



# Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo



FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL  
MAESTRIA EN CIENCIAS EN INGENIERIA  
AMBIENTAL

**“Sustitución de agregado pétreo natural por  
agregados reciclados en concretos de baja y mediana  
resistencia”**

TESIS PROFESIONAL

Para obtener el título

Maestra en Ciencias en Ingeniería Ambiental

PRESENTA

MAYBELIN CAROLINA GARCÍA CHIQUITO

ASESOR

Dr. Hugo Luis Chávez García

COASESOR

Dra. Elia Mercedes Alonso Guzmán

Tesis apoyada por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología



**MCIA**  
Maestría en Ciencias  
en Ingeniería Ambiental  
UMSNH

Morelia, Mich. Noviembre 2020



# “Replacement of natural stone aggregate by recycled aggregates in low and medium strength concretes”

## Tabla de contenido

RESUMEN .....	7
ABSTRACT .....	8
1 INTRODUCCIÓN .....	9
2 ANTECEDENTES.....	10
2.1 Impacto de la construcción en el medio ambiente.....	10
2.2 Sustentabilidad en los materiales de construcción.....	11
2.3 Reciclaje. Método para el manejo sustentable de los materiales de construcción y sus desperdicios. 13	
3 JUSTIFICACIÓN .....	17
4 OBJETIVOS .....	21
4.1 General .....	21
4.2 Específicos.....	21
5 HIPÓTESIS.....	21
6 MARCO TEÓRICO .....	22



<b>7</b>	<b>CONCRETO</b> .....	<b>22</b>
7.1	Generalidades.....	22
7.2	<b>Cemento</b> .....	<b>23</b>
7.2.1	Manufactura del cemento Portland .....	24
7.2.2	Composición química .....	26
7.2.3	Hidratación del cemento.....	28
7.3	<b>AGREGADO PETREO</b> .....	<b>30</b>
7.3.1	Agregado Natural.....	31
7.4	<b>Concreto reciclado</b> .....	<b>34</b>
7.5	<b>Demolición</b> .....	<b>34</b>
7.6	<b>Trituración de los residuos de construcción</b> .....	<b>36</b>
7.7	<b>Agregados de concreto reciclado</b> .....	<b>39</b>
7.8	<b>Sustitución del agregado pétreo natural por el agregado reciclado.</b> .....	<b>41</b>
7.9	<b>Enfoque de ciclo de vida y reciclaje de concreto</b> .....	<b>43</b>
7.9.1	ACV de agregados naturales y reciclados.....	45
7.10	<b>Legislación</b> .....	<b>46</b>
7.10.1	Legislación en México.....	47
7.10.2	Legislación en Bélgica .....	48
7.10.3	Legislación en Alemania .....	49
7.10.4	Legislación de Gran Bretaña .....	49
7.10.5	Legislación en Italia.....	50
7.10.6	Legislación en Japón .....	50
7.10.7	Legislación en Holanda.....	51
7.10.8	Legislación en Portugal.....	51
7.10.9	Legislación en España.....	51
7.10.10	Legislación en USA.....	52
7.10.11	Legislación en Brasil.....	52
7.10.12	Especificaciones RILEM .....	53



7.11	Proceso para normativas en México .....	53
7.12	Beneficios económicos al usar agregados reciclados .....	54
7.13	Caracterización del material reciclado internacional y nacionalmente .....	58
7.14	Caracterización del agregado .....	62
7.14.1	Masa Volumétrica .....	62
7.14.2	Granulometría .....	63
7.14.3	Absorción .....	63
7.14.4	Densidad .....	64
7.14.5	Permeabilidad .....	65
7.14.6	Desgaste de los ángeles .....	65
7.15	Diseño de mezclas para concreto reciclado .....	66
7.16	Caracterización del concreto con agregados reciclados .....	67
7.16.1	Velocidad de pulso .....	67
7.16.2	Resistividad eléctrica .....	71
7.16.3	Compresión .....	73
7.16.4	Módulo de Elasticidad .....	74
7.16.5	Flexión .....	76
7.16.6	Ataque por sulfatos .....	76
7.17	Puzolanas .....	78
7.18	Escoria .....	79
7.18.1	Clasificación de las escorias .....	79
7.18.2	Forma de la escoria de alto horno .....	81
8	DESARROLLO EXPERIMENTAL .....	83
8.1	Recolección del material para la experimentación .....	83
8.2	Masas volumétricas .....	86
8.2.1	Masa volumétrica .....	86
8.2.2	Masa volumétrica seca varillada .....	87



<b>8.3</b>	<b>Absorción de los agregados gruesos .....</b>	<b>89</b>
8.3.1	Densidad. ....	91
8.3.2	Análisis Granulométrico en gravas y arenas .....	93
8.3.3	Desgaste de los ángeles .....	95
<b>8.4</b>	<b>Diseño de la mezcla de concreto .....</b>	<b>99</b>
8.4.1	Comparación entre el diseño teórico y el implementado .....	100
<b>8.5</b>	<b>Caracterización del concreto con agregados de concreto reciclado. ....</b>	<b>100</b>
8.5.1	Velocidad de Pulso.....	100
8.5.2	Resistividad Eléctrica .....	102
8.5.3	Compresión .....	103
8.5.4	Flexión .....	105
<b>9</b>	<b>RESULTADOS Y ANALISIS .....</b>	<b>108</b>
<b>9.1</b>	<b>Resultados de caracterización del agregado .....</b>	<b>108</b>
9.1.1	Masas Volumétricas .....	108
9.1.2	Granulometría.....	110
9.1.3	Absorción .....	112
9.1.4	Densidad .....	113
9.1.5	Desgaste de los Ángeles .....	115
9.1.6	Comparación entre proporciónamiento teórico y R-N.....	116
<b>9.2</b>	<b>Resultados de los Concretos .....</b>	<b>122</b>
9.2.1	Velocidad de Pulso.....	122
9.2.2	Resistividad Eléctrica .....	126
<b>9.3</b>	<b>PRUEBAS DESTRUCTIVAS EN CONCRETO .....</b>	<b>129</b>
9.3.1	Resistencia a la Compresión.....	129
9.3.2	Tensión indirecta .....	132
9.3.3	Flexión en vigas.....	133
<b>10</b>	<b>PROPUESTA DE FICHA TÉCNICA PARA EL DE AGREGADOS RECICLADOS. ....</b>	<b>135</b>
10.1	INTRODUCCIÓN.....	135



---

10.2	Alcance.....	135
10.3	Propiedades tecnológicas de los materiales.....	136
10.3.1	Requisitos físicos mecánicos .....	136
10.4	REQUISITOS DE CLAIIDAD DE LOS AGREGADOS GRUESOS .....	137
10.4.1	TAMAÑO MÁXIMO Y MÍNIMO DE UN AGREGADO Y GRANULOMETRIA DE LOS AGREGADOS	137
10.4.2	RESISTENCIA AL DESGASTE .....	137
10.4.3	DENSIDAD Y ABSORCIÓN.....	137
10.4.4	MASA VOLUMÉTRICA .....	138
11	CONCLUSIONES.....	139
12	BIBLIOGRAFÍA .....	140
13	ÍNDICE DE TABLAS.....	146
14	ÍNDICE DE GRÁFICOS Y FIGURAS.....	147



## Resumen

Esta investigación está enfocada en la obtención de las características fundamentales de los Agregados de Residuos de Concreto (RCA por sus siglas en inglés), características como: porcentaje de absorción, densidad, masas volumétricas, desgaste de los ángeles, etc. El realizar esta caracterización tiene como objetivo conocer los parámetros permisibles para el uso de estos agregados y poder establecer una ficha de recomendaciones para el uso de los RCA, para establecer la antes dicha se investiga la legislatura de otros países para tener un panorama amplio sobre los estándares de calidad que manejan en sus agregados reciclados y comprobar que los RCA usados para este trabajo pueden encajan dentro de estas normas. Para mejorar las propiedades de los concretos elaborados con RCA se adiciona otro residuo de la industria acerera, escoria de alto horno, esta influye en las propiedades por su contenido de sílice.

Las pruebas al concreto (compresión, flexión, tensión indirecta, etc) usando RCA son importantes pues es lo que decide si su implementación es conveniente. En este trabajo se obtienen datos que resultan favorable para la implementación de los RCA en concretos nuevos con una sustitución de un 25% de agregado grueso natural por RCA.

**PALABRAS CLAVE:** Concreto, Reciclado, Residuos.



## ABSTRACT

This research is focused on obtaining the fundamental characteristics of Residual Concrete Aggregates (RCA for its acronym in English), characteristics such as: absorption percentage, density, volumetric masses, wear of the angels, etc. The objective of carrying out this characterization is to know the permissible parameters for the use of these aggregates and to be able to establish a recommendation sheet for the use of the RCA, to establish the aforementioned, the legislature of other countries is investigated to have a broad panorama on the quality standards that they handle in their recycled aggregates and verify that the RCAs used for this work can fit within these standards. To improve the properties of the concretes made with RCA, another residue from the steel industry is added, blast furnace slag, this influences the properties due to its silica content.

Concrete tests (compression, bending, indirect tension, etc.) using RCA are important because it is what decides if its implementation is suitable. In this work, data are obtained that are favorable for the implementation of RCA in new concrete with a 25% substitution of natural coarse aggregate for RCA.



## 1 Introducción

Desde un punto de vista puramente económico, el reciclaje de residuos de construcción resulta solamente atractivo cuando el producto reciclado es competitivo con las materias primas en relación al costo y calidad. Los materiales reciclados serán normalmente competitivos donde exista falta de materias primas y lugares de vertido adecuados. Con el uso de los materiales reciclados, se pueden obtener grandes ahorros en el transporte de residuos de la construcción y materias primas. (Luritzen & Hahn)

Para el uso de los agregados reciclados se necesita establecer los límites permisibles en la característica de los agregados de concreto reciclado (RCA) con el fin de hacer su uso más conveniente para el constructor. Se pretende que mediante la investigación de las normas internacionales y nacionales y la experimentación realizada en este trabajo estos límites se puedan establecer. Además, demostrar que cumplen con las pruebas mecánicas más importantes para poder ser empleados en nuevos concretos.



## 2 ANTECEDENTES

### 2.1 Impacto de la construcción en el medio ambiente.

Actualmente es muy importante la conservación y reducción de impacto en nuestros recursos no renovables. La industria de la construcción es una de las áreas de mayor importancia para el desarrollo de infraestructura en una sociedad, sin embargo, se ha estudiado el impacto negativo que tiene durante el desarrollo de su labor, y el resultado es la investigación de nuevas técnicas y nuevos materiales que ayuden a reducir el daño que se genera. De acuerdo con Joseph y Trestsiakov-McNally (2010), alrededor del mundo la edificación consume anualmente alrededor de 25% de los recursos maderables, 40% materiales pétreos (gravas, arenas y rocas) y el 16% de agua. Y también genera el 50% de la producción global de gases de efecto invernadero y agentes de lluvia ácida. Para realizar la evaluación del impacto ambiental de los materiales de construcción se deben considerar varias cuestiones como: recolección, tratamiento y producción de materias primas, construcción, vida útil, demolición y eliminación (de Brito & Nabajyoti, 2013). Otros aspectos que se toma en cuenta son el uso de la energía y las emisiones de CO<sub>2</sub> que están en varios pasos durante la construcción, estos dos aspectos aparecen inicialmente durante la extracción de las materias primas, transportación de las mismas, manufactura, demolición, tiempo de servicio de la edificación y tratamiento de los residuos.

La siguiente tabla muestra el cálculo de la cantidad de CO<sub>2</sub> emitido a la atmósfera en varios procesos del ciclo de construcción.



Tabla 1 Cantidad de CO<sub>2</sub> emitido a la atmósfera por el proceso de construcción

Procesos	Cantidad de CO <sub>2</sub> emitido	
	Cantidad (Mt)	%
Diseño	1.3	0.5
Manufactura	45.2	15
Distribución	2.8	1
Operación en sitio	2.6	1
En uso	246.4	83
Remodelación/demolición	1.3	0.4
Total	298.4	100

(de Brito & Nabajyoti, 2013)

Por consecuencia se debe considerar, el tamaño, importancia, recursos a usar y el impacto ambiental de la industria de la construcción.

## 2.2 Sustentabilidad en los materiales de construcción.

El término de sustentabilidad involucra varios aspectos como los siguientes:

- Lo finito y delimitado del planeta, así como con la escasez de los recursos de la tierra.
- El crecimiento exponencial de su población.
- La contaminación y agotamiento de los recursos naturales.

Y de acuerdo con (UN, 1987) la sustentabilidad es utilizar los recursos necesarios para el desarrollo sin comprometer la disponibilidad para generaciones futuras, tal concepto actualmente tiene mayor relevancia debido a la explotación excesiva de los recursos a consecuencia del acelerado crecimiento de la sociedad y a sus requerimientos para una vida digna. Dentro de lo que se considera una vida digna se toma en cuenta el contar con una vivienda adecuada y lugares para el esparcimiento.

En 1994 el Consejo Internacional de la Construcción (CIB), define que una construcción sustentable es la responsable de crear y mantener un ambiente de



construcción sano que hace uso eficiente de los recursos y el proyecto se basa en principios ecológicos. También el CIB ha definido siete principios para la construcción sustentable. (Torgal & Jalali, 2011)

Tabla 2 Principios de sustentabilidad para la construcción

Principios de sustentabilidad de la construcción	
1	Reducción del consumo de los recursos
2	Reúso de los recursos
3	Uso de recursos reciclados
4	Protección de la naturaleza
5	Eliminación de materiales tóxicos
6	Aplicación del ciclo de vida
7	Enfoque en la calidad

(Kibert, 2008)

Para el buen desarrollo de una sociedad se debe poner en práctica el concepto de sustentabilidad por lo tanto se explora con el uso de materiales de construcción sustentables con elevado tiempo de vida, pero mínimas necesidades de mantenimiento a futuro (de Brito & Nabajyoti, 2013).

Actualmente la durabilidad es un factor importante que deben tener las nuevas construcciones sustentables y tiene relación con las características de los materiales que se utilizan. Un material de construcción duradero tiene una vida útil larga y, por lo tanto, reduce el costo y la cantidad de materiales utilizados en la reparación y en nuevas construcciones en un periodo de tiempo particular (de Brito & Nabajyoti, 2013).

Existen cuatro métodos para el manejo sustentable de los materiales de construcción y sus desperdicios:



1. Reúso: utilizar los materiales sin aplicar ningún proceso ni inversión.
2. Reciclamiento: recuperar los materiales por medio de una transformación química o física. Para esto se emplea inversión.
3. Re fabricación: además de utilizar el material reciclado se puede auxiliar de otro para lograr obtener un producto final mejorado.
4. Recuperación de energía: sugiere recuperar algún tipo de combustibles que genere energía con base en desperdicios de la construcción (Silverio, 2008).

### 2.3 Reciclaje. Método para el manejo sustentable de los materiales de construcción y sus desperdicios.

La necesidad de estudiar el comportamiento de materiales pétreos reciclados surge de la crisis posguerra en Europa para reconstruir en los años 40's en el siglo XX, pues se tenían grandes cantidades de escombros como resultado de los bombardeos, estos escombros comenzaron a usarse como canteras para reconstruir obteniendo buenos resultados. Los países más devastados fueron el Reino Unido y Alemania, las publicaciones de la época, mayormente británicas, alemanas y rusas dan cuenta del uso de escombros para construcción de nuevas obras civiles, sólo que mucho de los escombros eran materiales cerámicos (ladrillos, cerámicas de mobiliario de servicios sanitarios), material pétreo natural, plásticos y gomas (Hoffmann & S. Schubert, 2012) y concreto hidráulico; que posteriormente tuvieron adiciones como: escorias, cenizas, humo de sílice. A fines del siglo XX los EEUU iniciaron también sus estudios en concreto reciclado. El primer informe de concreto reciclado fue realizado en la entonces Unión de Repúblicas Socialistas Soviéticas, Por Gluzhge, P. en 1946, poco tiempo después de la 2ª Guerra Mundial (Martinez-Molina, y otros, 2015). Tiempo después en España, el profesor Enric Vázquez (UPC; Barcelona), investigador principal del proyecto, es el primero en abordar el estudio de hormigones reciclados en la década de los '80, que se impulsa con más decisión en los '90 y con gran fuerza a partir del siglo XXI. En España, no obstante, se investiga fundamentalmente el arido procedente del residuo de hormigón: los proyectos FEDER del año 1998 abren la reciente explosión de



estudios, proyectos y trabajos, que quizá cristalizan definitivamente con el proyecto RECINHOR del Ministerio de Medio Ambiente (principios de siglo) y con el grupo de trabajo a él vinculado que desarrolla el Anejo de Hormigón reciclado de la EHE-08. (GEAR).

Los estudios sobre los RCD (Residuos de Construcción y Demolición) han ido incrementando principalmente en los países con medidas sustentables, dichos países han desarrollado conjuntos de normas jurídicas, Planes de Manejo para los RCD y fichas técnicas que facilitan el aprovechamiento de los residuos obtenidos de la industria de la construcción. Países como Bélgica y Holanda en la actualidad se han valido de los medios de comunicación como las páginas web que tienen como objetivo facilitar el uso de materiales de reutilización en proyectos de construcción y renovación, un ejemplo es OPALIS. El sitio ofrece un directorio de operadores profesionales que venden materiales de construcción a partir del desmantelamiento de instalaciones o edificios antiguos. Además del suministro de productos de construcción reutilizados, estos actores a menudo ofrecen otros servicios: deconstrucción, limpieza, redimensionamiento, asesoramiento (OPALIS, 2019).

En México se ha tenido un interés mediano en la utilización del método de reciclaje de materiales para disminuir el impacto de la construcción en el medio ambiente. La existencia de una única planta para reciclado de concretos en todo el país no es insuficiente para la cantidad de residuos de la construcción que se generan.

La elaboración de elementos jurídicos para la aplicación de RCD ha tenido un avance sólido desde la creación de la LGPGIR en el 2003, la creación de la NORMA Oficial Mexicana NOM-161-SEMARNAT-2011, que establece los criterios para clasificar a los Residuos de Manejo Especial y determinar cuáles están sujetos a Plan de Manejo; el listado de los mismos, el procedimiento para la inclusión o exclusión a dicho listado; así como los elementos y procedimientos para la formulación de los planes de manejo y últimamente la creación del PLAN NACIONAL DE MANEJO DE RESIDUOS DE LA CONSTRUCCIÓN Y LA



DEMOLICIÓN (PM-RCD) que desarrolló la CMIC (Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción).

En la ciudad de México se generan 7 mil toneladas diarias de RCD de los cuales menos del 10% se recicló y a su vez solo 10% de los agregados resultantes del proceso de reciclado se utilizaron en obras de ingeniería (Concretos reciclados y eficiencia energética, 2014).

La siguiente tabla muestra un resumen de los datos del concreto reciclado en diferentes países.

Datos:

A: Millones de Toneladas de concreto reciclado

B: Territorio del país en Km<sup>2</sup>

C: Habitantes en millones

D: Relación de Concreto Reciclado en millones de toneladas por cápita

E: Relación de Toneladas de concreto reciclado producidas por Km<sup>2</sup> de territorio.

Tabla 3 Resumen de datos de concreto reciclado

País	A	B	C	D	E
Costa Rica	0.50	51,100	5	0.10	9.78
Finlandia	1.60	337,030	5.4	0.3	4.74
Luxemburgo	2.70	2,586	0.54	5	1044.08
Portugal	4.00	92,391	10.6	0.38	43.29
Dinamarca	5.00	43,098	5.6	0.89	116.01
Argentina	5.50	2 780 400	43	0.13	1.99
Suiza	7.00	41,290	7.9	0.89	169.53
Israel	7.50	22,145	8.6	0.87	3.39
República Checa	9.00	78,866	10.5	0.86	114.12
Tailandia	10.00	513,115	65.5	0.15	19.49
Colombia	13.0	1,141,748	47.4	0.27	11.38
Bélgica	14.0	30,510	10.4	1.36	458.87



Irlanda	17.00	84,421	6.2	2.74	201.37
Australia	22.0	83,371	8.3	2.65	266.88
Francia	25.00	675,417	66	0.38	37.01
Holanda	26.00	41,526	16.8	1.55	626.11
México	30.00	1,964,375	119	0.25	15.27
España	39.00	504,645	47.1	00.83	77.28
Italia	40.0	301,338	59.4	0.67	203.79
Brasil	50.0	8,500,000	200	0.25	5.88
Taiwán	67.00	35,980	23.1	2.9	1862.15
Reino Unido	70.00	243,610	63.2	1.11	287.34
Japón	77.00	377,835	126.7	0.61	203.79
Alemania	120.00	357,121	80	1.5	336.02
China	200.0	9,600,00	1,300	0.15	20.83
Estados Unidos	335.00	9,826,675	316	1.06	34.09
Mundial	900.0	150,386,640	7000	0.13	5.98

(Martinez-Molina, y otros, 2015)

Tabla 4 Composición de residuos sólidos urbanos en rellenos sanitarios

<b>PRINCIPALES SUBPRODUCTOS CARACTERIZADOS DE LAS MUESTRAS DE RESIUIOS SOLIDOS DE LOS CINCO SITIOS DE LA ZONA DE ESTUDIO (% PESO FRESCO)</b>					
<b>PRINCIPALES SUBPRODUCTOS</b>	<b>CUADRANTE</b>				
	1	2	3	4	5
<b>Materia orgánica</b>	54.164	66.127	60.994	61.456	68.234
<b>Loza y cerámica</b>	4.499	0.363	0.263	0.9	0.101
<b>Material de construcción</b>	2.562	2.886	1.374	0.102	0.76
<b>Material ferroso</b>	1.041	0.101	0.061	1.799	0.02
<b>Pañal desechable</b>	6.365	8.04	8.65	1.783	12.284
<b>Bolsa de película</b>	12.768	9.647	8.731	7.36	5.483
<b>Plástico rígido</b>	6.29	4.48	4.628	2.862	5.624
<b>Vidrio</b>	4.145	3.613	5.032	2.862	1.275
<b>Piedras</b>	4.999	1.998	4.911	11.082	2.509
<b>otros</b>	3.166	2.745	5.356	9.793	3.702

En la ciudad de Morelia se realizó un estudio en el 2012 para la composición de residuos sólidos urbanos en 2 sitios de estudio, el relleno de tierra clausurado



(RTC) y en el relleno sanitario (RESA) muestra los siguientes porcentajes de RCD (Alberto & Otoniel, 2012)

### 3 JUSTIFICACIÓN

Los catálogos de información sobre los Residuos de construcción y demolición facilitan la implementación de los agregados reciclados en las obras civiles donde se busca aumentar la demanda de productos reciclados de estos residuos, teniendo en cuenta el enorme potencial que tienen para ser utilizados.

En el Catálogo de Residuos Utilizables en Construcción publicados por el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) se encuentran fichas de algunos de los residuos (Garrido, 2015). Sin embargo, esta lista es aplicable en España y otros países europeos que cuentan con una lista similar; México aún no cuenta con un catálogo de esta índole para materiales que son desechos de la construcción. Para concebir la idea de realizar un ejemplar similar a este catálogo basta con revisar como ha crecido la demanda de agregados pétreos naturales los cuales son un recurso no renovable y no se tiene restricción en la explotación de los mismos; de ahí la importancia de tomar en cuenta la existencia del PLAN DE MANEJO DE RESIDUO DE LA CONSTRUCCIÓN Y LA DEMOLICIÓN; fortalecer este plan con la creación de fichas técnicas sobre el uso de estos residuos podría facilitar su uso.

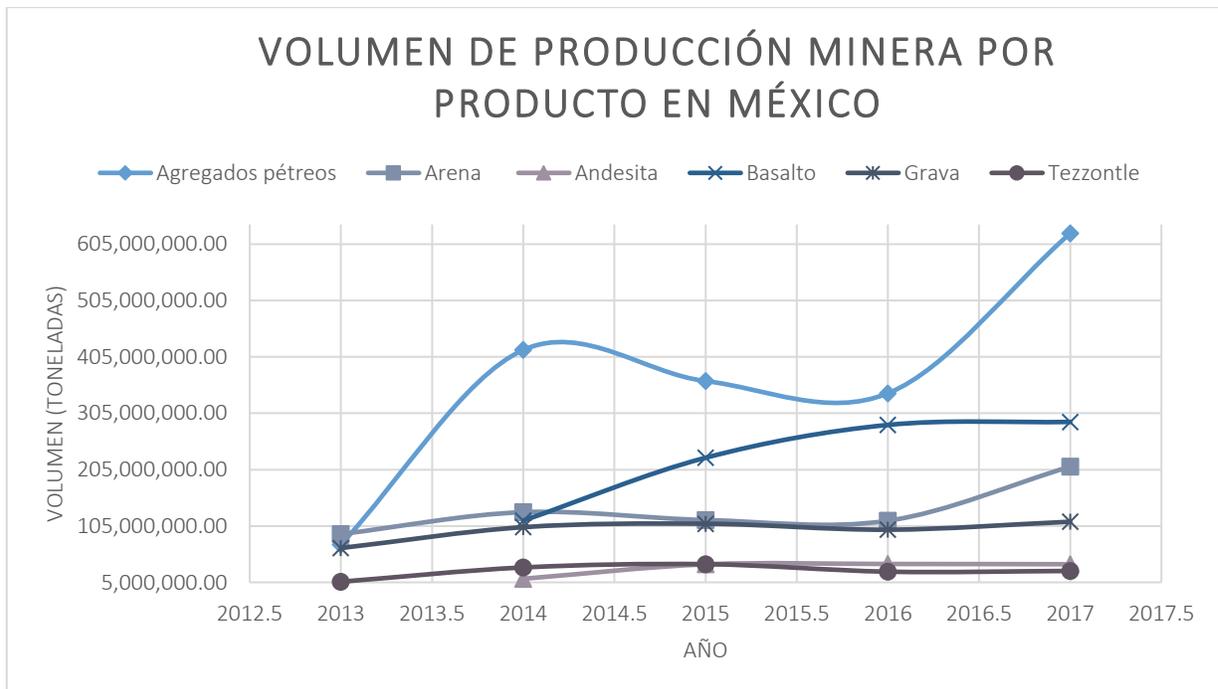
Dentro de los datos proporcionados para la elaboración de Anuario Estadístico de la Minería es su versión ampliada 2018, se observa un crecimiento en los volúmenes de producción reportados oficialmente (MINERÍA, 2018).

Los productos expuestos en la tabla 5 pertenecen al tipo de banco de material que se explota en Michoacán; bancos inventariados por la secretaria de comunicaciones y transportes (INVENTARIO DE BANCOS DE MATERIALES, 2017) .



