboratorio.....	26
3.5	Pruebas al concreto en estado fresco.....	27
	Determinación del revenimiento en el concreto fresco.....	27

Determinación del contenido de aire en el concreto fresco.....	27
3.6 Pruebas al concreto en estado endurecido.....	28
Determinación de la resistencia a la compresión de cilindros de concreto hidráulico, método de prueba...	28
Determinación de la resistencia a la flexión o modulo de ruptura del concreto hidráulico.....	28
Determinación de la resistencia a la tensión por compresión diametral en cilindros de concreto hidráulico.	29
Determinación del Modulo de elasticidad estático.....	29
4 metodología.....	30
5 Resultados y discusión.....	32
5.1 Caracterización de los materiales.....	32
Granulometría.....	32
Propiedades de los agregados para concreto.....	34
5.2 Dosificación.....	35
5.3 Pruebas al concreto en estado fresco.....	36
5.4 Pruebas al concreto en estado endurecido.....	37
Resistencia a la Compresión.....	37
Resistencia a la tensión, módulo de ruptura y módulo elástico.....	38
6 conclusiones.....	38
7 Referencias.....	41
8 ANEXOS:.....	46
8.1 Metodología y equipos para procesamiento de escombros para su reintegración a mezclas de concreto hidráulico.....	46
8.2 Anexo fotografico de pruebas a materiales, elaboración de cilindros y pruebas a concreto hidráulico.....	46
8.3 Tablas y graficas de pruebas en estado endurecido del concreto, del presente proyecto.....	46
8.4 Otros anexos generales.....	46

Indice de Tablas:

Tabla 2-1 Tipos de cementos portland simple.....	6
Tabla 2-2 Cementos mezclados.....	6
Tabla 2-3 Principales aspectos del concreto influidos por los agregados.....	8
Tabla 2-4 Tipos de concreto existentes.....	8
Tabla 2-5 Tipos de concreto de acuerdo a su resistencia.....	9
Tabla 2-6 Tipos de concreto de acuerdo a su masa especifica.....	9
Tabla 2-7 Clasificación de RCD por actividad génesis.....	10
Tabla 2-8 Clasificación de lo RCD de acuerdo a nadf-007-rnat-2004.....	11
Tabla 2-9 Relación de masa entre RCD y desechos municipales.....	12
Tabla 2-10 Residuos sólidos generados en México de 1995 a 2012.....	12

Tabla 2-11 Generación RCD y reciclaje anual efectivo en 3 países de Unión Europea de acuerdo a su actividad génesis.	13
Tabla 2-12 Tendencia de reciclaje en países Europeos.	14
Tabla 2-13 Tasas de recuperación en función de RCD generado.	14
Tabla 3-1 Comparación de los agregados según su origen. Naturales versus reciclados.	16
Tabla 3-2 Clasificación de agregados, según estándares Coreanos.	20
Tabla 3-3 Reducción de resistencia a la compresión en concreto reciclado.	21
Tabla 3-4 Normativa utilizada para pruebas a materiales y concreto hidráulico.	22
Tabla 3-5 Masa mínima de muestra de acuerdo al Tamaño nominal del agregado grueso	23
Tabla 4-1 Trituradora de mandíbulas.	30
Tabla 4-2 Listado de pruebas de laboratorio ejecutadas por grupos.	31
Tabla 5-1 Granulometría de agregados gruesos de ambas muestras	32
Tabla 5-2 Granulometría de agregados finos.	33
Tabla 5-3 Características de los materiales.	34
Tabla 5-4 Dosificación de mezclas de concreto de proyecto.	36
Tabla 5-5 Resultados de pruebas a mezclas de concreto en estado fresco.	36
Tabla 5-6 Resultados de cilindros en pruebas de resistencia a la compresión.	37
Tabla 5-7 Resumen de estadísticos descriptivos de los grupo de mezclas de concreto hidráulico. ..	37
Tabla 5-8 Estimación de otras propiedades del concreto en función de la resistencia a la compresión.	38
Tabla 6-1 Calculo de costo directo de 1Km. de obra complementaria de vialidades.	39
Tabla 6-2 Comparativa de costo directo con respecto al tipo de concreto utilizado.	40

Indice de Imágenes:

Imagen 2-1 Clasificación de los áridos por tipo de roca.	7
Imagen 2-2 Clasificación del concreto de acuerdo al origen de sus agregados.	9
Imagen 2-3 Escombros derivados de segunda guerra mundial.	11
Imagen 2-4 Porcentaje de agregados reciclados en el uso total de agregados.	15
Imagen 2-5 Producción de agregados reciclados de países europeos.	15
Imagen 3-1 Aplicaciones de agregados reciclados.	17
Imagen 3-2 Beneficios del reciclado del concreto.	18
Imagen 5-1 Granulometría de agregados gruesos y límites NMX-C-111-2004.	33
Imagen 5-2 Granulometría de agregados finos y límites de NMX-C-111-2004.	34

1 MARCO DE LA INVESTIGACION

1.1 OBJETIVO

Conocer las propiedades de agregados gruesos reciclados y las mezclas de concreto hidráulico que los incluyan en 30% de reemplazo, comparándolos con los agregados y mezclas con agregados 100% naturales.

1.2 HIPÓTESIS

Ho: Las mezclas de concreto hidráulico con 30% de reemplazo de agregados gruesos por reciclados, presentan un comportamiento mecánico similar a las de 100% de agregados naturales.

1.3 JUSTIFICACIÓN

Es pertinente considerar la forma de mitigar los daños ocasionados al medio ambiente por concepto de extracción de materias primas y construcción de obras civiles, buscando aprovechar de mejor manera los recursos disponibles, En este sentido la reutilización de escombros de concreto a través de mezclas de concreto hidráulico permite:

- Mayor cantidad de materia prima disponible para construcción.
- Menor cantidad de residuos provenientes de la construcción en rellenos sanitarios y otros lugares, lo que impacta positivamente al Medio Ambiente.
- Reducción de costos de producción de nuevos inmuebles a base de RCD.
- Sostenimiento de la calidad de los iguales construidos.

1.4 INTRODUCCIÓN

La generación y disposición final de los residuos de construcción y demolición representa una problemática ambiental con altos costos y consumo de espacio disponible para el vertido de residuos sólidos municipales; particularmente los escombros de concreto hidráulico, que debido a su volumen dificultan el aprovechamiento de espacio en los camiones para su acarreo y que por ende multiplican los gastos de transporte. Previamente en la literatura, se ha demostrado que los escombros de concreto pueden ser triturados y utilizados como agregados para concreto nuevo, tras una limpieza adecuada de las partículas finas superficialmente adheridas al agregado reciclado. Esta investigación aborda la factibilidad técnica del uso de mezclas de concreto hidráulico con reemplazo de 30% en los agregados gruesos naturales por agregados gruesos reciclados, producto de la trituración de escombros de banqueta y remanentes de concreto premezclado (nuevo) con $f'c = 250 \text{ Kg/cm}^2$. Los resultados indican un comportamiento similar en mezclas sin reemplazo de agregados y con el reemplazo de material reciclado que aborda este experimento, principalmente en las propiedades de mecánicas del concreto en estado endurecido, pudiendo ser categorizadas como concreto clase 1 para múltiples usos, entre los que están las obras complementarias de pavimentos.

2 ANTECEDENTES.

2.1 LA INDUSTRIA DEL CONCRETO HIDRAULICO Y REGULACIONES.

DEFINICIÓN.

El concreto hidráulico es un producto o masa conformada por un medio aglutinador. Generalmente este es el resultado de la relación entre cemento hidráulico, agregados (o áridos) y agua, donde lo tradicional es utilizar el cemento portland con variación en clases o tipos que hacen referencia al grado de resistencia con que se comportará el concreto una vez endurecido. (Neville 1999).

El tipo de cemento más utilizado para la elaboración de concreto es el cemento Portland, al cual es adicionado otros compuestos para la darle otras propiedades al concreto hidráulico elaborado, tales como puzolana, ceniza volante, escoria de alto horno, remanente de trigo, aditivo superfluidificador, polímeros y fibras, entre otros; mediante los cuales se producen diferentes concretos para diferentes usos, entre los que están; Autocompactante, Superfluidificante, De Alta resistencia y Alto desempeño.

El cemento (Portland) es una mezcla de materiales calcáreos y arcillosos u otros materiales asociados con sílice, alúmina y óxido de hierro, que son calentados a temperaturas que provocan que se formen escorias para posteriormente moler el producto resultante. Joseph Aspdín fue quien patentó el cemento portland en 1824, aunque ya era usado desde tiempo atrás. (Neville 1999).

Existen diferentes tipos de Cemento Portland, la variación obedece a los requerimientos que tiene el proyecto que utilizará la mezcla de concreto (tabla 2-1), así mismo la industria de producción del cemento, elabora cementos mezclados con otros materiales, de acuerdo a lo que establece la norma internacional ASTM C 595 para usos especiales (tabla 2-2).

Tabla 2-1 Tipos de cementos portland simple.

Tipo	Cementos portland simple (ASTM C 150)
	Características y uso
I	Para usarse cuando no se requieren propiedades especiales.
II	Uso general, pero recurrido cuando se desea resistencia moderada a los sulfatos o moderado calor
III	Para usarse cuando se desea alta resistencia inicial
IV	Para usarse cuando se desea bajo calor de hidratación
V	Para usarse cuando se desea alta resistencia a los sulfatos.

Fuente Manual de tecnología del concreto CFE, vol. 1, pág. 9

Tabla 2-2 Cementos mezclados.

Tipo	Cementos mezclados (ASTM C 595)	Variación de aditivo
	Características y uso	
IS	Cemento portland-escoria de alto horno, para uso en construcciones de concreto en general	25 a 70%
IP	Cemento portland-puzolana, para emplearse en las construcciones de concreto en general.	15 a 40%
P	Cemento portland-puzolana, puede usarse en las construcciones de concreto donde no se requieren altas resistencias a edades tempranas.	15 a 40%
S	Cemento de escoria de alto horno, para emplearse en combinación con el cemento portland para hacer concreto, o en combinación con cal hidratada para hacer mortero de mampostería	mayor a 70%
I (PM)	Cemento portland modificado con puzolana, para construcciones de concreto en general	menor a 15%
I (SM)	Cemento portland modificado con escoria AH, para construcciones de concreto en general	menor a 25%

Fuente Manual de tecnología del concreto CFE, vol., 1, pág. 10

Los agregados o áridos son otro componente de las mezclas de concreto hidráulico, y son definidos como materiales granulares inertes formados por fragmentos de roca o arenas utilizados en la construcción (edificación e infraestructuras) y en numerosas aplicaciones industriales. Coloquialmente son conocidos como arena, grava, gravilla, etc. (*Los áridos y el cemento, 2007*).

Los **agregados** se pueden clasificar de acuerdo a su origen; como **naturales** cuando proceden de yacimientos detríticos no consolidados y/o canteras mediante trituración de rocas masivas y consolidadas como el granito, diorita, calizas, cuarcitas; obteniendo forma angulosa, si estos materiales son de origen aluvial presentan forma redondeada. Existe otra clasificación a la que se le denomina áridos **reciclados**, cuando proceden de residuos de construcción y demolición (RCD) o de actividades industriales.

En función del tipo de roca, los áridos o agregados pueden clasificarse de la siguiente manera:

Imagen 2-1 Clasificación de los áridos por tipo de roca

ÁRIDOS NATURALES			ÁRIDOS RECICLADOS	ÁRIDOS SECUNDARIOS (ARTIFICIALES)
<ul style="list-style-type: none"> • Procedentes de la corteza terrestre. • Suponen el 99 % del consumo. 			<ul style="list-style-type: none"> • Procedentes del tratamiento de residuos de construcción y demolición. • Actualmente representan menos del 1 %. 	<ul style="list-style-type: none"> • Procedentes de escorias de otras industrias generadas en procesos térmicos. • Actualmente su uso es escaso.
<p>ROCAS ÍGNEAS</p> <p>Plutónicas Granitos Dioritas Gabros</p> <p>Hipoabisales Diabasas Pórfidos</p> <p>Volcánicas Basaltos Riolitas Traquitas Andesitas</p>	<p>ROCAS SEDIMENTARIAS</p> <p>Calcáreas Calizas Dolomías</p> <p>Arenosas Arenas Arenas silíceas Gravas Conglomerados Areniscas Grauvacas</p>	<p>ROCAS METAMÓRFICAS</p> <p>Gneises Cuarcitas Mármoles</p>		
			<p>Hormigones Ladrillos Tejas Carreteras Mezclas</p>	<p>Escorias de horno alto Escorias de acería Otras escorias</p>

Fuente: *Los áridos y el cemento, pág. 155, 2007.*

Los **agregados** pueden ser clasificados también de acuerdo a su tamaño, de tal manera que pueden diferenciarse **gruesos** retenidos en la malla número 4 (con abertura de 4.75mm.) y los que pasan de ella como **finos**. (*NOM-C-111-ONNCCE-2004 / NMX-C-C-077-ONNCCE-1997*). Los **agregados** pueden ser clasificados también de acuerdo al tipo de aplicación que vayan a tener pudiendo ser para mezclas de concreto hidráulico (pudiendo ser de peso normal o ligero), mezclas de concreto asfáltico, para morteros, para bases y subbases de carreteras, áridos para basalto de ferrocarril, para usos industriales, entre otros.

La tabla 2.3 presenta aspectos influidos en el concreto a partir de sus agregados, lo que permite observar hasta donde interviene la correcta elección de componentes y las propiedades que se afectan positiva o negativamente a partir características de estos.

Tabla 2-3 Principales aspectos del concreto influidos por los agregados.

Características de los agregados	Aspectos influidos en el concreto	
	concreto fresco	concreto endurecido
Granulometría	Manejabilidad	Resistencia mecánica
	Requerimiento de agua	Cambios volúmetricos
	Sangrado	Economía
Limpieza (materia orgánica, limo, arcilla y otros finos indeseables)	Requerimiento de agua	Durabilidad
	Contracción plástica	Resistencia mecánica
		Cambios volúmetricos
Densidad	Peso unitario	Peso unitario
Sanidad	Requerimiento de agua	Durabilidad
Absorción y porosidad	Perdida de revenimiento	Durabilidad
	Contracción plástica	Permeabilidad
Forma de las partículas	Manejabilidad	Resistencia mecánica
	Requerimiento de agua	Cambios volúmetricos
	Sangrado	Economía
Textura superficial	Manejabilidad	Durabilidad
	Requerimiento de agua	Resistencia al desgaste
		Economía
Tamaño máximo	Segregación	Resistencia mecánica
	Peso unitario	Cambios volúmetricos
	Requerimiento de agua	Peso unitario
		Permeabilidad
		Economía
Reactividad con los álcalis	-	Durabilidad
Módulo de elasticidad	-	Módulo de elasticidad
		Cambios volúmetricos
Resistencia a la abrasión	-	Resistencia a la abrasión
		Durabilidad
Resistencia Mecánica (por aplastamiento)	-	Resistencia mecánica
Partículas friables y terrones de arcilla	Contracción plástica	Resistencia mecánica
		Durabilidad
		Reventones superficiales
Coefficiente de expansión termica	-	Propiedades termicas

Fuente Manual de tecnología del concreto CFE, vol. 1, pág. 101

CLASIFICACIÓN.

Las combinaciones de los diferentes tipos cementos, de agregados, aditivos y métodos de elaboración de las mezclas de concreto hidráulico, resultan en una amplia gama de productos, se enlistan a continuación a título enunciativo, más no limitativo, de acuerdo a su función:

Tabla 2-4 Tipos de concreto.

Estándar (Portland)	Reforzado con fibras	De alta resistencia	De alto desempeño
Con aire incluido	Autocompactante	Lanzado	Antibacteriano
Arquitectónico y decorativo	Antideslave bajo el agua	Poroso y permeable	Superfluidificado (aditivos varios)

Fuente Tecnología del concreto A.M. Neville, pág. 23, 1999.

Así mismo el concreto se puede clasificar de acuerdo a su resistencia:

Tabla 2-5 Tipos de concreto de acuerdo a su resistencia.

Resistencia:	Rango de resistencia:	Considerable para uso:
Grado I	De 250 Kg/cm ² o mayor.	ESTRUCTURAL.
Grado II	Mayor a 200 Kg/cm ² , pero menor a 250 Kg/cm ²	NO ESTRUCTURAL.

Se puede clasificar el concreto también de acuerdo a su peso volumétrico fresco:

Tabla 2-6 Tipos de concreto de acuerdo a su masa específica.

Masa específica (Kg/m ³):	Considerable para uso:
De 1800 Kg/m ³ a 2400 Kg/m ³	CONCRETO NORMAL.
Menores a 1800 Kg/m ³	CONCRETO LIGERO.

La clasificación del concreto acerca de la procedencia de sus agregados será el punto de comparación de esta investigación, que a saber el concreto puede ser:

Imagen 2-2 Clasificación del concreto de acuerdo al origen de sus agregados.

CONCRETO NATURAL

- Los tradicionales; en donde todos sus agregados son vírgenes o naturales.

CONCRETO RECICLADO

- Llamado también concreto verde; en donde existe reemplazo total o parcial de los agregados naturales.

Internacionalmente las regulaciones normativas en materia de concreto y agregados están lideradas por la American Society Testing Materials (ASTM) y el American Concrete Institute (ACI), en la comunidad Europea destaca la Instrucción de Hormigón Estructural (EHE-08), elaborada en España y que dedica el anexo 15 exclusivamente a concreto reciclado. En México la Normativa Oficial Mexicana (NOM) y la Normativa SCT (Secretaría de Comunicaciones y Transportes) son las que mediante su cumplimiento garantizan la calidad de las obras de ingeniería civil, muchas de las cuales están basadas en las normas elaboradas por la Sociedad Americana de Prueba de Materiales (ASTM).

2.2 ESCOMBROS Y REGULACIONES.

DEFINICIÓN.

El Real Decreto Español [105/2008](#), define RCD como cualquier residuo que se genere en una obra de construcción y demolición, siendo residuos de naturaleza fundamentalmente inerte generados por obras de excavación, nueva construcción, reparación, remodelación, rehabilitación y demolición, incluidas las obras menores y reparaciones domiciliarias, (EHE, 2008). En países como Estados Unidos se le llama Construction and Demolition Waste (C&DW), pero se refiere a lo mismo.

CLASIFICACIÓN.

Existen muchas clasificaciones del RCD, debido a que varían de un país a otra las definiciones de cada residuo de construcción y demolición, incluso dentro de las regiones de un país hay diferencias en cuanto a terminología y prácticas de manejo de los mismos. Por ejemplo en algunos países no se considera que el remanente del movimiento de tierras sea un RCD, sin embargo se pueden clasificar de la siguiente manera:

- RCD de Nivel I: RCD excedentes de la excavación y los movimientos de tierras de las obras cuando están constituidos por tierras y materiales pétreos no contaminados.
- RCD de Nivel II: RCD no incluidos en los de Nivel I; generados principalmente en las actividades propias del sector de la construcción, de la demolición, de la reparación domiciliaria y de la implantación de servicios (abastecimiento y saneamiento, telecomunicaciones, suministro eléctrico, gasificación y otros, (EHE, 2008).