Tabla 5 Volumen de productos por producción minera en México

PRODUCTOS	2013	2014	2015	2016	2017
<b>Agregados pétreos</b>	72,172,961.65	417,312,834.19	362,140,922.97	340,396,945.13	624,272,102.70
<b>Arena</b>	90,723,399.15	129,469,274.43	115,565,572.66	114,275,753.77	210,285,676.32
<b>Andesita</b>	-	11,381,937.60	36,991,240.00	37,594,150.00	37,130,350.00
<b>Basalto</b>	<b>386,580.00(solo contabilizado Guanajuato)</b>	114,477,340.00	226,071,780.00	284,292,800.00	289,637,340.00
<b>Grava</b>	65,873,752.45	102,909,448.41	109,002,793.89	98,398,901.75	112,546,412.73
<b>Tezontle</b>	6,120,264.75	31,425,744.40	37,294,602.00	23,909,966.45	25,227,543.00

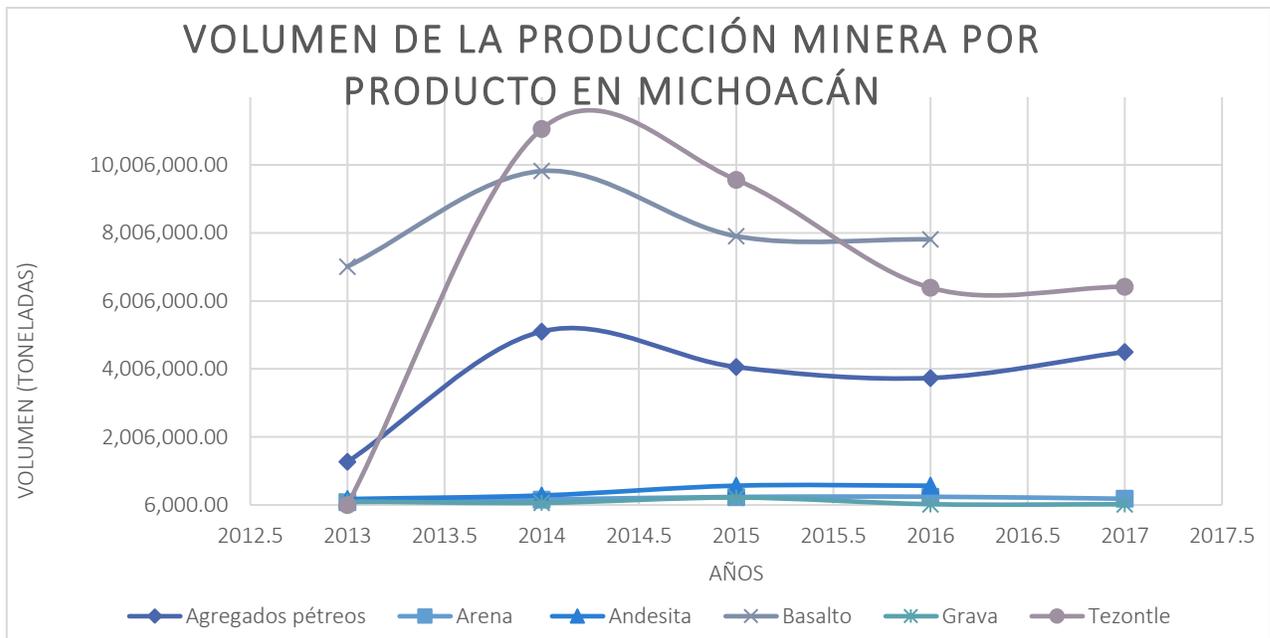


Gráfica 1 Volumen de producción minera por producto en México



Tabla 6 Volumen de producción de producto minero en Michoacán

PRODUCTOS	2013	2014	2015	2016	2017
<b>Agregados pétreos</b>	1,274,187.00	5,108,364.25	4,064,479.25	3,741,474.0	4,507,585.52
<b>Arena</b>	91,024.00	166,360.00	243,640.00	249,799.50	190,150.00
<b>Andesita</b>	-	181,150.00	287,100.00	574,200.00	574,200.00
<b>Basalto</b>	-	7,018,000.00	9,825,200.00	7,911,200.00	7,814,950.00
<b>Grava</b>	109,581.00	70,547.50	225,000.00	29,279.85	27,985.00
<b>Tezontle</b>	7,550.00	11,062,960.00	9,571,850.00	6,394,250.00	6,423,250.00



Gráfica 2 Volumen de la producción minera por producto en Michoacán



En el inventario de Bancos de Materiales del Estado de Michoacán tiene los siguientes campos considerados:

El campo de **restricción ecológica** en particular brinda otra razón para dar

- Número de Banco
- Nombre
- Kilometro (localización)
- Desviación
- Fecha de estudio
- Fecha de actualización
- Tipo de propiedad
- Tipo de material
- Tratamiento
- Volumen x 1000 m<sup>3</sup>
- Espesor de Despalme
- Usos probables
- Uso de explosivos
- Restricción ecológica
- Aspectos económicos

importancia al reciclaje del residuo de concreto y a su difusión, debido a que la mayoría de los bancos inventariados no tienen alguna restricción o en el mejor de los casos existe una “posible” restricción que no se encuentra detallada. (SCT & SECRETARIA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES, 2017)

Por consecuencia del crecimiento e inexistencia de restricciones ecológicas y para mitigar el daño en el medio biótico; el uso de agregados de concreto reciclado es viable como un material sustentable.

Otros daños que se pueden prevenir con el manejo adecuado de concretos reciclados son los siguientes:

- Obstrucción de arroyos, cañadas y barrancas.
- Afectaciones al drenaje natural.
- Focos de contaminación por mezclas de residuos, incluso peligrosos.
- Contaminación del suelo y subsuelo e incluso de acuíferos.
- Impacto visual del entorno.
- Proliferación de polvo (contaminación del aire) provoca enfermedades respiratorias.
- Proliferación de fauna nociva.



La Ciudad México cuenta con dos sitios para disposición final y transferencia de estos residuos, uno de los sitios es “Concretos reciclados”; es una planta privada de reciclado donde se procesa apenas el 3% de los residuos que se generan en la ciudad.

El sitio numero dos se encuentra en Xochimilco; es una estación de transferencia su labor consiste en solo recibir los desechos y enviarlos a algunos de los 14 sitios autorizados en el Estado de México debido al convenio entre la secretaria del Medio Ambiente de la CDMX y dicha entidad. (Q., 2017)

## 4 OBJETIVOS

### 4.1 General

Proponer una ficha técnica con las características y porcentajes de sustitución que debe cumplir el agregado de concreto reciclado.

### 4.2 Específicos

- Recolección y caracterización del material reciclado.
- Revisar los planes de manejo implementados en nacional e internacionalmente.
- Revisión de implementación de fichas técnicas en otros países.
- Pruebas destructivas y no destructivas de especímenes.

## 5 HIPÓTESIS.

El agregado reciclado puede ser implementado como un material sustentable siempre y cuando cumpla las características y pruebas físico-mecánicas correspondientes a un concreto de baja a media resistencia ( $150 \text{ Kg/cm}^2 < f'c \leq 250 \text{ Kg/cm}^2$ ).



## 6 MARCO TEÓRICO

### 7 Concreto

#### 7.1 Generalidades

El concreto es un producto que se genera a partir del uso de un medio cementante y agua. Para la producción de esta masa se debe generar una reacción a partir de agua y cemento hidráulico para formar una pasta aglutinante. A esta mezcla también hay añadir agregados pétreos (grava y arena). Los agregados pétreos pueden ser conceptualizados como un diluyente en la masa de concreto que ayuda a que este sea más barato, sin embargo, sería una manera muy ambigua de explicar la razón de su inmersión y olvidar el aporte que dan a la mezcla de concreto como: generan un mayor volumen que si se utiliza solamente la pasta pura de cemento y agua, aporta resistencia a la masa, es menos propenso al ataque por químicos que la pasta pura de cemento.

De acuerdo con la constitución básica del concreto en la siguiente ilustración se muestra la importancia que tienen los materiales pétreos (grava y arena) pues constituyen un 60% a 75% del volumen total de la mezcla de concreto, la pasta contribuye con un 25% a 40%. El volumen del agua está normalmente entre 7% y 15% y el volumen de agua entre 14% y 21%. El contenido de aire atrapado varía del 4% hasta 8% del volumen. Las propiedades con las que cumplen estos materiales en especial los agregados pétreos son las que proporcionan un buen diseño por durabilidad a una mezcla de concreto y que puede tener impacto para hacer del concreto un material más sustentable.

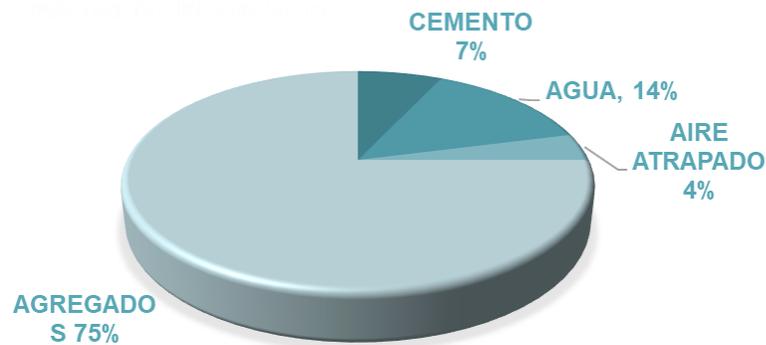


Fig. 1 Porcentaje de material usado en un concreto

## 7.2 Cemento

Los antiguos Romanos probablemente fueron los primeros en usar el concreto. Una palabra de origen latín- basado en cemento hidráulico, que es un material que endurece bajo el agua. El cemento Romano entro en desuso, y esto fue solo en 1824 con el cemento moderno, conocido como cemento Portland y fue patentado por Joseph Aspdin.

A Aspdin se le reconoce como el actual inventor del cemento Portland, aunque su método de fabricación fue conservado con mucho secreto. Su patente fue escrita en forma tan confusa y oscura, que nadie fue capaz de limitar a pesar de los esfuerzos hechos.

Únicamente hasta 1845, el inglés Isaac Johnson logró con éxito perfeccionar y fabricar este producto quemando una mezcla de caliza y arcilla hasta la formación del Clinker, el cual después de pulverizado obteniendo un compuesto fuertemente cementante. Johnson encontró que la temperatura de calcinación debía elevarse hasta el máximo que pudiera lograrse con los métodos de ese tiempo y describió sus experimentos más explícitamente que Aspdin.

Cemento Portland es el nombre dado a un cemento obtenido por una mezcla de calcáreos y arcillas, u otra sílice, alúmina, y óxido de hierro, horneados a altas temperaturas hasta obtener como resultado el Clinker.



El cemento utilizado en construcción es un producto artificial, puesto que se hace por la fusión parcial de una mezcla de materiales naturales. La mezcla usual para fabricar cemento consiste en caliza (que proporciona el  $\text{CaCO}_3$  necesario), arcilla o pizarra arcillosa (que proporcionan las cantidades necesarias de sílice y alúmina) y una pequeña cantidad de óxido de hierro. El producto (conocido con el nombre de Clinker) obtenido al calentar esa mezcla, se muele finalmente para lograr ese polvo gris amorfo tan familiar para todos los ingenieros.

Las calizas empleadas pueden variar mucho en dureza, textura y composición química, pero el magnesio, la sílice libre y el azufre son constituyentes que hay que evitar. Las arcillas utilizadas son a menudo impuras, pero es preciso que no contengan cantos o partículas sólidas libres. (Vázquez., 2014)

### **7.2.1 Manufactura del cemento Portland**

Por la definición del Cemento Portland podemos decir que principalmente es una combinación de materiales calcáreos como lo son la piedra caliza y la tiza, también de sílice y alúmina encontradas como arcilla o esquisto. El proceso de manufactura consiste principalmente en moler estos materiales hasta obtener un polvo fino, mezclándolos cuidadosamente en proporciones predeterminadas y después hornear a temperaturas cerca de los  $1400^\circ\text{C}$  y los materiales sintetizados y parcialmente fusionados en el Clinker. El Clinker es enfriado y molido a un fino polvo, con algunas adiciones de yeso, y el producto resultante es el cemento Portland comercial.

De manera más detallada y completa se hace mención de los pasos de elaboración:

1.-Explotación de materias primas: este procedimiento se hace de acuerdo a las normas y parámetros convencionales. Dependiendo de la dureza de los materiales se usan explosivos y trituración posterior, en otros casos el simple arrastre es suficiente. Una vez extraídos los materiales de las respectivas canteras, se lleva a un proceso de trituración primaria para obtener tamaños máximos de 1”.



Los materiales que no requieran trituración se llevan a un lugar de almacenamiento (Instituto del Concreto, 1997)

2.-Dosificación, molienda y homogenización de materias primas: las materias primas seleccionadas se trituran, muelen y dosifican de tal manera que la mezcla resultante tenga la composición química deseada. Se puede utilizar un proceso seco o húmedo. En el proceso seco, la molienda y el mezclado se realizan con materiales secos. En el proceso húmedo, las operaciones de molienda y de mezclado se efectúan con los materiales en forma de lechada. (Panarese, 1992)

3.-Clinkerización: Luego del mezclado, la materia prima molida se alimenta por el extremo superior de un horno, pasa a una velocidad que se controla por medio de la pendiente y la velocidad rotacional del horno. En el extremo inferior del horno el combustible para calcinar es inyectado; donde las temperaturas de 1 420°C a 1 650°C transforman químicamente a la materia prima en clinker de cemento, que tiene la forma de pelotillas negro-grisáceas de 12 mm de diámetro. (Panarese, 1992)

4.-Enfriamiento: el material transformado en clinker debe ser enfriado rápidamente a 70°C para garantizar que el cemento fabricado, después de fraguado, no presente cambio de volumen.

5.-Molienda de Clinker, adiciones de yeso: en este proceso se transforma el clinker en polvo y se agregan las adiciones (puzolanas o escoria de alto horno). Luego se introduce el yeso, se muele tan finamente que casi en su totalidad logra pasar la malla No. 200 y así se hace obtiene el cemento Pórtland propiamente dicho. El yeso es indispensable para controlar el endurecimiento del cemento una vez entra en contacto con el agua, porque cuando su cantidad es muy baja el endurecimiento puede ocurrir de manera instantánea.

6.-Empaque y distribución: el cemento resultante del molino se transporta en forma mecánica o neumática a silos de almacenamiento y posteriormente se empaca en bultos. También se puede descargar directamente en carros cisternas para su distribución a granel. (Panarese, 1992)

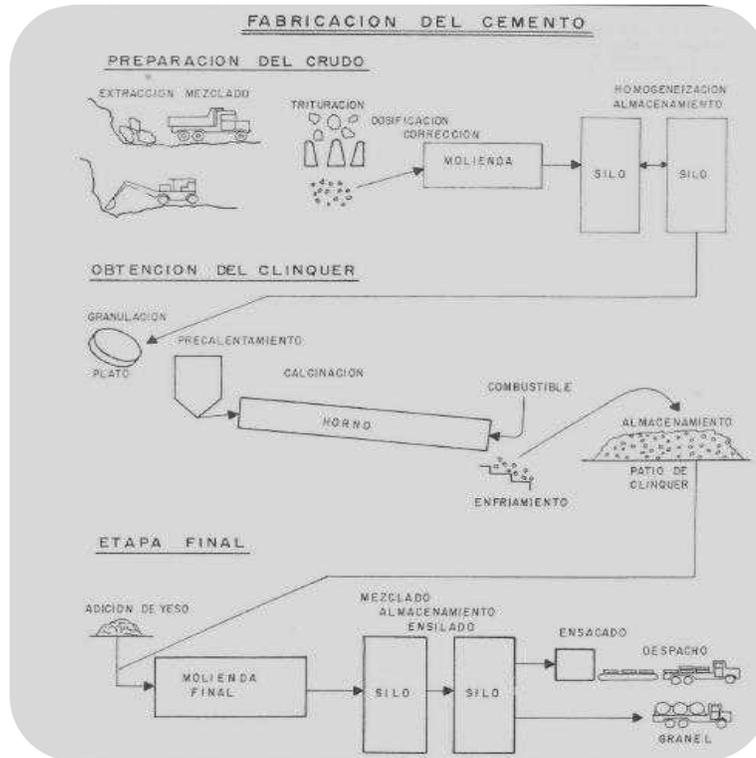


Fig. 2 Producción del cemento (Neville, 1999)

### 7.2.2 Composición química

Como sabemos, las materias primarias utilizadas en la fabricación de cemento portland consiste principalmente de cal, sílice, alúmina y óxido de hierro. Estos compuestos interactúan en el horno rotatorio de producción, para formar una serie de productos más complejos, hasta alcanzar un estado de equilibrio químico, con la excepción de un pequeño residuo de cal no combinada, que no ha tenido suficiente tiempo para reaccionar.

En la química del cemento, las fórmulas se expresan a menudo con la suma de óxidos; así, el silicato tricálcico ( $\text{Ca}_3\text{SiO}_5$ ) puede escribirse en la forma  $3\text{CaOSiO}_2$ . Esta forma no implica, por supuesto, que los óxidos constituyentes tengan una existencia independiente dentro de la estructura del compuesto. En general, se emplean abreviaturas para las fórmulas químicas de los óxidos más frecuentes, como C para  $\text{CaO}$  y S para  $\text{SiO}_2$ . El silicato tricálcico  $\text{Ca}_3\text{SiO}_5$  ( $3\text{CaOSiO}_2$ ) se transforma así en C3S. Este sistema se usa con frecuencia.



De acuerdo con lo descrito anteriormente, en la tabla 7 podemos ver cómo es la abreviatura de cada uno de los componentes del cemento.

Tabla 7 Componentes químicos del cemento

Nombre del componente	Composición	abreviación
<b>Silicato Tricálcico</b>	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	$\text{C}_3\text{S}$
<b>Silicato Dicálcico</b>	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	$\text{C}_2\text{S}$
<b>Aluminato Tricálcico</b>	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{C}_3\text{A}$
<b>Aluminoferrito tetracálcico</b>	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{C}_4\text{AF}$

Es importante saber y entender que función tiene cada uno de los componentes anteriores.

Los silicatos,  $\text{C}_3\text{S}$  y  $\text{C}_2\text{S}$ : son los más importantes, son responsables de la hidratación de la pasta del cemento. En realidad, los silicatos en cemento no son componentes puros, pero cuentan con una cantidad menor de óxidos en solución sólida. Estos óxidos tienen efectos significativos en el proceso atómico, en la forma de los cristales, y las propiedades hidráulicas de los silicatos. (Neville, 1999)

La presencia de  $\text{C}_3\text{A}$  es despreciable: este compuesto tiene una pequeña contribución podría decirse que casi nula en la fuerza que obtiene el cemento, excepto en edades tempranas y cuando la pasta dura es atacada por sulfatos, la formación de calcio sulfuro aluminato puede causar disrupción. De cualquier manera, el  $\text{C}_3\text{A}$  es benéfico en el proceso de manufactura del cemento para combinar con facilidad los limos y silicatos). (Neville, 1999)

El  $\text{C}_4\text{AF}$ : también se presenta en el cemento en cantidades pequeñas, y en comparación con los otros tres componentes, su efecto no es significativo; este componente reacciona con gypsum para formar calcium sulfoferrite y la presencia de este puede acelerar la hidratación de los silicatos. (Neville, 1999)

La cantidad de yeso al Clinker es crucial, y dependiente del contenido de  $\text{C}_3\text{A}$  y el contenido de álcali del cemento. Incrementando el grado de finura del cemento



tiene el efecto de aumentar la cantidad de C3A disponible en edades tempranas y esto plantea la exigencia de yeso. El contenido de yeso óptimo es determinado en base a la generación de calor en la hidratación. (Neville, 1999)

Otros compuestos que son parte del cemento son MgO, TiO<sub>2</sub>, Mn<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, K<sub>2</sub>O, Y Na<sub>2</sub>O; estos usualmente son un pequeño porcentaje de todo lo que es la masa de cemento. Dos de estos componentes son de interés, los óxidos de sodio y potasio Na<sub>2</sub>O y K<sub>2</sub>O, conocidos como álcalis. Se les ha encontrado que tienen reacción con algunos agregados, la producción de álcali-agregado causa disgregación del concreto.

### **7.2.3 Hidratación del cemento**

Anteriormente se dio una amplia explicación de lo que es el cemento y sus principales componentes. El resultado obtenido de la combinación de varios compuestos es un polvo fino con características específicas según sus componentes, sin embargo, en la práctica el cemento como lo obtenemos en polvo no nos es de gran utilidad y necesitamos mezclarlo con agua para crear una pasta.

La combinación del cemento y agua forma productos de hidratación o hidratantes, que con el tiempo forman una firme y dura masa.

La propuesta de Le chatelier y Williamson implica una constante disolución y precipitación de los productos hidratados a partir de una solución sobresaturada por un aumento de temperatura producido porque la hidratación es una reacción exotérmica. (Científicas, s.f.)

Como comienza tempranamente, los dos silicatos de calcio son los componentes cementosos del cemento, la forma de hidratación es más rápida que después.

Una vez que tenemos conocimiento de los compuestos que tiene el cemento y la característica que aporta en la mezcla, podemos hablar de las fases que se forman y la aportación que hacen en esta pasta cementante.



Los silicatos de calcio cuentan con pequeñas impurezas de algunos óxidos presentes en el Clinker. Estas impurezas tienen un efecto de fuerza en las propiedades de los silicatos hidratados. La impureza C3S es conocida como alita y la impureza C2S como belita. (Neville, 1999)

El contenido de estas dos sumas aproximadamente de 70 a 80% del cemento. Se supone que, de manera aproximada, el C3S aporta una resistencia a corto y mediano plazo (contribución al desarrollo de la resistencia durante las primeras cuatro semanas) y el C2S a mediano y largo plazo (contribución al desarrollo de la resistencia de la cuarta semana en adelante).

Sin embargo, en este proceso de hidratación contamos con otras 2 fases que son aluminato y ferrito. A continuación, se describen las 4 fases más importantes del proceso:

- **Halita, con alto contenido de C3S:** es la fase principal de la mayoría de los clinkers Portland, y de ella dependen en buena parte las características de desarrollo de resistencia mecánica. Reacciona rápidamente con el agua, endurece en corto tiempo y tiene alto calor de hidratación, de tal manera, que afecta el tiempo de fraguado y la resistencia inicial
- **Belita, a base de C2S:** es usualmente la segunda fase en importancia del clinker. Su componente principal (C2S) reacciona lentamente con el agua, con un consecuente bajo calor de hidratación y una contribución al desarrollo de la resistencia a partir de siete días.
- **Aluminato, rica en C3A:** este compuesto no es puro, sino más bien una solución sólida de C3A con algo de impurezas de SiO<sub>2</sub> y MgO que reacciona de manera rápida con agua, contribuye con calor alto de hidratación y a una alta resistencia inicial. Además, confiere al concreto propiedades indeseables, como cambios volumétricos y poca resistencia a la acción de los sulfatos razón por la cual



su contenido se limita entre 5 y 15% según el tipo de cemento (Instituto del Concreto, 1997)

- **Ferrita C4AF**, solución sólida compuesta por ferritos y aluminatos de calcio: este componente está presente en pequeñas cantidades en el cemento y en comparación con los otros tres componentes, no influye en forma significativa en su comportamiento, colaborando escasamente a la resistencia del concreto, siendo relativamente inactivo, pero es útil al facilitar la fusión durante el calcinamiento del clinker. (Neville, 1999)

### 7.3 AGREGADO PETREO

Los agregados pétreos son un componente indispensable y de gran importancia en el concreto, gracias a las propiedades que le aportan. Existen diferentes tipos de agregado pétreo, más que nada depende de la región donde se localice y características como: el estado físico y composición química.

La variación en sus características puede ocurrir también durante los procesos de explotación, manejo y transporte. Y puesto que forman la mayor parte del volumen del material, se consideran componentes críticos en el concreto y tienen un efecto significativo en el comportamiento de las estructuras.

Se estima que aproximadamente tres cuartos del volumen del concreto es ocupado por el agregado (A.M. NEVILLE, 1987). El agregado pétreo no solo se limita a dar fuerza a la masa o mezcla de concreto sino también tiene un efecto sobre la durabilidad y la estructura en cómo se forma esta mezcla.

El agregado puede tener diferente procedencia, ya sea depósitos naturales o por trituración de alguna roca. En cuanto a depósitos naturales nos referimos a la extracción de en los bancos, ríos, playas, etc. que dependiendo de la ubicación el agregado tendrá diferentes características. También existe la posibilidad de utilizar un agregado reciclado, su procedencia puede ser de las construcciones demolidas, ya que los trozos de concreto pueden mandarse a triturar y se obtiene un agregado del tamaño deseado, las características de este agregado pueden ser muy variables y totalmente diferentes a un agregado natural.



Una de las clasificaciones según el tipo de agregado es:

- **Agregados Naturales.** Son aquellos que se utilizan solamente después de una modificación de su distribución de tamaño para adaptarse a las exigencias según su disposición final.
- **Agregados de Trituración.** Son aquellos que se obtienen de la trituración de diferentes rocas de cantera ó de las granulometrías de rechazo de los agregados naturales. Se incluyen todos los materiales canterables cuyas propiedades físicas sean adecuadas.
- **Agregados Artificiales.** Son los subproductos de procesos industriales, como ciertas escorias o materiales procedentes de demoliciones, utilizables y reciclables.
- **Agregados Marginales.** Los agregados marginales engloban a todos los materiales que no cumplen alguna de las especificaciones vigentes.

### **7.3.1 Agregado Natural**

Los agregados naturales se forman a partir de procesos naturales como la abrasión y el intemperismo. Las siguientes propiedades dependen de la roca de origen: químicas, composición mineralógica, clasificación petrográfica, gravedad específica, dureza, estabilidad física y química, tipo de estructura, color, etc.

La existencia de diferentes tipos de agregados es muy extensa por lo que se cada uno tiene características físicas distintivas y su influencia en el concreto cuando son utilizadas como agregado es diferente.

Los agregados naturales se clasifican generalmente en finos y gruesos. Un agregado fino o arena es cualquier material que pasa la Malla No. 4, es decir, un tamiz con cuatro aberturas por pulgada lineal. El material más grueso que no pasa por esta malla se clasifica como agregado grueso o grava. El tamaño máximo del agregado grueso para concreto reforzado está controlado por la facilidad con que éste debe entrar en los espacios entre barras de refuerzo. La norma ASTM C33-03



“Standard specification for concrete aggregates” presenta los requisitos para agregados de buena calidad.

La opción más común en la fabricación de concreto de buena calidad es obtener agregados en al menos dos grupos de tamaño; la división principal se hace entre agregado fino, llamado a menudo arena, y agregado grueso, conocido como grava. (Neville, 1999)

#### 7.3.1.1 *Propiedades Químicas*

Las exigencias químicas que se deben solicitar a los agregados para evitar su reacción en la masa del concreto, son las de evitar sustancias presentes agresivas y componentes geológicos o mineralógicos agresivos, entre los cuales el más frecuente parece ser la sílice activa.

**Epitaxia:** esta es la única reacción química favorable de los agregados conocidos hasta el momento. Da mejor adherencia entre ciertos agregados calizos y la pasta de cemento, a medida que transcurre el tiempo.

**Reacción álcali-agregado:** la sílice activa, presente en algunos agregados, reacciona con los álcalis del cemento produciendo expansiones, destrucción de la masa y pérdida de características resistente. (Instituto del Concreto, 1997)

#### 7.3.1.2 *Propiedades Físicas*

Las propiedades físicas son muy importantes ya que están más relacionadas a la resistencia que tendrá nuestra masa de concreto una vez que ya está seca.

**Granulometría:** es la composición, en porcentaje, de los diversos tamaños de agregados en una muestra. Esta proporción se suele indicar, de mayor a menor tamaño, por una cifra que representa, en masa, el porcentaje parcial de cada tamaño que pasó o quedó retenido en los diferentes tamices que se usan obligatoriamente para tal medición.



**Porosidad y absorción:** cuanto más poroso es, menos resistencia mecánica tiene, por lo tanto, cuanto menor sea la absorción, es más compacto y de mejor calidad.

**Forma:** La forma de los agregados es una característica importante ya que afecta a la trabajabilidad del concreto, esta forma depende del tipo de roca que lo originó, ya que para ciertas piedras resulta determinante el sistema de clivaje, las posibles instrucciones en la roca y su estado de meteorización.

### 7.3.1.3 *Propiedades mecánicas*

**Dureza:** propiedad que depende de la constitución mineralógica, la estructura y la procedencia del agregado. En la elaboración de concretos sometidos a elevadas tasas de desgaste por roce o abrasión, como aplicaciones en pavimentos o revestimientos de canales, la dureza del agregado grueso es una propiedad decisiva para la selección de los materiales.

**Resistencia:** el agregado grueso, en mayor medida que el fino, va a resultar relacionado con el comportamiento de las resistencias del concreto, por su aporte en tamaños de grano dentro de la masa de la mezcla. En tal sentido, una de las posibilidades de ruptura de la masa es por medio del agregado grueso (las otras son por la pasta y por la interface de contacto entre pasta y agregado). De esta manera, la resistencia de los agregados cobra importancia y se debe buscar que éste nunca falle antes que la pasta de cemento endurezca. La falla a través del agregado grueso se produce bien sea porque tiene una estructura pobre entre los granos que constituyen las partículas o porque previamente se les han inducido fallas a sus partículas durante el proceso de explotación (especialmente cuando éste se hace por voladura) o por un inadecuado proceso de trituración. Adicionalmente, cuando se aumenta la adherencia por la forma o textura superficial del agregado al buscar una alta resistencia del concreto, también aumenta el riesgo de que las partículas del agregado fallen antes de la pasta de cemento endurecida.



**Tenacidad o resistencia a la falla por impacto:** es una propiedad que depende de la roca de origen y se debe tener en cuenta ya que tiene mucho que ver con el manejo de los agregados, porque si estos son débiles ante las cargas de impacto, se puede alterar su granulometría y también disminuir la calidad del concreto que con ellos se elabore.

**Adherencia:** es la interacción que existe en la zona de contacto agregado-pasta, la cual es producida por fuerzas de origen físico-químico. Entre más adherencia se logre entre la pasta de cemento endurecida y los agregados, mayor será la resistencia del concreto. La adherencia depende de la calidad de la pasta de cemento y, en gran medida, del tamaño, forma, rigidez y textura de las partículas del agregado, especialmente cuando se trata de resistencia a flexión. Hoy en día, no se conoce ningún método que permita medir la buena o mala adherencia de los agregados, pero es claro que aumenta con la rugosidad superficial de las partículas. (Instituto del Concreto, 1997)

## 7.4 Concreto reciclado

La diferencia más sobresaliente entre un concreto reciclado y un concreto convencional es la procedencia del agregado y los porcentajes de sustitución que se deben usar. También hay diferencia en el comportamiento mecánico del concreto debido a las interacciones que se hacen entre el agregado reciclado y la matriz cementante.

## 7.5 Demolición

La necesidad de maximizar el reúso y reciclado de residuos de la construcción ha forzado a la aparición de un nuevo procedimiento llamado “demolición selectiva. La demolición selectiva de las estructuras es determinante en los beneficios para el reúso de los residuos de construcción; entre estos beneficios se encuentra aumentar la calidad de los agregados reciclados, minimizando la



cantidad de impurezas y contaminantes en los residuos de construcción y demolición. Por lo tanto, el proceso de demolición es más complejo y lleva mayor tiempo, esto repercute en un mayor costo en comparación con la demolición tradicional, lo cual significa que esta técnica solo podría ser viable si se proporciona una compensación financiera por aplicar esta opción o si las regulaciones favorecen para que pueda ser aplicado el proceso.

Aprovechar todo el potencial de la demolición selectiva implica que en la fase de diseño se cumplen algunos principios para mejorar el desmontaje del edificio: (Kimbert, 2005)

1. Uso de materiales reciclados y reciclables;
2. Minimice el número de tipos de materiales;
3. Evitar materiales tóxicos y peligrosos;
4. Evitar materiales compuestos y hacer productos inseparables de materiales similares;
5. Evitar acabados secundarios a los materiales;
6. Proporcionar regulación y permanente identificación de los tipos de materiales
7. Minimice el número de diferentes tipos de componentes;
8. Usar preferentemente conexiones mecánicas en lugar de químicas
9. Use un sistema de construcción abierto con partes intercambiables;
10. Use diseño modular
11. Utilice tecnologías de ensamblaje compatibles con las prácticas de construcción estándar;
12. Separar la estructura del revestimiento;
13. Proporcionar acceso a todos los componentes del edificio;
14. Diseñe componentes dimensionados para adaptarse al manejo en todas las etapas;
15. Proporcionar manipulación de componentes durante el montaje y desmontaje;
16. Proporcionar tolerancia adecuada para permitir el desmontaje;



17. Minimice el número de sujetadores y conectores;
18. Minimice los tipos de conectores;
19. Diseñe juntas y conectores para resistir el montaje y desmontaje repetidos;
20. Permitir el desmontaje paralelo;
21. Proporcionar identificación permanente para cada componente;
22. Use una grilla estructural estándar;
23. Utilice conjuntos prefabricados;
24. Use materiales y componentes livianos;
25. Identifique el punto de desmontaje de forma permanente;
26. Proporcionar repuestos y almacenamiento para ellos;
27. Retener información sobre el edificio y su proceso de montaje.

De acuerdo con Thormak el diseño de desmontaje tiene múltiples beneficios medioambientales, económicos y sociales.

En México al no tener este proceso la selección de los materiales a reciclar es manual, por lo tanto, en muchas ocasiones la materia prima para los RCA está contaminada por algunos otros materiales como alambre, yeso, mampostería, vidrio, etc.

## 7.6 Trituración de los residuos de construcción

Para el tratamiento y uso de rocas y minerales, es necesario practicar una preparación de los mismos y dentro de esa preparación se requiere efectuar una reducción de tamaño. Las operaciones mediante las que se efectúan dichas reducciones de tamaño por medios físicos se denominan trituración y molienda. Las operaciones citadas se realizan con el objeto de facilitar el transporte de los materiales, las operaciones físicas (tales como mezclado, dosificación, aglomeración o disolución) y facilitar o permitir las reacciones químicas (como consecuencia de que la velocidad de reacción es función de la superficie de las partículas y es tanto más grande cuanto mayor es su grado de subdivisión).



Generalmente se habla de trituración cuando se fragmentan partículas de tamaños superiores a 1 pulgada y de molienda cuando se tratan partículas de tamaños inferiores a 1 pulgada.

El proceso de trituración se recomienda se realice en 2 etapas. La primera etapa para obtener tamaños nominales máximos de 3 a 4 pulgadas y la trituración secundaria para obtener un tamaño específico del material, no siempre es necesario utilizar dos métodos de trituración, el criterio de selección va de acuerdo a las características que ocupemos para el agregado. Existen 3 métodos usuales de trituración como a continuación se describe.

- Las trituradoras de mandíbula usan una placa de acero grande para comprimir fragmentos de concreto contra una placa estacionaria dentro de la carcasa de la trituradora. El tamaño superior agregado se controla variando la cantidad de cierre de la mandíbula. Las trituradoras de mandíbula se usan comúnmente como trituradoras primarias porque pueden manejar fragmentos de losas más grandes que las trituradoras de cono. Se utilizan principalmente para la desintegración de material grueso, produciendo material irregular, puntiagudo y con aristas. Son la mejor opción para una trituración primaria y, eventualmente, en trituración secundaria.

Estas trituradoras tienen una alta producción, pero producen un alto porcentaje de lascas lo que obliga a emplear un molino secundario que confiera forma cubica al árido. a distribución de tamaño de grano más adecuada de RA para hormigón

Este tipo de trituración da la distribución de tamaño de grano más adecuada de RA para hormigón.

- Las trituradoras de cono usan un cono giratorio excéntrico para atrapar y aplastar fragmentos de concreto contra el triturador interior que aloja las paredes. Cuando el material se vuelve lo suficientemente pequeño, se escapa por la parte inferior de la carcasa de la trituradora. La mayoría de las trituradoras de cono pueden manejar fragmentos de losas no mayores

de 8 pulgadas de diámetro. Por esta razón, se usan con mayor frecuencia como unidad de trituración secundaria en operaciones de reciclaje de concreto.

- Las trituradoras de impacto utilizan "barras de soplado" de acero pesado montadas en un rotor horizontal o vertical para impactar repetidamente fragmentos de concreto y arrojarlos contra yunques de acero o "placas de ruptura" en la trituradora de vivienda. El rotor continúa lanzando partículas que son más grandes que el tamaño superior deseado. Se caracterizan por una elevada tasa de reducción, por la propiedad de dar forma cúbica al producto, por lo que se suelen utilizar para trituración secundaria, aunque los grandes trituradores de impacto también se usan para trituración primaria. Las trituradoras de impacto tienden a eliminar más mortero del agregado grueso, resultando en agregado reciclado más fino y menos No. 200 finos y menor rendimiento de agregado reciclado grueso. Pero el agregado reciclado grueso producido en una trituradora de impacto a menudo produce concreto de mayor calidad si usado para esa aplicación ya que hay menos mortero recuperado presente. (Transportation, 2011)

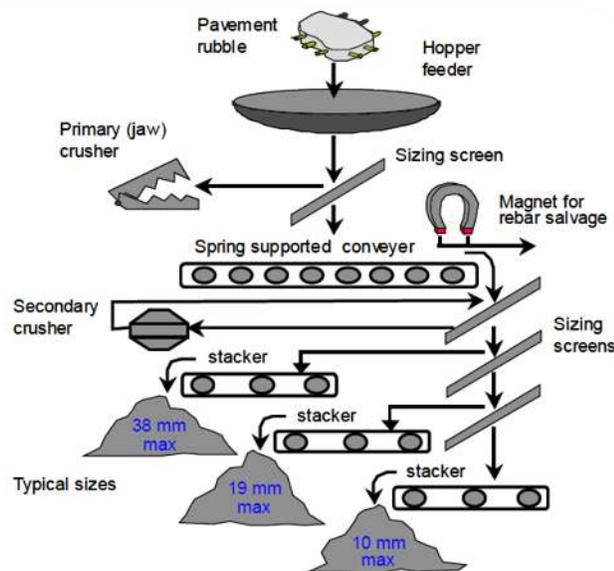


Fig. 3 Proceso de trituración de los RCA (Kibert, 2008)



Los proyectos de construcción más pequeños pueden emplear mini trituradoras de concretos portátiles que se pueden remolcar detrás de un camión para facilitar el transporte y reducir los requisitos de espacio (Hiller et al. 2011). Estas trituradoras reducen significativamente los costos de transporte asociados con las operaciones de trituración fuera del sitio y se puede utilizar eficazmente para asegurar los tamaños de RCD's deseados. En general, los tamaños de RCD's se seleccionan según sobre el uso anticipado del concreto, con un rendimiento general que depende en gran medida del tamaño máximo de agregado (ya que el triturado a un tamaño más pequeño crea más finos que no se pueden utilizar).

## 7.7 Agregados de concreto reciclado

De una manera muy general se tiene la clasificación de los residuos de construcción y demolición de la siguiente manera (de Brito & Nabajyoti, 2013).

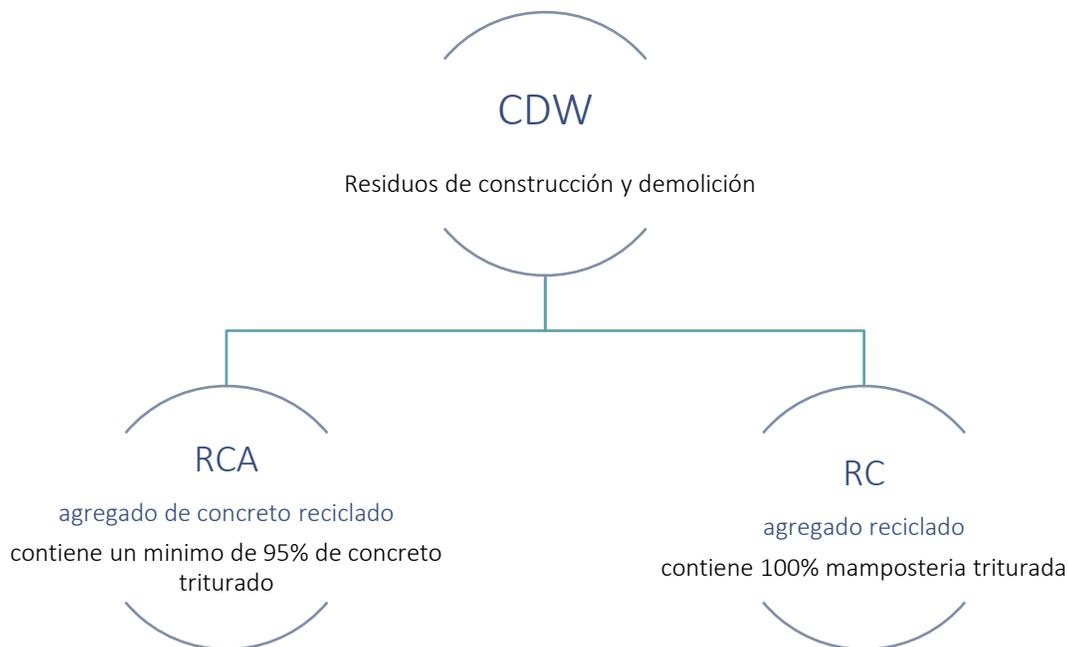


Fig. 4 Clasificación de los RA

De acuerdo con las recomendaciones del RILEM, el agregado grueso reciclado se puede clasificar en tres categorías en función de su composición:



- Tipo 1: Agregado procedente de su mayoría de escombros de fábrica de ladrillo
- Tipo 2: Agregados procedentes de escombros de concreto
- Tipo 3: Agregados compuestos por una mezcla de pétreos naturales (mayor a 80%) y agregado de fábrica de ladrillo (inferior a 10%) o en su defecto agregado de concreto hasta un 20%.

En la mayoría de los países de la unión europea se suele usar 4 tipos de agregados reciclados (ACHE grupo de trabajo Hormigón, septiembre 2006):

- Agregado de Plantas de Tratamiento. Pueden distinguirse de los agregados procedentes del concreto, ya que éstos tienen propiedades específicas de elaboración.
- Agregados reciclados cerámicos. Se obtiene en el procesamiento del material predominantemente cerámico. El 85% de este agregado debe tener una densidad seca superior de 1600 kg/m<sup>3</sup> según la norma holandesa, para evitar materiales excesivamente porosos y ligeros.
- Agregados reciclados mixtos. Deberá contener un porcentaje mayor del 50% de concreto con una densidad seca superior a 2100 kg/m<sup>3</sup> y no más del 50% de materiales pétreos reciclados de distinta naturaleza que el concreto, incluyendo los cerámicos con una densidad seca mayor de 1600 kg/m<sup>3</sup>.
- Agregado reciclado de concreto. Es el único tipo de agregado que es admisible para concretos estructurales. Tiene valores límite para las impurezas que puedan tener efectos negativos sobre la resistencia y la durabilidad, un contenido mínimo del 80% de concreto y posee una densidad superior a 2100 kg/m<sup>3</sup>.

Depende de la procedencia del material se le da o no tratamiento. Los residuos (CDW) se tratan porque quizá puedan contener componentes perjudiciales o su elaboración fue de mala calidad. Conocer la caracterización del residuo antes



de usar es necesario y los materiales de residuo pueden ser mezclados con otro material que aporten beneficios a sus características (de Brito & Nabajyoti, 2013).

## 7.8 Sustitución del agregado pétreo natural por el agregado reciclado.

El concreto es uno de los materiales de construcción más utilizado a nivel mundial debido a sus sollicitaciones mecánicas y versatilidad; sin embargo, no es un material amigable con el medio ambiente debido a la explotación de bancos de materiales existentes en el país y a la producción de su componente principal, el cemento Portland (CP), se emiten grandes cantidades de CO<sub>2</sub> a la atmósfera (629kg por tonelada de producción), lo cual es preocupante ya que éste último es uno de los gases de efecto invernadero (FICEM, 2013).

Al conocer el porcentaje que ocupa el material pétreo en una mezcla de concreto resulta conveniente realizar una sustitución de 30%-50% (Lauch, Vrijders, & Doms, 2018) del material pétreo natural por reciclado. Los beneficios de la sustitución tienen efecto en el ámbito ambiental (reducción en la explotación de bancos de material, manejo adecuado de los residuos de construcción y demolición, reducción de focos de contaminación en las ciudades) pero también en los costos de elaboración de una obra.

La naturaleza de estos residuos de construcción y demolición depende del tipo de obra o infraestructura de la que se obtienen, del tipo y calidad de material utilizado en ellas, y en parte también del tipo de demolición aplicado.

El agregado de concreto reciclado puede implementarse en los siguientes casos mostrados en la tabla 8.



Tabla 8 Aplicación de los Residuos de Construcción y Demolición

RESIDUO	MATERIAL RECICLADO	APLICACIÓN
Escombros Mezclados de Concretos y Morteros	Agregado Reciclado	Bases Hidráulicas en caminos y estacionamientos. Concretos Hidráulicos.
Escombros mezclados	Material Firme	Terraplenes
Escombros mezclados	Arena Reciclada	Cobertura en Rellenos, Sustituto de Tepetate. Fabricación de Blocks, Tabiques, Adocreos, Losetas, Postes, Bordillos, Guarniciones.
Escombros Mezclados	Agregados Finos	Andadores y Ciclopistas
Escombros Mezclados	Agregados Reciclados	Camas de Tuberías, Acostillamiento y Relleno. Relleno de cimentaciones. Pedraplenes. Rellenos de azoteas y jardineras. Conformación de terrenos.
Residuo de concreto	Grava y arena reciclada	Guarniciones y banquetas. Firmes de concreto. Construcción de muros.



## 7.9 Enfoque de ciclo de vida y reciclaje de concreto

Es necesario hacer una evaluación de los beneficios derivados del reciclaje del concreto para el desarrollo sostenible. Los procesos para la obtención de concreto tienen un alto impacto medioambiental, específicamente en la fase de producción del cemento. El transporte y entrega en todas las etapas de la producción es la segunda fuente más importante de impactos. Los factores más importantes que se deben comparar al utilizar agregados reciclados y agregados puros son los siguientes:

- **Costos de transporte** incluyendo consumo de combustible y emisiones de CO<sub>2</sub>. Generalmente los RCD se localizan dentro de las urbes o en el sitio de la construcción, en tanto que los materiales vírgenes suelen obtenerse de canteras distantes y áreas naturales. Los costos de transporte pueden incrementarse al utilizar agregados reciclados sino existen maneras viables de procesar los agregados reciclados en el sitio donde serán utilizados.
- **Contaminación atmosférica, hídrica y auditiva y el consumo energético** de los sistemas de procesamiento al recuperar el concreto o utilizar materiales naturales.
- **Impacto sobre el uso del suelo**- Utilizar agregados reciclados implica
  - Que menos desechos se destinen a los vertederos
  - Que los suelos sean conservados y que sean menos explotados como fuente de materias vírgenes.
- **Impactos ambientales durante la fase de uso.** Los agregados reciclados tienen propiedades similares a las del concreto convencional. Por lo tanto, generalmente hay una menor diferencia en el impacto desde la perspectiva de fase de uso.
- **Expectativa de vida útil.** La durabilidad del concreto y del concreto reciclado significa que su larga vida útil puede presentar ventajas en sostenibilidad frente a otros materiales de construcción.



Cuando se hablan de desarrollo sostenible, el tema regularmente es enfocado en las grandes reducciones de emisiones de gases con efecto invernadero que conlleva un proceso, sin embargo, el reciclaje de concreto no presenta muchas oportunidades para disminuir la generación de estos gases con efecto invernadero. (CONSEJO MUNDIAL EMPRESARIAL PARA EL DESARROLLO SOSTENIBLE). La oportunidad que se tiene de reducción de los gases con efecto invernadero es durante la producción de los agregados reciclados en el sitio de la construcción, debido a que no implican un transporte, sin embargo, esta no es la única fase que se tiene en el proceso de utilización de RA. Para contemplar todas las fases del proceso al utilizar RA y obtener datos que sean cuantificables los estudios se deben basar en metodologías apropiadas que cumplan con estos dos criterios. La metodología más utilizada es un Análisis de Ciclo de Vida (ACV).

El análisis del ciclo de vida (ACV) se emplea para considerar y comparar los impactos medioambientales de una serie de materiales y productos. Un ACV puede ser útil en la determinación del mejor uso para los RCD. Un buen análisis de Ciclo de Vida debe contemplar todas las etapas de un producto y debe tomar en cuenta los usos alternativos, así como los flujos de residuos asociados, la extracción de materias primas, transporte y procesamiento de materiales, fabricación, distribución y uso de productos, reparación y mantenimiento, y desechos o emisiones asociados con el producto, proceso, o servicio, así como eliminación, reutilización o reciclaje al final de su vida útil. (Pellegrin & Faleschini, 2016). El ACV contempla múltiples indicadores medioambientales y de acuerdo a la normativa ISO el ACV consiste en 4 fases:

- 1) Definición de metas y alcances
- 2) Compilación del inventario del ciclo de vida
- 3) Evaluación de los impactos en el ciclo de vida
- 4) Interpretación de los resultados

En la Fig.5 se muestran estas fases con su desglose.



Fig. 5 ciclo de vida

### 7.9.1 ACV de agregados naturales y reciclados.

Para un ACV de agregados se toma en cuenta los procesos de producción de acuerdo al tipo de agregado y las características de estos pueden ser comparadas con los requerimientos mínimos para la aplicación de cierto tipo de concreto.

En bastas investigaciones para realizar este análisis se toman en cuenta los siguientes datos como indispensables para cuantificar y definir las entradas y salidas del sistema de producción.

- Energía, materia prima, entradas auxiliares y otras.
- Productos generados, subproductos y desechos.
- Emisiones al aire, agua y suelos.
- Otros factores medioambientales.

En sus investigaciones (Fernando López Gayarre, 2015) y (Ardavan Yazdanbakhsh, 2017) concluyen que en los procesos de obtención de agregados reciclados y las aplicaciones los beneficios ambientales son mínimos en comparación con los procesos de los agregados naturales. Sin embargo, los beneficios se obtienen al



evitar el vertido de CDW (desechos de concreto y demolición) en los rellenos sanitarios con el propósito de generar RCA que puedan ser utilizados en las obras. Otro de los factores que hacen rentable el uso de RCA es la implementación de estaciones móviles de triturado para ser utilizados directamente en el sitio sin necesidad de ser transportados.

## 7.10 Legislación

Para la regularización de los residuos de concreto y demolición se debe imponer la ejecución de un plan de manejo que cumpla con los siguientes apartados:

- Características de las obras de ejecución.
- Principales generadores del residuo.
- Estimaciones de las cantidades de cada material.
- Propuestas para minimizar, reusar y reciclar.
- Forma de transportar el residuo de construcción y demolición.

Se debe preparar un plan de manejo de los residuos de concreto y demolición tanto para obra pública como privada en los siguientes casos:

- Desarrollos residenciales de diez o más casas.
- Construcción de edificios institucionales, de educación, de salud y otros edificios de uso público que excedan un área de 1250 m<sup>2</sup>.
- Demolición/renovación/ remodelación de proyectos que generen un volumen que exceda los 100 m<sup>3</sup> residuos de construcción y demolición.
- Proyectos de ingeniería civil que excedan los 500 m<sup>3</sup> de producción en residuos, incluyendo los residuos que se generen en el desarrollo de la misma obra. (DEHLG, 2006)



### **7.10.1 Legislación en México**

La Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos, publicada el 8 de Octubre de 2003 y reformada por última vez el 22 de Mayo de 2015, tiene por objeto garantizar el derecho de toda persona al medio ambiente sano y propiciar el desarrollo sustentable a través de la prevención de la generación, la valorización y la gestión integral de los residuos peligrosos, de los residuos sólidos urbanos y de manejo especial; prevenir la contaminación de sitios con estos residuos y llevar a cabo su remediación.

En el artículo 7 establece que la Federación, a través de la SEMARNAT, será la encargada de expedir las normas oficiales mexicanas, reglamentos y demás disposiciones jurídicas en materia de residuos; también tendrá a su cargo las actividades encaminadas a la regulación y control de los residuos peligrosos provenientes de pequeños y grandes generadores o de micro generadores, cuando éstos últimos no sean controlados por las entidades federativas.

En el artículo 9 se establecen las facultades de las entidades federativas, siendo las más relevantes la formulación de leyes de carácter estatal que sean necesarias para cumplir con lo dispuesto en la presente Ley y que corresponde al estado las acciones referentes a la regulación y control de los residuos de manejo especial.

Finalmente, en el artículo 10 se establece que los municipios tienen a su cargo las funciones de manejo integral de residuos sólidos urbanos, que consisten en la recolección, traslado, tratamiento, y su disposición final (SEMARNAT, 2003).

Además de las leyes LGPGIR y LGEEPA, existen las normas oficiales mexicanas que son las encargadas de establecer procedimientos, límites máximos permisibles y demás especificaciones para lograr con el objetivo de dichas leyes. En materia de residuos algunos de las NOM aplicables son enlistadas enseguida:

- NOM 161-SEMARNAT-2011, que establece los criterios para clasificar a los residuos de manejo especial y determinar cuáles están sujetos a Plan de Manejo; el listado de los mismos, el procedimiento para la inclusión o



exclusión a dicho listado; así como los elementos y procedimientos para la formulación de los planes de manejo.