En España se utiliza el *Catálogo Europeo de Residuos (CER)* donde cada residuo es identificado y tiene asignada una clave, dentro de la numeración 17-00-00, para el caso de Residuos de hormigón o concreto le corresponde CR: 17-01-01.

La clasificación más utilizada y generalizada es aquella hace énfasis en la actividad que le da origen, y que se muestra a continuación.

Tabla 2-7 Clasificación de RCD por actividad génesis.

Actividad	Tipo de Obra	Componentes principales
DEMOLICIÓN	Vivienda	Antiguas: mampostería, ladrillo, madera, yeso, etc.
	Edificios	Recientes: ladrillo de hormigón, hierro/Acero, escombros y plásticos.
	Obras Públicas	Industriales: hormigón, acero, ladrillo, mampostería, etc.
CONSTRUCCIÓN	Edificación y Obras Públicas	Fierro, acero, ladrillos, bloques, tejas y materiales no ferrosos.
	Reconstrucción	Suelo, toca, hormigón, cal, yeso, pavimento, ladrillo y escombros.
	Excavación	Tierra
	Otros	Madera, plástico, etc.

Fuente: Cruz (2004) modificado.

En México, la Secretaría de Medio Ambiente del Distrito Federal, promulgó en Julio 2006 la “Norma Oficial para la clasificación y especificación de Manejo de Residuos de Construcción y Demolición (RCD)”, la cual puede verse en la tabla 2-8, de la cual los escombros de concreto hidráulico, pertenecen a la clasificación “A”: **“Residuos potencialmente reciclables para la obtención de agregados y material de relleno”**.

Tabla 2-8 Clasificación de lo RCD de acuerdo a nadf-007-rnat-2004

A. Residuos potencialmente reciclables para la obtención de agregados y material de relleno	
Nombre	
1.	Prefabricados de mortero o concreto (blocks, tabicones, adoquines, tubos, etc.).
2.	Concreto simple.
3.	Concreto armado.
4.	Cerámicos.
5.	Concretos asfálticos.
6.	Concreto asfáltico producto del fresado.
7.	Productos de mampostería.
8.	Tepetatosos.
9.	Prefabricados de arcilla recocida (tabiques, ladrillos, Blocks, etc).
10.	Blocks.
11.	Mortero.
B. Residuos de excavación	
Nombre	
1.	Suelo orgánico.
2.	Suelos no contaminados y materiales arcillosos, granulares y pétreos naturales contenidos en ellos.
3.	Otros materiales minerales no contaminados y no peligrosos contenidos en el suelo.
C. Residuos sólidos	
Nombre	
1.	Cartón.
2.	Madera.
3.	Metales
4.	Papel.
5.	Plástico.
6.	Residuos de podas, tala y jardinería.
7.	Paneles de yeso.
8.	Vidrio.
9.	Otros.

Fuente Gaceta oficial del Distrito Federal, 12 julio 2006, pág. 17.

ESTADÍSTICAS DE GENERACIÓN DE RCD

Tras la Segunda Guerra Mundial se generó gran cantidad de RCD, debido a los ataques llevados a cabo por los ejércitos involucrados a los edificios erigidos en ese entonces (ver imagen 2.3), por lo que la reconstrucción de las ciudades requirió utilizar todo ese material que tenían como *residuo* “al alcance de la mano” para lograr ese propósito y reducir los costos que implicaba hacerlo tras un periodo de guerra que les consumió gran cantidad de recursos.

Imagen 2-3 Escombros derivados de segunda guerra mundial.



Otras formas en las que se generan RCD es debido al impacto de fenómenos naturales, tales como huracanes y terremotos en las ciudades y edificaciones, En México tras el terremoto de 1985, se presentaron daños severos en la infraestructura y obras civiles, se reportaron la demolición de más de 180 edificios en la ciudad de México en los siguientes seis meses tras el terremoto del 19 de Septiembre 1985. (<http://www.oem.com.mx/laprensa/notas/n2233181.html>).

Asimismo, se considera como fuente de generación de residuos de construcción y demolición el concreto hidráulico remanente de los camiones revolventes que lo transportan a las obras, el producto de las devoluciones por no cumplir con la calidad y/o tiempo de entrega tras salir de la planta concretora, así como residuos generados durante la producción del concreto; De acuerdo a *Cruz (2004) Martínez (2006)*, el porcentaje estimado de residuos debidos a esta categoría es del 10% del total de la producción anual, porcentaje considerable para el que se utilizan agregados vírgenes (recurso no renovable) y para los que en algunas ocasiones, se tiene que disponer de volumen en un sitio de disposición final, si estos residuos no se aprovechan.

México, como la mayoría de los países, no se tiene registros de la cantidad de RCD generados, sin embargo existen algunas estadísticas de organismos internacionales que han publicado las condiciones actuales e históricas de países como Estados Unidos de América, Japón y algunos países de la Comunidad Europea, tal es el caso de la *Iniciativa por la Sustentabilidad del Cemento (CSI)*. En este sentido la tabla 2-9, presenta una relación de masa entre RCD y desechos municipales generados, de la cual se puede inferir que la masa de RCD representa una cantidad adicional entre 40% y 100% de la cantidad reportada de residuos sólidos municipales.

Tabla 2-9 Relación de masa entre RCD y desechos municipales.

Cantidad de desechos (millones de toneladas).	Europa.	Estados Unidos.	Japón.
Desechos de Construcción y Demolición (RCD).	510	317	77
Desechos municipales.	241	228	53

Fuente: Iniciativa por la Sustentabilidad del Cemento (CSI), 2009.

México, no cuenta con un control estadístico de RCD ni fuentes y cantidades de quienes los generan, Sin embargo, existen datos disponibles de residuos sólidos en México, los cuales son presentados en los informes de gobierno que rinde anualmente el ejecutivo federal. Tal es el caso del anexo estadístico del sexto informe de gobierno del presidente Felipe Calderón en el año 2012 titulado: “principales indicadores de la planeación nacional”, en su página 62 reporta la generación de residuos sólidos en México de 1995 hasta 2012, como se puede apreciar en la tabla 2.10 en el periodo de 17 años, la generación de residuos se incrementó en un 28%, prácticamente 1.95% cada año; haciendo un ejercicio similar al que se hizo con los datos de la tabla 2-9, la generación de RCD en México en el periodo presentado, estaría ubicada entre 59072 y 84388 toneladas aproximadamente.

Tabla 2-10 Residuos sólidos generados en México de 1995 a 2012.

Concepto	1995	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012 p/
GENERACIÓN ANUAL DE RESIDUOS SÓLIDOS ^{1/}														
Total (Miles de Toneladas)	30 510	30 733	31 489	32 174	32 916	34 602	35 405	36 136	36 865	37 595	38 325	40 059	41 063	42 194
Per cápita (Kilogramos)	335	316	319	322	324	329	332	336	349	352	356	357	360	363

Fuente Sexto Informe de Gobierno 2012.

Los rellenos sanitarios reciben la gran mayoría de los residuos sólidos, donde también son vertidos los RCD cuando estos, no son sometidos a un plan de manejo. Cabe señalar que los escombros de concreto, disminuyen la vida útil del depósito final de desechos, debido a su volumen.

Las obras de ingeniería civil tienen una vida útil en la que son seguras y funcionales, el umbral de expiración de este tiempo es la principal razón para su demolición y la principal fuente de RCD. De acuerdo a *(Concretos reciclados S.A. de C.V., 2005)*. El concreto representa el 20% del producto de demolición de una obra civil, sin embargo cuando hablamos de losas de canales y pavimentos de concreto hidráulico, este porcentaje es prácticamente 100%.

La generación de RCD ha estado asociada al crecimiento de la población, debido a la demanda de bienes y servicios, cada nueva edificación representa un nuevo porcentaje total o parcial de residuos de construcción y demolición potenciales. De acuerdo con *Energy Efficiency in Buildings, Business Realities and Opportunities, WBCSD, 2007*; Existen más de 85 billones de m² de edificaciones, por lo tanto significa 85 billones de m² de potenciales RCD, aunado a esto China añade cada año 2 billones de m², debido al crecimiento y desarrollo que está consolidando en los últimos años.

ESTADÍSTICAS DE RECUPERACIÓN Y RECICLAJE DE RCD

En México, La Ley general para la prevención y gestión integral de residuos (última reforma 19 de Marzo de 2014) En el Título Tercero “Clasificación de Residuos” en el artículo 19, fracción VII de esta Ley, se indica que los Residuos de Construcción, mantenimiento y Demolición en general (RCD) serán considerados como Residuo de Manejo Especial. Así mismo y de acuerdo con la *NOM-161-SEMARNAT-2011* en su anexo normativo único se establece que la generación de RCD mayor de 80 metros cúbicos (m³) en una obra, será sujeta a plan de manejo. En este sentido, los escombros de concreto hidráulico, también serán considerados de la misma forma, como un residuo de manejo especial debido a su volumen. En este marco, los planes de manejo de residuos, permitirán el aprovechamiento de los escombros, para la transformación de los mismos, en agregados reciclados.

Sin embargo hasta ahora no existen en nuestro país estadísticas oficiales ni de generación de RCD ni de recuperación-transformación en agregados reciclados, debido principalmente a que la normativa aplicable es reciente, existe abundancia de recursos naturales y no hay mercado establecido de comercialización para agregados reciclados ni productos que los contienen.

La Comunidad Europea y Estados Unidos han llevado durante los últimos años registro de generación y reciclaje de RCD, La tabla 2-11 presenta la cantidad de RCD por la actividad que le dio origen, así como la cantidad y porcentaje que alcanzo de reciclaje, por tipo de actividad, en países seleccionados. Cabe señalar que los escombros de concreto son el principal componente generado por la actividad de demolición y que las cantidades en tonelaje, varían de país en país, por el tipo de materiales que utilizan durante la construcción de edificios y obra pública, así mismo existe variación por los años en que se obtuvieron los datos.

Tabla 2-11 Generación RCD y reciclaje anual efectivo en 3 países de Unión Europea de acuerdo a su actividad génesis.

Actividad	Tipo de Obra	Componentes principales	Caso RCD Alemania		Caso RCD Holanda		Caso RCD Dinamarca	
			Generación	Reciclaje	Gen.	Reciclaje	Gen.	Reciclaje
DEMOLICIÓN	Vivienda	Antiguas: mampostería, ladrillo, madera, yeso, etc.	53,000 miles de toneladas	16960	14,000 miles de toneladas	8820	6,500 miles de toneladas	2860
	Edificios	Recientes: ladrillo de hormigón, hierro/Acero, escombros y plásticos.		miles de toneladas		miles de toneladas		miles de toneladas
	Obras Públicas	Industriales: hormigón, acero, ladrillo, mampostería, etc.		32%		63%		44%
CONSTRUCCIÓN	Edificación y Obras Públicas	Fierro, acero, ladrillos, bloques, tejas y materiales no ferrosos.	53,000 miles de toneladas	32860	14,000 miles de toneladas	5180	6,500 miles de toneladas	1495
	Reconstrucción	Suelo, toca, hormigón, cal, yeso, pavimento, ladrillo y escombro.		miles de toneladas		miles de toneladas		miles de toneladas
	Excavación	Tierra		63%		37%		23%
	Otros	Madera, plástico, etc.						

Fuente: Cruz (2004) modificado.

Los países con mayores porcentajes de reciclaje de RCD comparten una plataforma legislativa que favorece con estímulos y distinciones a las empresas constructoras que reducen los niveles de residuos sólidos producto de las obras que ejecuten. Así mismo, facilitan apoyos para la creación de empresas dedicadas al rubro de reciclaje de RCD (Romero 2004), y que finalmente permiten que aquellos agregados reciclados que demuestran cumplir satisfactoriamente con todas las pruebas de calidad para su incorporación en pavimentos y producción de concreto para obras civiles, lo puedan hacer. Cabe mencionar que algunos de esos países tienen poca disposición de fuentes de agregados naturales, lo que ha impulsado estas prácticas medioambientalmente responsables. La tabla 2-12 presenta la tendencia general de recuperación en países Europeos, y la tabla 2-13 las tasas de recuperación con respecto del total contabilizado como existente; destacan casos como el de Bélgica y Holanda que ha logrado recuperar altos porcentajes del RCD generado.

Tabla 2-12 Tendencia de reciclaje en países Europeos.

Países	% reciclaje RCD	Observaciones
Dinamarca, Holanda y Bélgica	90%	hasta 100% en pavimentos
Finlandia, Austria y Reino Unido	40-45%	hormigón y ladrillo de 50-76%, cuentan con 50-100 machacadoras de RCD
Suecia, Alemania y Francia	15-20%	Alemania tiene baja cuota de reciclaje a pesar de contar con 1000 machacadoras de RCD con capacidad media de trituración de 120,000 toneladas/año
Italia e Irlanda	6-9%	-

Fuente Romero 2004, modificada.

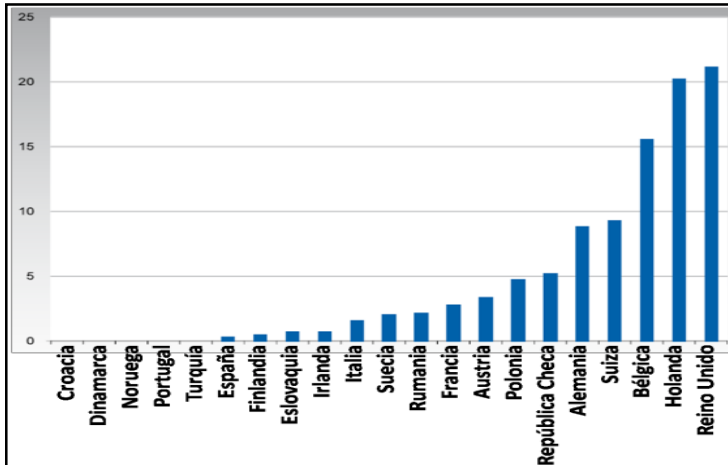
Tabla 2-13 Tasas de recuperación en función de RCD generado.

PAÍS	TOTAL RCD (Millones de toneladas)	TOTAL RCD RECUPERADOS (Mt)	% DE RCD RECUPERADOS
Alemania	201	179	89
Australia	14	8	57
Bélgica	14	12	86
Canadá	No disponible	8 (concreto reciclado)	No disponible
España	39	4	10
Estados Unidos.	317 (incl. 155 de concreto)	127 (concreto reciclado)	82
Francia	309	195	63
Holanda	26	25	95
Inglaterra	90	46	50 – 90
Irlanda	17	13	80
Japón	77	62	80
Noruega	No disponible	No disponible	50 – 70
Portugal	4	Mínimo	Mínimo
República Checa	9 (incl. 3 de concreto)	1 (concreto reciclado)	45 (concreto)
Suiza	7 (incl. 2 de concreto)	2	casi 100
Taiwán	63	58	91
Tailandia	10	No disponible	No disponible

Fuente: Iniciativa por la Sustentabilidad del Cemento (CSI), 2009.

Gran parte del RCD recuperado se utiliza para la producción de agregados, que conformarán el soporte de base y subbase del cuerpo de pavimento, y mezclas de concreto hidráulico masivo. Se estima que en Europa la producción de agregados reciclados en el año 2010 fue del orden de los 185 millones de toneladas, siendo Alemania y el Reino Unido los máximos exponentes de esta producción, ver Imagen 2-4 presentada a continuación, publicada por la Unión Europea de Productores de Agregados (Union Européenne des Producteurs de Granulats).

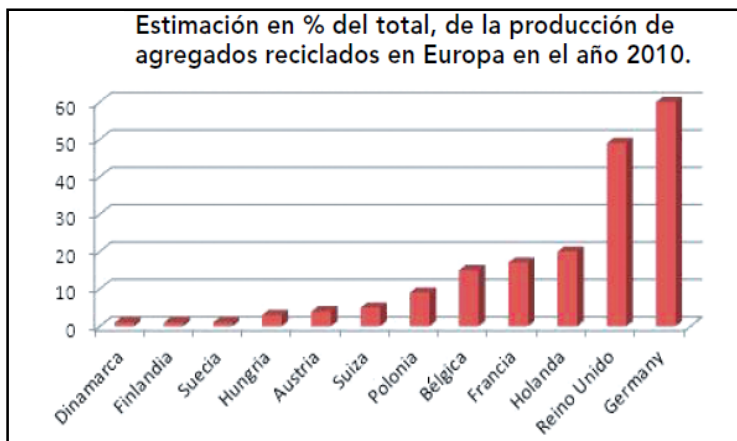
Imagen 2-4 Porcentaje de agregados reciclados en el uso total de agregados.



Fuente: UEPG 2005 y 2006 estadísticas publicadas 2008.

Los agregados reciclados representan entre un 6% y 8% del total de agregados utilizados en Europa, con diferencias significativas entre países. Los principales usuarios son el Reino Unido, Holanda, Bélgica, Suiza y Alemania. Se estima que en el año 2000 aproximadamente el 5% de los agregados utilizados en Estados Unidos fueron agregados reciclados. Para el año 2010, esta práctica de reciclaje ya se había consolidado como una solución de desarrollo sustentable, y países como Alemania y Francia incrementaron sus porcentajes de producción de agregados, como lo muestra la imagen 2-5, lo que obedece a que el marco normativo Europeo contempla los agregados reciclados, como materiales aptos, incluso para uso estructural, bajo reserva de un adecuado diseño, ejemplo de ello es lo manifestado en la “Instrucción de Hormigón Estructural” (EHE, 2008, Real Decreto 2661/1998).

Imagen 2-5 Producción de agregados reciclados de países europeos.



Fuente: Construcción y Tecnología en Concreto, Julio 2013, pág. 20

3 REVISION DE LITERATURA.

3.1 REUTILIZACION DE LOS ESCOMBROS; UNA PRACTICA DE SUSTENTABILIDAD.

El hormigón o concreto es uno de los materiales para construcción más utilizado por las ventajas que ofrece, tales como durabilidad, resistencia al fuego y otros elementos de la naturaleza, así como facilidad de trabajo, adaptando muchas formas.

El concreto ocupa el segundo lugar entre los materiales más consumidos del planeta con 25 billones de toneladas anuales, o sea 3.6 toneladas de concreto por habitante del mundo. Para el caso de México la producción anual de concreto es de cerca de 52 millones de toneladas (según reportes sustentabilidad Cemex y Holcim 2011), esa cantidad de producción tiene una variación de entre 5% al 10% en los últimos años.