- NOM-157-SEMARNAT-2009, que establece los elementos y procedimientos para instrumentar planes de manejo de residuos mineros.
- NOM-053-SEMARNAT-1993, que establece el procedimiento para llevar a cabo la prueba de extracción para determinar los constituyentes que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente.
- NOM-055-SEMARNAT-2003, que establece los requisitos que deben reunir los sitios que se destinarán para un confinamiento controlado de residuos peligrosos previamente estabilizados.
- NOM-083-SEMARNAT-2003, que incluye las especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de RSU y RME.
- NOM-098-SEMARNAT-2002, Protección ambiental-Incineración de residuos, especificaciones de operación y límites de emisión de contaminantes (SEMARNAT, 2017).

### ***7.10.2 Legislación en Bélgica***

Para el uso de agregados reciclados en Bélgica se rigen por las siguientes normas europeas creadas en un principio para los agregados de procedencia natural. (Pellegrino & faleschini, 2016)

- EN 13242:2008-Aggregates para materiales no unidos y unidos hidráulicamente para uso en obras de ingeniería civil y construcción de carreteras.
- EN 13043:2002- Agregados para mezclas bituminosas y mezclas y tratamientos superficiales para carreteras, aeródromos y otras áreas de tráfico.
- EN 13285:2010-Mezclas sin unir Especificaciones



- EN 14227 serie- Mezclas unidas hidráulicamente
- EN 933-11:2009- Pruebas de propiedades geométricas de los agregados-Parte 11: Prueba de clasificación para los componentes del agregado grueso reciclado.
- En 1744-6:2006- Prueba de propiedades químicas de los agregados. Parte 6: Determinación de la influencia del extracto agregado reciclado en la configuración inicial tiempo de cemento.

La relación de sustitución máxima permitida es del 20% en volumen de los agregados gruesos totales en la mezcla.

### ***7.10.3 Legislación en Alemania***

En Alemania la regulación para el uso de agregados está basado en los estándares europeos y adicionalmente incluyen la norma DIN 4226-100 en esta norma las especificaciones están en base a el campo de aplicación. La legislación alemana toma en cuenta cuatro tipos de AR (agregados reciclados) y en todos ellos los criterios que los definen son la densidad y la absorción del agregado.

### ***7.10.4 Legislación de Gran Bretaña***

En la normativa de esta región se distinguen 2 tipos de agregados reciclados, RCA (proveniente solo de material a base de concreto permitiendo 5% de contenido de mampostería) y RA (mezcla de residuos). Las normas con que se complementan son:

- En 2006-1
- BS 8500-2 2015

Esta limitado el uso de los agregados reciclados a superficies de carreteras o trabajos de apuntalamiento. (Vazquez, 2013). La limitación es por la falta de una regularización específica sobre el uso de agregados reciclados, que se refleja en una gran variabilidad de sus propiedades, composición y origen.

Lo concerniente al RCA se permite una sustitución del 20% en peso y se limita su uso a zonas donde no se exponga a sales y hielos y deshielos.



Los requisitos incluyen principalmente los aspectos relacionados con la composición química de los áridos, careciendo de requisitos en cuanto a densidad, absorción de agua o contenido máximo de partículas cuyo tamaño les permita actuar como relleno (normalmente menores de 63 o 75  $\mu\text{m}$ ) aspectos que están presentes en la mayoría de los documentos normativos estudiados aquí.

La ausencia de un requisito que imponga una densidad mínima o absorción de agua permite utilizar materiales muy ligeros, como los residuos de hormigón con mucha pasta adherida al NA. Esto dificulta que el hormigón nuevo alcance una alta resistencia y módulo de elasticidad. La calidad más baja de los agregados implica que se utilizan aglutinantes más grandes y menores contenidos de agua, lo que resulta en diferencias en la contracción o fluencia. (de Brito & Nabajyoti, 2013)

#### ***7.10.5 Legislación en Italia***

Se rigen por los estándares o normas europeas para la caracterización de los agregados reciclados. Para el uso de los agregados se toma en cuenta en qué tipo de obra serán utilizados y el origen de los agregados reciclados, es decir, si son recusados de alguna demolición directamente o de alguna industria certificada.

Las siguientes normas complementarias proporcionan las posibles aplicaciones de agregados reciclados en campos específicos:

- UNI 8520-1
- UNI 8520-2

#### ***7.10.6 Legislación en Japón***

En Japón los agregados reciclados se clasifican en 3 tipos dependiendo de su calidad en términos de su composición propiedades físicas: áridos reciclados de alta calidad (H), de calidad media (M), y baja calidad (L). Las normas con que se regulan estas cualidades son:

JIS A 5021- Establece las características para un agregado reciclado de alta calidad. Esta norma ha sido actualizada por la JIS A 5021:2011.



### 7.10.7 Legislación en Holanda

En los Países Bajos, el conjunto de normas que regula el uso de los áridos reciclados para la producción de concretos son las existentes en Europa y adicionalmente usan la norma NEN 5905 donde se informan los requisitos que deben cumplir los RA. Los residuos se dividen en dos clases RCA y RA.

### 7.10.8 Legislación en Portugal

En esta región el uso de agregados puede ser estructural siempre y cuando sean clase ARB1 y ARB 2 que son principalmente agregados originados de concreto y su uso está regulado por LNEC E 471 esta norma clasifica los agregados reciclados y define los requerimientos mínimos para su uso. Algunas otras normas son las siguientes:

- LNEC E 472- Se centra en aplicaciones de asfalto de mezcla en caliente.
- LNEC E 473- Hace referencia a capas de pavimento sin consolidar.
- LNEC E 474- Trata de terraplén y la capa de protección de las infraestructuras de transporte.

Clase	Concreto (%)	Mampostería (%)	Bituminosos (%)	Contaminantes (%)	Otros (%)
ARB1	≥90	≤ 10	≤ 5	≤ 0.5	≤ 0.2
ARB2	≥70	≤ 30	≤ 5	≤ 1	≤ 0.5
ARC	≥90	-	≤ 10	≤ 2	≤ 1

### 7.10.9 Legislación en España

En España el uso de los agregados está regulado por el Instituto de Concreto Estructural. Aplicando la norma EHE-08 y CEDEX. Se tiene un pliego de restricciones técnicas para su uso y de igual manera de acuerdo a las características del material su uso se sugiere en este pliego.



### **7.10.10 Legislación en USA**

En Estados Unidos no existe una barrera reguladora para el uso de agregado de concreto reciclado en concreto estructural: desde 1982, ASTM C33 ha incluido el concreto de cemento hidráulico triturado en su definición de agregado grueso, mientras que ASTM 125 permitió el sistema hidráulico triturado.

### **7.10.11 Legislación en Brasil**

En Brasil la especificación que se toma en cuenta es la NBR 15.116 “Recycled aggregate of solid residue of building constructions - Requirements and methodologies”, esta norma permite solamente el uso de RA en concretos no estructurales, y permite utilizar el agregado grueso y fino en la elaboración del concreto.

La clasificación que se ve en la norma perteneciente a Brasil es la siguiente:

En la clasificación “CLASE A” se pueden encontrar residuos generados por remodelaciones de pavimentos / obras de infraestructura, pueden incluir mortero, concreto y componentes cerámicos como ladrillos, bloques, tejas, entre otros. Dentro de esta clasificación se separan dos grupos, los agregados de concreto reciclado (RCA) y los agregados mezclados (MA), y estos a su vez se dividen en 4 grupos:

- Grupo 1: CDW constituidos en un volumen de más del 50% por pasta de cemento endurecida.
- Grupo 2: CDW constituidos en un volumen de más de 50% por partículas de rocas.
- Grupo 3: CDW que contengan cerámicas rojas o blancas con superficies pulidas no más del 50% en volumen.
- Grupo 4: CDW que contienen materiales orgánicos no minerales como madera, plástico, betún y materiales carbonizados, y contaminantes como vidrio, baldosas de cerámica o yeso.



Si la proporción de los dos primeros grupos es superior al 90%, entonces el CDW puede definirse como RCA; de lo contrario, es un MA.

#### **7.10.12 Especificaciones RILEM**

Como las propiedades de la fracción fina de AR son muy diferentes de las de la arena natural, no existe una especificación para la fracción fina en la especificación RILEM. Clasifica los agregados gruesos reciclados e indica el ámbito de aplicación del hormigón que contiene estas clases de RA en términos de clases de exposición ambiental aceptables y clases de resistencia del hormigón. Los áridos gruesos reciclados se clasifican de la siguiente manera:

- Tipo I: agregados que se entiende implícitamente que se originan principalmente en escombros de mampostería;
- Tipo II: agregados que se entiende implícitamente que se originan principalmente a partir de escombros de hormigón;
- Tipo III: agregados que se entiende implícitamente que consisten en una combinación de RA y NA; la composición deberá tener al menos un 80% de NA y hasta un 10% de agregado tipo I.

### **7.11 Proceso para normativas en México**

En un contexto de mercados mundiales caracterizado por la innovación tecnológica y la intensificación de la competencia, la actividad normalizadora en un instrumento indispensable para la economía nacional y el comercio internacional.

En México la normalización se plasma en las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) de carácter obligatorio, elaboradas por Dependencias del Gobierno Federal y las Normas Mexicanas (NMX) de ámbito primordialmente voluntario, promovidas por la Secretaría de Economía y el sector privado, a través de los Organismos Nacionales de Normalización.



La normalización es el proceso mediante el cual se regulan las actividades desempeñadas por los sectores tanto privado como público, a través de este proceso se establecen la terminología, la clasificación, las directrices, las especificaciones, los atributos, las características, los métodos de prueba o las prescripciones aplicables a un producto, proceso o servicio. Los principios básicos en el proceso de normalización son: representatividad, consenso, consulta pública, modificación y actualización.

La actividad normalizadora se entiende como la consolidación del conocimiento que es recabado entre expertos de una rama o actividad productiva. Es un documento mediante el cual los sectores interesados acuerdan las características técnicas deseables en un producto, proceso o servicio.

## 7.12 Beneficios económicos al usar agregados reciclados

Para un desarrollo sustentable es importante tener en cuenta los 3 criterios que necesitan estar en equilibrio: Ambiente, sociedad y economía; con estos criterios debemos desarrollar nuestras investigaciones. El beneficio económico en el uso de los agregados reciclados está en diferentes etapas de los procesos constructivos como un ejemplo tenemos el traslado de materiales. Frecuentemente los RCD's se encuentran en la zona urbana o cerca de ellas mientras que los materiales naturales se obtienen de canteras alejadas de la urbe, debido a esta lejanía se incrementan los precios en traslados. He aquí la ventaja económica de usar RCD's que cumplan con las características para las obras.

Para la evaluación económica de los agregados reciclados la operación inicial sería la adquisición de equipos, conocer todos los costos de mantenimiento y laborales. Los costos operativos se determinarán en función de la energía consumida por el equipo, que depende en gran medida de su potencia nominal y del combustible utilizado. Los costos laborales incluyen administración, supervisión local, operadores de equipos y trabajadores no especializados



### **Costo estimado de gestión de residuos:**

En investigaciones recientes se ha establecido que es de particular beneficio para los contratistas cuando se identifican y resaltan todos los componentes de costos asociados con la producción de desechos. Esto será efectivo para mejorar los procedimientos de control de costos internos para el contratista y ayudar a garantizar que se eliminen los costos improductivos y fácilmente evitables de la gestión de residuos de C&D. Los detalles de dichos costos permiten determinar el costo real de las actividades de gestión de residuos dentro del proyecto. (Best Practice Guidelines on the Preparation of Waste Management Plans for Construction & Demolition Projects, 2006)

Los costos deben cubrir los siguientes aspectos:

- Costo de compra de materiales de desecho
- Costo de manejo
- Costo de almacenamiento y transporte
- Ingresos generados por ventas
- Costos de disposición, incluido el impuesto al vertedero

Con los aspectos anteriores será posible estimar:

- Costo total de la gestión de residuos de concreto
- Costo total de manejo de residuos de suelos
- Costo total de gestión de residuos de mampostería

En el caso de un análisis de costos beneficios para el reciclaje de concreto los siguientes procesos son los indispensables y más comunes a tomar en cuenta para obtener un buen análisis.

### **Residuos de la construcción**

- cargo por vertido de plantas de reciclaje
- cargo por vertido de vertedero
- transporte



- la contaminación del aire
- emisión de gases
- consumo de energía
- contaminación acústica

**Decapado** es la etapa donde las rocas se limpian y nivelan. Se requiere equipo como excavadora. Costo incurrido en esta etapa, incluido el costo laboral, el costo del combustible y los gastos generales fijos.

- Equipo
- Labor
- Combustible
- Gastos fijos

**Explotación** es el proceso en el que se utilizan equipos para la explotación del material y se calculan los siguientes costos:

- Capital
- Capital de trabajo
- Mantenimiento de equipo
- labor
- combustible
- gastos fijos
- almacenamiento

**El almacenamiento** es la etapa en la que participa una mano de obra.

- capital
- capital de trabajo
- Mantenimiento de equipo
- labor
- combustible
- gastos fijos



**Proceso de trituración** El proceso de trituración incluye trituración primaria, separación magnética y proceso de trituración secundaria. Se trata de equipos como la trituradora primaria, la trituradora secundaria y el moldeador. Además, se estima el costo de capital, el costo del equipo, el costo del capital de trabajo (aproximadamente el 15% del costo operativo variable), el costo operativo que incluye el costo de mantenimiento del equipo, el costo de la mano de obra, el costo del combustible y el costo indirecto fijo. En este proceso, el único beneficio es el costo de mantenimiento que se puede ahorrar en comparación con el proceso de reciclaje porque hay más desgaste de las cuchillas del equipo. Por lo tanto, la diferencia entre el costo de mantenimiento del equipo para el método actual y el método de reciclaje de concreto es el beneficio obtenido en esta etapa.

#### Trituración primaria

- Equipo
- Capital de trabajo

#### Mantenimiento de equipo

- Labor
- Combustible
- Sobrecarga fija
- 

#### Separación Magnética

- Equipo
- Capital de trabajo

#### Mantenimiento del equipo

- Labor
- Combustible
- Costos fijos
- Ingreso por la venta de chatarra

#### Trituración secundaria



- Equipo
- Capital de trabajo

#### Mantenimiento de equipo

- Labor
- Combustible
- Sobrecarga fija

**El proceso de lavado**, cribado o secado al aire es la etapa que involucra combustible y agua reciclada para asentar el polvo y todas las partículas.

De acuerdo con la investigación realizada por (Vivian, 2008) el método de reciclaje de concreto puede resultar en una gran suma de ahorro. Los beneficios obtenidos del método de reciclaje de concreto pueden equilibrar el costo gastado para la práctica actual. Por lo tanto, reciclar los desechos de concreto para la nueva producción es un método rentable que también ayuda a proteger el medio ambiente y logra la sostenibilidad de la construcción.

### 7.13 Caracterización del material reciclado internacional y nacionalmente.

Para poder generalizar ciertos valores que caracterizan a un agregado reciclado es necesario indagar en las pruebas que ya se han realizado y cuales han sido sus resultados. En este apartado se recopilan algunas de las pruebas realizadas en otras instituciones nacionales e internacionales (tabla 9).



Tabla 9 Parámetros de caracterización en normas internacionales

Parámetros de caracterización en normas internacionales						
País	Tipo de agregado	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	% Absorción	Max. De cloruros	Max sulfato	% Sustitución
<b>Alemania</b> El tipo 1 y 2 son los que se pueden utilizar para mezclas de concreto	Tipo 1: virutas de concreto/ arena triturada de concreto	≥ 2000	≤ 10	0.04	0.8	20%-50%
	Tipo 2: Virutas de construcción/ arena trituradora de construcción	≥ 2000	≤ 15			20-50%
	Tipo 3: Virutas de mampostería/ arena de mampostería	≥ 1800	≤ 20			20%-50%
	Tipo 4: mezcla de virutas / arena triturada mezcla de varios.	≥ 1500	No se requiere	0.15	-	20%-50%
<b>JAPÓN</b>	Tipo H agregado grueso	≥ 2500	≤ 3			100%
	Tipo H agregado fino	≥ 2500	≤ 3.5			--
	Tipo M agregado grueso	≥ 2300	≤ 5			-
	Tipo M agregado fino	≥ 2200	≤ 7			-
<b>JAPÓN</b>	Tipo L agregado grueso	Sin requerimientos	≤ 7			-



	Tipo L agregado fino	Sin requerimientos	≤ 13			-
<b>PAISES BAJOS</b>	<b>RCA</b> No debe contener más de 5% de mampostería, 1% de orgánicos y de impurezas.	≥ 2000	Sin requerimiento	0.05	1	100%
	<b>RMA mixto:</b> composición 65% mampostería y 1% orgánicos	≥ 2000	Sin requerimiento	0.05	1	-
<b>Portugal</b>	<b>ARB1</b>	2200	7	-	0.8	Max 25
	<b>ARB2</b>	-	-	-	-	Max 20
<b>Brasil</b>	<b>RCA</b>	-	≤ 7	1	1	100%
	<b>MA</b>	-	≤ 12	-	-	-
<b>UK</b>	<b>RCA</b>	-	-	-	1	20
	<b>RA</b>	-	-			
<b>BELGICA</b>	<b>GBSB-I</b>	>1600	<18	< 0.06	<1.0	
	<b>GBSB-II</b>	>2100	<9	-	-	
<b>Hong Kong</b>	<b>RCA</b>	2000	10	0.05	1	20-100%
<b>Suiza</b>	<b>RCA</b>	-	-	0.03	1	100%
	<b>MRA</b>	-	-	-	1	-

De acuerdo con la RILEM las características para la clasificación de un agregado grueso reciclado deben ser las siguientes (tabla 10):



Tabla 10 Parámetros de caracterización de acuerdo con la RILEM

Requerimiento	RCAC tipo 1	RCAC tipo 2	RCAC tipo 3	Método de prueba
Min. Densidad de partículas secas.	≥ 1500	≥ 2000	≥ 2400	ISO 6783 & 7033
Max % de absorción	≤ 20	≤ 10	≤ 3	ISO 6783 & 7033
Max. Contenido de material con SSD < 2200 Kg/m <sup>3</sup> (%m/m)	-	≤ 10	≤ 10	ASTM C123
Max contenido de material con SSD < 1800 Kg/m <sup>3</sup> (%m/m) <sup>a</sup>	≤ 10	≤ 1	≤ 1	ASTM C123
Max contenido de material con SSD < 1000 Kg/m <sup>3</sup> (%m/m y % v/v)	≤ 1	≤ 0.5	≤ 0.5	Visual
Max. Contenido de materiales extraños (metales, vidrio,	≤ 5	≤ 1	≤ 1	Visual



bituminoso) (% m/m)				
Max. Contenido de metales (% m/m)	≤ 1	≤ 1	≤ 1	NEN 5933
Max contenido de materia organica (% m/m)	≤ 1	≤ 0.5	≤ 0.5	prEN 933-1
Max contenido de relleno (<0.063 mm) (% m/m)	≤ 3	≤ 2	≤ 2	prEN 933-1
Max contenido de arena (<4 mm) (%m/m) <sup>b</sup>	≤ 5	≤ 5	≤ 5	BS 812, parte 118
Max contenido de sulfatos (%m/m) <sup>c</sup>	≤ 1	≤ 1	≤ 1	

## 7.14 Caracterización del agregado

### 7.14.1 Masa Volumétrica

La masa volumétrica de los agregados es aquella que resulta de la cantidad de masa que se requiere para llenar un recipiente con un volumen unitario conocido. Ésta depende de que como sea compactado el material y de la distribución y forma de las partículas. Si se tienen un gran número de partículas de aproximadamente el mismo tamaño, la relación de vacíos será mayor que en una muestra en la que se distribuyan de una manera uniforme los tamaños de las partículas. Por ejemplo, si se tienen partículas grandes habrá espacios relativamente grandes entre ellas, pero



si también se cuenta con partículas pequeñas, éstas llenarán dichos espacios, teniendo así una densidad aparente mayor.

La masa volumétrica aproximada de agregado comúnmente usado en el concreto de peso normal varía de 1200 a 1750 kg/m<sup>3</sup>

#### **7.14.2 Granulometría**

Es la composición, en porcentaje, de los diversos tamaños de agregados en una muestra. Esta proporción se suele indicar, de mayor a menor tamaño, por una cifra que representa, en masa, el porcentaje parcial de cada tamaño que pasó o quedó retenido en los diferentes tamices que se usan obligatoriamente para tal medición.

#### **7.14.3 Absorción**

La absorción que presentan los agregados pétreos es una de las propiedades que más influencia tiene en la elaboración de la mezcla del concreto, ya que afecta a la cantidad de agua a utilizar. Si los agregados presentan humedad o capacidad de absorber agua, la mezcla deberá ser modificada para que la cantidad de agua se ajuste para así mantener la relación de agua-cemento con la que se hizo el diseño.

Los agregados grueso y fino generalmente tienen niveles de absorción que varían de 0.2% al 4% y del 0.2% al 2%, respectivamente. Los contenidos de agua libre generalmente varían del 0.5% al 2% para el agregado grueso y del 2% al 6% para el agregado fino. La mayoría de los agregados finos puede mantener un contenido máximo de humedad drenada de cerca del 3% al 8%, mientras que el agregado grueso puede mantener del 1% al 6%. (Kosmatka, 2004)

La elevada absorción de los agregados reciclados provoca que, durante el mezclado, éstos absorban un elevado contenido de agua, aumentando considerablemente la consistencia del concreto. Este hecho puede ser compensado realizando una presaturación de los agregados reciclados (CEDEX, 2011).



La absorción capilar de agregados reciclados oscila entre el 10 y 15%, teniéndose como promedio un 12%. La porosidad de los concretos reciclados es elevada en comparación con los concretos convencionales, debido a la mayor porosidad de los agregados reciclados provocada por la presencia de la pasta de cemento. En función de su porosidad, los concretos pueden clasificarse según su calidad de acuerdo con la tabla 11.

Tabla 11 Calidad del concreto reciclado según su porosidad (Rodríguez, 2011)

	Buena	Media	Pobre
Porosidad	<15%	15-17%	>17%

Existen cuatro condiciones de humedad que se pueden presentar en los agregados:

- Secado al horno. Ocurre cuando se pone a secar el agregado en un horno hasta que la cantidad de agua contenida en éste desaparezca, con lo que se obtendrá un agregado con masa constante y totalmente absorbente.

- Secado al aire. Se presenta cuando la superficie del agregado se encuentra seca, esto debido a la exposición del material al aire seco, con lo cual, el agua contenida en algunos poros se evapora, dando así la capacidad de absorber cierta cantidad de humedad al agregado.

- Saturado con superficie seca. Ocurre cuando los poros del agregado se encuentran completamente saturados, con lo cual, el material no absorbe ni cede agua al concreto.

- Húmedos. Se presentan cuando el agregado tiene un exceso de humedad sobre la superficie, a lo que se le conoce como agua libre.

#### 7.14.4 Densidad

Es la masa de las partículas del agregado secas totalmente por la unidad de volumen de las mismas partículas, incluyendo el volumen de poros permeable e impermeable en las partículas, pero sin incluir huecos entre partículas. (ASTM,



2004). Una de las propiedades de los sólidos, así como de los líquidos e incluso la de los gases es la medida del grado de compactación de un material: su densidad.

La densidad es una medida de cuanto material se encuentra comprimido en un espacio determinado; es decir la cantidad de masa por unidad de volumen.

La densidad del mortero varía dependiendo de la cantidad y la densidad del agregado, la cantidad de aire atrapado (ocluido) o intencionalmente incluido y las cantidades de agua y cemento. Por otro lado, el tamaño máximo del agregado influye en las cantidades de agua y cemento. Al reducirse la cantidad de pasta (aumentándose la cantidad de agregado), se aumenta la densidad.

#### **7.14.5 Permeabilidad**

El poroscopio Plus mide el tiempo que le toma al aire fluir hacia el volumen conocido de una cámara de evacuación sellada en el concreto.

#### **7.14.6 Desgaste de los ángeles**

Los agregados reciclados para tener un desempeño favorable no solo deben ser resistentes a la compresión sino también a la abrasión. De acuerdo con la norma TS 706 EN 12620+A1, Aggregates for concrete, Turkish Standards Institutions, Ankara, 2009, si los agregados tienen una resistencia a la compresión inferior a 100 MPa se debe realizar alguna prueba para determinar la resistencia a la abrasión. La prueba más utilizada es desgaste de los ángeles. Se reconoce que los RCA tienen en promedio una menor resistencia a la abrasión y al impacto (pérdida por abrasión de Los Ángeles > 30%) que NA.

Los agregados gruesos probados al desgaste tendrán una pérdida, en masa, del cincuenta (50) por ciento como máximo. Dicha pérdida se determinará en una muestra de agregados cuyo tamaño o tamaños nominales sean lo más semejantes posible a los que se van a utilizar en la elaboración del concreto, mediante el procedimiento indicado en el Manual M.MMP.2.02.032, Resistencia a la Degradación del Agregado Grueso mediante la Máquina de Los Ángeles.



## 7.15 Diseño de mezclas para concreto reciclado

Para el diseño de las mezclas de concreto usualmente se ha utilizado el diseño de Abrahms y con mayor frecuencia por su ahorro en materiales es método establecido por el ACI (American Concrete Institute). En la actualidad buscando mejorar las características mecánicas de los concretos con agregados reciclados se han propuestos algunos métodos innovadores en los que los protagonistas son los RCA y se toma en cuenta las características de estos. Se sugieren dos enfoques para lograr que la resistencia proyecto sea alcanzada por los concretos diseñados con RCA: el primero es mediante la adición extra de cemento y el segundo es mediante aditivos, sin embargo, no resultan opciones viables económicamente y ambientalmente por lo que el estudio de diferentes métodos de diseño sigue evolucionando.

Un método novedoso, introducido recientemente por Fathifazl, llamado Volumen Equivalente de Mortero (EMV), se ha utilizado para prevenir las pérdidas de resistencia que a menudo se informan en la literatura. Básicamente, el método considera al RCA como un material bifásico, compuesto por NA y el mortero adherido al mismo (mortero residual, RM) que debe cuantificarse y contarse en la proporción de la mezcla. Dado que las propiedades físicas del RCA se ven afectadas por la cantidad y las características de RM, este método puede dar cuenta directamente de cualquier deficiencia en el agregado de baja calidad, equilibrando la mezcla sin afectar el desempeño mecánico y relacionado con la durabilidad del concreto final. Esto permite preparar la mezcla de RAC con una estructura interna similar a la de NAC. (Pellegrino & Faleschini, 2016)

Algunos métodos como el sugerido por Vázquez sugieren que diseñar un concreto con agregado natural por el método de ACI y después diseñar el de concreto reciclado con la misma cantidad de cemento que para el diseño de agregados naturales, aquí se tomara en cuenta la cantidad de mortero residual de los RCA. Para este método es necesario conocer el contenido de mortero residual, el peso específico aparente del RCA y el del agregado natural original. Bajo este método de dosificación, se obtuvo una resistencia a la compresión de un 6 y 13%



mayor para todas las mezclas con agregado reciclado, en comparación con los concretos de referencia. (Vázquez, *Methods in Mixture Proportioning and His Influence in the Properties*, 2013).

(Letelier, Osses, Valdes, & Moricomi, 2014) Considera un método de disminuir la cantidad de mortero adherido a los RCA por medio de abrasión utilizando el método de desgaste de los Ángeles. Con esta metodología se obtiene una baja absorción de los RCA y se obtienen buenos resultados en pruebas como resistencia a la compresión.

## 7.16 Caracterización del concreto con agregados reciclados

### 7.16.1 *Velocidad de pulso*

Entre diferentes métodos de pruebas no destructivas contamos con la prueba de velocidad de pulso que se considera como la prueba de mayor importancia, con la cual se pueden obtener varias características en las estructuras de concreto. Una de las características es que tan homogéneo es el material.

Usando el análisis de propagación de onda de ultrasonido, es posible verificar la compacidad y detectar regiones heterogéneas en el concreto. (Alexandre Lorenzi, 2007)

El concreto es un material básico usado en la construcción. La mezcla de concreto es influenciada por algunas variables de construcción como son: la relación agua/cemento, el tipo y tamaño de agregado, la humedad y el tipo de cemento. Estas variables afectan directamente la fuerza de compresión y hace difícil la identificación de las propiedades de concreto. Enfocándonos en esto, la velocidad de pulso permite estimar una correlación entre las variables y la fuerza de compresión. (Alexandre Lorenzi, 2007).

Para poder utilizar y saber comprender los resultados obtenidos con este método es necesario entender su funcionamiento, puesto que se pueden presentar diferentes situaciones en la experimentación y debemos elegir la más adecuada de acuerdo a las características y tipo de experimentación.



Este método normalmente se basa en el uso de un equipo portátil, compuesto por una fuente/unidad detectora y unos transductores, que trabajan en un rango de frecuencia de 25 a 60 kHz. Los pulsos ultrasónicos dependen de la densidad y las propiedades elásticas del material. (Alexandre Lorenzi, 2007)

Los transductores piezoeléctricos son el tipo más común usado para la generación de ondas ultrasónicas. Las ondas ultrasónicas son generadas por excitar el elemento piezoeléctrico en un transductor por una señal de tensión de placa eléctrica en la forma de un pico, lo que hace que vibre a su frecuencia de resonancia. (Ismail Ozgur Yaman, Nov-Dec,2001)

El tiempo que toma para propagarse la onda ultrasónica a través del elemento hasta ser recibida en el transductor es definido como tiempo de vuelo.

En el método de velocidad de pulso ultrasónico, un pulso de onda ultrasónica a través del concreto es creado en un punto sobre la superficie del objeto de prueba, y el tiempo que éste tarda en viajar de ese punto a otro es medido. Conociendo la distancia entre los dos puntos, la velocidad del pulso de onda puede ser determinada. Un equipo portátil de velocidad de pulso está disponible hoy en día en el mercado para realizar pruebas en concreto y determinar el tiempo de llegada del primer frente de onda. Para la mayoría de las configuraciones de prueba, esta resulta ser la onda de compresión directa, ya que es la más rápida. (Chávez, 2012)

La prueba empieza cuando un pulso ultrasónico es generado y transmitido por un transductor electro-acústico, colocado en contacto con la superficie del concreto. Después al pasar por el concreto, las vibraciones son recibidas y convertidas por el otro transductor electro-acústico. El tiempo que tarda la onda desde el punto de entrada (primer transductor) hasta el punto de salida (segundo transductor) es medido con precisión.

La velocidad de pulso para un concreto ordinario es típicamente de 3700 a 4200 m/s. Para ello, para una trayectoria de 300-mm el tiempo de traslado es de aproximadamente 70 a 85 m/s. Es obvio que el instrumento debe ser preciso de tal manera que tome mediciones cortas de tiempo.



De acuerdo a los estudios realizados en Canadá, Malhotra (1985) publicó un criterio de aceptación del concreto sobre la base de la medición de la velocidad ultrasónica. La clasificación del concreto en categorías con base a intervalos de velocidad se presenta en la tabla 12. (Carcaño, s.f.)

Tabla 12 Clasificación del concreto de acuerdo al rango de VPU

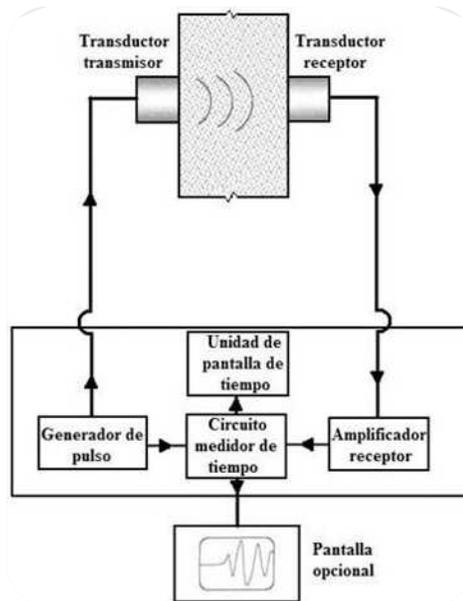
Velocidad Ultrasónica, $v$ (m/s)	Clasificación del concreto
<b><math>V &gt; 4575</math></b>	Excelente
<b><math>4575 &gt; V &gt; 3660</math></b>	Bueno
<b><math>3660 &gt; V &gt; 3050</math></b>	Cuestionable
<b><math>3050 &gt; V &gt; 2135</math></b>	Pobre
<b><math>V &lt; 2135</math></b>	Muy pobre

Para realizar esta prueba tenemos 3 casos para el posicionamiento de los transductores los cuales se colocan según la complicación que se tenga para tomar la medición en alguna cara de la superficie del concreto. El acomodo de transductores es: Directo, Semi-directo e Indirecto.

Existen tres configuraciones en las cuales se pueden arreglar o acomodar los transductores, como se muestra en la Fig. 7. Tenemos entonces, 1) transmisión directa; 2) transmisión semidirecta; y 3) transmisión indirecta o método de superficie. El método de transmisión directa, es el más deseable y el arreglo más satisfactorio, debido a que, con este arreglo, se transmite y recibe el máximo de la energía del pulso. El método de transmisión semidirecta, puede ser usado satisfactoriamente también. Sin embargo, se debe tener cuidado de que los transductores no estén muy alejados; de otro modo la transmisión del pulso podría disminuir y por tanto la señal podría no detectarse. Este método es usado donde se tienen concentraciones de refuerzos. El método de transmisión indirecta o método de superficie, es el menos satisfactorio por que la amplitud de la señal que se recibe es significativamente menor que la señal que se recibe por el método de transmisión directa. Este método es más propenso a errores y se requiere un procedimiento especial para determinar la velocidad de pulso. (Qixian & Bungey, 1996)



La transmisión indirecta es descrita como menos sensible en arreglos de pruebas. Condiciones de Estándares Británicos dicen que la velocidad de indirecta es 5 a 20% menor que la velocidad de pulso medida directamente, dependiendo de las cualidades del concreto. (Yaman, 2001)



(Malhotra & Carino, 2004)

Fig. 6 Diagrama esquemático del circuito de prueba de velocidad de pulso

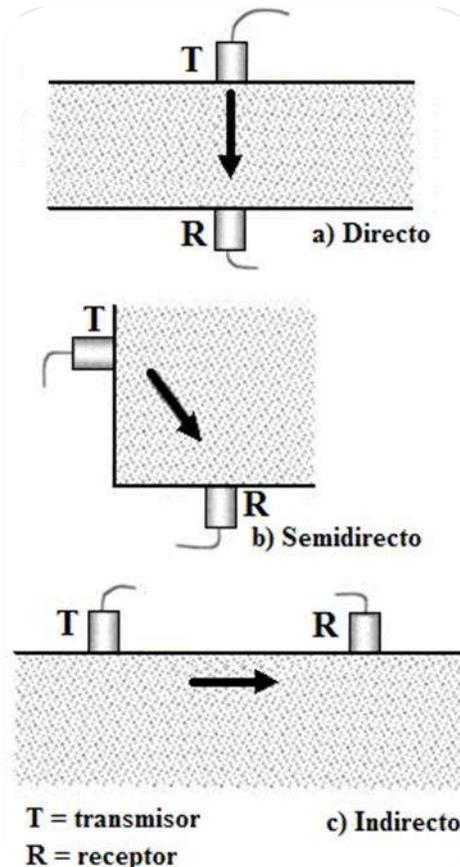


Fig. 7 Configuraciones para medición de velocidad de pulso, a) Método directo, b) Método semidirecto, c) Método indirecto o de superficie (Malhotra & Carino, 2004)

### 7.16.2 Resistividad eléctrica

Es una propiedad de cada material, esta corresponde al recíproco de su conductividad. Depende en gran proporción del grado de saturación de los poros del mortero y en menor grado, de la hidratación de la pasta y de la presencia de sales disueltas en la fase acuosa en función de variables como el tipo de cemento, adiciones inorgánicas, relación agua/cemento, porosidad de la estructura, etc. La unidad de medida para representar la resistividad eléctrica es el ohm-cm u ohm-m. Se puede utilizar en el laboratorio sobre testigos extraídos de la estructura o directamente sobre la estructura en campo (Chávez, 2012).

Cuanto mayor es la resistividad menor es la porosidad del hormigón y mayor su resistencia mecánica, al tener más fase sólida por volumen. Además, si el



hormigón no está saturado de agua la resistividad crece, por lo que es un indicador de su grado de saturación. Por tanto, la resistividad es un indicador de la calidad del hormigón al indicar su porosidad, y es un indicador de su grado de saturación y por tanto puede servir para el control del grado de curado. (Andrade & DÁndrea, 2011)

Tabla 13 Rangos de calidad de un concreto para la prueba de resistividad eléctrica

Valor [ $\Omega$ -m]	Criterio
$\rho > 2000$	Poco Riesgo
$2000 > \rho > 100$	Riesgo Moderado
$\rho < 100$	Riesgo alto

Procedimiento.

1. Se determinaron las dimensiones de la muestra: diámetro y longitud.
2. Se revisa la conexión de las terminales de corriente y voltaje.
3. Se monta la muestra en el equipo Nilsson.
4. Se colocan las caras laterales del cilindro entre dos placas de cobre y entre estas esponjas húmedas.
5. Mediante la fuente y a través de las placas metálicas adosadas a las caras laterales del espécimen, se somete el cilindro a una corriente dada, (I) y voltaje (E).
6. La resistencia eléctrica (R) se calcula como E/I y se expresa en Ohm.

Cálculo:

$$\rho = R_c \left( \frac{A}{L} \right)$$

Dónde:

$\rho$  = Resistividad eléctrica en  $K\Omega$ -cm (ohm-m).

$R_c$  = Resistencia eléctrica que el equipo proporciona, en  $K\Omega$ .



A= Área transversal del espécimen en cm<sup>2</sup>.

L= Longitud del espécimen en cm.

### 7.16.3 Compresión

Este método de ensayo consiste en aplicar una carga axial de compresión a cilindros moldeados o núcleos a una velocidad que está dentro de un rango prescrito hasta que ocurra una falla. La resistencia a la compresión de la muestra se calcula dividiendo la carga máxima alcanzada durante la prueba entre el área de la sección transversal de la muestra.

Según la NORMA MEXICA NMX-C-083-ONNCCE-2002 los especímenes de prueba deben contar con las siguientes características:

El diámetro y la altura del espécimen de prueba debe determinarse promediando las dos medidas de diámetro perpendiculares entre sí a una altura media del espécimen y dos alturas opuestas con una aproximación de 1mm.

Si la altura promedio del espécimen es menor de 1.8 veces el diámetro, a la resistencia debemos realizar una corrección por esbeltez de acuerdo a la tabla 14. Los valores intermedios que no aparecen pueden ser calculados por medio de la interpolación.

Algo importante en esta norma es que los especímenes que tengan una relación diámetro a altura menor de 1:1 no deberán ensayarse.

Tabla 14 Relación del diámetro y altura en especímenes para ensayo

Relación Altura- Diámetro del espécimen	Factor de corrección a la resistencia
<b>2.00</b>	1.00
<b>1.75</b>	0.99
<b>1.50</b>	0.97
<b>1.25</b>	0.94
<b>1.00</b>	0.91



El ensaye a compresión debe realizarse lo más pronto posible después de ser retirados los especímenes de la pileta o cuarto húmedo y una vez que el material de cabeceo haya adquirido la resistencia requerida verificada de acuerdo a la NMX-C-109-ONNCE; durante el tiempo transcurrido entre el retiro del almacenamiento húmedo y el ensaye, se debe prevenir la pérdida excesiva de humedad en los especímenes.

#### 7.16.4 *Módulo de Elasticidad*

El módulo de elasticidad puede ser estimado de la resistencia a la compresión del concreto utilizando los mostrados en la tabla 15. Observe que estas relaciones resultan del módulo secante en vez del módulo de cuerda, determinado según el procedimiento de pruebas ASTM C4669. La diferencia en el módulo de cuerda y secante elástico es mínima para los niveles de deformaciones encontrados típicamente en el diseño de pavimentos, como se muestra en la Fig.8 estas relaciones son válidas solo para mezclas de concreto normal (densidad aproximadamente igual a 2320 kg/m<sup>3</sup>) y podrían ser inapropiadas para concretos de alto comportamiento u otros especiales. (IMT, 2002)

Tabla 15 Modelos para relacionar la compresión al módulo de elasticidad (IMT, 2002)

MODELO	FUENTE
$E_c = 0.043\rho^{3/2}(f'c)^{1/2}$	American Concrete Institute (ACI)
$E_c = 9.1(\rho/2300)(f'c)^{0.33}$	British Standards Institution (BSI)
$E_c = 9.5(\rho/2400)^2(f'c + 8)^{0.33}$	Comité Europeen du Beton (CEB)

$E_c$  es el módulo de elasticidad secante del concreto en GPa,  $\rho$  es el peso volumétrico unitario del concreto en kg/m<sup>3</sup> y  $f'c$  es la resistencia a la compresión del concreto de un cilindro estándar de 150 x 300 mm en MPa.

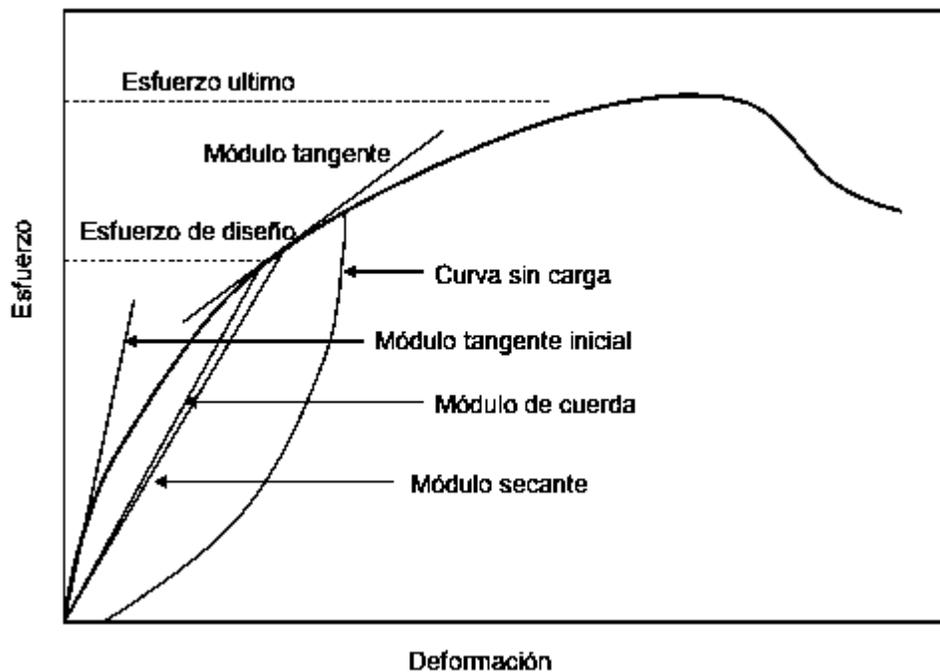


Fig. 8 Diagrama esfuerzo-deformación típico para concreto mostrando los diferentes módulos de elasticidad

Los resultados obtenidos en otras investigaciones como en Carrijo, Leite, Kou and Gomez-Soberón para el módulo de elasticidad en concretos que tienen sustitución de agregados naturales por reciclado indican una reducción en el módulo de elasticidad de acuerdo con la proporción de sustitución. Este comportamiento se atribuye principalmente a la menor rigidez del agregado reciclado en comparación con el agregado natural. La mayor porosidad de RA es responsable de la mayor deformación de estos agregados en comparación con NA, y este efecto también se refleja en el concreto con RA en comparación con el concreto convencional. (de Brito & Nabajyoti, 2013)

Muchas investigaciones coinciden en que sustituciones de hasta el 20% tienen poca influencia sobre el desarrollo del módulo de elasticidad; a diferencia de cuando se realizan sustituciones del 25% en las que el módulo se ve reducido en un 15% aproximadamente, con respecto a lo que se tendría en un concreto convencional con la misma dosificación. (Quintana & Quintana, 2015)



### 7.16.5 Flexión

Es una medida de la resistencia a la falla por momento de una viga o losa de concreto no reforzada. La resistencia a la flexión se expresa como el *Módulo de Rotura (MR)* y este módulo es cerca del 10% al 20% de la resistencia a compresión, en dependencia del tipo, dimensiones y volumen del agregado grueso utilizado, sin embargo, la mejor correlación para los materiales específicos es obtenida mediante ensayos de laboratorio para los materiales dados y el diseño de la mezcla. (NRMCA)

El MR tiene un profundo efecto sobre el potencial de agrietamiento por fatiga de las losas de concreto para cualquier magnitud dada de esfuerzo repetido a la flexión o tensión. Una vez que se hace la prueba se debe observar donde ocurre la falla, si la falla ocurre más cerca de los apoyos, los resultados deben ser desechados. El estado esfuerzo-deformación lineal asumido es verdadero para el tercio medio del espécimen de la prueba. Sin embargo, la diferencia entre el esfuerzo actual y el asumido se incrementa exponencialmente para esfuerzos medidos fuera del tercio medio del espécimen y alrededor de los extremos de los apoyos. Los especímenes que se fracturan fuera del tercio medio de la viga producirán, por lo tanto, resultados erróneos en las pruebas. (IMT, 2002)

La resistencia a la flexión de concretos reciclados con un contenido superior al 50%, disminuye de media un 5% y 16% respectivamente (ACHE grupo de trabajo Hormigón, septiembre 2006).

### 7.16.6 Ataque por sulfatos

Los sulfatos más abundantes en los suelos son: sulfatos de calcio, de magnesio y de sodio, todos ellos de diferente solubilidad. La acción de los sulfatos se produce sobre el hidróxido de calcio y fundamentalmente sobre el aluminato de calcio C3A y el ferro aluminato tetra cálcico C3FA. El ataque del sulfato se manifiesta con una exudación de apariencia blanquecina y agrietamiento progresivo que reduce al concreto a un estado quebradizo y hasta suave.

- La acción del sulfato de calcio es relativamente simple, ataca al aluminato tricálcico y en menor medida al ferro aluminato tetra



cálcico, produciendo sulfo aluminato tricálcico (etringita) e hidróxido de calcio (portlandita).

- La acción del sulfato de sodio es doble, reacciona primero con el hidróxido de calcio generando durante la hidratación del cemento, formando sulfato de calcio e hidróxido de sodio. A su vez el sulfato de calcio ataca al aluminato tricálcico formando etringita
- La acción del sulfato de magnesio es la que produce un mayor daño, en cuanto actúa sobre las fases de la pasta de cemento, como son los silicatos cálcicos, mediante una serie de acciones complejas que modifican el PH de las pastas de cemento.

El ataque por sulfatos es uno de los más peligrosos para el concreto, el agente agresivo comienza por atacar los granos de Clinker hidratados, la pasta de cemento sufre cierta expansión, se torna blanda y por último se agrieta.

Como afirma Gómez, el sulfato de calcio es más agresivo que el de sodio y el de magnesio. Su ataque sobre el concreto, que puede ser físico o fisicoquímico, se da por reacción con el aluminato cálcico hidratado, generando la formación de yeso en los capilares y espacios vacíos. Este efecto inicialmente aumenta la compacidad del concreto, pero como el yeso es un compuesto expansivo, finalmente deteriora el material.

Un ataque de sulfato puede originarse a partir de los mismos componentes del material reciclado. Los sulfatos que actuarán son la suma de todos los sulfatos presentes en el sistema. En todos los casos, existe una necesidad común de prevenir la formación de etringita y taumaúsita. Desde un punto de vista ambiental, también es importante para evitar la lixiviación excesiva de los sulfatos. La necesidad de limitar la presencia de sulfatos en el agregado reciclado es una necesidad común; no obstante, el medio ambiente rodear el material es de particular importancia ya que varía de un lugar a otro y afecta el producto general y la liberación de lixiviación.



En agregados de concreto reciclado, los sulfatos pueden estar presentes como yeso y como sulfatos de aditivos o aglutinantes. En agregados mixtos y CDW en general, su presencia se atribuye a residuos de yeserías, aislamientos prefabricados piezas, paneles de yeso, etc. (Vázquez & Barra, Recycle Concrete)

## 7.17 Puzolanas

Estos materiales se definen como aquellos que, aunque no son conglomerantes por sí solos, contienen constituyentes que combinarán con la cal a temperatura ordinaria, y en presencia de agua, para formar compuestos insolubles y estables con propiedades conglomerantes. Existen dos tipos de puzolanas las naturales y las industriales.

Las **puzolanas naturales** en lo general son de origen volcánico y consisten en una masa amorfa, a vece vitrificada, acompañada de microcristales de los constituyentes de origen que, en ocasiones, se encuentran alterados o en fase de descomposición (feldespatos, piroxenos, magnetita, mica, ópalo, cuarzo, etc.). Las cualidades puzolánicas se deben a la cantidad de parte amorfa o vítrea que contienen estos materiales.

las puzolanas artificiales su estado físico, esencialmente vítreo, supuesto que su composición es la adecuada y el contenido de inquemados admisible las hace aptas para el uso como material puzolánico.

Las escorias de horno alto no pueden clasificarse como materiales puzolánicos, porque difieren de éstos en su composición como en la manera de desarrollar su acción puzolánica. En tanto que las puzolanas son compuestos con propiedades conglomerantes sólo por fijación de cal, las escorias de horno alto granuladas (vitreas y con propiedades hidráulicas) son por sí mismas suficientemente básicas y, por lo tanto, tienen una actividad puzolánica débil en el sentido de combinar con la cal, procedente de la solución saturada de contacto. (Santamaria)



## 7.18 Escoria

La escoria de alto horno es un residuo que se obtiene del proceso primario para la obtención de arrabio como lo muestra la Fig. 10. El alto horno de cuba en el que se introduce un gas reductor a presión (generalmente CO) por la parte inferior y una carga de materia constituida por minerales de hierro, coque y fundentes por la parte superior. De este proceso se separan dos productos: el hierro y las impurezas con los fundentes (escoria primaria), que van evolucionando en su composición hasta llegar a la parte baja del horno (crisol), y formándose los dos materiales finales: arrabio y escoria. Estos productos fluyen juntos en estado líquido, a través de un orificio situado en la parte de bajo del crisol denominado piquera, a una especie de balsa, produciéndose la separación definitiva del arrabio y la escoria por diferencia de densidad.

En el horno de fundición, las escorias se forman por la reacción química de un fundente con la mena de un mineral, la ceniza de un combustible o las impurezas oxidadas durante la refinación de un metal. (CANACERO, 2008)

### ***7.18.1 Clasificación de las escorias***

Los diferentes tipos de escoria se pueden clasificar de acuerdo a: características del proceso de metalurgia del que son extraídas, de acuerdo al horno de procedencia o a sus características químicas como lo muestra la Fig.9

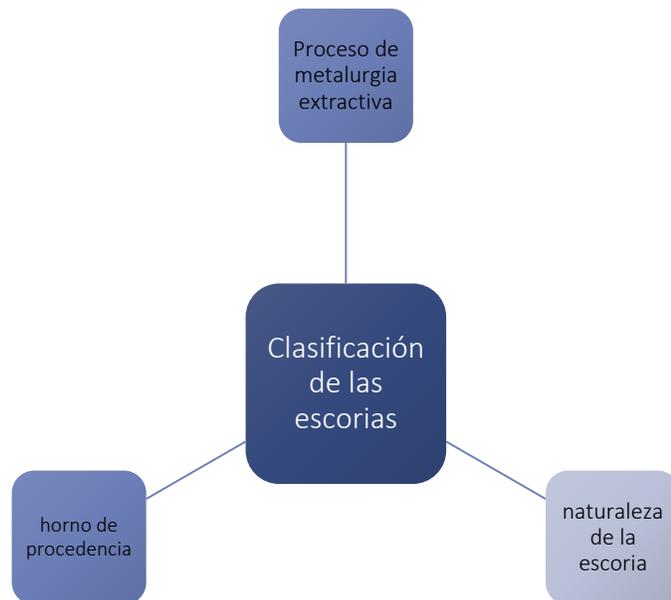


Fig. 9 Clasificación según el proceso de metalurgia extractiva

### Clasificación según el proceso de metalurgia extractiva

- Siderúrgica: Las escorias siderúrgicas se distinguen en dos; las generadas en proceso primario de recuperación de un metal para la obtención de hierro fundido o arrabio y las generadas en procesos secundarios que se obtienen al producir acero. (Ballester, Sancho, & Verdeja, 2003)
- Metalúrgica no férrea: Se refiere a la extracción y refinado de metales como cobre y sus aleaciones, aluminio, zinc, plomo, cadmio, níquel, cobalto, oro, plata, platino. (Higgins, 1967)

### Clasificación de acuerdo al horno de procedencia

- Proceso primario de obtención. Proceso utilizado en la producción de hierro, cobre, plomo, níquel y cobalto.
  - Alto horno o Horno de cuba
  - Horno de reverbero
  - Proceso Noranda
  - Horno flash



- Procesos de refinación de metal
  - Horno de Arco Eléctrico
  - Horno Básico al Oxígeno
  - Horno de olla

### **Clasificación de acuerdo a la naturaleza ácida o básica de la escoria**

- Naturaleza ácida. El carácter ácido se refiere al contenido de óxidos metálicos de carácter ácido, generalmente una escoria ácida es rica en  $\text{SiO}_2$ .
- Naturaleza básica. El carácter básico se refiere al contenido de óxidos metálicos de carácter básico, generalmente una escoria es básica cuando es rica en  $\text{CaO}$ .