La reutilización de escombros tiene futuro, pues adicional a las obras construidas actualmente, cada año 25 billones de toneladas son sumadas al inventario actual, y serán invariablemente demolidas en el corto, mediano o largo plazo. En este sentido, es conveniente realizar una comparativa entre los agregados naturales (recurso no renovable) y los agregados reciclados que se obtienen producto de la trituración de escombros de concreto.

Tabla 3-1 Comparación de los agregados según su origen. Naturales versus reciclados.

Agregados naturales	Agregados reciclados
Los agregados son derivados de una variedad de formaciones rocosas.	Los agregados son derivados de desechos de la construcción.
La minería requiere de monitoreo ambiental y recuperación. Los costos de exploración, permisos, la eliminación de residuos, la preparación del sitio y la recuperación final del mismo deben ser considerados.	El proceso de reciclaje requiere un limitado seguimiento y recuperación. Los costos de exploración, explotación y/o extracción no son considerados, pero los costos de recuperación, la limpieza del sitio y la reducción de polvo y ruido deben ser tenidos en cuenta.
La calidad depende principalmente de las propiedades físicas y químicas del depósito fuente.	La calidad varía significativamente debido a la gran variación en el tipo y las impurezas de las fuentes de desechos.
Existe normativa vigente para cada una de sus aplicaciones.	Falta de normas y reglamentos vigentes para su uso.
La ubicación de las plantas está relacionada con la disponibilidad del recurso (cantera).	El procesamiento frecuentemente se realiza en áreas urbanas mediante el uso de equipos móviles.
Los productos pueden ser comercializados local o regionalmente.	Los productos son comercializados localmente en áreas urbanas.

Fuente: Foro internacional del concreto, 2012.

Los agregados a partir de concreto reciclado pueden ser utilizados en concreto estructural, de acuerdo a un estudio realizado por la National Ready Mixed Concrete Association (NRMCA) en los Estados Unidos que concluyó que los agregados de concreto reciclado son sustitutos aptos en reemplazo de materiales vírgenes hasta en un 10% para la mayoría de aplicaciones del concreto, incluso concreto estructural. Investigaciones en el Reino Unido indican que se puede utilizar hasta un 20% de agregados de concreto reciclado en la mayoría de

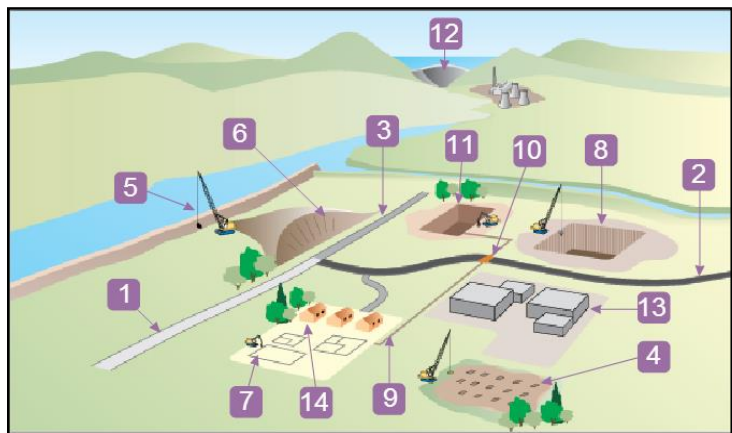
aplicaciones (también concreto estructural), Los lineamientos del gobierno Australiano indican que se puede utilizar hasta un 30% de agregados reciclados en concreto estructural sin que esto implique algún decremento en su fuerza y maleabilidad en comparación con agregados naturales. Los lineamientos en Alemania permiten que bajo ciertas circunstancias los agregados de concreto reciclado sean hasta el 45% del total de los agregados utilizados dependiendo del tipo de exposición que tendrá el concreto durante su vida útil.

Países como Alemania, Suiza y Australia comercializan concreto con agregados reciclados, como concreto “verde”, De hecho en Australia se empleó para la construcción del edificio verde líder a nivel mundial, “The Council House 2”, un bloque de oficinas de diez pisos en Melbourne (CSI, 2009).

Los agregados reciclados pueden ser utilizados en muchas aplicaciones, destacan las que se encuentran enlistada a continuación y que pueden ser identificadas en la Imagen 3-1.

1. Vía de concreto
2. Vía de asfalto
3. Vías de conglomerados hidráulicos
4. Mejoras del suelo
5. Excavaciones – terraplenes
6. Excavaciones – zanjas
7. Bases superficiales
8. Bases profundas
9. Servicios públicos
10. Rehabilitación de servicios públicos en vías
11. Subestructuras de concreto
12. Estructuras de concreto
13. Edificaciones (industriales)
14. Edificaciones (residenciales)

Imagen 3-1 Aplicaciones de agregados reciclados.



Fuente: (www.aggregain.org.uk/opportunities)

En los estados Unidos, mucha de la actividad de reciclaje ha sido impulsada por el apoyo las siguientes dependencias:

- The Federal Highway Administration (FHWA).
- La Sociedad Americana para la Prueba de Materiales (ASTM)
- Asociación Americana de Oficiales de Carreteras y Transporte Estatal (AASHTO)
- Administración Federal de Aviación (FAA).
- Cuerpo de Ingenieros Militares.
- Agencia de Protección Medioambiental (EPA).
- Los Departamentos Estatales de Transporte (DOTs) y muchas municipalidades.

Las enlistadas anteriormente, han utilizado agregados reciclados principalmente para la estructura de pavimentos, y están haciendo investigación que avala la utilidad y buen desempeño de estos materiales de construcción.

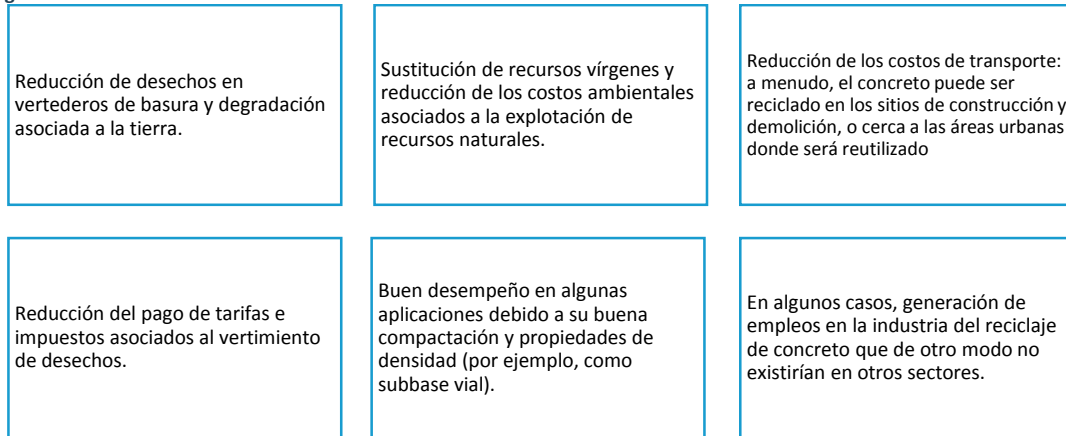
En el Reino Unido se han implementado tarifas e impuestos sobre el vertimiento de desechos para incentivar la utilización de agregados reciclados e incluyen ayuda económica para proyectos de infraestructura de reciclaje. Japón tiene leyes robustas en desarrollo sostenible y hay un fuerte interés en limitar el vertimiento de desechos, reutilizar y reciclar materiales, como La Ley sobre el Reciclaje de Materiales de Construcción entró en vigencia en el año 2009, esta ley exige la separación obligatoria de los RCD y la reutilización/reciclaje del concreto, el asfalto y la madera. (*Iniciativa por la sostenibilidad del cemento, 2009*).

Existen estándares que propician la integración de agregados reciclados a nuevos procedimientos constructivos, algunos de ellos son:

- **El estándar español EHE**, el cual recomienda una sustitución del 20% de agregados gruesos por concreto reciclado.
- **Estándar ISO 13315-1:2012 GESTIÓN AMBIENTAL DEL CONCRETO Y DE LAS ESTRUCTURAS DE CONCRETO**, el cual ayudará a la industria de la construcción a gestionar mejor los impactos ambientales ocasionados por el concreto u hormigón; haciendo recuento de la producción de concreto, construcción y mantenimiento de edificaciones, demolición y reutilización de edificaciones, reciclaje de concreto, etiquetación de productos y diseño ambiental de estructuras.
- **Los sistemas de calificación de edificios verdes**, tales como Leadership in Energy and Environmental Design (**LEED**) en Estados Unidos y (Building Research Establishment Ltd) **BREEAM** en España, promueven dentro de las cinco áreas claves del programa el Desarrollo sostenible (incluyendo el manejo responsable de los RCD) y la Selección de materiales (incluyendo el uso de materiales reciclados). En el caso de LEED, las nuevas construcciones, pueden obtener 8 de los 85 puntos posibles, los cuales tienen que ver con el manejo de RCD y la integración de materiales reciclados al proceso o los elementos de la nueva edificación.

En este sentido, es preciso destacar los beneficios que ofrece el reciclado del concreto (Imagen 3-2), cuyos alcances positivos están en el ámbito socioeconómico, ambiental y técnico, este último es indispensable para la funcionalidad y utilidad de las obras donde se incorporan estos productos.

Imagen 3-2 Beneficios del reciclado del concreto.



3.2 EVALUACIÓN DE CARACTERÍSTICAS Y COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE CONCRETO HIDRÁULICO, ELABORADO CON AGREGADOS NATURALES Y CON SUSTITUCIÓN PARCIAL POR AGREGADOS RECICLADOS.

Durante los últimos años ha existido cada vez más investigación en torno al concreto reciclado, principalmente en países de la Comunidad Europea y Estados Unidos de América, algunos autores aseguran que las propiedades de muchos materiales incluidos en el cemento o como agregado en sustitución de áridos (gravas/arenas) son equiparables a los tradicionales-naturales, incluso algunos reemplazos e inclusiones; mejoran la calidad del concreto hidráulico; Sin embargo otros autores afirman que si bien es posible utilizar estos “concretos verdes” debe hacerse bajo algunas reservas, recomendando no utilizarlos para uso estructural. A continuación, se presentan resultados de investigaciones sobre concreto reciclado, a título enunciativo, más no limitativo.

Cabe destacar que el origen de los agregados reciclados, la calidad de los materiales y proporciones de los mismos en las mezclas de concreto de las investigaciones aquí presentadas, varían de un autor a otro, por lo tanto puede haber diferencias entre las propiedades que describen los especímenes, aun cuando hayan sido concebidos en las mismas condiciones y dosificación. Sin embargo los resultados obtenidos representan las condiciones características para un cierto grupo de materiales, y permiten hacer una comparativa entre concretos naturales y reciclados, de tal forma que pueda conocerse el comportamiento promedio que presentan y bajo qué condiciones existe ventaja sobre el otro, para desarrollarse soluciones en torno a ello y/o establecer seguridad para usos determinados.

CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES.

Todos los autores de literatura citada en este trabajo, prueban los agregados que pretenden formen parte de las mezclas de concreto con las que trabajan en sus investigaciones, el ensaye de **granulometría** es fundamental debido a que mediante ella, se puede optimizar la mezcla de concreto, hacerla económica y suministrarle en un adecuado diseño, la trabajabilidad suficiente para la colocación y acabado del hormigón. En todos los casos los autores se ajustan a lo establecido de límites máximos y mínimos de normativas tales como *ASTM C 33*, *NMX C 077*, *IRAM 1540* entre otras. Tal es el caso de *Rolón (2007)* que caracterizó hormigón elaborado con áridos reciclados (proveniente de pavimentos), y en su diseño de mezclas hizo 8 especímenes modificando la relación agua/cemento (a/c), el aditivo superfluidificador y la cantidad de agregados de remplazo en la mezcla, donde cada uno de ellos posee una composición granulométrica dentro los límites de *ASTM C 33*. *Martínez et.al.(2005)* quien elaboró mezclas de concreto reciclado con residuos de concreto premezclado, también ajusto su agregado grueso para que cumpliera con la norma.

La **absorción** es la propiedad más crítica para mezclas de concreto que integran agregado proveniente de escombros, la razón principal obedece a la importancia de conservar la relación agua-material cementante (a/c) que garantice la resistencia y/o seguridad estructural del concreto para la que fue diseñado. La variación de absorción en los agregados reciclados se debe a la porosidad del material, producto el mortero adherido en la superficie del mismo. Por lo general, y a menos que se utilicen aditivos (reductores de agua y similares) los concretos reciclados siempre demandarán mayores cantidades de agua para alcanzar la misma relación agua/cemento. Los valores típicos para agregados reciclados varían del 3 al 10% (kosmatka, 2004), Sin embargo existen casos como el de *Rolón (2007)* quien con valores de absorción arriba de 11%, que obtuvo resistencias cercanas a las de la mezcla de control (de agregados naturales), por lo que se indica que en algunos casos, cubriendo la demanda de agua en demasía, generada por absorción e incrementando los consumos de cemento, pueden alcanzarse resultados satisfactorios en el concreto, aunque cabe señalar que esto podría hacer antieconómica la mezcla de concreto en algunos casos.

De acuerdo a *Montrone (2008)* la absorción es sinónimo por lo menos de:

- Mayor contracción.
- Mayor demanda de agua.
- Mayor pérdida de asentamiento en el tiempo.
- Mayor permeabilidad.
- Menor durabilidad.
- Menor exudación.
- Menor módulo de elasticidad.
- Menor peso unitario.
- Menor resistencia a la compresión.
- Menor trabajabilidad.

A partir de la relevancia de la absorción del agregado reciclado, *Yang (2008)* publica en el ACI Materials Journal, en base a las Normas Industriales Coreanas para ensayos de concreto, una tabla que clasifica el agregado de acuerdo a su porcentaje de absorción con aplicación para material con estas características. La tabla 3-2 es pues un acierto relevante que puede facilitar la toma de decisiones acerca de cuan adecuado es el valor absorción para determinados usos, porque de cierto, existe una relación entre el nivel de absorción y la reducción de la resistencia a la compresión.

Tabla 3-2 Clasificación de agregados, según estándares Coreanos.

Clasificación de agregados por nivel de Absorción			
AGREGADO	TIPO	ABSORCIÓN	APLICACIÓN
GRUESO	I	< 3%	Concreto estructural
	II	< 5%	Concreto NO estructural
	III	< 7%	Concreto NO estructural para construcción de pavimentos
FINO	I	< 5%	Concreto estructural
	II	< 10%	Concreto No estructural

Fuente *Yang, 2008*.

Ensayos de *Yang (2008)* señalan que para agregados de baja absorción (menores del 5%), la resistencia a los 28 días se reduce un 10%, pero pasados los 60 días alcanza resistencia similar a la de la mezcla control, demostrando que la resistencia en un concreto de agregados reciclados de este tipo, no se reduce, sino que tarda más en desarrollarse. Otros ensayos *Montrone (2008)*, señalan que para agregados de alta absorción, el concreto experimenta pérdidas de 20% a más; *Muñoz (1975)* dice que es posible obtener concretos reciclados con resistencia del orden del 90% de un concreto natural (CN). Para esta aseveración se empleó agregado con 6.06% de absorción. *Rahal (2007)* corrobora lo que dice Muñoz de 90% de resistencia, pero con 3.47% de absorción, por debajo del 5% permitido por la norma. *Yang y Chang (2008)*: el concreto a base de agregado reciclado de alta absorción a edades tempranas alcanza de 60-80% de la resistencia obtenida por mezclas elaboradas con agregados naturales. *Romero (2004)* dice que el concreto de materiales reciclados alcanza resistencias entre 64 y 100% de un concreto con todos sus agregados naturales, mientras que *Montrone y Quispe (2007)* dicen que esta variación esta oscila 80 y 95% del valor de referencia.

MEZCLAS DE CONCRETO HIDRAULICO RECICLADO.

La **resistencia a la compresión** es probablemente la característica más importante y cuidada de las mezclas de concreto, debido a que su desempeño está íntimamente ligada a la seguridad, algunas de las propiedades relacionadas con la resistencia a la compresión son:

- Densidad.
- Impermeabilidad.
- Durabilidad.
- Resistencia a la abrasión.
- Resistencia al impacto.
- Resistencia a la tensión.
- Resistencia a los sulfatos.

Un concreto de mayor resistencia tendrá mejores propiedades.

La resistencia a la compresión es una de las referencias para durabilidad.

Estudios realizados en concretos a base de agregados reciclados señalan, que efectivamente hay menor resistencia a la compresión que aquellos concretos diseñados con agregados naturales, pero hay variación hasta en un 30% que está en función de la fuente del agregado, su limpieza de partículas finas, orgánicas y contaminantes, así como la calidad y cantidad de remplazo de agregados naturales por reciclados en la mezcla de concreto.

La tabla 3-3 presenta una recopilación de reducciones en la resistencia a la compresión del concreto que emplea agregados reciclados, con respecto al concreto tradicional, según varios autores:

Tabla 3-3 Reducción de resistencia a la compresión en concreto reciclado.

Fuente:	Reduccion a la resistencia
Jorge Muñoz (1975)	10%
Puig (2003)	15%
Frondistou (1981)	0 - 36%
Hansen (1983)	0% aumentado cantidad cemento
Romero (2004)	0-30%
Yang (2008)	0-40%
ABOU-ZEID, M. (2005)	10-20%
ACI committe 555 (2001)	15 - 40%
Martínez y Mendoza (2005)	2-7%
Ramamurthy y Gumaste (1998)	5 - 32%
Montrone y Quispe (2007)	5-20%
Martínez - Soto (2005)	3 - 25%

Fuente: Montrone modificado (2008).

El anexo 15 de la *Instrucción de Hormigón Estructural (EHE 2008)*, recomienda limitar el contenido de árido grueso reciclado al 20% en peso sobre el contenido total de árido grueso. Con esta limitación, las propiedades finales del hormigón reciclado apenas se ven afectadas en relación a las que presenta un hormigón convencional. Así mismo recomienda limitar en máximo 5% la fracción fina reciclada, porque afecta la calidad del hormigón.

Bedoya (2003) elaboró mezclas de concreto tradicional y reciclado 100%; con relación a/c de 0.488 y diseñadas para alcanzar a los 28 días 21MPa (214.14 Kg/cm²), absorción de finos reciclados de 8.34% versus 3.45% en finos naturales y absorción de gruesos reciclados de 5.35% versus 1.26% en gruesos naturales, con el siguiente resultado en la prueba de resistencia a la compresión a 28 días; especímenes reciclados 21.53Mpa y los naturales 21.56MPa, es decir la mezcla de agregados reciclados provenientes de escombros alcanzó el 99% de la resistencia de la mezcla de control.

Zega (2007) comparo tres mezclas de agregado grueso reciclado, con porcentaje de reemplazo de 25%, 50% y 75% contra las mezclas de concreto premezclado de las que provenían. Los resultados indican que la resistencia a la compresión a los 28 días, se redujo en 9% para los primeros dos reemplazos mencionados, pero el reemplazo de agregado grueso natural por 75% alcanzo decremento de 19% en su resistencia con respecto a la mezcla de control.