#### **7.18.2 *Forma de la escoria de alto horno***

La forma final de la escoria de alto horno depende del método de enfriamiento. Hay cuatro principales tipos de escoria de alto horno: granulada, enfriamiento en aire, expandido y peletizado. Químicamente la escoria de alto horno contiene principalmente sílice (30-35%), óxido de calcio (28-35%), óxido de magnesio (1-6%) y  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Fe}_2\text{O}_3$  (1.8-2.5%). Debido a su bajo contenido en hierro se puede utilizar de forma segura en la fabricación de cemento. Dos tipos de escoria de alto horno como escoria enfriada por aire y escoria granulada se están generando de las plantas de acero. La gravedad específica de la escoria es aproximadamente 2.90, con una densidad aparente que varía en el rango de 1200 a 1300  $\text{kg/m}^3$ . El color de la escoria granulada es blanquecino. La escoria enfriada por aire se utiliza como agregado en la fabricación de carreteras mientras que la escoria granulada es usada para la manufactura de cemento.

La escoria granulada de alto horno se forma debido al enfriamiento rápido de la escoria fundida, que la convierte en un estado vítreo. La escoria granulada posee propiedades cementantes si se muele finamente. El tamaño y las propiedades físicas de la escoria granulada varía, según la composición química y el método de producción, generalmente está compuesta por silico-aluminatos de calcio y



magnesio. Estos muestran una composición de cuatro óxidos principales, estos son: CaO (C), SiO<sub>2</sub> (S), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (A) y MgO (M).

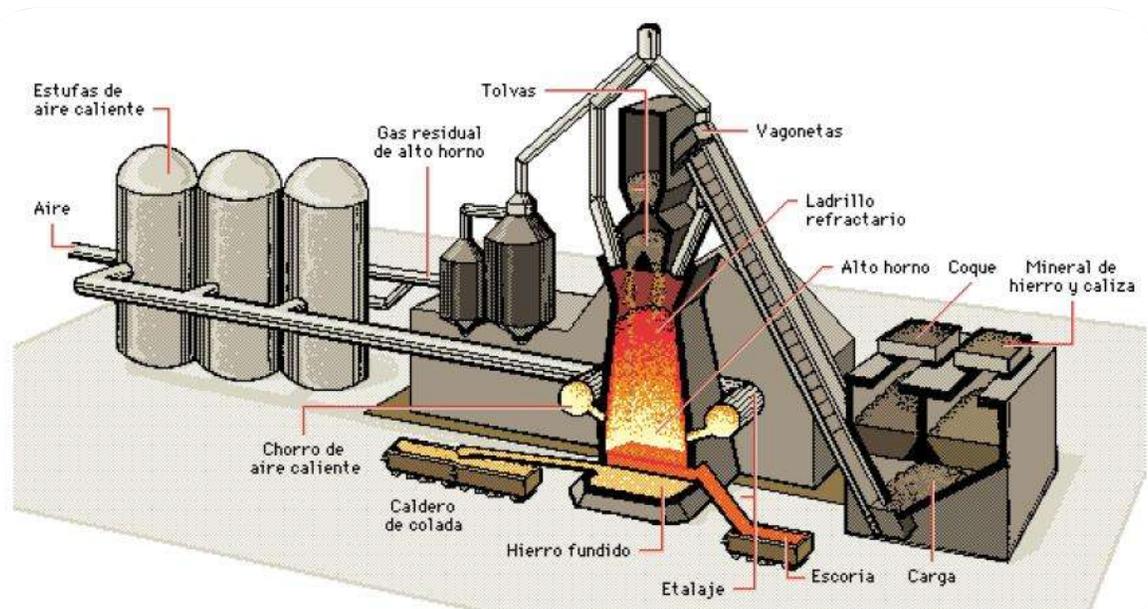


Fig. 10 Producción de acero

Las dos propiedades físicas más importantes de las escorias son la densidad y la superficie específica. Las densidades de las escorias granuladas de alto horno son típicamente 2880-2960 kg/m<sup>3</sup>. (P.C. Arnold, 1998). La finura de un material cementante se puede conocer en términos de la superficie específica del mismo, expresada como el área total de las partículas en relación con su masa, en cm<sup>2</sup>/g. La finura de la escoria granulada es un parámetro muy importante. Para una mejor funcionalidad, la finura de la escoria debe ser mayor que la del cemento. (SC Pal, 2005). Como todos los materiales cementantes, la reactividad de la escoria es determinada por el área superficial. En general, el incremento de la finura da como resultado un mejor desarrollo de la resistencia, para en la práctica, la finura está limitada por consideraciones económicas y de funcionalidad.



## 8 DESARROLLO EXPERIMENTAL

### 8.1 Recolección del material para la experimentación

La recolección del material se dificulta por la falta de una bitácora donde se programen las demoliciones y de un proceso de demolición más técnico. De acuerdo a (Luritzen & Hahn) la demolición debe ser un proceso selectivo en el que se requiere un protocolo para hacer más fácil el manejo de los residuos y lograr su aprovechamiento de acuerdo a sus características por el tipo de elemento estructural o no estructural de donde se obtienen y el tipo de demolición que se utiliza. Esta demolición selectiva puede resultar con costos superiores a una demolición tradicional, sin embargo, la recuperación de este costo se tiene en el momento en que se trata estos residuos de demolición en planta y ahorrar las separaciones de los productos se ve reflejado en la venta del material.

Para la recolección se obtuvo permiso de extraer el residuo de la demolición del antiguo CERESO Francisco J. Mujica de Morelia ubicado sobre la avenida acueducto.



Fig. 11 Localización del sitio de recolección del material de investigación

Cuando se realizó la recolección se hizo en 2 etapas, tomando en cuenta que en ambas veces se recolectaría elementos estructurales como pedazos de losa y columnas como lo muestran las Fig. 12, 13 y 14 inevitablemente se recolectaron algunos fragmentos de piso. La diferencia entre unos fragmentos y otros es el



diseño del concreto, debería ser que el concreto para elementos estructurales tenga una mayor resistencia que el utilizado en el piso. Dentro de los residuos de la demolición había material de mampostería, madera y yeso entre otros en menores cantidades. Para lograr que la recolección fuera más del 90% concreto se realizó la recolección en el área frontal del CERESO donde aparentemente se concentraban las celdas y había más columnas y losas.



Fig. 12 Recolección de RCA



Fig. 13 Sitio de recolección



Fig. 14 Acero desmontado en el sitio

En la primera recolección solo se permitió extraer aproximadamente 1 m<sup>3</sup> (Fig. 15) con permiso de la constructora encargada de la obra por lo tanto se cargó manualmente una camioneta y en la segunda ocasión ya con permiso de SCOP la extracción fue de 7 m<sup>3</sup> (Fig. 16) utilizando una retroexcavadora y volteo para el traslado del material a la trituradora.



Fig. 15 Recolección 1 m<sup>3</sup>



Fig. 16 Recolección para 7 m<sup>3</sup>



El proceso de trituración de 1 m<sup>3</sup> de material se llevó a cabo en el banco de



Fig. 17 Planta trituradora



Fig. 18 Acomodo del material triturado



Fig. 19 Captación del RCA triturado

materiales SUPRA trituradora (Fig. 17) ubicado en salida Salamanca. La trituración se realizó mediante el mecanismo de mandíbulas y la segunda ocasión se realizó por medio de impacto.

Del resultado de la trituración por impacto se obtuvo diferentes tipos de material en la primera recolección se obtuvo arena, grava y confitillo, en la segunda etapa de recolección la trituración fue mediante mandíbulas para obtener material de 1" a ¾". Para la investigación se utilizó solo la granulometría de gravas (malla de 1" a la no.4)

El material triturado fue transportado al laboratorio de materiales “Ing. Luis Silva Ruelas” para ser caracterizado.

Para comenzar con la caracterización se expuso el material al sol para conseguir un estado de las partículas superficialmente seco. El material se dividió en 2 de acuerdo al proceso de trituración para el secado superficial (Fig. 20).



Fig. 20 Extendido de material para secado

## 8.2 Masas volumétricas

La obtención de masas volumétricas seca suelta y varillada se realizó de acuerdo al procedimiento expuesto en la norma NMX-C-073-ONNCCE-2004. (ONNCCE, 2004)

### 8.2.1 Masa volumétrica

Esta prueba se lleva a cabo para determinar la masa por unidad de volumen de los agregados cuando el acomodo de sus partículas es en forma libre o natural.

#### EQUIPO.

- Muestra completamente seca.
- Recipiente de masa y volumen conocido.
- Varilla lisa punta de bala.
- Balanza o báscula.
- Cucharón.
- Pala.

#### PROCEDIMIENTO.

Se vacía el material dentro del recipiente dejándose caer a una altura medida a partir de la arista superior del recipiente de aproximadamente 5 centímetros, distribuyendo uniformemente el material y llenando completamente el recipiente



hasta colmarlo formando un cono. Enseguida se enrasa el recipiente con la varilla y se limpia el mismo de las partículas adheridas en las paredes exteriores, procediendo a pesarlo. A la masa obtenida anteriormente se le resta el peso del recipiente para obtener la masa de la arena

CÁLCULOS.

$$M.V.S.S = \frac{M}{V}$$

Donde:

M.V.S.S. = Masa volumétrica seca y suelta (gramos/cm<sup>3</sup>).

M = Masa de la muestra (gramos).

V = Volumen del recipiente (cm<sup>3</sup>).

### **8.2.2 Masa volumétrica seca varillada**

El objetivo de esta prueba es obtener la masa por unidad de volumen de una muestra cuando el material tiene una determinada compactación. Si la diferencia entre la mvss y la mvsv es pequeña, indica que el material en estado natural tiene un acomodo muy bueno.

EQUIPO.

- Muestra completamente seca.
- Recipiente de peso y volumen conocido.
- Varilla lisa punta de bala.
- Balanza
- Cucharón
- Pala

PROCEDIMIENTO.

Se procede a llenar el recipiente con agregado, dejándola caer a una altura aproximada de 5 centímetros. El llenado del recipiente debe hacerse en tres capas,



dando a cada capa de arena 25 golpes distribuidos con la varilla punta de bala, distribuyéndolos en toda la superficie del material. Debe cuidarse que la varilla no penetre en la capa anterior al dar los golpes. Se enrasa el recipiente con la varilla punta de bala y se limpian todas las partículas que hayan quedado adheridas a las paredes exteriores. Después de haber realizado los pasos anteriores, se pesa el recipiente con el material y se le resta el peso del recipiente para así obtener la masa neta del material.

### CÁLCULOS.

$$M.V.S.V = \frac{M}{V}$$

Donde:

M.V.S.V.= Masa volumétrica seca y varillada (gramos/cm<sup>3</sup>).

M = Masa del material (gramos).

V = Volumen del recipiente (cm<sup>3</sup>).



Fig. 21 Cuarteo del material a usar



Fig. 22 Prueba de MVSS



Fig. 23 Prueba de MVSV



### 8.3 Absorción de los agregados gruesos

El realizar esta prueba nos va a servir para determinar las cantidades de materiales en una revoltura de concreto. Podemos conocer cuánta agua va requerir el material grueso y fino para que no afecte las cantidades de agua que se requieren para la reacción del cemento. La humedad de los agregados indica la cantidad de poros, y esto se considera para el comportamiento mecánico del concreto. También repercute en el consumo del cemento, ya que los poros que contienen los agregados tendrán que ser cubiertos por lechada, lo que repercutirá en la cantidad de cemento a utilizar.

#### EQUIPO

Muestra representativa de aproximadamente 2 kilogramos.

- Balanza con aproximación al décimo de gramo.
- Parrilla eléctrica.
- Charolas metálicas.
- Cono metálico (truncocónico), para el secado del agregado fino.
- Pizón.
- Espátula.

#### PROCEDIMIENTO.

1. La muestra de 2 kg se pone a saturar durante 24 horas, como mínimo, antes de realizar la prueba.

2. Al término de este tiempo se seca superficialmente, como se describe a continuación:

**Agregado Grueso:** se criba a través de las mallas 3/4 y 3/8 y del material que pasa la 3/4 y se retiene en 3/8. Con una franela se seca superficialmente una muestra de grava



3. Cuando la muestra está seca superficialmente, se pesa una muestra de 300 gramos, registrando este peso como masa saturada y superficialmente seca (Mh).

4. Se coloca la muestra de 300 gramos en una charola para secarla hasta peso constante, o sea, hasta eliminar completamente el agua Fig.24.

5. Para saber cuándo está seco el material, se coloca el cristal (Fig.25) sobre el material. Si no lo empaña retiramos el material del fuego y lo dejamos enfriar un poco, procediendo a pesarlo (Fig.27) y registramos el peso como masa seca (Ms). Si todavía se empaña el cristal, hay que seguir secando el material para secarlo completamente.

#### CÁLCULOS.

$$\% \text{ Humedad de Absorción} = \frac{Mh - Ms}{Ms} * 100$$

Donde:

% Humedad de Absorción= % que absorbe la muestra.

Mh = masa saturada y superficialmente seca (gramos).

Ms = masa seca del material (gramos).



Fig. 24 Evaporación del agua en el agregado



Fig. 25 Comprobación del secado del material



Fig. 26 Secado del material



Fig. 27 Peso del material

### 8.3.1 Densidad.

El objetivo es determinar el volumen obstáculo de las partículas, es decir, el volumen efectivo excluyendo los vacíos que se forman entre las partículas de arena cuando se acomodan una sobre la otra. La densidad del agregado es proporcional a la resistencia del concreto. Si se tiene un agregado denso, mecánicamente se esperarí un comportamiento mejor en el concreto.

#### EQUIPO.

- Muestra representativa.
- Charolas.



- Espátulas.
- Parrilla eléctrica.
- Molde troncocónico, para el secado del agregado fino.
- Pisón.
- Vidrio.
- Balanza con aproximación al décimo de gramo.
- Probeta.
- Picnómetro

#### PROCEDIMIENTO.

1. Se pone a saturar el agregado en una charola durante 24 horas. Al término de este tiempo se seca superficialmente utilizando el procedimiento descrito con anterioridad (Fig.29).

2. En el picnómetro se coloca un volumen de agua conocido, registrándolo como volumen inicial  $V_i$  ( $\text{cm}^3$ ). Enseguida se pesa una muestra superficialmente seca anotando este valor como masa ( $M_a$ ) que aproximadamente sea entre 200 y 300 gramos

3. Posteriormente, se coloca la muestra dentro de la probeta (Fig.30), procurando que no salpique agua porque esto ocasionaría un error en la prueba, agitando un poco la probeta para expulsar el aire atrapado. Esta operación va a provocar un aumento en el volumen de agua que se registrará como volumen final  $V_f$ .

#### CÁLCULOS.

La densidad de la arena se calcula de la siguiente manera:  $DA = \frac{M_a}{V_f - V_i}$

Donde:

$DA$  = densidad en  $\text{g}/\text{cm}^3$ .

$M_a$  = masa saturada y superficialmente seca en gramos en gr.

$V_f - V_i$  = volumen colocado dentro de la probeta en  $\text{cm}^3$ .



Fig. 28 Medición de la densidad



Fig. 29 Secado superficial del RCA



Fig. 30 Desalajo de agua del picnómetro a la probeta



Fig. 31 Peso de la muestra

### 8.3.2 Análisis Granulométrico en gravas y arenas

#### EQUIPO.

- Juego de mallas con abertura rectangular o circular:
- Agregado Fino: mallas de la No. 4, 8, 16, 30, 50, 100,200
- Agregado Grueso: mallas No. 2", 1 1/2", 1", 3/4", 1/2 ",3/8",1/4", y No. 4
- Balanza con capacidad de 2160 gramos y aproximación al décimo de gramo.
- Charolas, espátulas y parrillas eléctricas.
- Cepillos de cerdas y alambre.
- Hojas de papel.



## PROCEDIMIENTO.

1. Se toma una muestra representativa. Para el agregado fino aproximadamente 600 gramos, y para el agredo grueso aproximadamente de 15 kilogramos.

2. Se seca la muestra hasta peso constante.

3. se toma una muestra representativa y se pesa, para después colocarse en las respectivas mallas.

4. Se agita el juego de mallas durante un tiempo de 10 minutos como mínimo. El agitado puede ser a mano o mecánicamente (Raf-tap) en el caso del agregado fino. Para el agregado grueso, se pasa la grava a través de las mallas colocándolas de mayor a menor, agitándolas con la mano para que las partículas de menor tamaño pasen a la malla siguiente. Cuando se haya terminado con la muestra de grava, al realizarle este procedimiento se elabora una tabla, registrando las masas retenidas en cada una de las mallas correspondientes.

5. Módulo de finura:

$$MF = \frac{\Sigma \text{ de la malla \#8 - \#100}}{100}$$

5. Se procede a pesar el material retenido en cada una de las mallas con aproximación al décimo de gramo, anotando los pesos en el registro correspondiente.

6. En una superficie horizontal y limpia, se colocan siete hojas de papel y sobre ellas se coloca el material retenido en cada una de las mallas previamente pesado, esto para tenerlo como testigo si es que surge algún error.

## CÁLCULOS.

1. Se anotan los pesos en las respectivas mallas.

2. El retenido se calcula de la siguiente manera:



$$\%retenido = \frac{\textit{peso retenido}}{\textit{Suma del peso retenido}} * 100$$

3. El % acumulativo se calcula a partir de los datos anteriores, como sigue:

$$\%acumulativo \textit{ de la malla} = \% \textit{ retenido malla} + \%acumulativo \textit{ malla anterior}$$

4. El % que pasa se calcula de la siguiente manera:

$$\% \textit{ que pasa de la malla} = 100 - \%acumulativo \textit{ de la malla}$$

6. El tamaño máximo de la grava se obtiene observando la columna de los % retenidos y el tamaño máximo será el tamaño de la malla que retenga el 5% o más de la masa de la muestra.



Fig. 32 Tamaños producto de la granulometría aplicada

### 8.3.3 Desgaste de los ángeles

La prueba consiste en colocar una muestra del material con características granulométricas específicas dentro de un cilindro giratorio, en donde es sometida al impacto de esferas metálicas durante un tiempo determinado. Midiendo la variación granulométrica de la muestra como la diferencia entre la masa que pasa antes y después de haber sido sometida a este tratamiento.

#### EQUIPO.

- Máquina de los ángeles.



- Esferas de hierro fundido o acero, con un diámetro promedio de 47 mm y una masa de entre 390 y 445 g cada una.
- Juegos de mallas (Cribas)
- Horno.
- Balanza, con capacidad de 20 Kg y aproximación de 1.0 g.
- Máquina agitadora para las mallas.
- Calibrador de espesores, cucharón, charolas.

## PROCEDIMIENTO

1. Una vez separado y clasificado el material de la muestra, se elige el tipo de composición que se utilizará para integrar la muestra de prueba que mejor se asemeje a las características granulométricas obtenidas como se indica.
2. Se integra la muestra de prueba con las proporciones correspondiente a cada rango de tamaños, de acuerdo con las cantidades indicadas.
3. Se obtiene la masa de la muestra de prueba integrada, registrándola como  $P_i$ , con aproximación de 1 g y se introduce a la máquina de los ángeles (Fig 33).
4. De acuerdo con lo indicado, se define la cantidad de esferas requeridas y se verifica que su masa total cumpla con lo establecido en la Tabla 15. Hecho lo anterior, se introducen las esferas a la máquina de los ángeles y se hace funcionar a una velocidad angular de 30 a 33 rpm, durante 500 revoluciones.
5. Se retira el material del interior de la máquina depositándolo en una charola. Se desecha la fracción de la muestra de prueba, para lo que se puede hacer pasar el material por todas las mallas indicadas. Una vez desechado el material de 1.7mm, se lava la muestra de prueba con un chorro de agua y se seca en el horno a una temperatura de  $110 \pm 5^\circ \text{C}$  hasta masa constante.

6. Finalmente se deja enfriar la muestra de prueba a temperatura ambiente, para determinar su masa con aproximación de 0.1 g, registrándola como Pf.



Fig. 33 Pesado de las muestras de material



Fig. 34 Prueba de desgaste de los ángeles



Tabla 16 Tabla para elección del número de bolas de acero para la prueba de desgaste

Tipo de composición de la muestra de prueba	Rango de tamaños		Masa de la fracción g	Carga abrasiva	
	mm	designación		Número de esferas	Masa total g
A	37.5-25	1 ½"	1250 +- 25	12	5000 +-25
	25-19	1"- ¾"	1250 +- 25		
	19-12.5	¾ " - ½ "	1250 +- 10		
	12.5-9.5	½ " - 3/8 "	1250 +- 10		
	Masa total de la muestra de prueba			5000 +- 10	11
B	19-12.5	¾ " - ½ "	2500 +- 10		



	12.5-9.5	½ “- 3/8 “	2500 +- 10		
	Masa total de la muestra de prueba		5000 +- 10		
C	9.5 – 6.3	3/8“- 1/4”	2500 +- 10	8	3330 +-20
	6.3 – 4.75	¼ “-N°4	2500 +- 10		
	Masa total de la muestra de prueba		5000 +- 10		
D	4.45 - 2	N°4 – N°10	5000 +- 10	6	2500 +-115

### CÁLCULOS

$$Pa = \left( \frac{Pi - Pf}{Pi} \right) * 100$$

Donde

Pa= Desgaste por trituración los ángeles (%)

Pi= Masa inicial de la muestra de prueba, (g)

Pf= Masa final del material de la muestra de prueba mayor de 1.7mm (malla N° 12), (g).

Para evitar errores durante la ejecución de la prueba, se observarán las siguientes precauciones:

- Realizar la prueba en un lugar cerrado, con ventilación indirecta, limpio y libre de corrientes de aire que puedan provocar la contaminación de la muestra de prueba con otras partículas.
- Verificar que la muestra esté perfectamente seca al momento de efectuar el cribado.
- Que todo el equipo esté perfectamente limpio y funcional. Especialmente las mallas estarán limpias, que el mecanismo de control de revoluciones trabaje correctamente y que la placa radial cumpla con las dimensiones indicadas.
- Verificar que las esferas cumplan con las dimensiones y masas indicadas.



- Verificar que la balanza esté limpia en todas sus partes, bien calibrada y colocada en una superficie horizontal, sin vibraciones que alteren las lecturas.
- Verificar que el horno esté limpio y completo en todas sus partes y que su termostato trabaje correctamente.

## 8.4 Diseño de la mezcla de concreto

Para esta experimentación se realizó un cambio en la metodología del diseño de mezclas. Normalmente el método de dosificación se realiza en el laboratorio de materiales “Ing. Silva Ruelas” generando un promedio de las características de los agregados gruesos involucrados en la mezcla y estos promedios se emplean en el método de ACI. La innovación que se realizó para generar las cantidades de material destinadas a las mezclas con sustitución de RCA impacta en las cantidades de agua, agregado grueso natural y agregado grueso reciclado.

Para la dosificación empleada se respetaron las características propias de los agregados, debido a que el agregado reciclado tiene un alto % de absorción no es conveniente promediarlo con el % de absorción de agregado natural, esto impacta en la cantidad de agua que se necesita en la mezcla y por lo tanto en la trabajabilidad, también origina que se utilice una cantidad menor que la necesaria de agregado grueso natural y como consecuencia se producen bajas resistencias a la compresión. Se optó por diseñar dos proporcionamientos donde la diferencia radica en las características de los agregados gruesos (MVSS, MVSV, densidad, % absorción): el primero es un diseño para un concreto convencional y el segundo es un diseño para un concreto con 100% agregados gruesos reciclados. Para ambos diseños se respetó un  $f'c$  de 280 kg/cm<sup>2</sup>, lo cual generó la misma relación a/c. Una vez obtenidos los resultados de ambos proporcionamientos diseñados por ACI se sustrae el porcentaje de las cantidades de grava, arena, cemento y agua que se desea sustituir, para esta investigación se empleó como sustitución el 25% en peso de las cantidades de material producto del diseño para 100% reciclado y 75% de las cantidades del diseño convencional.



### 8.4.1 Comparación entre el diseño teórico y el implementado

Se realizó un diseño de mezcla teórico donde se promedian las características de los agregados gruesos (RCA y NA), antes mencionadas, con el propósito de comparar entre ambos proporcionamientos las cantidades de material a usar en 1cm<sup>3</sup> de concreto. Para la comparación se realizaron 3 diseños de mezclas de los cuales los primero dos son necesarios para la dosificación implementada en esta investigación (R-N):

M100R: Para este diseño se utilizaron los datos auténticos del RCA

M100N: Se utilizan los datos auténticos del agregado grueso natural

MT: Los datos utilizados aquí son resultado de promediar los resultados correspondientes a los RCA y NA.

En los 3 diseños se utilizaron los mismos datos de arena volcánica, agua y cemento CPC. En la tabla 17 se muestran los datos utilizados para realizar los diseños de mezcla.

Tabla 17 Datos que se utilizan en los diseños de mezcla

	reciclado	natural	promedio	25% reciclado	75% testigo
M.V.S.S=	1119.81	1468.87	1294.34	279.9525	1101.6525
M.V.S.V=	1185.85	1579.72	1382.785	296.4625	1184.79
%abs	10.06	1.76	5.91	2.515	1.32
densidad	2.1	2.7	2.4	0.525	2.025
tamaño max	3/4"	3/4"			

## 8.5 Caracterización del concreto con agregados de concreto reciclado.

### 8.5.1 Velocidad de Pulso

El propósito de este ensayo es determinar la velocidad de propagación de ondas de compresión longitudinales a través del concreto. Este método se ha utilizado para evaluar la calidad del concreto por más de 60 años. Puede ser



utilizado para evaluar grietas internas y otros defectos, como cambios en el concreto por deterioro debido a agresiones químicas del medio ambiente, tales como congelación y deshielo. Utiliza ondas mecánicas que no ocasionan daño alguno al elemento de prueba. (Chávez García, 2012)

La determinación de la velocidad de transmisión de una onda longitudinal en concreto tiene entre otras las siguientes aplicaciones:

- Determinación de la uniformidad del concreto en una zona, así como encontrar defectos en el mismo.
- Estimación de espesores de concreto mediante el método indirecto.
- Correlación entre la velocidad y la resistencia como medida de aseguramiento de calidad.
- Estimación del módulo de elasticidad y módulo de Poisson para el concreto.
- Determinación de la resistencia residual después de daño por incendio

Dentro del concreto, se pueden encontrar algunos factores que afecten la lectura de la velocidad. Entre ellos tenemos:

- Humedad y temperatura del concreto.
- Distancia.
- Forma y tamaño del espécimen.
- Efectos de las barras de refuerzo (en caso de tener barras embebidas).

#### EQUIPO.

Consta de un generador de pulso eléctrico, un par de transductores, un amplificador, un dispositivo de medición de tiempo, una pantalla de proyección del tiempo y cables de conexión.

#### PROCEDIMIENTO.

Inicialmente se coloca el elemento de unión entre el concreto y el transductor (grasa, vaselina, jabón líquido o algún otro tipo de sustancia recomendada en el instructivo del equipo). Según la norma ACI 228 es recomendado que se realicen 5 lecturas de velocidad en el análisis. Sin embargo, por efectos de calibración se



pueden realizar 3 lecturas para cada lectura por cada cilindro poco antes de que estos sean sometidos a alguna prueba destructiva. Se debe determinar el promedio de la velocidad, si se tiene para el espécimen más de una lectura.

Según la normativa mexicana (NMX-C-275-ONNCCE-2004, 2004), velocidades inferiores a 1700 m/s contienen muchos vacíos o agrietamientos, entre 17800 a 2350 m/s algunos vacíos, y superiores a 23500 m/s pocos vacíos o agrietamientos bajos o nulos.



Fig. 35 Aparato para la medición de velocidad de pulso



Fig. 36 Medición directa de VPU

### 8.5.2 Resistividad Eléctrica

Es una propiedad de cada material, correspondiente al recíproco de su conductividad. Está íntimamente relacionada con la microestructura de la matriz cementicia y distribución de los poros, en gran proporción del grado de saturación de los poros del mortero y en menor grado, de la hidratación de la pasta y de la presencia de sales disueltas en la fase acuosa en función de variables como el tipo de cemento, adiciones inorgánicas, relación agua/cemento, porosidad de la estructura, etc. (Chávez García, 2012). Se puede utilizar en el laboratorio sobre testigos extraídos de la estructura o directamente sobre la estructura en campo.

#### EQUIPO.

- Especímenes a prueba (Cilindros o Vigas).
- Resistómetro.
- Gel.



- Esponjas.

#### PROCEDIMIENTO.

1. Se determinan las dimensiones de la muestra: diámetro y longitud.
2. Se revisa la conexión de las terminales de corriente y voltaje.
3. Se monta la muestra en el equipo Nilsson.
4. Se colocan las caras laterales del cilindro entre dos placas de cobre y entre estas esponjas húmedas.
5. Mediante la fuente y a través de las placas metálicas adosadas a las caras laterales del espécimen, se somete el cilindro a una corriente dada, (I) y voltaje (E).
6. La resistencia eléctrica (R) se calcula como  $E/I$  y se expresa en Ohm.

#### CÁLCULO.

La resistividad eléctrica está dada por:

$$\rho = Re(AL)$$

Dónde:

$\rho$  = Resistividad eléctrica en  $K\Omega\text{-cm}$  (ohm-m).

$Re$  = Resistencia eléctrica que el equipo proporciona, en  $K\Omega$ .

$A$  = Área transversal del espécimen en  $\text{cm}^2$ .

$L$  = Longitud del espécimen en cm.

### 8.5.3 Compresión

La normativa de la Secretaría de comunicaciones y Transportes (SCT N-CMT-2-02-005-04, 2004), indica que se obtendrá la resistencia de diseño ( $F'c$ ) a los 28 días, se aceptará valores promedios no menores al 85% y ningún valor será menor al 75%.



## EQUIPO

- Vernier.
- Máquinas hidráulicas (prensas).

## PROCEDIMIENTO.

1. Se determina el diámetro del cilindro, el cual se obtiene del promedio de las medidas de 2 diámetros perpendiculares entre sí.

2. Una vez obtenido el diámetro del espécimen, se coloca en la máquina de prueba (Fig. 37), la cual tiene que tener las placas de apoyo totalmente limpias. Se centrará el eje vertical del cilindro al centro de la placa de apoyo.

3. Se ajusta la platina superior a la cara del espécimen de manera que la carga se aplique constante.

4. Se nivela y se pone en ceros la máquina. Se aplica la carga a una velocidad constante de 1.4 a 3.1 kg-cm<sup>2</sup>/seg. Esta velocidad puede ser un poco mayor en la primera mitad de la carga total del espécimen. Tomar en cuenta que por ningún motivo se suspenda la aplicación de la carga, cuando el espécimen ya se aproxime a la carga de falla (Fig.38).

5. Se continúa la carga del espécimen hasta la falla registrándola y observando su tipo de falla y la apariencia del material.

## CÁLCULO.

$$E = \frac{P}{A}$$

Donde:

P = es la carga de ruptura en kg.

A = Área de la sección transversal del espécimen en cm<sup>2</sup>.

E = Esfuerzo que resiste el espécimen en kg/cm<sup>2</sup>.



Conociendo y registrando su edad, se determina el porcentaje de resistencia respecto a la resistencia de proyecto de la forma siguiente:

$$\%R = \frac{R}{R_p}$$

Donde:

% Resistencia = Por ciento de Resistencia.

R = resistencia real a cierta edad en días y en kg/cm<sup>2</sup>.

R<sub>p</sub> = resistencia de proyecto en kg/cm<sup>2</sup>.



Fig. 37 Acomodo del espécimen en la prensa eléctrica



Fig. 38 Falla de la muestra a compresión

#### 8.5.4 Flexión

Se lleva a cabo con la finalidad de conocer la resistencia a flexión del concreto en vigas moldeadas en el laboratorio.

EQUIPO.

- Máquina de prueba.
- Accesorios para la flexión.



- Flexómetro.

#### PROCEDIMIENTO.

1. El espécimen debe de voltearse sobre uno de sus lados, respecto a la posición original en la que fue colado, para así asegurar que la carga se reciba en un área lisa.

2. Se centran los apoyos inferiores y posteriormente los superiores, quedando así un tercio central en el espécimen, entre los apoyos (Fig. 39).

3. Si no se tiene un buen contacto con los apoyos interiores será necesario pulir, cabecear o calzar el espécimen con tiras de madera o acero las superficies de contacto.

4. Se aplica la carga, la cual deberá aplicarse en forma uniforme de modo que no produzca impacto. Puede aplicarse rápidamente hasta poco menos del 50 % de carga de ruptura. Después se aplicará de manera que el esfuerzo en la fibra externa no exceda de 10 kg/cm<sup>2</sup>/min.

#### CÁLCULOS.

Si la fractura ocurre en tercio medio del claro, el módulo de ruptura se calculará con:

$$R = \frac{PL}{bd^2}$$

Donde:

R = Módulo de ruptura en kg/cm<sup>2</sup>.

P = Carga de ruptura en kg.

L = Claro en cm.

b = Ancho promedio en cm.

d = Peralte promedio en cm.



Si la fractura ocurre fuera del tercio medio en más del 5 % del claro, los resultados deben descartarse.



Fig. 39 Acomodo de la viga en la máquina de pruebas



Fig. 40 Viga probada



## 9 RESULTADOS Y ANALISIS

### 9.1 Resultados de caracterización del agregado

#### 9.1.1 Masas Volumétricas

La masa unitaria se determinó con base en los lineamientos indicados en la norma (NMX-C-073-ONNCCE, 2004). Los resultados para la masa unitaria suelta y varillada en agregados finos y gruesos se muestran en la en las tablas 18, 19 y 20:

Tabla 18 Masas volumétricas para arena

MASAS VOLUMETRICAS AGREGADOS FINOS						
Muestra	M tara (gr)	V tara (cm <sup>3</sup> )	M bruta (gr)	M grava natural (gr)	M.V. S	PROMEDIO
MVSS 1	1845	2785	5700	3855	1384	1366
MVSS 2	1845	2785	5600	3755	1348	
MVSV 1	1845	2785	5900	4055	1456	1470
MVSV 2	1845	2785	5980	4135	1485	

Tabla 19 Masas volumétricas para la grava natural

MASAS VOLUMETRICAS AGREGADOS GRUESOS NATURALES						
Muestra	M tara (gr)	V tara (cm <sup>3</sup> )	M bruta (gr)	M grava natural (gr)	M.V. S	PROMEDIO
MVSS 1	2930	10600	18900	15970	1507	1511
MVSS 2	2930	10600	19000	16070	1516	
MVSV 1	2930	10600	20100	17170	1620	1643
MVSV 2	2930	10600	20600	17670	1667	



Tabla 20 MVS en agregados gruesos reciclados

MASAS VOLUMETRICAS AGREGADOS GRUESOS RECICLADOS						
Muestra	M tara (gr)	V tara (cm <sup>3</sup> )	M bruta (gr)	M RCA (gr)	M.V. S (g/ cm <sup>3</sup> )	PROMEDIO
MVSS 1	2930	10600	13500	10570	997	1059
MVSS 2	2930	10600	14800	11870	1120	
MVSV 1	2930	10600	14100	11170	1054	1120
MVSV 2	2930	10600	15500	12570	1186	

\*MVSS: masa volumétrica seca suelta

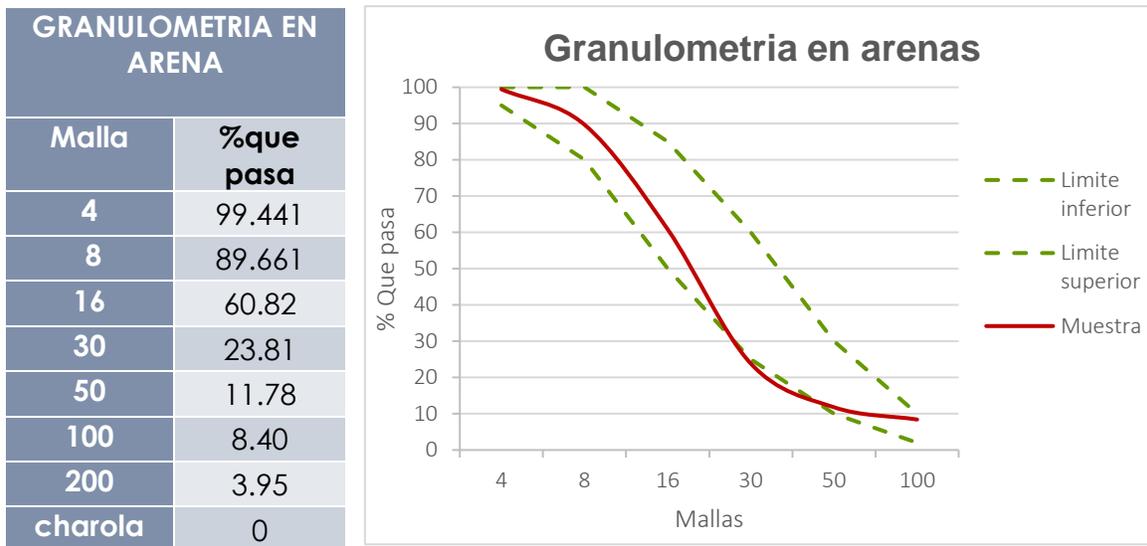
\*MVSV: masa volumétrica seca varillada

En el análisis de las masas volumétricas de los agregados gruesos es propicio destacar que los agregados reciclados son ligeros en comparación con un agregado natural triturado, ya que los gramos por cm<sup>3</sup> son menores en los agregados reciclados. Particularmente hablando de los agregados reciclados las masas volumétricas muestran diferencias de acuerdo al método de trituración utilizado, las muestra MVSS 1 y MVSV 1 son producto de una trituración por mandíbulas y las muestras restantes (MVSS 2 y MVSV 2) son resultado de una trituración por impacto. Observando los resultados podemos inferir que las muestras catalogadas como 2 tienen mejor acomodo de las partículas en el mismo volumen.



### 9.1.2 Granulometría

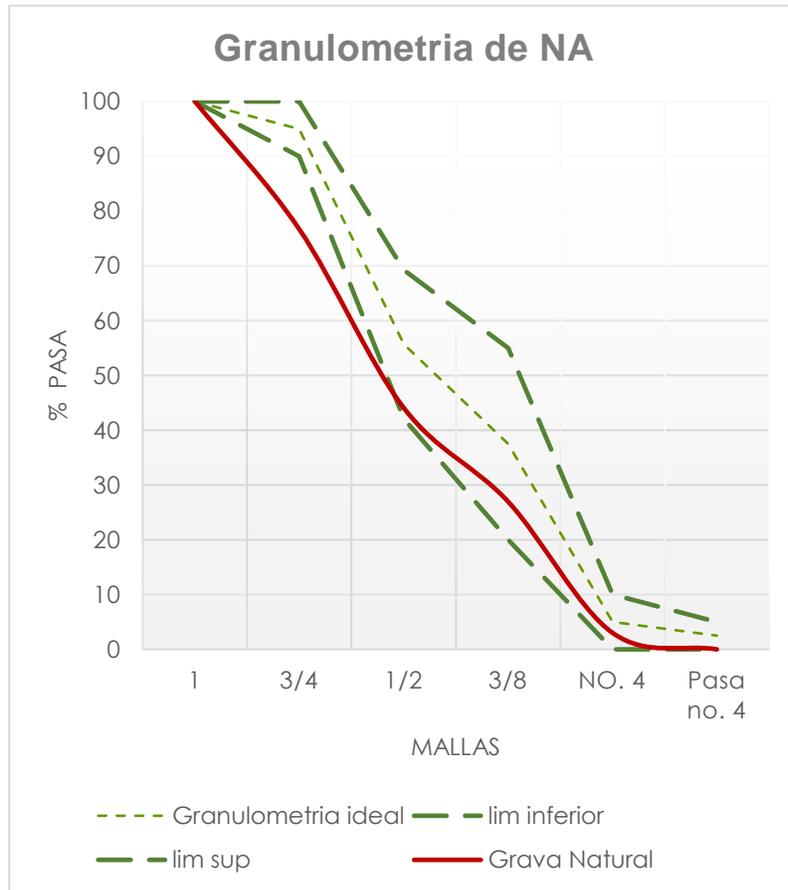
Tabla 21 Resultados de análisis granulométrico en arenas



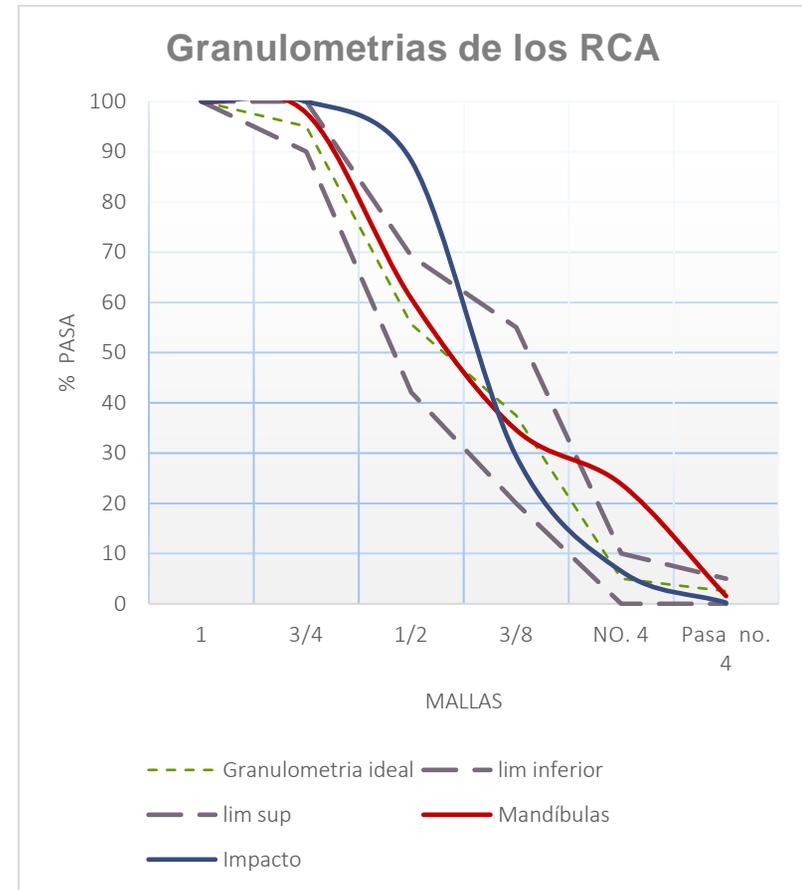
Gráfica 3 Granulometría en arenas

Tabla 22 Resultados de la granulometría en grava natural y grava reciclada

AGREGADOS GRUESOS	% PASA		% PASA
	GRANULOMETRIA RCA		GRANULOMETRIA NA
#MALLA	mandíbulas	impacto	--
1 1/2	100.00	100.00	100
1	100.00	100.00	100
3/4	97.69	100.00	76.67
1/2	60.77	88.23	44.08
3/8	34.62	29.36	26.96
NO. 4	23.85	6.51	3.01
Pasa no. 4	1.54	0.21	0.00



Gráfica 4 Granulometría en la grava natural



Gráfica 5 Granulometría en los agregados reciclados triturados por método diferente

En la granulometría de los RCA influye el método de trituración, se observa en la gráfica 5 una distribución granulométrica similar a la ideal en los fragmentos triturados por mandíbulas.



### 9.1.3 Absorción

Tabla 23 Resultados de porcentaje de absorción

% Humedad de Absorción en arena			
Muestra	mss(gr)	ms(gr)	Abs (%)
1	301	289.8	3.86
2	300	288.7	3.91
<b>Promedio=</b>			<b>3.89</b>

Tabla 24 % Humedad de absorción en grava natural

% Humedad de Absorción en grava natural			
Muestra	mh(gr)	ms(gr)	Abs (%)
1	300	295.8	1.42
2	302	298.2	1.27
3	302	297.2	1.62
<b>Promedio=</b>			<b>1.44</b>

Tabla 25 Porcentaje de absorción a agregado reciclado

%Humedad absorción RCA (triturado por mandíbulas)			
Muestra	Mh (gr)	Ms (gr)	%H. Abs
1	300	267	12.4
2	300	266.2	12.7
3	300	267.4	12.2
<b>Promedio=</b>			<b>12.416081</b>

Tabla 26 Porcentaje de absorción a agregado reciclado (triturado por impacto)

% Humedad absorción RCA (triturado por impacto)			
Muestra	Mh (gr)	Ms (gr)	%H. Abs
1	300	274.8	9.2
2	300	274.6	9.2
3	300	268.4	11.8
<b>Promedio=</b>			<b>10.06</b>



En las tablas 23 a 26 están los resultados de la prueba de porcentaje de absorción. El porcentaje de humedad de absorción es mayor en los agregados gruesos reciclados de las tablas 25 y 26, y entre los dos métodos diferentes de trituración hay una **diferencia de 2.35% en absorción**. Se podría inferir que la trituración por impacto genera agregados con menor cantidad de mortero alrededor de la partícula.

### 9.1.4 Densidad

Tabla 27 Resultado de densidad en arena volcánica

Densidad relativa en arena volcánica				
muestra	Mss (gr)	f+agua (gr)	f+a+arena	Densidad
1	300	772	947.5	2.41

Tabla 28 Resultados de densidad en grava natural triturada

Densidad en grava natural				
Muestra	muestra (gr)	Volumen (cm3)	Densidad (g/cm3)	Promedio
1	300	110	2.73	2.73
2	300	110	2.73	
3	301	110	2.74	



Tabla 29 Resultados de densidad en agregados reciclados (triturado por mandíbulas)

Tabla 30 Resultados de densidad en RCA triturados por impacto

Densidad RCA Mandíbulas				
Muestra	Muestra (gr)	Volumen (ml)	Volumen (cm <sup>3</sup> )	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )
m1	300	150	150	2
m2	300	140	140	2.1
m3	300	150	150	2
			<b>Promedio=</b>	<b>2.05</b>

Densidad RCA Impacto				
Muestra	Muestra (gr)	Volumen (ml)	Volumen (cm <sup>3</sup> )	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )
1	300	150	150	2
2	300	140	140	2.1
3	300	150	150	2
			<b>Promedio=</b>	<b>2.05</b>

Los RCA suelen ser más densos como lo muestran las tablas 29 y 30, en comparación con los agregados naturales, esto se debe a la porosidad de los agregados reciclados y al contenido pequeñas grietas y microporos en el mortero adherido a su alrededor. En el caso de esta investigación la densidad de los agregados RCA es igual, aunque cambien el método de trituración.



### 9.1.5 Desgaste de los Ángeles

Tabla 31 Resultados de desgaste de los ángeles

Desgaste de los ángeles			
muestra	Pi	Pf	Pc %
1	5000	3622	27.56
2	5000	3535.5	29.29
		Promedio=	28.425

Los datos resultantes expresados en la tabla 31 de esta prueba muestran que en los agregados reciclados hay un desgaste en promedio del 28.5% que de acuerdo con la literatura estos agregados suelen tener un desgaste de alrededor de 30% y tomando en cuenta la normativa (Manual M.MMP.2.02.032, SCT) para agregados naturales el desgaste por abrasión que debe tener un agregado para poder ser implementado es de 50% como máximo.



### 9.1.6 Comparación entre proporciónamiento teórico y R-N

Diseños de mezclas utilizados para la comparación entre los proporcionamientos teórico e implementado R-N, los datos utilizados en el diseño de mezclas se muestran en la tabla 32.

R-N → { M100R: Para este diseño se utilizaron los datos auténticos del RCA  
M100N: Se utilizan los datos auténticos del agregado grueso natural

T → MT: Los datos utilizados aquí son resultado de promediar los resultados correspondientes a los RCA y NA.

En los 3 diseños se utilizaron los mismos datos de arena volcánica, agua y cemento CPC.

Tabla 32 Datos que se utilizan en los diseños de mezcla

DISEÑO DE MEZCLA	M100R	M100N	MT
Tipo de material:	reciclado	natural	promedio
M.V.S. S=	1119.81	1468.87	1294.34
M.V.S. V=	1053.77	1579.72	1382.78
%absorción	10.06	1.76	5.91
densidad	2.1	2.7	2.4
tamaño max	3/4"	3/4"	3/4"



Una vez ingresados los datos en el método del ACI tenemos las siguientes cifras de material en la tabla 33 para 1 cm<sup>3</sup> de concreto.

1. Cantidades de material a emplear en las mezclas M100R Y M100N respectivamente

Tabla 33 Cantidades de material para 1cm<sup>3</sup> de concreto

MEZCLA	M100R		M100N	
	PESO (Kg.)	VOLUMEN (Cm3)	PESO (Kg.)	VOLUMEN (Cm3)
<b>Grava</b>	705.58	0.34	939.93	0.34
<b>Arena</b>	675.74	0.29	652.06	0.29
<b>Cemento</b>	455.55	0.14	455.55	0.14
<b>Agua</b>	205	0.205	205	0.205
<b>Aire</b>	-----	0.02	-----	0.0200
<b>SUMA=</b>	2041.87	1	2252.54	1

De la tabla 33 se obtienen los porcentajes 25% M100R y 75% M100N a utilizar en el proporcionamiento R-N y se expresan los resultados en la tabla 34, de la cual se hace un análisis de la cantidad de grava en la tabla 35.



Tabla 34 Cantidades a usar para la mezcla R-N

	25% M100R	75% M100N	R-N
MATERIAL	PESO (kg)	PESO (kg)	25%+75%
<b>Grava</b>	176.39	704.94	881.34
<b>Arena</b>	168.93	489.05	657.98
<b>Cemento</b>	113.88	341.66	455.55
<b>Agua</b>	51.25	153.75	205
<b>Aire</b>	-----	-----	-----

Tabla 35 Análisis de la cantidad de grava

	P. total (kg)	25% P. total	75% P. total
		kg de RCA	kg de NA
Grava	881.34	176.39	704.94
Volumen cm <sup>3</sup>	0.33	0.08	0.25

En los ajustes por humedad de la tabla 36 para el proporcionamiento R-N se observan los siguientes resultados

Tabla 36 Resultados del ajuste por humedad en R-N

Ajuste por humedad		
	M100R	M100N
<b>Cantidad de agua</b>	205	205
<b>Dif. de % de grava</b>	70.98	16.54
<b>Dif de % de arena</b>	30.61	29.53
<b>Cantidad de agua en total</b>	306.59	251.08

Tabla 37 Análisis de la cantidad de agua para R-N

PROPORCIONAMIENTO	cantidad total M100R	cantidad total M100N	25%M100R+75%M100N (kg)
R-N	306.59	251.08	264.95



2. Para el proporcionamiento T se obtuvieron las cantidades de material de la tabla 38 para 1 cm<sup>3</sup> de concreto. De la grava total obtenida se calcula el 25% que corresponde a la sustitución de agregado reciclado y el resto (75%) pertenece a NA.

Tabla 38 Cantidades de material para la mezcla T

Proporcionamiento T		
MATERIAL	PESO (kg)	VOLUMEN (cm <sup>3</sup> )
<b>Grava</b>	822.75	0.34
<b>Arena</b>	659.97	0.29
<b>Cemento</b>	455.55	0.14
<b>Agua</b>	205	0.205
<b>Aire</b>	-----	0.02
<b>SUMAS=</b>	2041.87	1

Tabla 39 Análisis del contenido de grava en T

	P. total (kg)	25% P. total	75% P. total
Grava	822.75	205.68	617.06
		kg de RCA	kg de NA
Volúmen cm <sup>3</sup>	0.34	0.08	0.25

Como resultados de los ajustes por humedad se obtuvo las siguientes cifras de la tabla 40.

Tabla 40 Cantidad de agua para el diseño T

Cantidad de agua	Dif.de % de grava	Dif.de % de arena	agua total (kg)
205	48.62	29.89	283.52

Como es conocido en los diseños de mezcla están relacionados grava y arena, cuando se tiene una densidad baja en las grabas la cantidad de arena sube para compensar la baja característica de este elemento. En el proporcionamiento



T se tiene una cantidad de arena en peso mayor como efecto del promedio realizado entre las densidades de los agregados RCA y NA dado que al promediar estamos restando valor a la buena densidad del agregado natural triturado. En cambio, cuando sustraemos los porcentajes de cada uno de los diseños (M100R y M100N) solamente se toma en cuenta la densidad respectiva al porcentaje requerido y no decrece la buena densidad del NA, esto impacta en la cantidad de grava de buena calidad que se usa en la elaboración de la mezcla y por lo tanto una cantidad menor de arena. Estas diferencias se ven numéricamente en la tabla 41.

Tabla 41 Comparación de cantidades de material para 1 cm<sup>3</sup> de concreto

Comparación del material para 1cm <sup>3</sup> de concreto		
Proporcionamiento	R-N	T
MATERIAL	peso (kg)	peso (kg)
<b>Grava</b>	881.34	822.75
<b>Arena</b>	652.06	659.97
<b>Cemento</b>	455.55	455.55
<b>Agua</b>	205	205
<b>Aire</b>	-----	-----

En el desglose de las cantidades de grava mostrada en la tabla 42 se observa que en R-N la cantidad de RCA es menor en 24 kg, esto se debe a que únicamente se está trabajando con un valor promedio de un solo material (RCA), por lo tanto, no se incrementan o decrecen las características de este agregado. En el caso de T al realizar el promedio de las M.V.S.V se



aminora la volumetría en el cálculo del AN por lo tanto la cantidad en T de AN triturado que pudiera representar una mejor condición para la mezcla disminuye.