García (2009) elaboró 2 tipos de mezclas; de agregados de cantera (andesita natural) y la otra con el 100% de sus agregados provenientes de escombros de pavimento rígido, con de absorción de 3.86% y 7.64% respectivamente; la resistencia a la compresión de proyecto era de 250 Kg/cm² y la obtenida a los 28 días de edad fue de 355.42 Kg/cm² en los especímenes naturales y 349.29 Kg/cm² en los especímenes del pavimento reciclado; ambas mezclas cumplieron con la resistencia de proyecto y existe solo un decremento de la resistencia de la mezcla reciclada en 2% aproximadamente.

(*Tabsh, 2009*) Elaboró 2 tipos de mezclas cada una con 4 orígenes diferentes; origen del escombro desconocido, origen de demolición de escombros de resistencia 30MPa y de 50MPa, finalmente origen de cantera (agregados naturales), todas las mezclas compartían tamaño máximo de agregado de 19mm. Y revenimiento de 100mm. Los resultados de la mezcla 1 mostraron que entre los especímenes de agregado natural y de aquellos cuyo agregado reciclado provenia de escombros de resistencia 50Mpa, no existe diferencia significativa de resistencia a la compresión, no así con las mezclas de agregados provenientes de 30MPa y origen desconocido, que presentaron decremento de 30% y 40% aproximadamente en la resistencia a la compresión en relación con la mezcla de control

(agregados naturales). Un patrón similar ocurrió con la mezcla 2, pero los decrementos de resistencia para las mezclas con agregados de origen de 30MPa y desconocido, fueron 10% y 15% respectivamente. La aportación de Tabsh (2009), estriba principalmente en demostrar que la calidad y resistencia de los escombros de concreto impacta sobre la calidad y resistencia del concreto nuevo, así como la necesidad de clasificar y separar los escombros por características comunes que permitan reducir la variación de dispersión entre resultados de un mismo diseño.

Mukesh (2003) dice que respecto al agregado natural, el reciclado tiene una densidad entre 4 a 8% más baja, y una mayor capacidad de absorción de agua (2 a 6 veces), sin embargo que la resistencia no se ve afectada hasta el 30% de reemplazo con agregado reciclado en una mezcla de concreto.

Romero (2004) señala que con reemplazo máximo de 40% por agregados reciclados se alcanza casi el 100% de la resistencia que la mezcla control (con agregados naturales), sin embargo al reemplazo de 100% con agregado reciclado la mezcla alcanza hasta 70% de resistencia a la compresión del total alcanzado por la mezcla control.

Como podemos observar, a partir de los datos expuestos anteriormente, es difícil tratar de predecir la resistencia a la compresión debido a que los diseños de mezclas, las capacidades de carga, tiempo de servicio, condiciones a las que estuvo expuesto el concreto en su obra anterior, entre otras variables; son diferentes en todos los casos. Sin embargo las características y comportamiento del hormigón a base de agregados reciclados está en función del agregado madre. Por ello hay que caracterizar el material con el que se va a trabajar. Esta labor caracterización es importante porque hacerla correctamente implica que los resultados obtenidos pueden ser válidos para muestras con características similares.

3.3 REVISIÓN DE NORMATIVA DE MATERIALES PARA CONCRETO.

El concreto hidráulico y los materiales que lo componen están sujetos a normativa que busca garantizar la calidad de los mismos y de las obras de las que formaran parte, en este sentido, el presente proyecto consulta y aplica de los lineamientos establecidos en las normas oficiales mexicanas (NOM) y se toma como referencia normativa internacional que sustenta tanto los procedimientos de prueba, como los resultados obtenidos a partir de la aplicación de los mismos. A título enunciativo, más no limitativo, se presenta la siguiente tabla con la normativa utilizada en la presente investigación:

Tabla 3-4 Normativa utilizada para pruebas a materiales y concreto hidráulico.

Norma Oficial Mexicana	Descripción de la Prueba:	Referencia	Etapas:
NMX-C-073-ONNCCCE-2004	Masa volumétrica.	ASTM-C-029	Caracterización de los materiales.
NMX-C-077-ONNCCCE-1997	Análisis granulométrico.	ASTM-C-033	
NMX-C-111-ONNCCCE-2004	Especificaciones y métodos de prueba.	ASTM-C-136	
NMX-C-152-ONNCCCE-2010	Determinación de la densidad del cemento	ASTM-C-127	
NMX-C-164-ONNCCCE-2002	Determinación de la masa específica y absorción de agua del agregado grueso.	ASTM-C-128	
NMX-C-165-ONNCCCE-2004	Determinación de la masa específica y absorción de agua del agregado fino.	ASTM-C-128	
NMX-C-166-ONNCCCE-2006	Contenido de agua por secado.	ASTM-C-566	Elaboración
NMX-C-436-ONNCCCE-2004	Coefficiente volumétrico (de forma) en agregado grueso.	NCh 1511	
NMX-C-159-ONNCCCE-2004	Elaboración y curado de especímenes en el laboratorio.	ACI 211	Pruebas al concreto en estado fresco
NMX-C-156-ONNCCCE-2010	Determinación del revenimiento en el concreto fresco.	ASTM-C-143	
NMX-C-162-ONNCCCE-2010	Determinación de la masa unitaria, cálculo de rendimiento y contenido de aire del concreto fresco por el método gravimétrico.	ASTM-C-138	Pruebas al concreto en estado fresco
NMX-C-083-ONNCCCE-2002	Determinación de la resistencia a la compresión de cilindros de concreto.	ASTM-C-039	
NMX-C-128-ONNCCCE-1997	Determinación del módulo de elasticidad estático y relación de Poisson.	ASTM-C-469	
NMX-C-163-ONNCCCE-1997	Determinación de la resistencia a la tensión por compresión diametral de cilindros de concreto.	ASTM-C-496	
NMX-C-191-ONNCCCE-2004	Determinación de la resistencia a la flexión del concreto usando una viga simple con carga en los tercios del claro.	ASTM-C-078	

Se describe a continuación objetivo, utilidad y consideraciones de cada una de las pruebas enlistadas en la tabla anterior, de tal forma que el resultado de llevarlas a cabo otorgue información valiosa sobre los materiales o combinación de los mismos para determinar el uso y en qué medida estos pueden ser dispuestos.

AGREGADOS PARA CONCRETO HIDRÁULICO:

En la normativa NMX-C-111-ONNCCE-2004, se definen las especificaciones y métodos de prueba a los que se tienen que sujetar los agregados para concreto hidráulico, ya sean naturales o procesados, como es el caso de los agregados reciclados, de uso común para la producción de concretos de masa normal. Se entiende por concretos normales aquellos que usualmente tienen una masa específica de 1800 kg/m³ a 2400 kg/m³, quedan excluidos los concretos ligeros que tienen masa específica menor de 1800kg/m³, independientemente del origen de los agregados que lo integran.

En NMX-C-111-ONNCCE-2004 se describe a grosso modo las normativas requeridas para poder evaluar las propiedades, características y comportamiento de los agregados para concreto hidráulico, así como en que consiste la determinación de cada una de las propiedades y su vinculación con otras normas asociadas para su correcta ejecución. Destacando los límites granulométricos del agregado grueso y fino, mapas de clasificación de intemperismo, riesgo, temperatura, entre otros. También pone énfasis en las propiedades químicas de los materiales y establece límites permisibles y tolerancias de aceptación de diferentes tipos de agregados.

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO:

La granulometría puede ser definida como la proporción de participación de material granular, de una muestra, en función de sus tamaños, y su correspondiente distribución de manera gráfica, a partir de la cual se puede estimar la composición y tipo de suelo o material.

Este ensayo se encuentra normado en NMX-C-077-ONNCCE-1997 y establece el método para análisis granulométrico de agregados finos y gruesos, con el fin de determinar la distribución de las partículas de diferentes tamaños por medio de cribas.

Existen maneras diferentes para analizar al agregado grueso y al fino de una muestra, se indica en la norma y se utilizan cribas en tamaño descendente para determinar la cantidad de presencia porcentual de cada partícula.

La muestra debe obtenerse de acuerdo a la norma NMX-C-030 y reducirse de acuerdo a NMX-C-170, de tal manera que se garantice que sea representativa, aquella porción que se somete a análisis. Para el caso específico del presente proyecto, la masa mínima de muestra de acuerdo a lo indicado en NMX-077 es de 8 Kilogramos, lo cual puede verse en la siguiente tabla, de la fracción que pase la malla no. 4, medio kilogramo representativo de la muestra, será suficiente para granulometría de agregado fino.

Tabla 3-5 Masa mínima de muestra de acuerdo al Tamaño nominal del agregado grueso

Tamaño nominal máximo (mm)	Masa mínima de la Muestras (Kg)
10	2
13	4
20	8
25	12

Fuente: Tomado de NMX-C-077-ONNCCE.

El procedimiento de prueba consiste en pesar el material antes de su ingreso al set de cribas en orden descendente de aberturas con una tapa en la parte superior y una charola (fondo) en la parte inferior, agitando el material en

forma manual o mecánica por un tiempo suficiente. Usualmente es satisfactorio el cribado en seco de agregados de granulometría normal, sin embargo cuando se desea mayor exactitud del total que pasa por la malla no. 200, primero se criba la muestra por lavado de acuerdo con lo establecido en la NMX-C-084.

Una vez cribado el material y registrados los porcentajes de cada uno retenido en cada malla, se procede a realizar la curva de distribución granulométrica, la cual es presentada en escala semilogarítmica, y de la cual puede identificarse el tipo de material y su distribución de tamaños.

Se dice que el material es “bien graduado”; cuando los tamaños de las partículas están distribuidos sobre un amplio rango. Este presenta un coeficiente de uniformidad (Cu) mayor de aproximadamente 4 para gravas y 6 para arenas, y un coeficiente de curvatura (Cc) entre 1 para gravas y 3 para arenas. También puede ser “mal graduado” cuando la mayoría de los granos son del mismo tamaño. La “granulometría discontinua” será cuando el material presenta una combinación de dos o más fracciones uniformemente graduadas o se omitan intencionalmente algunos tamaños de partículas.

COEFICIENTE VOLUMÉTRICO:

También conocido como coeficiente de forma, se define como la relación que existe entre la suma de los volúmenes de las partículas representativas del agregado grueso que componen una muestra con la suma de los volúmenes de las esferas que circunscriben a cada partícula de dicha muestra. Lo anterior es importante porque permite calificar la forma de los agregados gruesos (es decir, aquellas partículas que se retienen en la malla o criba conocida como No. 4 de abertura en milímetros de 4.75mm), para la optimización de las mezclas.

Se realiza en base a determinación del volumen de la muestra, la medición de cada una de las 50 o más partículas y la aplicación de una serie de fórmulas que se presentan en la normativa mexicana NMX-C-436-ONNCCE-2004. Cabe mencionar que la norma francesa NFP-18-301 y la Nch 1511, permiten también esta útil caracterización de la forma del agregado.

Se sabe que un árido de forma angulosa, obtenido generalmente por trituración, es perjudicial para la buena trabajabilidad del concreto, En muchos casos es obligado utilizar tales materiales por cuestiones de proximidad entre la obra y la cantera. Sin embargo utilizar grava y arena con este origen puede afectar la manejabilidad, no tener una buena compacidad o superficie bien terminada. El coeficiente volumétrico es tanto más elevado cuanto más redondeada sea la forma del árido, para el caso de la grava un buen valor mínimo sería 0.20, sin embargo la manejabilidad del hormigón dependerá más de la granulometría de la arena. (Gorisse, 1981)

MASA VOLUMÉTRICA, MÉTODO DE PRUEBA.

Este método se encuentra normado en NMX-C-073-ONNCCE-2004 y aplica tanto para los agregados finos y gruesos, o combinación de ambos, siempre y cuando su tamaño nominal no exceda de 150mm. La masa volumétrica se define como la masa de un material por unidad de volumen, siendo el volumen el ocupado por el material en un recipiente especificado.

El material a probar se somete a secado en horno, se mide su masa seca, y tras la calibración del recipiente con agua y a determinada temperatura, se calcula un factor de corrección que multiplicará al material contenido en el mismo recipiente que se calibró con agua, en dos exhibiciones distintas el material ingresado al recipiente compactando con varilla “punta de bala” al que se llama masa volumétrica compactada y otra forma en donde el material es vaciado en el recipiente sin impacto alguno, al que llamamos masa volumétrica suelta; como se indica en la norma, el peso del material en el recipiente es multiplicado por el factor de corrección en un metro cúbico para la determinación en ambas masa volumétricas.

El concreto convencional, normalmente usado en pavimentos, edificios y otras estructuras, tiene masa volumétrica (masa unitaria) que varía de 2200 hasta 2400 Kg/m³. La masa volumétrica del concreto varía dependiendo de la cantidad y la densidad del agregado, el contenido de aire y la cantidad de agua y cemento (kosmatka, 2004). Cabe destacar que el TMA influye en las cantidades de agua y cemento; al reducirse la cantidad de pasta (aumentándose la cantidad de agregado) se aumenta la masa volumétrica.

DETERMINACIÓN DE LA MASA ESPECÍFICA (DENSIDAD) Y ABSORCIÓN DE AGUA DEL AGREGADO FINO Y GRUESO, MÉTODOS DE PRUEBA:

Estos métodos se encuentran normados en NMX-C-165-ONNCCE-2004 para agregados finos y NMX-C-164-ONNCCE-2002 para agregados gruesos. Aunque los procedimientos son diferentes, en ambos casos la muestra de material es sometida a saturación de agua por 24 horas, se determina el estado de masa del material saturado y superficialmente seca (sss), que se define como aquel donde la partícula tiene saturados por agua todos los vacíos internos que tiene la partícula, y superficialmente seca exteriormente; existen formas diferentes que marcan las normas para identificar cuando se alcanza esta condición, pero en función de esta y de la masa en estado seco, se logra la determinación de estas propiedades que serán utilizadas para el cálculo y la dosificación del concreto elaborado con cemento hidráulico. La Absorción es una de las propiedades más importantes para este fin, debido a que pone en riesgo la estabilidad de la relación agua/cemento y por ende cambios en la resistencia especificada del concreto elaborado.

La densidad de las partículas de la mayoría de los agregados naturales está entre 2400 y 2900 Kg/m³; en agregados reciclados la densidad es menor, pero variable porque depende del origen de los mismos. Con respecto a la absorción de los agregados grueso y fino naturales, tienen niveles de absorción (contenido de humedad a sss) que varían de 0.2 % al 4% y de 0.2 a 2% respectivamente. Los contenidos de agua libre generalmente varían de 0.5% al 2% para el agregado grueso y del 2% al 6% para el agregado fino; en agregados reciclados los valores de absorción típicamente varían del 3% al 10%. (kosmatka, 2004).

DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE AGUA POR SECADO, MÉTODO DE PRUEBA:

Plasmado en NMX-C-166-ONNCCE-2006 es una prueba relativamente sencilla y que el valor obtenido de esta prueba es utilizado en otras para el cálculo de otras propiedades de caracterización de materiales, se define el contenido total de agua como la cantidad de agua que contiene la muestra de agregado, al momento de efectuar la determinación de su masa, para dosificar una revoltura, pudiendo estar constituida por la suma de agua superficial y la absorbida. Las muestras homogenizadas serán de acuerdo a NMX-C-030 y para el agregado de tamaño nominal 20mm del presente proyecto, se necesitan 3 kilogramos de acuerdo a la presente normativa y para el agregado fino 0.5 kilogramos. El procedimiento para Determinación del contenido de agua por secado, requiere solo de los datos de masa humedad de la muestra, masa seca de la misma y el cálculo porcentual del contenido de agua (H) presente en ella.

El contenido de humedad que contenga el agregado, será junto la absorción que pueda presentar el mismo, los responsables de otorgar la información suficiente que permita realizar corrección de la dosificación de agua a la mezcla de concreto, de tal forma que la relación agua/cemento (a/c) de proyecto no se pierda.

DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD DEL CEMENTO HIDRÁULICO:

Método de prueba descrito en NMX-C-152-ONNCCE-2010, este ensayo determina la densidad de los cementantes hidráulicos, en función de la relación de la masa del cementante en gramos, entre el volumen en mililitros que desplaza al introducirse en un líquido, con el cual no se efectuó reacción química alguna.

Se necesita de un matraz especial denominado Matraz Chatelier, el cementante hidráulico y un reactivo como Keroseno, en nuestro caso particular utilizamos gasolina blanca para realizar la determinación de la densidad.

La masa específica del cemento varía de 3.10 hasta 3.25 gr/cm³, sin embargo en los últimos años en México, se han desarrollado cementos con densidad menor, tal es el caso de los productos comerciales de CEMEX y HOLCIM de clase resistente 30 y 40, con densidad de 3.04 gr/cm³, que cumplen con lo estipulado en la norma mexicana NMX-414-ONNCCE.

3.4 PROPORCIONAMIENTO, ELABORACIÓN Y CURADO DE ESPECÍMENES DE CONCRETO.

DISEÑO DE MEZCLAS DE CONCRETO HIDRÁULICO.

“El objetivo al diseñar una mezcla de concreto consiste en determinar la combinación más práctica y económica de los materiales con los que se dispone, para producir un concreto que satisfaga los requisitos de comportamiento bajo las condiciones particulares de uso. Para lograr tal objetivo, una mezcla de concreto bien proporcionada deberá poseer las propiedades siguientes:” (Kosmatka, 1992)

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

Los métodos de proporcionamiento han evolucionado desde el arbitrario método volumétrico (1:2:3 - cemento: arena: agregado grueso) hasta los métodos actuales de peso y volumen absoluto descritos en la práctica estándar para el proporcionamiento de mezclas de concreto del Comité 211 del American Concrete Institute (ACI).

El método de proporcionamiento por peso, es muy simple y consiste en utilizar un peso supuesto o conocido del concreto por unidad de volumen. *El método de volumen absoluto es más exacto que el anterior, debido a que involucra el uso de los valores de la densidad de todos los ingredientes para calcular el volumen absoluto que cada ingrediente ocupará en la unidad de volumen de concreto. Cabe señalar que una mezcla de concreto se puede proporcionar a partir de experiencias de campo (datos estadísticos), o de mezclas de prueba de concreto.* (Kosmatka, 1992)

Para el caso particular de este proyecto, se utilizó el método de proporcionamiento por volumen absoluto.

Se diseña de acuerdo a $f'c$ = Resistencia a compresión especificada en el concreto, (Kg/cm²). Sin embargo se emplea un tipo de factor de seguridad, que aplica principalmente de acuerdo $f'cr$ (consultar ACI 211 YACI 318), a lo que se denomina $f'cr$ = Resistencia a compresión promedio del concreto requerida como base para la selección de las proporciones del concreto, (Kg/cm²), lo anterior debe garantizar que la resistencia a compresión especificada en el concreto siempre se cumpla, aun cuando pudieran presentarse anomalías en el transporte y/o colocación del concreto en obra, ya sea por causas humanas o naturales, dentro de ciertos escenarios moderados.

ELABORACIÓN Y CURADO DE ESPECÍMENES CONCRETO HIDRÁULICO EN EL LABORATORIO.

Procedimiento descrito en la normativa NMX-C-159-ONNCCE-2004, De manera similar como lo hace la NMX-C-111, en esta norma se definen las especificaciones y métodos para elaborar especímenes de concreto hidráulico de diferentes formas y características para las diferentes pruebas destructivas que se realizan al concreto en estado endurecido, que a saber son pruebas de resistencia a la compresión, a la flexión y a la tensión diametral, pues para diferentes procedimientos se requieren probetas en forma cilíndrica y prismática rectangular, las

dimensiones y materiales se detallan en esta norma. Adicionalmente se describen los equipos y herramientas para la elaboración de las pruebas a las mezclas de concreto hidráulico en estado fresco, tras la detallada explicación que se otorga acerca de cómo se deben preparar la revoltura de materiales y como deben ser maniobrados para llenar los moldes de los especímenes. Finalmente el método de curado de los elaborados, puede ser por humedad ambiente (por aspersión) o por inmersión de los especímenes desmoldados en agua a temperatura constante a los 23 grados centígrados, para su respectiva prueba a los 7 o 28 días, siendo este último el periodo en el que se alcanza la máxima resistencia posible del concreto elaborado.

3.5 PRUEBAS AL CONCRETO EN ESTADO FRESCO.

DETERMINACIÓN DEL REVENIMIENTO EN EL CONCRETO FRESCO.

Este procedimiento se encuentra en la norma NMX-C-156-ONNCCE-2010 la cual establece como determinar la consistencia del concreto hidráulico en estado fresco, mediante el método conocido como revenimiento o slump, obteniéndose valores confiables entre 2cm. a 20cm. en concreto fresco de tamaño máximo nominal menor a 50mm.

Esta prueba se lleva a cabo sobre una superficie no absorbente en molde de acero con llenado de 3 capas de la mezcla de concreto acompañadas de 25 impactos en cada una de ellas (sin tocar el molde o la placa de apoyo), seguido en la última de un enrasado y eliminación de residuos que pudieran estorbar el libre desplazamiento del concreto si su consistencia se lo permite al levantar de forma vertical el molde, finalmente se mide el desplazamiento del concreto desde el nivel de la parte superior del molde a 30 centímetros, la medición representa directamente el revenimiento de la mezcla. Este procedimiento debe realizarse en un tiempo no mayor a 2.5 minutos.

El ensayo de revenimiento (asentamiento) se usa para medir la plasticidad (facilidad de moldeo del concreto) y la consistencia, es decir; capacidad del concreto para fluir. El revenimiento es un indicador de trabajabilidad cuando se evalúan mezclas similares. *Para una dada proporción de cemento y agregado, sin aditivos, cuanto mayor el revenimiento, más húmeda es la mezcla.* (kosmatka, 2004)

Son necesarios diferentes valores de revenimiento para varios tipos de construcción y existen recomendaciones internacionales para cada uno de ellos, el rango de los mismos varia generalmente entre 2.5 a 10 cm. Cabe señalar que el rango de revenimiento tiene tolerancia de + 2.5cm, de acuerdo al ACI 211.1 cuando los métodos de consolidación se realizan por medios manuales (varillado o picado).

DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE AIRE EN EL CONCRETO FRESCO.

Esta determinación puede realizarse por el método de presión, volumétrico y gravimétrico, el resultado de la aplicación de cualquiera de los tres métodos, es equivalente, por lo que serán considerados validos en el marco de la correcta ejecución de los mismos.

La norma NMX-C-157-ONNCCE-2006 establece el procedimiento para determinar el contenido de aire por el método de presión, con base en la observación del cambio en el volumen del concreto con respecto al cambio de presión, usando dos tipos de medidores. Se recomienda su uso para concretos y morteros elaborados con agregados de masa especifica mayor o igual a 2.10 Kg/m³. Y no es aplicable a concretos elaborados con agregados ligeros, porosos, o de bajo revenimiento (por ser poco plásticos). Es importante tomar en cuenta que el porcentaje de contenido de aire de la muestra probada, sufrirá una reducción, mediante el factor de corrección por agregado.

La norma NMX-C-162-ONNCCE-2010 establece los procedimientos para determinar la masa unitaria, cálculo del rendimiento y contenido de aire por el método gravimétrico, aplicable al concreto fresco industrializado o hecho en obra. No es aplicable a los concretos secos o de bajo revenimiento, tales como los que se usan en la fabricación de elementos precolados.

La masa unitaria se define para este caso como la cantidad de materia contenida en un metro cúbico de concreto fresco (kg/m^3). La obtención de la misma será mediante el llenado de un recipiente especificado y la diferencia de peso del recipiente y este lleno con la mezcla de concreto, multiplicado por el con factor de calibración del recipiente.

En base a la determinación de masa unitaria se podrá calcular el rendimiento del concreto (el volumen de concreto fresco producido por una cantidad de ingredientes, obtenido del cociente del valor de la masa total de los mismos entre el valor de la masa unitaria del concreto fresco) y el contenido de aire (el volumen de vacíos en la pasta de concreto excluyendo el espacio de los poros en las partículas del agregado, usualmente expresado como un porcentaje del volumen total de la mezcla de concreto o mortero). Las fórmulas para los respectivos cálculos están contenidos en la presente normativa.

3.6 PRUEBAS AL CONCRETO EN ESTADO ENDURECIDO.

DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE CILINDROS DE CONCRETO HIDRÁULICO, MÉTODO DE PRUEBA.

La norma NMX-C-083-ONNCCE-1997 es aplicable a especímenes cilíndricos moldeados y corazones de concreto con masa volumétrica mayor a $900 \text{ Kg}/\text{m}^3$.

Se establecen los procedimientos para determinar la resistencia a la compresión de cilindros, la norma establece criterios de corrección por esbeltez (para el caso de los especímenes elaborados en este proyecto no se requirió factor de corrección por esbeltez, debido a que la altura de los especímenes no fue menor a 1.8 veces el diámetro, de hecho los moldes tienen las características adecuadas para garantizar esta relación), cuando esto llega a ser necesario, se debe principalmente a que se tuvieron que realizar cortes al especímenes por problemas de acabado o daño en alguna de sus superficies durante el manejo o descimbrado, y que no pueden ser corregidas mediante simple cabeceo con azufre.

DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA FLEXIÓN O MODULO DE RUPTURA DEL CONCRETO HIDRÁULICO.

Se define el módulo de ruptura como el valor obtenido mediante el procedimiento indirecto para determinar la resistencia a la tensión del concreto por el ensaye de flexión de una viga.

La norma NMX-C-191-ONNCCE-2004 establece el método de prueba para la determinación de la resistencia a la flexión o módulo de ruptura utilizando una viga simple con carga en los tercios del claro.

Se establecen las dimensiones de los especímenes de prueba, así como las características del equipo y maquinaria de prueba. Se denota la necesaria realización del correcto muestreo de la revoltura, curado, descimbrado y aplicación de la carga a velocidad uniforme, de tal manera que el aumento de esfuerzo de las fibras extremas no exceda de $980 \text{ KPa}/\text{min}$ ($10 \text{ Kg}/\text{cm}^2$ por minuto), permitiéndose velocidades mayores antes del 50% de la carga estimada de ruptura; sobre por lo menos 2 especímenes a la misma edad de proyecto.

Alternativamente puede estimarse el módulo de ruptura para concreto de peso normal en 2 y 1.4 veces la raíz cuadrada de la resistencia a la compresión para concretos clase uno y clase dos, respectivamente, con buena precisión y de acuerdo a lo establecido en las normas técnicas complementarias para diseño y construcción de estructuras de concreto del Reglamento de Construcciones del Distrito Federal (RCDF), publicadas en la gaceta oficial del Distrito Federal el día 6 de Octubre de 2004 en la sección 1.5.1 de este documento.

DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA TENSIÓN POR COMPRESIÓN DIAMETRAL EN CILINDROS DE CONCRETO HIDRÁULICO.

La norma NMX-C-163-ONNCCE-1997 establece el método de prueba para la determinación de la resistencia a la tensión utilizando cilindros de concreto hidráulico.

Se definen las instrucciones para el marcado del espécimen, en el cual se deben dibujar líneas diametrales, así mismo el centrado del cilindro para la aplicación de la carga en el dispositivo de prueba. Con respecto a la aplicación de la carga debe ser continua y sin impacto, a velocidad constante, de tal manera que se logren esfuerzos de tensión por compresión diametral de 149 kPa a 1475 kPa. (De 5 a 15 Kg/cm²) por minuto hasta la falla del espécimen. Cuando este tiene las dimensiones estándar de 15x30cm. El rango de esfuerzos por tensión corresponde a una carga aplicada aproximadamente entre 34 kN. Y 104 kN. (3467 Kg y 10605Kg) por minuto. Se registra la carga máxima aplicada, indicada por la máquina de prueba en el momento de la falla, se debe observar y reportar el tipo de falla y la apariencia del concreto.

Alternativamente puede estimarse la resistencia a la tensión para concreto de peso normal en 1.2 y 1.5 veces la raíz cuadrada de la resistencia a la compresión para concretos clase uno y clase dos, respectivamente, con buena precisión y de acuerdo a lo establecido en las normas técnicas complementarias para diseño y construcción de estructuras de concreto del Reglamento de Construcciones del Distrito Federal (RCDF), publicadas en la gaceta oficial del Distrito Federal el día 6 de Octubre de 2004 en la sección 1.5.1 de este documento.

DETERMINACIÓN DEL MODULO DE ELASTICIDAD ESTÁTICO.

La norma NMX-C-128-ONNCCE-1997 establece el método de prueba para la determinación del Módulo de Elasticidad Estático Secante (Modulo de Young) que se define como a la relación que existe entre el esfuerzo y la deformación unitaria axial (Es la pendiente de la secante definida por dos puntos de la curva del esfuerzo–deformación dentro de la zona elástica. Así mismo se establece la forma para la determinación de la relación de Poisson que se define como la relación entre las deformaciones transversal y longitudinal, dentro del comportamiento elástico, en especímenes cilíndricos de concreto, cuando se someten a esfuerzos de compresión longitudinal.

El ensaye de los especímenes requiere de una preparación y acondicionamiento de las muestras elaboradas, que requerirá de la colocación de micrómetros y la aplicación de carga en una prensa universal. Se requieren mínimo de 5 especímenes para determinar el módulo de elasticidad para el caso de cilindros elaborados en laboratorio.

Alternativamente puede estimarse el módulo de elasticidad del concreto de peso normal en 14,000 y 8,000 veces la raíz cuadrada de la resistencia a la compresión para concretos clase uno y clase dos, respectivamente, con buena precisión y de acuerdo a lo establecido en las normas técnicas complementarias para diseño y construcción de estructuras de concreto del Reglamento de Construcciones del Distrito Federal (RCDF), publicadas en la gaceta oficial del Distrito Federal el día 6 de Octubre de 2004 en la sección 1.5.1 de este documento.

4 METODOLOGIA.

Los alcances del presente estudio son la evaluación de la factibilidad de reintegración de los escombros de concreto hidráulico estudiados en 30% de reemplazo de agregados naturales, para la construcción de pavimentos y obras complementarias, destacando los pros y contras del concreto reciclado en comparación del concreto tradicional a base de agregados 100% naturales.

Las etapas del proyecto **Reutilización de escombros de concreto hidráulico en nuevos procedimientos constructivos** son las siguientes:

Investigación teórica.

Investigación de campo.

Pruebas a materiales.

Diseño de mezclas de concreto reciclado.

Ensaye de Especímenes

Evaluación de Resultados.

Difusión.

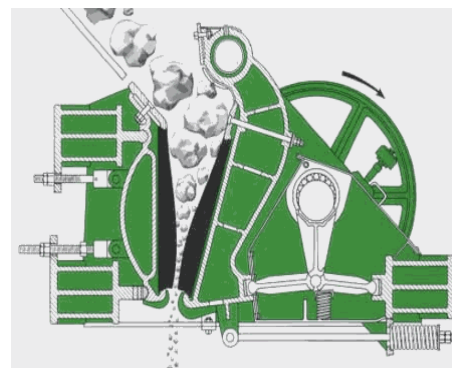
El estudio es experimental-longitudinal. Es decir tiene diferentes evaluaciones en el tiempo, mediante múltiples y repetidas pruebas a los materiales provenientes escombros de concreto, para conocer sus propiedades físicas y mecánicas; de tal forma que permitan caracterizar los mismos mediante valores medibles y comparables, así como establecer rangos de operación, respuesta y desempeño de los materiales a las diferentes pruebas, con el fin de comparar ambos agregados de acuerdo a su fuente y ambos concretos de acuerdo a su composición.

La muestra es probabilística. Se tomará como muestra solo escombros de concreto hidráulico de tipo o clase I (con $f'c = 250 \text{ kg/cm}^2$ o superior) para disminuir la variación de resistencia entre los especímenes y para caracterizar un grupo específico muestral con características definidas, Quedan excluidas aquellas muestras de concreto hidráulico residual cuyos materiales estén contaminados con materia orgánica u algún otro tipo de agente que modifique las propiedades de la nueva mezcla de concreto hidráulico a la que forme parte el escombro en forma de agregado triturado de tamaño máximo de 19.05mm (3/4 de pulgada), así mismo aquellas muestras donde el acero no pueda ser removido o ha presentado alta corrosión. Quedan excluidas aquellas muestras de concreto hidráulico residual para los cuales se desconoce la naturaleza u origen de los componentes que lo integran.

Con respecto al origen de los escombros utilizados en este proyecto, estos provienen de residuos de construcción y demolición (Banqueta y remanente de concreto hidráulico premezclado con $f'c = 250 \text{ kg/cm}^2$) de instalaciones de Cety's Universidad en Mexicali, Baja California.

Con respecto al procedimiento de trituración (se incluye un anexo), se procedió a una trituración primaria mediante impacto con retroexcavadora y posteriormente de forma manual hasta conseguir tamaños del escombro de hasta 3 pulgadas de longitud, para ser ingresados en la trituradora de mandíbulas o quijadas (ver Imagen 4.1), que entrega a su salida un tamaño máximo de agregado de $\frac{3}{4}$ de pulgada. Equipo destinado principalmente para trituración primaria de materiales cuya resistencia sea menor a 32MPa, la reducción se lleva a cabo entre 2 quijadas, una estacionaria y otra quijada móvil. Este Equipo pertenece a las instalaciones del laboratorio del programa educativo de Ingeniero Civil, Facultad Ingeniería, Campus Mexicali, de la Universidad Autónoma de Baja California.

Tabla 4-1 Trituradora de mandíbulas.



La serie de pruebas de aplicación son aquellas que señalan la Normativa Oficial Mexicana (NOM) principalmente y American Society Testing Materials (ASTM) como referencia, para agregados y muestras de concreto hidráulico, en tres categorías, que a saber son las siguientes:

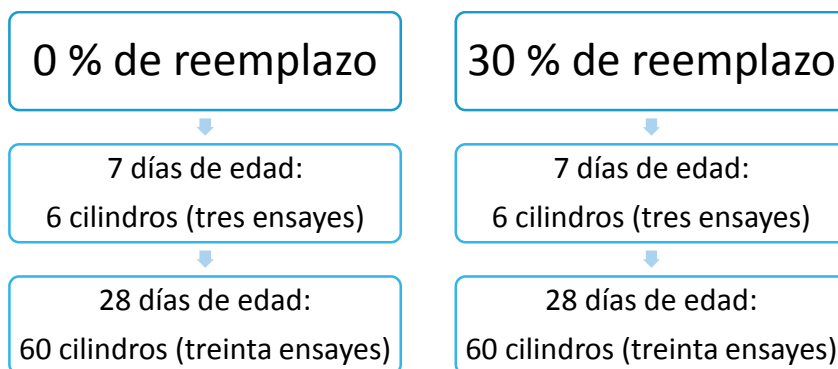
Tabla 4-2 Listado de pruebas de laboratorio ejecutadas por grupos.

Características de los materiales	Pruebas al concreto en estado fresco	Pruebas al concreto en estado endurecido
<ul style="list-style-type: none"> •NMX-C-077-1997-ONNCCE •NMX-C-436-ONNCCE-2004 •NMX-C-152-ONNCCE-2010 •NMX-C-166-ONNCCE-2006 •NMX-C-164-ONNCCE-2002 •NMX-C-165-ONNCCE-2004 •NMX-C-073-ONNCCE-2004 	<ul style="list-style-type: none"> •Elaboracion y curado de especímenes (cilindros): •NMX-C-159-ONNCCE-2004 •NMX-C-156-ONNCCE-2010. •NMX-C-162-ONNCCE-2010. 	<ul style="list-style-type: none"> •NMX-C-083-ONNCCE-2002 •NMX-C-191-ONNCCE-2004 •NMX-C-163-1997-ONNCCE •NMX-C-128-1997-ONNCCE

Los resultados de cada prueba caracterizarán las muestras de concreto hidráulico para compararlos entre sí (concreto tradicional versus concreto reciclado), verificando que estén de acuerdo a lo permitido por la normativa correspondiente y los usos permitidos por el reglamento de construcciones vigente y aplicable, se analizaran estadísticos descriptivos de los especímenes probados, para a partir de la totalidad de resultados, emitir un reporte y las conclusiones generales sobre la factibilidad de integrar escombros a nuevos procedimientos constructivos, como es el caso de obras complementarias de pavimentos, mediante mezclas de concreto hidráulico.

La cantidad de cilindros que deben elaborarse, surge a partir de la publicación del Comité ACI 318, en la que se establece el procedimiento para validar los resultados de resistencia a la compresión; la cantidad es de 30 ensayos y cada ensaye consta de dos cilindros que se sirven de testigos para corroborar la no dispersión de resultados en una muestra de concreto hidráulico que debe ser homogénea en toda su producción.

El Diseño de mezclas para concreto hidráulico se realizará en los porcentajes de reemplazo del agregado grueso natural por reciclado, de 0% y 30% de reemplazo, con el propósito de verificar el comportamiento del concreto en estado fresco y endurecido.



Para el caso de las mezclas de concreto reciclado de este proyecto no se tienen datos estadísticos que representen mezclas con los mismos materiales, proporciones y condiciones de colado que serán empleadas en el nuevo proyecto, Debido a la naturaleza de los materiales reciclados que las integran, no habiendo antecedente alguno de su uso, en la región noroeste de México. Por lo cual se elaboraran 30 ensayos consecutivos (un ensaye es la resistencia promedio de dos cilindros tomados de una misma muestra), para determinar una desviación estándar que represente la variación típica de estas mezclas.

Para el caso de las mezclas tradicionales (con todos sus agregados naturales o vírgenes), aun con datos estadísticos, no se cuenta con registros propios, por lo que se realizarán también 30 ensayos a fin de tener una comparativa objetiva de mezcla de referencia de los mismos materiales, proporciones y condiciones de elaboración; con las mezclas de concreto reciclado

5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

5.1 CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES.

GRANULOMETRÍA

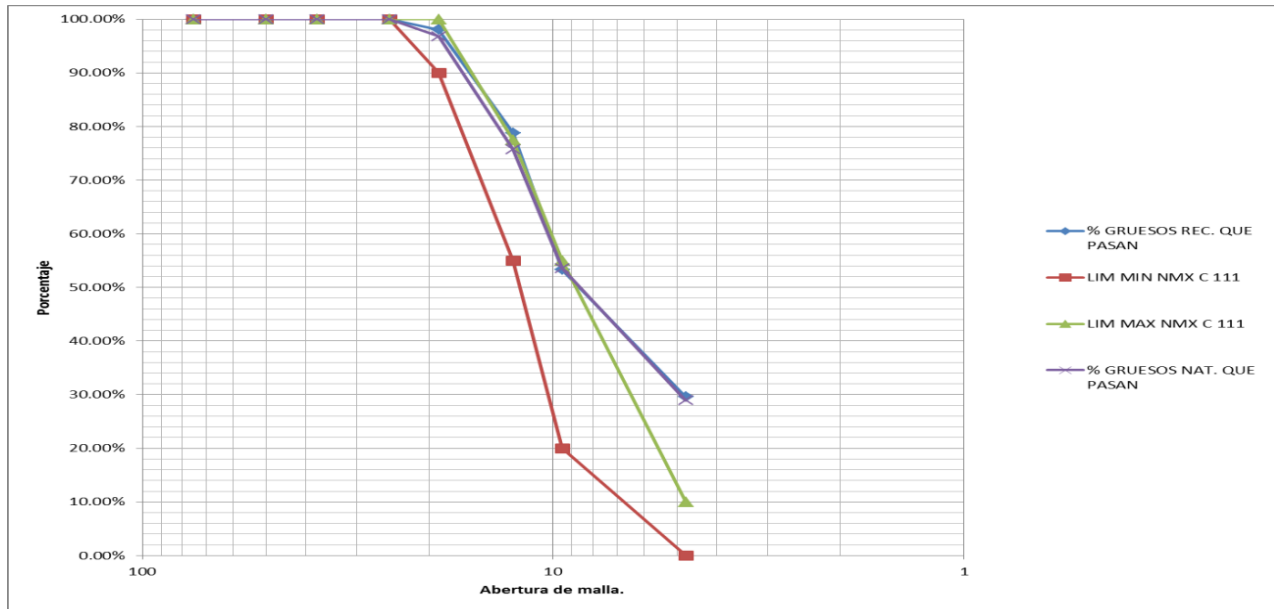
Los agregados utilizados para la elaboración del concreto hidráulico fueron sometidos a la aplicación de los procedimientos indicados en la norma mexicana NMX-C-077-1997-ONNCCE y NMX-C-111-ONNCCE-2004. El tamaño máximo de agregado (TMA) obtenido tras la trituración de escombros fue de 19mm., por tal razón se estableció como TMA para ambas muestras que serían utilizadas en la elaboración de concreto hidráulico, así mismo acorde al tipo de obra propuesta. Las muestras fueron homogenizadas, cuarteadas y posteriormente se obtuvo la granulometría tanto para la fracción gruesa como la fina.

Los resultados de la tabla 5-1, presentan las columnas de TAMICES (que corresponde a la abertura en milímetros y designación de la misma), 70N.30R. (Que corresponde al porcentaje acumulado de material que pasa por los tamices de cada fila, de la muestra que incluye el reemplazo del 30% de los agregados gruesos naturales por agregados reciclados), 100NAT. (Que corresponde al porcentaje acumulado de material que pasa por los tamices de cada fila, de la muestra sin reemplazo alguno en sus agregados gruesos naturales), las últimas dos columnas presentan los límites granulométricos del agregado grueso de acuerdo a NMX-C-111/2004. En este sentido los resultados muestran un ajuste prácticamente en todos los límites propuestos por la normativa, para ambos tipos de muestras, no existiendo separación significativa entre ambas, en parte porque la muestra 70N.30R. Se compone en 70% por agregados gruesos naturales que están presentes en la otra muestra, cabe señalar que el mayor ajuste estuvo en la muestra 100 NAT. En la imagen 5-1 se presentan graficados los porcentajes señalados en la tabla 5-1 y en escala semilogarítmica la abertura de los tamices utilizados.

Tabla 5-1 Granulometría de agregados gruesos de ambas muestras

TAMICES		70N. 30R.	100 NAT.	NMX C 111/2004	
No. DE MALLA:	ABERTURA (mm)	% PASA ACUM.	% PASA ACUM.	MINIMO	MAXIMO
3"	75	100.00%	100.00%	100%	100%
2"	50	100.00%	100.00%	100%	100%
1 1/2 "	37.5	100.00%	100.00%	100%	100%
1"	25	100.00%	100.00%	100%	100%
3/4"	19	98.05%	96.83%	90%	100%
1/2"	12.5	78.81%	75.74%	55%	78%
3/8"	9.5	53.32%	53.54%	20%	55%
No 4	4.75	29.59%	28.92%	0%	10%

Imagen 5-1 Granulometría de agregados gruesos y límites NMX-C-111-2004

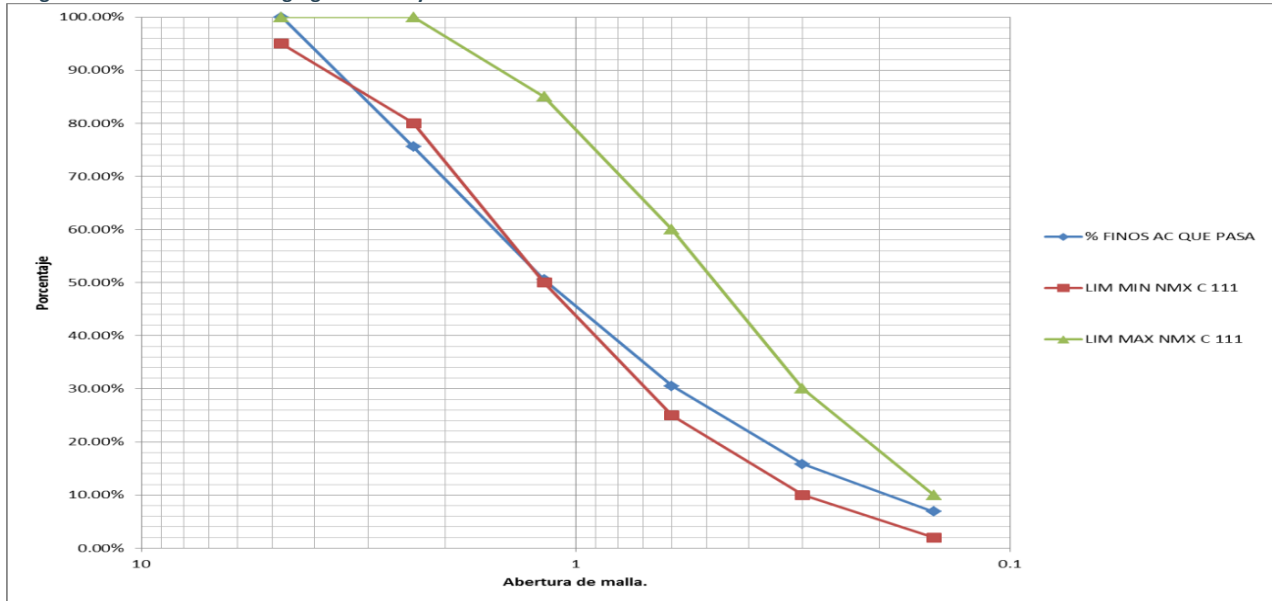


Los resultados de la tabla 5-2 y graficados en la Imagen 5-2, presentan las columnas de TAMICES (que corresponde a la abertura en milímetros y designación de la misma), ARENA NAT. (Que corresponde al porcentaje de material que pasa por cada tamiz), las últimas dos columnas presentan los límites granulométricos del agregado fino de acuerdo a NMX-C-111/2004. En este caso, el material que pasa en la malla no. 8 que no cumple con el mínimo por 4 unidades porcentuales, sin embargo el resto de los tamaños están dentro de los límites establecidos por la normativa. Con lo anterior tenemos en conjunto una graduación de tamaños satisfactoria. El módulo de finura se obtuvo siguiendo el procedimiento descrito en NMX-C-111-ONNCCE-2004, donde la sumatoria de los porcentajes retenidos acumulados a partir de la malla No. 4 hasta la malla No. 100, divididos entre 100, fue de 3.2, lo que indica que la presencia de finos tiene tamaño característico de las arenas, lo anterior está sobre los límites aceptados por la normativa, pudiendo ofrecer mejoras adicionales con la inclusión de partículas más finas o cemento en la mezcla de concreto, para garantizar mejores acabados con mayor pasta en la misma.

Tabla 5-2 Granulometría de agregados finos.

TAMICES		Arena NAT.	NMX C 111	
MALLA:	ABERTURA (mm)	% PASA ACUM.	MINIMO	MAXIMO
No 4	4.75	100%	95%	100%
No 8	2.36	76%	80%	100%
No 16	1.18	51%	50%	85%
No 30	0.6	31%	25%	60%
No 50	0.3	16%	10%	30%
No 100	0.15	7%	2%	10%

Imagen 5-2 Granulometría de agregados finos y límites de NMX-C-111-2004.



La combinación de los materiales reciclados y naturales, gruesos y finos, utilizados en la dosificación, presentó una granulometría bien graduada, En este sentido y de acuerdo con Martínez et. al. (2005), El agregado reciclado con granulometría adecuada produce mezclas de buena calidad y con un comportamiento mecánico similar al de los concretos naturales.

PROPIEDADES DE LOS AGREGADOS PARA CONCRETO.

Es necesario conocer las características de los materiales para poder utilizarlas en la elaboración del diseño de mezclas de concreto hidráulico, de tal forma que puedan controlarse el desempeño de la mezcla en obra, así como conocer de antemano el comportamiento esperado de sus componentes en un elemento de obra civil.

En la siguiente tabla se resumen los resultados de las pruebas de laboratorio realizadas a los materiales que integraron las mezclas de concreto hidráulico, de acuerdo a los métodos de prueba referidos en la norma oficial mexicana vigente correspondiente en cada caso.

Tabla 5-3 Características de los materiales.

Tipo de agregado	% Humedad.	% Absorción.	Densidad.	Masa Volumétrico kg/m3	Coefficiente Volumétrico
GRAVA NATURAL	0.91%	0.53%	2.72	1852	0.2
GRAVA RECICLADA	2%	5.82%	2.08	1704	0.22
ARENA NATURAL	6%	6.30%	2.52	1968	-

La alta absorción de los materiales reciclados, determinaron ajustes importantes para la dosificación de la mezcla reciclada, tales como el uso de aditivo reductor de agua, de hecho se tomó la decisión de no incluir la fracción fina del material reciclado en este experimento, debido a que presentó 11.93% de absorción, con lo cual la mezcla que la incluyera sería sumamente inestable y podría afectar directamente sobre la resistencia a la compresión del concreto. La grava reciclada típicamente alcanza valores de 10%, en este caso fue poco más del 5% y aunque es aproximadamente 10 veces la del material grueso natural, se consideró apta para su incorporación en concreto nuevo. Otros autores como *Mukesh (2003)* encontraron en sus materiales 6 veces la absorción de reciclado sobre natural e incluso *Rolón (2007)* obtuvo resultados de 11.16% en su grava reciclada, cabe destacar que aun después de la limpieza del agregado grueso reciclado persiste cemento adherido al material. *Kerkhoff y Siebel (2001)*

realizan la comparación de la absorción de agregados gruesos naturales, ligeros y reciclados, donde a estos últimos presentaron absorción que variaba del 3% al 10% y una media típica del 5%, en este sentido los valores registrados por este ejercicio concuerdan con los resultados de Kerkhof.

La *Guía Española de Áridos Reciclados (GEAR, 2012)* detectó que las muestras analizadas percibieron que el valor medio de la absorción del árido reciclado esta alrededor del 7%, señalando que en ocasiones los valores pueden alcanzar hasta 14% de absorción, En este documento y en base a los resultados de la valoración de las propiedades de los agregados provenientes de escombros, GEAR realiza la recomendación técnica GEAR-RT-01, para la implementación de estos áridos como material granular en firmes.

La densidad de los agregados gruesos y finos se determinó mediante el método de prueba establecido en NMX-C-164-ONNCCE-2002 y NMX-C-165-ONNCCE-2004 y tomando como referencia a ASTM-C-127 y ASTM-C128, los resultados se resumen en la tabla 5-3 en la cual destaca una densidad menor para la grava reciclada, siendo algo típico en materiales con mortero adherido a las partículas de grava del concreto viejo, el resto de los valores son igualmente aceptables (con masa específica entre 2.4 y 2.9) y fueron considerados en el diseño de mezclas de concreto hidráulico, para proporcionamiento por el método volumen absoluto (ACI 211.1). Así mismo se determinó la densidad del cemento hidráulico clase resistente 40 (CPC 40R) utilizado para la elaboración de las mezclas de concreto, cuyo valor fue de 3.04, mediante la aplicación del método de prueba establecido en NMX-C-152-ONNCCE-2010.

Para la conocer la masa volumétrica compacta de los agregados utilizados en este experimento se realizó el método de prueba establecido en NMX-C-073-ONNCCE-2004, los valores obtenidos se presentan en tabla 5-3, destaca que la grava reciclada está en el rango típico para estos materiales, entre el 1200 al 1760 Kg/m³. (PCA, pág. 114, 2004.

Con respecto al coeficiente volumétrico, siguiendo el procedimiento descrito en la norma NMX-C-436-ONNCCE-2004 se obtuvieron los resultados plasmados en la tabla 5-3, ambos materiales ensayados proceden de trituración, pero la muestra que contenía fracción de material reciclado presento un aumento en el coeficiente de forma, inducido porque la trituración de los escombros entrego algunas de sus partículas un poco más angulosas y alargadas que la muestra de agregado natural, sin embargo la combinación de ambos tipos de agregados permite favorablemente potencial para optimizar la mezcla de concreto reciclado, Martínez et. al. (2005), expresa valores similares en su investigación, en ambos casos, la forma del agregado no ocasionó problemas en el acabado de los cilindros elaborados para prueba.

5.2 DOSIFICACIÓN.

En la presente investigación se utilizaron los agregados cuyas características se describieron anteriormente, en ambas muestras se utilizó arena natural, sin embargo las muestras se diferenciaban porque en una de ellas se reemplazó el 30% de sus agregados gruesos de caliza natural por agregados procedentes de la trituración de escombros de concreto hidráulico; los cuales al ser incorporados en una de las mezcla de concreto de esta investigación su producto se denominó **concreto reciclado**. El otro tipo de muestra analizada estaba compuesto por agregados completamente naturales con los cuales se fabricaron el tipo de **concreto de referencia o natural**.

La dosificación utilizada para la elaboración de las mezclas fue a partir de lo descrito en la norma mexicana NMX-C-159-ONNCCE-2004 “Elaboración y curado de especímenes en el laboratorio” y siguiendo las recomendaciones publicadas del American Concrete Institute (ACI) en el documento ACI-211.3 Se resume en tabla 5-4 la dosificación para cada tipo de mezcla, la cantidad de aditivo utilizada fue de acuerdo a las recomendaciones del fabricante.

Tabla 5-4 Dosificación de mezclas de concreto de proyecto.

Mezcla	Agua (kg/m3)	%	Cemento (kg/m3)	%	Grava (kg/m3)	%	Arena (kg/m3)	%	A/C
natural	156.87	6.53	317.142	13.20	1096.2	45.64	831.6	34.62	0.5
reciclado	160.65	7.05	304	13.34	982.4	43.11	831.6	36.50	0.53

Para el caso de la mezcla reciclado se reporta el porcentaje de 43.11% para la totalidad de agregado grueso, del cual al 30% de agregado grueso reciclado le corresponde el 12.93% con respecto a los ingredientes totales de la mezcla, equivalentes a 127.05 kilogramos por metro cubico de grava reciclada para este tipo de mezcla.

5.3 PRUEBAS AL CONCRETO EN ESTADO FRESCO.

Los cilindros elaborados fueron 6 de concreto natural y 6 de concreto reciclado para su prueba a los 7 días de edad, así mismo se elaboraron 60 de concreto reciclado y 60 de concreto natural para su prueba a los 28 días de edad, siguiendo las recomendaciones del comité ACI 318 (2008), no teniendo registro previos del comportamiento de concreto elaborado con agregados reciclados localmente, así como cilindros tradicionales en misma cantidad para la comparación de propiedades y medición de la desviación estándar entre ambos tipos de mezcla; natural y reciclada, a fin de poder establecer una referencia valida del desempeño entre ambos, esto servirá para la reducción del número de especímenes de prueba para futuras determinaciones de resistencia en mezcla afines.

Las pruebas aplicadas a las mezclas de concreto en estado fresco, se basaron en los procedimientos de NMX-C-156-ONNCCE-2010 y NMX-C-162-ONNCCE-2010, siendo determinados revenimiento (asentamiento), contenido de aire y masa volumétrica de muestras de cada mezcla recién elaborada, se resumen los resultados en la Tabla 5-5.

Tabla 5-5 Resultados de pruebas a mezclas de concreto en estado fresco.

Tipo de concreto	Revenimiento (cm)	% de Contenido de aire	Masa volumétrica (Kg/m3)
NATURAL	12.5	1.8	2401
RECICLADO	7.2	2.2	2282

Mediante la Tabla 5-5 se pueden comparar los resultados de los dos tipos de mezcla de concreto, donde se hace manifiesto que el revenimiento promedio fue mayor en la mezcla natural, sin embargo el ACI permite incrementos hasta de 2.5cm. en el mismo cuando se realiza la prueba por medio de varillado, como fue el caso de la obtención de esta propiedad por medios manuales, de manera que se encuentra en el límite de la tolerancia para el revenimiento de diseño que fue de 10cm. Para el caso de la mezcla con material reciclado esta cumple con los requerimientos preestablecidos, aun cuando el material presentaba un porcentaje de absorción ligeramente mayor a 5% se logró mantener la relación agua – material cementante (a/c) prácticamente en 0.5 con lo que se protegieron otras propiedades que se esperaba obtener del concreto en estado endurecido. Con respecto a los contenidos de aire de la mezcla, eran esperados para ambos tipos de mezclas que fueron diseñadas bajo la premisa de “sin aire incluido”. La masa volumétrica del concreto natural fue alta, pero se encuentra en los límites para concreto de peso normal, el concreto reciclado elaborado fue menor a su homólogo de referencia, registro 2282 Kg/m3 siendo la composición de esta mezcla con densidad menor en su fracción de reemplazo la que pudo favorecer tal reducción, colocándola dentro del rango para concreto de peso normal.

5.4 PRUEBAS AL CONCRETO EN ESTADO ENDURECIDO.

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN.

Los especímenes de concreto elaborados, fueron probados de acuerdo a lo descrito en la norma NMX-C-083-ONNCCE-2002 para determinar la resistencia a la compresión de los cilindros de concreto a 7 y 28 días de edad, tras el tiempo de curado los cilindros fueron sacados para registrar masa, diámetro y altura, revisar si eran sujetos a corrección por esbeltez (para esta investigación ninguno requirió de este procedimiento, debido a que durante la elaboración de los cilindros se utilizaron moldes de 30cm.x15cm. las medidas requeridas por la norma y fue cuidado el enrase y acabado de los mismos), se colocaron placas de neopreno en su óptimo estado (sin fisuras) sobre el diámetro de ambas caras de cada cilindro, se llevaron a prueba y los resultados promedio de cada grupo de concretos se resumen en la tabla 5-6. En el anexo 3 se encuentran las resistencias de cada ensaye y su gráfico.

Tabla 5-6 Resultados de cilindros en pruebas de resistencia a la compresión.

Tipo de concreto	Resistencia compresión (Kg/cm ²)	
	7 DÍAS	28 DÍAS
NATURAL	187.88	293.06
RECICLADO	147.15	310.72

A los 7 días el concreto hidráulico alcanza entre el 60 y 70% de la resistencia que tendrá durante su vida útil, que es muy semejante a la registrada cuando se realiza la prueba a los 28 días de edad, para el caso de los cilindros naturales ya se había alcanzado el 60% de la resistencia promedio requerida de diseño igual a 295Kg/cm², mientras que los cilindros reciclados alcanzaron poco más del 50% de la misma, para ambos tipos de concreto no se presentó dispersión significativa entre los ensayes. En el caso de los especímenes de prueba a los 28 días, todos cumplieron con la resistencia especificada de 210Kg/cm² y parte de ellos alcanzaron valores superiores de 300Kg/cm², el máximo valor alcanzado en esta prueba lo obtuvieron los cilindros de concreto reciclado, sin embargo los estadísticos descriptivos (ver tabla 5-7), señalan que ambas muestras probadas son prácticamente equivalentes con medias promedio que solo tienen diferencia de 17 unidades de resistencia entre ellas, la ventaja en resistencia fue de apenas 6% de reciclados sobre naturales, estos resultados tienen un intervalo de confianza de 93.5% para los especímenes naturales y 90.3% para especímenes reciclados, por lo que se puede confiar que el comportamiento que describen estas mezclas es similar entre los dos grupos. *Vidaud et. al. (2013)* señalan que para porcentajes de reemplazo entre 20% y 30% no se verán afectadas las principales propiedades del concreto, lo que si sucede con porcentajes mayores. *Domínguez et. al. (2007)*, consiguió resistencias superiores del orden del 8.5% en los concretos reciclados de su experimento con una relación a/c= 0.68. Incluso existen investigaciones que para una dosificación similar a la nuestra han conseguido resistencias superiores a las mezclas convencionales (o de control, con agregados naturales); tal es el caso de 11.5% (Serrano-Guzmán, 2012).

Tabla 5-7 Resumen de estadísticos descriptivos de los grupo de mezclas de concreto hidráulico.

ESTADISTICOS DESCRIPTIVOS	NATURALES	RECICLADOS
MAXIMO	347.79	374.31
MINIMO	267.27	256.99
RANGO	80.52	117.33
PROMEDIO	293.06	310.72
DESVIACION ESTANDAR	18.98	30.15
	0.63	1.01
VARIANZA	360.08	909.30
	0.40	1.01
COEFICIENTE DE VARIACION DIRECTO	6.48%	9.70%

Pavón, Etxeberria y Martínez (2011) describen las propiedades físicas, mecánicas y de durabilidad de los hormigones fabricados con 25% y 100% de árido reciclado utilizando adiciones activas e inertes en estas mezclas, comparándolas contra hormigones patrón o tradicionales. En razón a la resistencia a la compresión, se encontró que la sustitución de 25% de agregado grueso natural y sin adición alguna, iguala las resistencias alcanzadas por el hormigón patrón (HP). Mientras que los hormigones con 100% de reemplazo sufrieron una reducción en esta propiedad en el orden del 12%. Adicionalmente, se encontró que las sustituciones del 5% y 10% de cemento por microsilíce, con el porcentaje de reemplazo de áridos naturales de 25%, obtuvieron 95% de la resistencia a la compresión del HP, como también, en este mismo porcentaje de reemplazo adicionado con escoria de arco eléctrico, incluso generó reducciones del 9% al 19% de la resistencia a la compresión. En el caso del porcentaje de reemplazo del 100% de agregados naturales por reciclados obtuvo resultados inferiores en la mayoría de las propiedades del hormigón, lo que comprueba que a mayor cantidad de árido reciclado, la resistencia a la compresión es menor, independientemente de la adición utilizada. Lo anterior, destaca el buen desempeño del hormigón con 25% de áridos reciclados y las mejoras notables con adiciones activas, lo que señala la necesidad de investigar materiales reciclados en mezclas de hormigón para obtener resultados equiparables a los concretos tradicionales y a menor costo de producción.

Resistencia a la tensión, módulo de ruptura y módulo elástico.

En el caso de estas tres propiedades, no se elaboraron los especímenes para determinar su valor mediante los métodos descritos en la norma mexicana NMX-C-191-ONNCE-2004 (resistencia a la flexión o módulo de ruptura), NMX-C-163-1997-ONNCE (resistencia a la tensión por compresión diametral) y NMX-C-128-1997-ONNCE (módulo de elasticidad), sin embargo se estimaron sus valores de acuerdo a lo establecido en la página 104 de las normas técnicas complementarias para diseño y construcción de estructuras de concreto del Reglamento de Construcciones del Distrito Federal (RCDF), publicadas en la gaceta oficial del Distrito Federal el día 6 de Octubre de 2004 en la sección 1.5.1 de este documento.

Debido a que, poco más del 88% de las mezclas probadas describen especímenes con resistencias a la compresión características de concretos clase uno, es decir mayores a 250Kg/cm², se presenta el equivalente de cada una de las propiedades en estado endurecido estimadas a partir de estas condiciones y con las formulas correspondientes incluidas en las normas técnicas complementarias anteriormente mencionadas. Los resultados se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 5-8 Estimación de otras propiedades del concreto en función de la resistencia a la compresión.

Tipo de concreto	Resistencia a flexión Kg/cm ²	Resistencia a tensión Kg/cm ²	Modulo elástico (EX10 ³) Kg/cm ²
	Concreto clase uno. 2 veces la raíz cuadrada de (f'c)	Concreto clase uno. 1.5 veces la raíz cuadrada de (f'c)	Concreto clase uno. 14,000 veces la raíz cuadrada de (f'c)
NATURAL	34.18	25.64	239
RECICLADO	35.19	26.39	246

Cabe señalar que la resistencia a la flexión o módulo de ruptura requerido para losas de concreto hidráulico en pavimentos esta entre 42 a 48 Kg/cm² por lo que en base a los valores de la tabla anterior, ninguno de los tipos de concreto elaborado son aptos para este uso, con los consumos de cemento utilizados, pudiéndose incrementar a más de 400 Kg/m³ para obtener mejores resultados, sin embargo las mezclas elaboradas tienen otras múltiples aplicaciones, sirviendo de referencia los valores de resistencia presentados anteriormente.

6 CONCLUSIONES.

Los resultados obtenidos en esta investigación indican que los concretos reciclados que incluyen específicamente 30% de reemplazo en sus agregados gruesos, tienen un comportamiento mecánico similar que aquellos con agregados completamente naturales que comparten granulometría bien graduada, características de los agregados (con excepción de humedad, absorción y densidad entre tipos de gravas); así como relación de agua – material cementante y condiciones de elaboración de las mezclas de concreto hidráulico.

Cabe señalar que el concreto que denominamos “reciclado” presentó un comportamiento favorable de clase uno, y que de acuerdo a las pruebas de laboratorio efectuadas tienen aptitud para su uso en elementos tales como guarniciones, banquetas, cunetas y contracunetas, bordillos y lavaderos, muros de contención, entre otras obras complementarias de pavimentos, sin embargo esta proporción con reemplazo utilizada no cumple con las especificaciones para la construcción de losas de rodamiento a base de concreto hidráulico, pero no se descarta la posibilidad que en otras combinaciones de reemplazo, tales como 10%, 20% o incluso porcentajes mayores o intermedios, bajo la misma relación agua/cemento, se puedan encontrarse circunstancias que favorezcan su uso para las losas de pavimentos y otro usos de tipo estructural. En este sentido se presenta un ejemplo general-comparativo entre concretos naturales y concretos reciclados; utilizados en la construcción de obras complementarias de pavimentos en un kilómetro paralelo a una vialidad, para ejemplificar el beneficio de la implementación de reciclados versus naturales en estos trabajos específicos.

En el siguiente ejemplo se presentan el costo directo, es decir sin incluir indirectos, financiamiento u otro tipo de elemento adicional en la construcción de las obras complementarias de pavimentos, que para este caso consisten en guarniciones tipo “L”, banquetas de 10 centímetros de espesor y todo lo necesario para la realización de las mismas. En este caso específico se incluyeron la mano de obra, maquinaria y materiales requeridos, particularmente se desglosaron los componentes de ambas mezclas de concreto hidráulico y las cantidades para su producción con precios comerciales en el año 2013, se resumen a continuación los conceptos, cantidades y precios para la realización de dichas obras complementarias de pavimentos, así como un comparativo de costo directo final, utilizando los concretos naturales y reciclados probados en esta investigación.

Tabla 6-1 Calculo de costo directo de 1Km. de obra complementaria de vialidades.

OBRAS COMPLEMENTARIAS DE PAVIMENTOS UTILIZANDO CONCRETO NATURAL.						
Código	Concepto	Unidad	Cantidad	Precio Unitario (\$)	Importe (\$)	%
1-001	Excavación a mano y/o maquinaria para desplante de elementos de concreto en guarniciones y banquetas, incluye: excavación, preparación de superficie, afine y apile del material para su fácil carga al camión, herramienta y equipo.	m3	320	53.35	17,072	3.40%
1-002	Fabricación de guarnición tipo “L” de concreto hidráulico premezclado de F’c=250 kg/cm2 t.m.a. 3/4” de 120lt, incluye: suministro y colocación de concreto, maniobras y acarreo locales, cimbra metálica, descimbra, celotex @ 3.00m, vibrado y curado con curacreto blanco a razón de 0.50lt/m2, herramienta, equipo, así como lo necesario para efectuar el trabajo.	m1	1000	247.13	247,130	49.17%
1-003	Relleno compactado para desplante de guarnición y banquetas, así como para respaldo de guarniciones después de su fabricación, en capas no mayores de 15cm cuando con material producto de excavación, incluye: acarreo, humedecido, homogenizado, colocación y relleno compactado al 90% de su PVSM, herramienta y equipo.	m3	250	46.28	11,570	2.30%
1-004	Construcción de banqueta de 10cm espesor, incluye: suministro y colocación de concreto hidráulico con resistencia a la compresión de F’c= 250 kg/cm2, T.M.A. 3/4”, afine, cimbra y descimbra, vibrado, celotex a cada 2 m, acabado escobillado, curado con curacreto blanco a razón de 0.50lt/m2, herramienta, equipo, mano de obra y todo lo necesario para su correcta ejecución.	m2	1000	226.79	226,790	45.13%
Total:	COSTO DIRECTO.				\$502,562	100%
OBRAS COMPLEMENTARIAS DE PAVIMENTOS UTILIZANDO CONCRETO RECICLADO.						
Código	Concepto	Unidad	Cantidad	Precio Unitario (\$)	Importe (\$)	%
1-001	Excavación a mano y/o maquinaria para desplante de elementos de concreto en guarniciones y banquetas, incluye: excavación, preparación de superficie, afine y apile del material para su fácil carga al camión, herramienta y equipo.	m3	320	53.35	17,072	3.47%
1-002	Fabricación de guarnición tipo “L” de concreto hidráulico premezclado de F’c=250 kg/cm2 con reemplazo del 30% de sus gravas naturales por agregado reciclado proveniente de escombros de concreto hidráulico, T.M.A. 3/4” de 120lt, incluye: suministro y colocación de concreto, maniobras y acarreo locales, cimbra metálica, descimbra, celotex @ 3.00m, vibrado y curado con curacreto blanco a razón de 0.50lt/m2, herramienta, equipo, así como lo necesario para efectuar el trabajo.	m1	1000	241.56	241,560	49.05%
1-003	Relleno compactado para desplante de guarnición y banquetas, así como para respaldo de guarniciones después de su fabricación, en capas no mayores de 15cm cuando con material producto de excavación, incluye: acarreo, humedecido, homogenizado, colocación y relleno compactado al 90% de su PVSM, herramienta y equipo.	m3	250	46.28	11,570	2.35%
1-004	Construcción de banqueta de 10cm espesor, incluye: suministro y colocación de concreto hidráulico con resistencia a la compresión de F’c= 250 kg/cm2 con reemplazo del 30% de sus gravas naturales por agregado reciclado proveniente de escombros de concreto hidráulico, T.M.A. 3/4”, afine, cimbra y descimbra, vibrado, celotex a cada 2 m, acabado escobillado, curado con curacreto blanco a razón de 0.50lt/m2, herramienta, equipo, mano de obra y todo lo necesario para su correcta ejecución.	m2	1000	222.23	222,230	45.13%
Total:	COSTO DIRECTO.				\$492,432	100%

Tabla 6-2 Comparativa de costo directo con respecto al tipo de concreto utilizado.

	PRECIO (\$)	DIF. COSTO	DIF. %
M3 CUBICO DE CONCRETO NATURAL F´C 250 KG/CM2	\$ 1210.27	\$42	3.49%
M3 CUBICO DE CONCRETO RECICLADO F´C 250 KG/CM2	\$ 1168.05		
	COSTO DIRECTO	DIF. COSTO	DIF. %
KM. De OBRAS COMPLEMENTARIAS DE PAVIMENTOS UTILIZANDO CONCRETO NATURAL.	\$502,562	\$10,130	2.02%
KM. De OBRAS COMPLEMENTARIAS DE PAVIMENTOS UTILIZANDO CONCRETO RECICLADO.	\$492,432		

Como podemos apreciar en las tablas 6-1 y 6-2, existe una diferencia de \$ 42 pesos mexicanos en la producción de ambas mezclas de concreto, pero al ser utilizado como concreto masivo en las obras descritas, puede alcanzarse disminución de costos por kilómetro en el 2%, y para este caso específico representan poco más de diez mil pesos mexicanos.

La disminución de costos en la construcción de obras civiles representa una ventaja competitiva utilizando concretos reciclados para aquellos fines que demuestra ser aptos. Adicionalmente la incorporación de agregados reciclados presenta otros beneficios en el ámbito ambiental, tales como la reducción de ocupación en espacios de disposición final de residuos sólidos, debido a que cuando los escombros son vertidos en rellenos sanitarios, estos ocupan un volumen considerable dentro del mismo que disminuye la vida útil del relleno o sitio de confinamiento, como en el caso del bordo poniente en la Ciudad de México, que tuvo su clausura con anticipación a lo previsto en el año de 2011. Los escombros también pueden ser encontrados en tiraderos clandestinos, regularmente en lotes baldíos o a las afueras de la mancha urbana, como es el caso de ciudad Mexicali, lo cual representa un punto de partida para más escombros y basura en el futuro en esos lugares, focos de infección y criaderos de fauna nociva para la salud, e indirectamente estas acciones disminuyen la calidad visual del paisaje de toda zona en los que son encontrados estos residuos.

La posibilidad de contribuir un medio ambiente sano y disminuir el 6% del flujo total de materiales, equivalente a 500 mil toneladas al año, provenientes de materias primas vírgenes que terminan regresando al ambiente en forma de RCD (Hernandez & Mendoza, 2006), es posible; cuando los escombros de concreto hidráulico son recuperados para su reutilización en nuevos procedimientos constructivos como agregado reciclado, ya sea que se utilicen en la construcción de bases hidráulicas para pavimentos o para formar parte de mezclas de concreto hidráulico, esta acción permite atender la problemática de transporte y disposición final de estos residuos de construcción y demolición, particularmente cuando estos se separan y trituran en el sitio donde se generan o donde actualmente se encuentran, porque esto permite aprovechar mejor los espacios en los camiones de carga y se reducen las emisiones e impacto en la huella de carbono por concepto de número de viajes para transportar los escombros hacia el sitio en el que se vayan a procesar y/o reutilizar, cabe señalar que la mayor parte de emisiones a la atmosfera relacionadas con el concreto hidráulico, se generan durante la producción del cemento que es uno de sus componentes básicos (WBCSD, 2009), sin embargo la contribución en reducción de emisiones, debida a tal conjunto de acciones para incorporar los escombros a nuevas obras civiles, mejoran la calidad del aire.

Esta investigación encontró que el concreto reciclado con la configuración y características que presentado en este documento, presento buen desempeño versus su homologado con agregados 100% naturales, con lo que la hipótesis planteada se cumple; permitiendo la posibilidad de la incorporación de estos materiales, en múltiples obras, entre las se recomienda las relacionadas con vialidades y obras complementarias de pavimentos. Sirve así mismo como punto de partida para futuras investigaciones que puedan encontrar porcentajes en los cuales las mezclas de concreto hidráulico con algún tipo de material reciclado en su dosificación sean mayormente competitivas y describan comportamientos similares e incluso mejores a los concretos tradicionales en aplicaciones estructurales.

7 REFERENCIAS

- Bedoya Montoya, C. M. (Julio de 2003). El concreto reciclado con escombros como generador de hábitats urbano sostenibles. Tesis Magíster en Hábitat. Medellín, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- C., H. (2005). Caracterización de hormigones elaborados con agregado grueso reciclado. Hormigonar.
- García L., C. (Abril de 2009). Características mecánicas de concretos reciclados fabricados con desechos sólidos de construcción. Tesis Ingeniero Civil. Xalapa, Veracruz, México: Universidad Veracruzana.
- Gorisse, F. (1981). Ensayos y control de los hormigones. Barcelona: Editores técnicos asociados.
- Hansen, T. (1983). strength of recycled concrete made from crused concrete coarse aggregate. Concrete International.
- Kosmatka, S. H. (1992). Diseño y control de mezclas de concreto. Mexico: Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C.
- kosmatka, S. H. (2004). Diseño y control de mezclas de concreto. México: Portland Cement Association.
- Kroenke, D., & Auer, D. (2009). Database Concepts. New Jersey: Prentice Hall.
- Montrone P., M. A. (2008). Estudios de concretos reciclados - Nuevas tecnologías. V Congreso Latinoamericano de Estudiantes de Ingeniería Civil, (pág. 9). Loja, Ecuador.
- Montrone, M. y. (2007). Desarrollo sostenible mediante el reciclaje y reutilización del desmonte como agregado del concreto en la construcción de viviendas. XV congreso nacional de estudiantes de ingeniería civil, (pág. 95).
- Muñoz, J. (1975). Utilización de desechos de concreto como agregado grueso. Tesis de pregrado. Lima, Perú, Perú.
- Rahal, K. (2007). Mechanical properties of concrete with recycled coarse aggregate. Building and Environment, 407.
- Stair, R., & Reynolds, G. (2001). Principles of Information Systems. Boston: Course Technology.
- Tabsh, S. W. (2009). Influence of recycled concrete aggregates on strength properties of concrete. Construction and Building Materials, 1163-1167.
- Yang, K. e. (2008). Influence of type and replacement level of recycled aggregates on concrete properties. ACI Materials Journal, 289.
- Zega, C. F. (2007). Hormigones elaborados con reciclados de sobrante de hormigones de mixer. Hormigonar, Asociación Argentina del Hormigón elaborado.
- Gorisse, Francis (1981) "Ensayos y control de los hormigones" Págs. 47-53, Editores técnicos asociados, Barcelona, 1980. ISBN: 84-7146-214-1.
- AASTHO. (s.f.). tesis uson. Recuperado el 06 de 05 de 2013, de Capitulo 5 Metodología de diseño de pavimentos de concreto: <http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/4203/Capitulo5.pdf>
- AASTHO. (s.f.). tesis uson. Recuperado el 06 de 05 de 2013, de Capitulo 4: Criterios para espesores de pavimentos por el metodo del IIUNAM: <http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/3384/Capitulo4.pdf>
- American Concrete Institute, 2004, "Requisitos de reglamento para concreto estructural (ACI318S-05) y comentario", Comité ACI 318, ISBN 0-087031-183-2.
- ASTM-C-078/10. Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete
- ASTM-C-469/10. Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression.
- ASTM-C-496/11. Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens
- AYUNTAMIENTO DE MEXICALI. (2013). INFOMEX. Recuperado el 2013, de folio 00016713: <http://www.mexicali.gob.mx/infomex/>
- AYUNTAMIENTO DE MEXICALI. (2013). INFOMEX. Recuperado el 2013, de folio 00022513: <http://www.mexicali.gob.mx/infomex/>
- AYUNTAMIENTO DE MEXICALI. (2013). INFOMEX. Recuperado el 2013, de folio 00024113: <http://www.mexicali.gob.mx/infomex/>

- BancoMundial.org. (2012).
- CALDERÓN HINOJOSA (2012) “principales indicadores de la planeación nacional”, Página 62, Sexto informe de gobierno.
- Gobierno de Baja California, (2013). SASIP. Recuperado el 2013, de solicitud 130484: <http://om.bajacalifornia.gob.mx/Sasip/frmSolicitudes.aspx>
- CEMEX. (2011). Reporte de sustentabilidad. Mexico.
- Chaida & Franco, I. (2013). Destino de los escombros de concreto. (M. Gutierrez, Entrevistador)
- Comité ACI 318. (2008). Capítulo 5: Calidad del concreto, mezclado y colocación. En B. G. James K. Wigh, Reglamento estructural para edificaciones; requisitos de reglamento para concreto estructural (ACI 318S-08) y comentario (págs. 67-84). ACI.
- Concretos reciclados S.A. (2005). Residuos generados por la industria de la construcción.
- CONSTRUCCIÓN Y TECNOLOGIA EN CONCRETO (2011), “Factibilidad técnica del uso de agregados Reciclados”, México.
- CONSTRUCCIÓN Y TECNOLOGIA EN CONCRETO (2012), “Juegos olímpicos sustentables”, Agosto, México.
- Construcción y tecnología en concreto. (2013). posibilidades del concreto marzo. Construcción y tecnología en concreto, 10.
- Contreras, K. E. (2010). Apuntes de tecnología del concreto, criterios del reglamento ACI 318.
- CRUZ GARCIA (2004), “Concreto reciclado, tesis”, México, Instituto Politécnico Nacional.
- Ficunfv.com. (s.f.). artículos. Recuperado el 30 de 04 de 2013, de probetas de concreto norma ASTM C31: <http://www.ficunfv.com/articulos/46-articulos/229-probetas-de-concreto-norma-astm-c31>
- FONTANET SALLÁN (1996), “Residuos que se generan en la actividad de la construcción”, España.
- Gaceta oficial del Distrito Federal, 12 julio 2006, pág. 17.
- García, H. L. (2010). Empleo de técnicas no destructivas de ultrasonido para la caracterización del concreto hidráulico. Ciencia Nicolaita, 115.
- GONZÁLEZ G. (2005), “La perspectiva Española”, México.
- GONZÁLEZ G. (2007), “Reciclar es lo de hoy”, México.
- Grupocomosa. (s.f.). Concreto estructural. Recuperado el 27 de 05 de 2013, de clase II: http://www.grupocomosa.com/index.php?option=com_content&view=article&id=63:concretoestructural-clase-ii&catid=41:productos&Itemid=79
- GUSA, E. p. (12 de 2012). Operación de planta de agregados petreos.
- HANSEN TORBEN (1983), “Strength of recycled concrete made from crushed concrete coarse aggregate”, U.S.A.
- HOLCIM. (2011). Reporte de sustentabilidad. Mexico.
- Ibarquengoytia, D. (Mayo de 2013). Maquinaria y procedimientos en la industria cementera. (M. Gutierrez, Entrevistador)
- Instituto Mexicano del Cemento y Concreto, 1992 “Diseño y concreto de mezclas de concreto”, ISBN 0-087031-183-2.
- Instituto Mexicano del Cemento y Concreto. (s.f.). Concreto. Recuperado el 19 de 04 de 2013, de Historia: <http://www.imcyc.com/concretohistoria/>
- Instituto Mexicano del cemento y del concreto. (s.f.). IMCYC. Recuperado el 19 de 04 de 2013, de Resistencia del concreto: <http://www.imcyc.com/concretohistoria/resistencia.htm>
- Julio César Argueta Alvarado, D. d. (s.f.). Resúmenes de investigaciones. Recuperado el 08 de 05 de 2013, de En ensayos de resistencia a la compresión: <http://www.ugb.edu.sv/index.php/resumenes-de-investigaciones/ingenieria-y-arte/156-en-ensayos-de-resistencia-a-la-compresion-.html>
- KIM, M (1993), “An experimental study on the workability and engineering properties of recycled aggregate concrete
- according to the combination condition of recycled aggregate, Korea.
- KUMAR MEHTA (2000), “Avances en la tecnología del concreto”, Publicación en revista de IMCYC, México.

- Limbachiya, Mukesh. (2003). Construction and demolition waste recycling for reuse as aggregate in concrete production. Kingston University, United Kingdom.
- LÓPEZ-PRUSINSKI, "Carreteras recicladas con cemento", USA.
- Manual de tecnología del concreto CFE, vol. 1, pág. 9-11, 24 101
- Mercante, I. T. (2007). Caracterización de residuos de la construcción. Aplicación de los índices de generación a la gestión ambiental. Revista científica de UCES, 86-109.
- Montoya, C. M. (2003). EL CONCRETO RECICLADO CON ESCOMBROS COMO GENERADOR DE HÁBITATS URBANOS SOSTENIBLES (Tesis). Medellín, Colombia: Escuela de Habitación, Facultad de Arquitectura, Universidad Nacional de Colombia.
- MONTRONE PISCULICH (2008), "Estudio de concretos reciclados, Presentación en congreso", Ecuador.
- MONTRONE Y QUISPE (2007), "Desarrollo sostenible mediante el reciclaje y reutilización del desmonte como agregado del concreto en la construcción de viviendas, Perú.
- NEVILLE ADAM (1998) "Tecnología del concreto, libro", Pág. 23.
- NFP-18-301, Normativa Francesa para determinación del coeficiente de forma del agregado grueso.
- NMX-C-073-ONNCCE-2004. Masa volumétrica, método de prueba.
- NMX-C-077-ONNCCE-1997. Agregados para concreto, análisis granulométrico, método de prueba.
- NMX-C-083-ONNCCE-2002. Determinación de la resistencia a la compresión de cilindros de concreto.
- NMX-C-111-ONNCCE-2004. Agregaciones para concreto hidráulico, Especificaciones y método de prueba.
- NMX-C-128-ONNCCE-1997. Determinación del módulo de elasticidad estático y relación de Poisson.
- NMX-C-152-ONNCCE-2010. Determinación de la densidad del cemento.
- NMX-C-156-ONNCCE-2010. Determinación del revenimiento en el concreto fresco.
- NMX-C-157-ONNCCE-2006. Determinación del contenido de aire del concreto fresco por el método de presión.
- NMX-C-158-ONNCCE-2006. Determinación del contenido de aire del concreto fresco por el método volumétrico.
- NMX-C-159-ONNCCE-2004. Elaboración y curado de especímenes en el laboratorio.
- NMX-C-162-ONNCCE-2010. Determinación de la masa unitaria, cálculo del rendimiento y contenido de aire del concreto fresco por el método gravimétrico.
- NMX-C-163-ONNCCE-1997. Determinación de la resistencia a la tensión por compresión diametral de cilindros de concreto.
- NMX-C-164-ONNCCE-2002. Determinación de la masa específica y absorción de agua del agregado grueso.
- NMX-C-165-ONNCCE-2004. Determinación de la masa específica y absorción de agua del agregado fino.
- NMX-C-191-ONNCCE-2004. Determinación de la resistencia a la flexión del concreto usando una viga simple con carga en los tercios del claro.
- NMX-C-196-ONNCCE-2010. Determinación de la Resistencia a la abrasión e impacto de agregados gruesos usando la máquina de los Ángeles.
- NMX-C-436-ONNCCE-2004. Coeficiente volumétrico (de forma) en agregado grueso.
- ONNCCE.ORG. (01 de 2011). normas mexicanas. Recuperado el 7 de 01 de 2013, de catalogo concreto: http://www.onncce.org.mx/normas/catalogo_de_normas_0611.pdf
- Ramirez, J. M. (06 de 03 de 2007). Guía para el manejo de residuos sólidos generados en la industria de la construcción. http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/mgc/cortina_r_jm/indice.html.
- Real Academia Española. (2013). Diccionario de la real academia de la lengua española. Obtenido de RAE.ES: <http://lema.rae.es/drae/>
- Rolón Aguilar, J.C., 2007, "Caracterización del hormigón elaborado con áridos reciclados producto de la demolición de estructuras de hormigón", Materiales de construcción, España. ISSN 0465-2746.
- Rómel G. Solís Carcaño, É. I. (2004). Predicción de la resistencia del concreto con base en la velocidad de pulso ultrasónico y un índice de calidad de los agregados. Ingeniería 8-2, 41-52.

- ROMERO (2004), "Viabilidad técnica y económica del uso del concreto reciclado como agregado" Colombia.
- Foro internacional del concreto, 2012. "Uso a gran escala de concretos reciclados" (InterCement LOMAX).
- SCT N-CMT-4-02-002/11; Materiales para bases hidráulicas de pavimentos
- slideshare.net/certificacionACI. (23 de 12 de 2008). Certificación ACI. Recuperado el 30 de 04 de 2013, de http://es.slideshare.net/certificacion_aci/criterios-de-aceptacin-aci-presentation
- Unidad concentradora de transparencia Gobierno de Baja California. (2013). SASIP. Recuperado el 2013, de solicitud 130485: <http://om.bajacalifornia.gob.mx/Sasip/frmSolicitudes.aspx>
- Unidad concentradora de transparencia Gobierno de Baja California. (2013). SASIP. Recuperado el 2013, de solicitud 130484: <http://om.bajacalifornia.gob.mx/sasip>
- Unidad concentradora de transparencia Gobierno de Baja California. (2013). Sistema de acceso a solicitudes de información pública. Recuperado el 2013, de solicitud 130873.
- YANG & CHUNG (2008), "Influence of ty and replacement level of recycled aggregates on concrete properties", U.S.A.
- Asociación Española de Gestores de RCD, (GERD) "Guía española de áridos Reciclados procedentes de residuos de construcción y demolición (RCD)", publicada el 17 de Octubre de 2012, Madrid, España.
- ASTM-C-078/10. Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete
- ASTM-C-469/10. Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression.
- ASTM-C-496/11. Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens
- Comité ACI 318, "Requisitos de reglamento para concreto estructural (ACI318S-08) y comentario", American Concrete Institute, 2008, ISBN 0-087031-183-2.
- Consejo Mundial Empresarial para el Desarrollo Sostenible (WBCSD), "Iniciativa por la sostenibilidad del cemento: reciclando concreto", WBCSD, Julio 2009. ISBN: 978-3-940388-50-6
- Dominguez L., J.A. & Martinez L.,E., "Reinserción de los residuos de construcción y demolición al ciclo de vida de la construcción de viviendas", Ingeniería, Vol. 11, núm. 3, 2007, p.p. 43-54, Universidad Autónoma de Yucatan, Mexico.
- Gonzalez G., J.F., "Reciclar es lo de hoy", en Construcción y tecnología en concreto, núm. 25, Febrero 2007, p.p. 42-48. ISSN: 0187-7895.
- Hernandez Castañeda, O, & Mendoza Escobedo, C.J., "Durabilidad e infraestructura: retos e impacto socioeconómico", Ingeniería, Investigación y Tecnología, volumen VII, núm. 1, Enero-Marzo 2006, p.p. 57-70, Universidad Nacional Autónoma de México, México. ISSN: 1405-7743.
- Instituto Mexicano del Cemento y Concreto, 1992 "Diseño y concreto de mezclas de concreto", ISBN 0-087031-183-2.
- Kerkhoff, Beatriz and Siebel Eberhard, "Properties of concrete with recycled aggregates (part 2.)", Beton 2/2001, Verlag Bau + Technik, 2001, paginas 105-108.
- Kosmatka, S.H., Kerkhoff, B., Panarese, W.C. & Tanesi, J. "Diseño y control de mezclas de concreto" Portland Cement Association (PCA), pagina I.S.B.N.0-89312-233-5, (2004)
- Limbachiya, M.C., "Construction and Demolition Waste Recycling for Reuse in Concrete Production" in 'Wastes Management Journal', Chartered Institution of Wastes Management, July, pp. 46-47. ISBN/ISSN 0263- 8126 (2002).
- Martínez Soto, I.E. & Mendoza Escobedo, C.J., "Comportamiento mecánico del concreto fabricado con agregados reciclados", Ingeniería, Investigación y Tecnología volumen VII, núm. 3 Julio-Septiembre 2006, p.p. 151-164, Universidad Nacional Autónoma de México, México. ISSN: 1405-7743.
- Ley general para la prevención y gestión integral de residuos (última reforma 19 de Marzo de 2014) En el Título Tercero "Clasificación de Residuos" en el artículo 19, fracción VII.
- NOM-161-SEMARNAT-2011. "Criterios para clasificar a los Residuos de Manejo Especial y determinar cuáles están sujetos a Plan de Manejo"

- NMX-C-073-ONNCCE-2004. Masa volumétrica, método de prueba.
- NMX-C-077-ONNCCE-1997. Agregados para concreto, análisis granulométrico, método de prueba.
- NMX-C-083-ONNCCE-2002. Determinación de la resistencia a la compresión de cilindros de concreto.
- NMX-C-111-ONNCCE-2004. Agregaciones para concreto hidráulico, Especificaciones y método de prueba.
- NMX-C-128-ONNCCE-1997. Determinación del módulo de elasticidad estático y relación de Poisson.
- NMX-C-152-ONNCCE-2010. Determinación de la densidad del cemento.
- NMX-C-156-ONNCCE-2010. Determinación del revenimiento en el concreto fresco.
- NMX-C-157-ONNCCE-2006. Determinación del contenido de aire del concreto fresco por el método de presión.
- NMX-C-159-ONNCCE-2004. Elaboración y curado de especímenes en el laboratorio.
- NMX-C-163-ONNCCE-1997. Determinación de la resistencia a la tensión por compresión diametral de cilindros de concreto.
- NMX-C-164-ONNCCE-2002. Determinación de la masa específica y absorción de agua del agregado grueso.
- NMX-C-165-ONNCCE-2004. Determinación de la masa específica y absorción de agua del agregado fino.
- Órgano de Gobierno del Distrito Federal, (2004) "Normas técnicas complementarias para diseño y construcción de estructuras de concreto del Reglamento de Construcciones del Distrito Federal", p.p. 104, Tomo I, No. 103 BIS, Gaceta Oficial del Distrito Federal, México.
- NMX-C-191-ONNCCE-2004. Determinación de la resistencia a la flexión del concreto usando una viga simple con carga en los tercios del claro.
- NMX-C-436-ONNCCE-2004. Coeficiente volumétrico (de forma) en agregado grueso.
- Rolón Aguilar, J.C. et. al., "Caracterización del hormigón elaborado con aridos reciclados producto de la demolición de estructuras de hormigón", Materiales de Construcción, volumen 57, núm. 288 Octubre-Diciembre 2007, p.p. 5-15. ISSN: 0465-2746.
- Serrano Guzmán, M.F. et al. "Beneficios de agregados no convencionales en mezclas de concreto" en Revista Técnica Cemento-Hormigón, número 951, Julio-Agosto 2012, P.P.46-51. ISSN: 0008 8919. (2012).
- Vidaud, I. et. al., "Concreto sustentable ¿mito o realidad? (parte 2)", en Construcción y tecnología en concreto, volumen 3, núm. 5, Agosto 2013, p.p. 20-24. ISSN: 0187-7895.
- <http://www.uepg.eu/index.php?pid=141>
- <http://www.yourhome.gov.au/materials/waste-minimisation>
- <http://www.breeam.es/>
- <http://www.usgbc.org/leed>
- <http://www.oem.com.mx/laprensa/notas/n2233181.html>
- www.aggregain.org.uk/opportunities

8 ANEXOS:

- 8.1 METODOLOGÍA Y EQUIPOS PARA PROCESAMIENTO DE ESCOMBROS PARA SU REINTEGRACIÓN A MEZCLAS DE CONCRETO HIDRÁULICO.
- 8.2 ANEXO FOTOGRAFICO DE PRUEBAS A MATERIALES, ELABORACIÓN DE CILINDROS Y PRUEBAS A CONCRETO HIDRÁULICO.
- 8.3 TABLAS Y GRAFICAS DE PRUEBAS EN ESTADO ENDURECIDO DEL CONCRETO, DEL PRESENTE PROYECTO.
- 8.4 OTROS ANEXOS GENERALES.