Tabla 42 Comparación entre la cantidad de grava en el diseño R-N y T

proporción		P. total (kg)	25% RCA (kg)	75% NA (kg)
R-N	Grava	861.20	176.39	684.80
T		802.40	200.601275	601.803825
Volumen cm <sup>3</sup>		0.33	0.08	0.25

En la comparativa de los resultados de ajuste por humedad de la tabla 43 la cantidad de agua es mayor en el proporcionamiento T, difiere en 18.57 kg, esto debido a que aumenta la absorción realizando el promedio entre ambos agregados gruesos, además, que la cantidad de RCA destinada al 25% en T es mayor.

Tabla 43 Comparación entre las cantidades de agua para los diseños R-N y T

CANTIDAD DE AGUA CON AJUSTE POR HUMEDAD EN LOS PROPORCIONAMIENTOS	
R-N (kg)	T (kg)
264.95	283.52



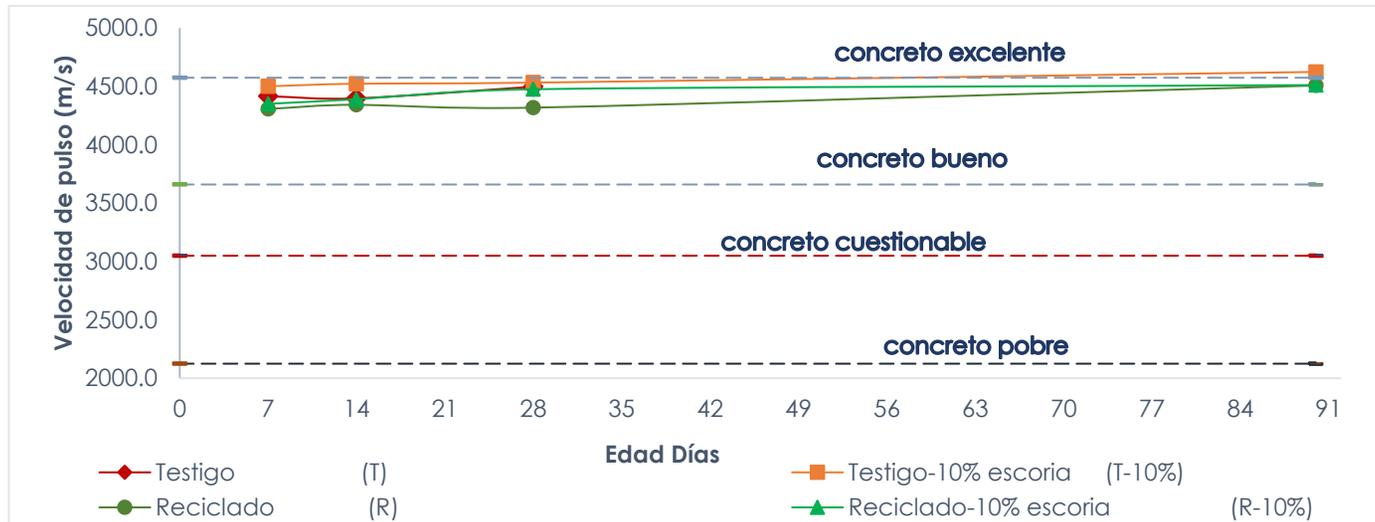
## 9.2 Resultados de los Concretos

### 9.2.1 Velocidad de Pulso

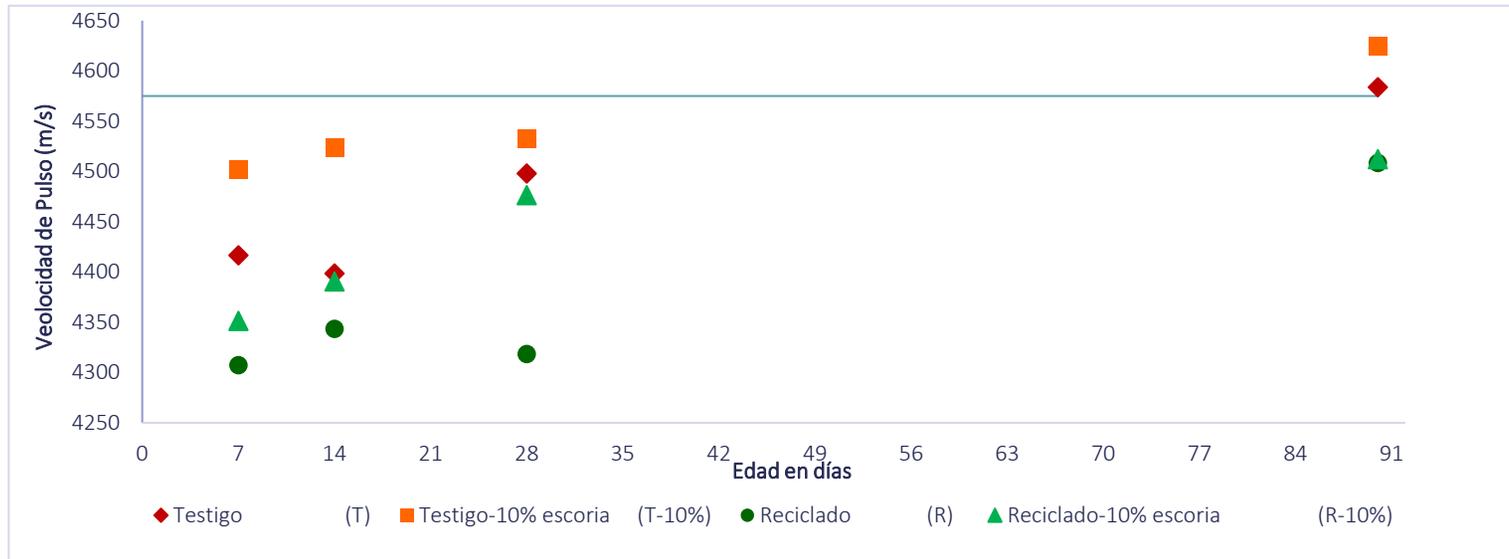
#### a) Velocidad de pulso en cilindros

Tabla 44 Resultados de VPU en cilindros

PROMEDIOS (m/s)	Edad en días			
Muestra	7	14	28	90
Testigo (T)	4416.5	4398.5	4497.8	4583.8
Testigo-10% escoria (T-10%)	4501.3	4523.7	4532.7	4624.7
Reciclado (R)	4307.3	4343.5	4318.5	4508.3
Reciclado-10% escoria (R-10%)	4351.3	4390.5	4476.3	4512.0



Gráfica 6 Resultados de VPU en cilindros

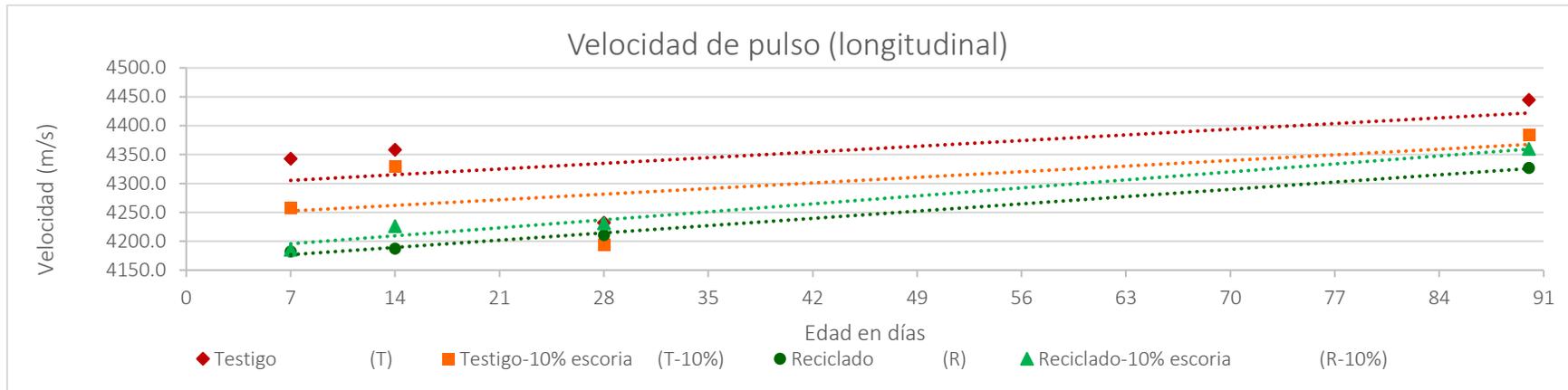


Gráfica 7 Resultados a detalle de VPU en cilindros

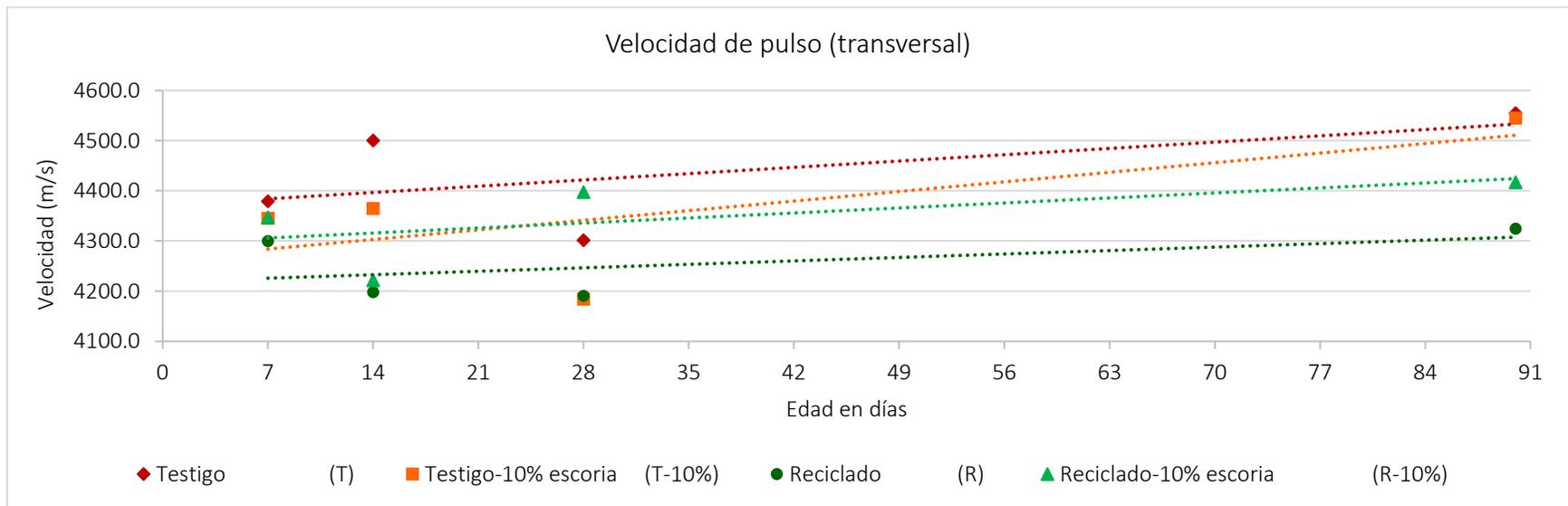
## b) Velocidad de pulso en vigas

Tabla 45 Resultados de VPU en vigas

Días	7		14		28		90	
	longitudinal	transversal	longitudinal	transversal	longitudinal	transversal	longitudinal	transversal
<b>Testigo (T)</b>	4342.67	4379.00	4358.33	4500.33	4232.00	4301.33	4444.33	4554.67
<b>Testigo-10% escoria (T-10%)</b>	4257.33	4345.00	4329.00	4364.67	4193.00	4184.00	4384.33	4545.33
<b>Reciclado (R)</b>	4182.00	4299.67	4187.00	4198.00	4210.67	4190.33	4327.00	4324.67
<b>Reciclado-10% escoria (R-10%)</b>	4185.00	4346.67	4226.33	4221.33	4231.00	4397.33	4359.67	4416.67



Gráfica 8 VPU en vigas de manera longitudinal



Gráfica 9 VPU en vigas de manera transversal



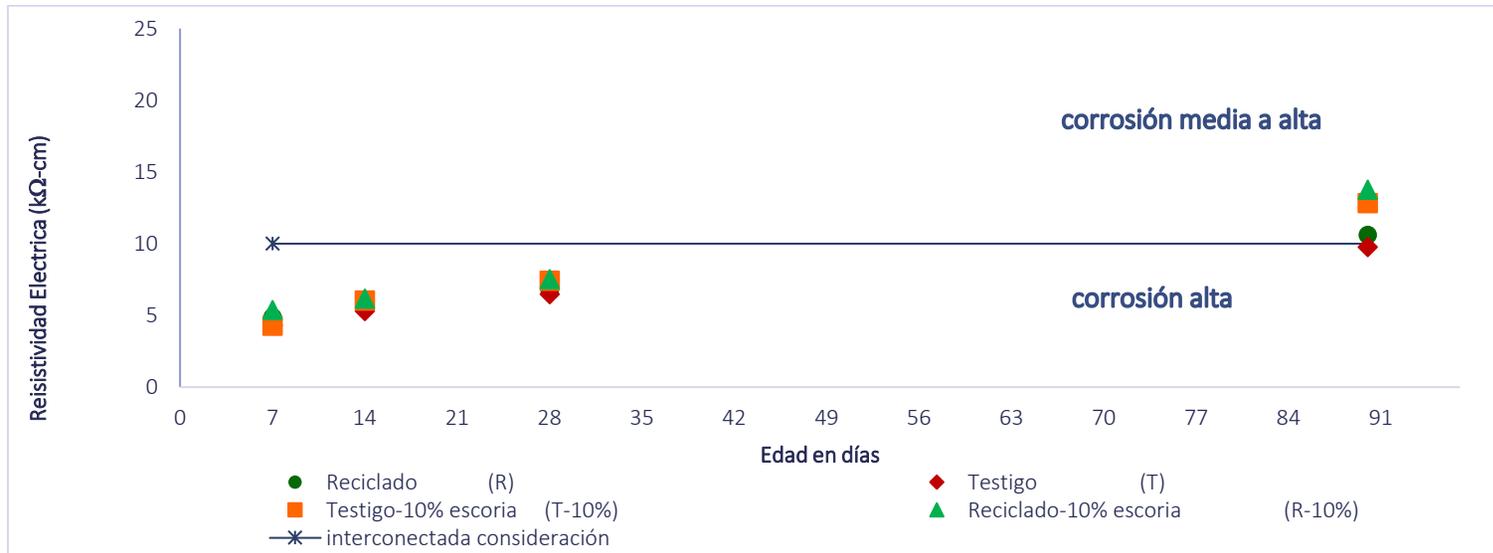
Todas las mezclas entran en la categoría de un concreto bueno de acuerdo con los criterios de *CBD-187. Non-Destructive Testing of Concrete*. Los especímenes de la mezcla T y T-10% muestran resultados por encima de las mezclas con agregados reciclados de acuerdo a lo expresado en las gráficas 7,8 y 9. La mezcla R-10% muestra un comportamiento muy cercano a la mezcla testigo (T) y mejor en comparación con la mezcla R, por lo tanto, esta prueba nos da un indicio de que la sustitución de escoria contribuye en mejorar los resultados en velocidad de pulso.

### 9.2.2 Resistividad Eléctrica

#### a) Resistividad Eléctrica en cilindros

Tabla 46 Resultados de resistividad eléctrica

PROMEDIOS (kohms-cm)	Edad en días			
	7	14	28	90
Muestra				
Testigo (T)	4.31	5.30	6.48	9.75
Testigo-10% escoria (T-10%)	4.28	6.02	7.40	12.83
Reciclado (R)	4.88	5.83	6.74	10.60
Reciclado-10% escoria (R-10%)	5.37	6.15	7.53	13.74

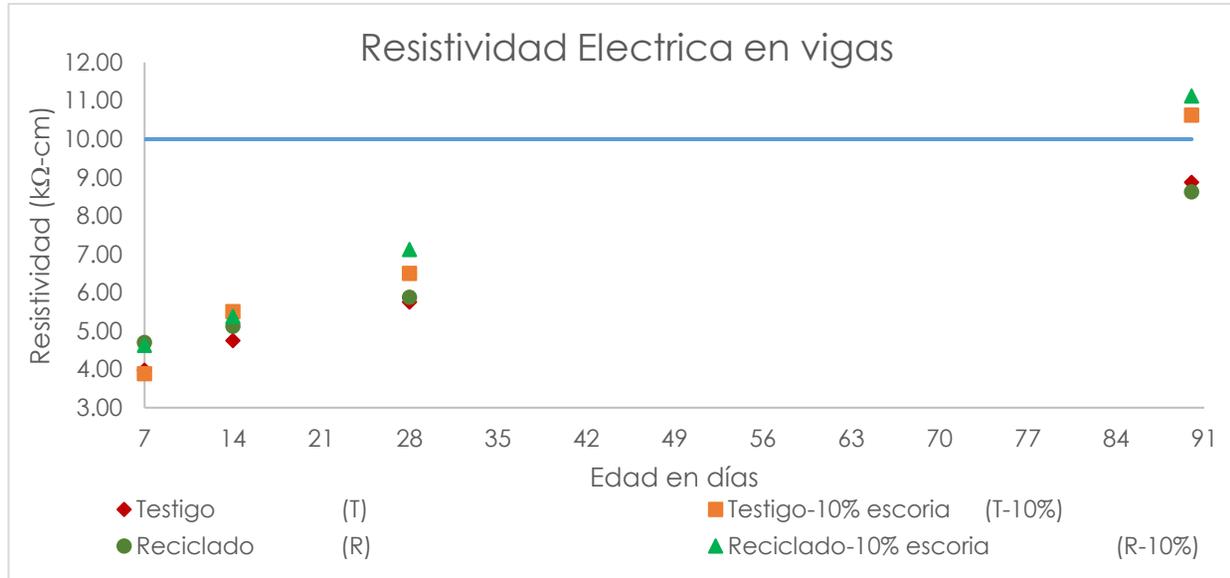


Gráfica 10 Resistividad eléctrica en cilindros

### b) Resistividad eléctrica en vigas

Tabla 47 Resultados de resistividad eléctrica en vigas

PROMEDIOS (kohms-cm)	Edad en días			
muestra	7	14	28	90
Testigo (T)	3.98	4.75	5.75	8.88
Testigo-10% escoria (T-10%)	3.88	5.50	6.50	10.63
Reciclado (R)	4.70	5.13	5.88	8.63
Reciclado-10% escoria (R-10%)	4.63	5.38	7.13	11.13



Gráfica 11 Resistividad eléctrica en vigas

La resistividad eléctrica en los especímenes R-10% es la más alta de todas las mezclas, este comportamiento aparece para 3 de las edades de prueba. Una alta resistividad eléctrica es indicio de la poca porosidad que tiene el concreto, por lo tanto, su impermeabilidad y resistencia mecánica serán mayores en comparación con las otras mezclas. De acuerdo a la gráfica la segunda mezcla de mejor comportamiento es la T-10%, al estar en los primeros 2 lugares con mejor resultado las mezclas con sustitución del 10% de escoria de alto horno podría denotar que la escoria de alto horno mejora las características en ambas mezclas de concreto.

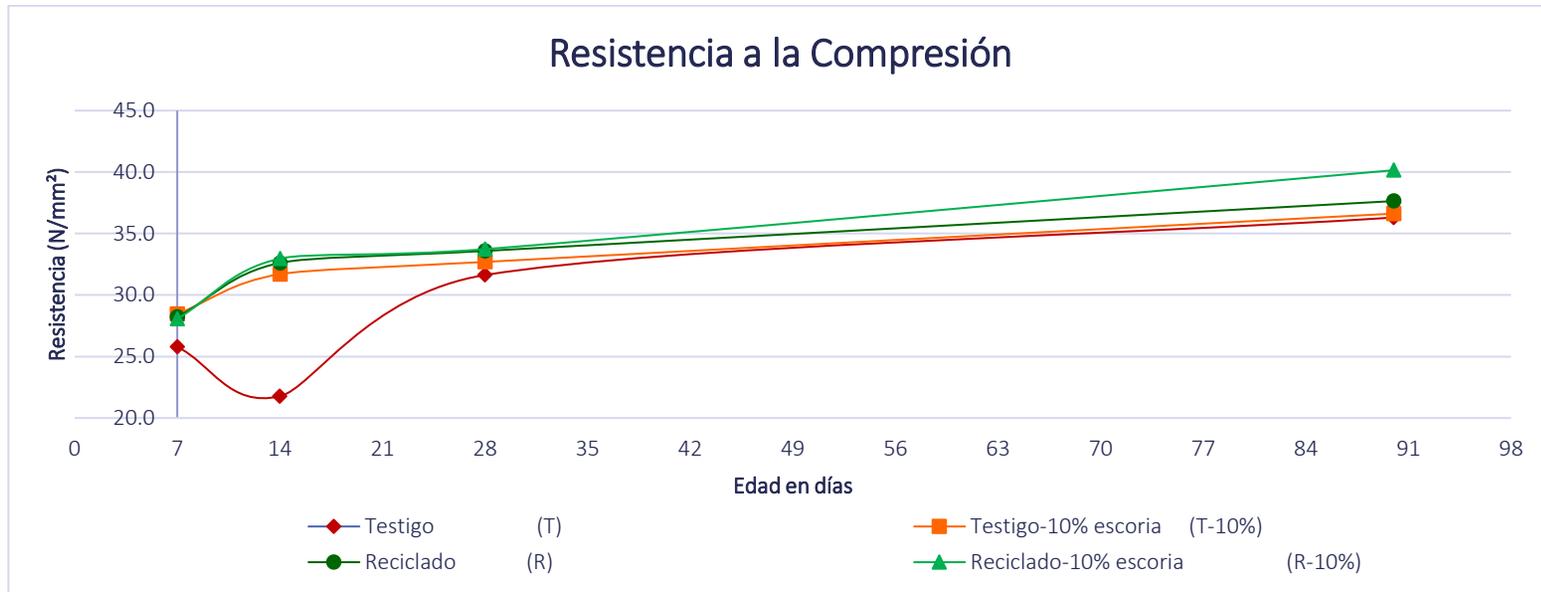


## 9.3 PRUEBAS DESTRUCTIVAS EN CONCRETO

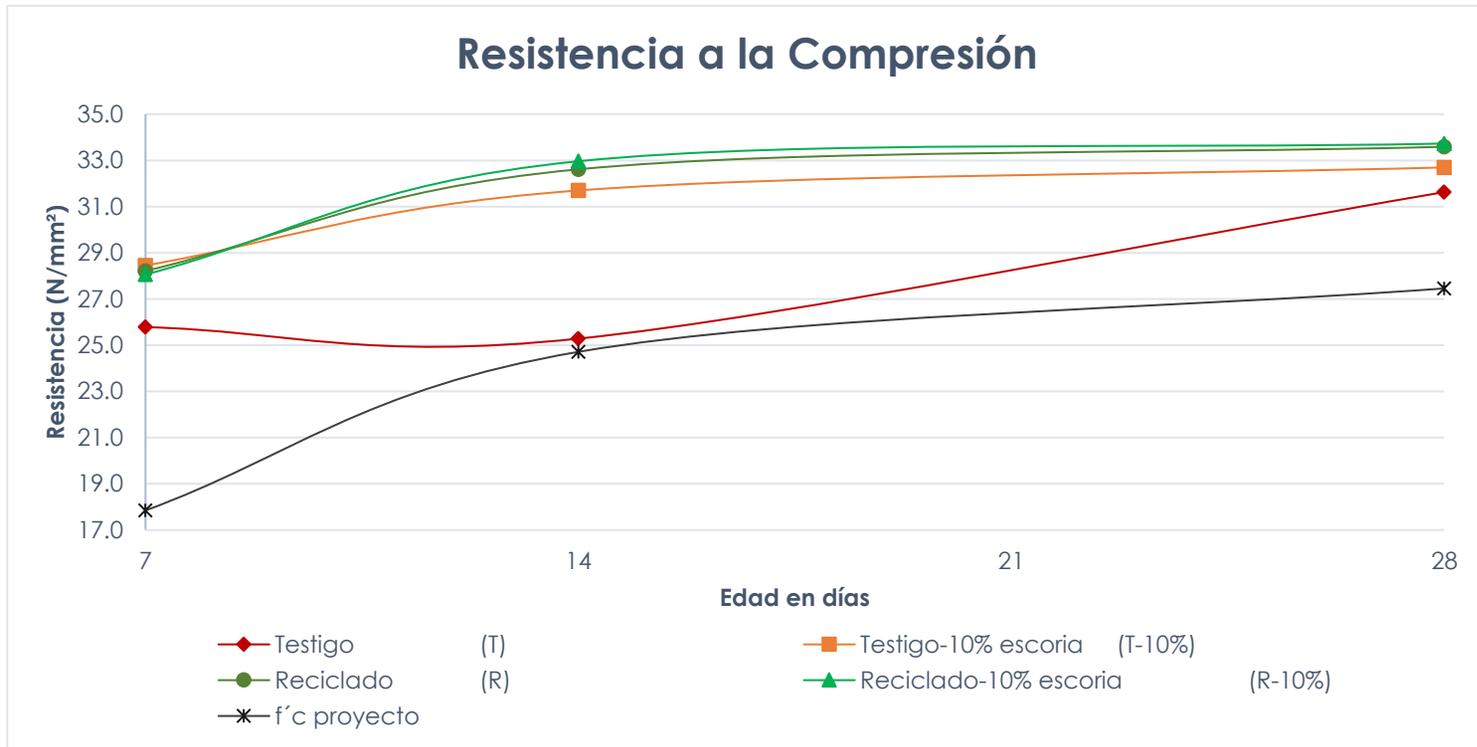
### 9.3.1 Resistencia a la Compresión

Tabla 48 Resultados de Resistencia a la Compresión

PROMEDIOS (N/mm <sup>2</sup> )	Edad en días			
	7	14	28	90
Muestra				
Testigo (T)	25.8	21.8	31.6	36.3
Testigo-10% escoria (T-10%)	28.5	31.7	32.7	36.6
Reciclado (R)	28.2	32.6	33.6	37.6
Reciclado-10% escoria (R-10%)	28.1	33.0	33.7	40.2



Gráfica 12 Resistencia a la compresión



Gráfica 13 Resistencia a la compresión con línea f'c proyecto

Los resultados de compresión son favorables para las mezclas con RCA de acuerdo con la gráfica 12. Todas las mezclas cumplen con la resistencia de diseño, de acuerdo con la normativa se aceptarán muestras que a los 28 días (gráfica 13) cumplan con el más del 75% de esta. La sustitución de RCA no ha afectado en la resistencia del concreto, se observa que desde la edad de 7 días las muestras cumplen muy satisfactoriamente con la resistencia esperada a los a esta edad, que corresponde al 65% de la resistencia diseñada. Para los 14 días las muestras de concreto reciclado (R y R-10%)



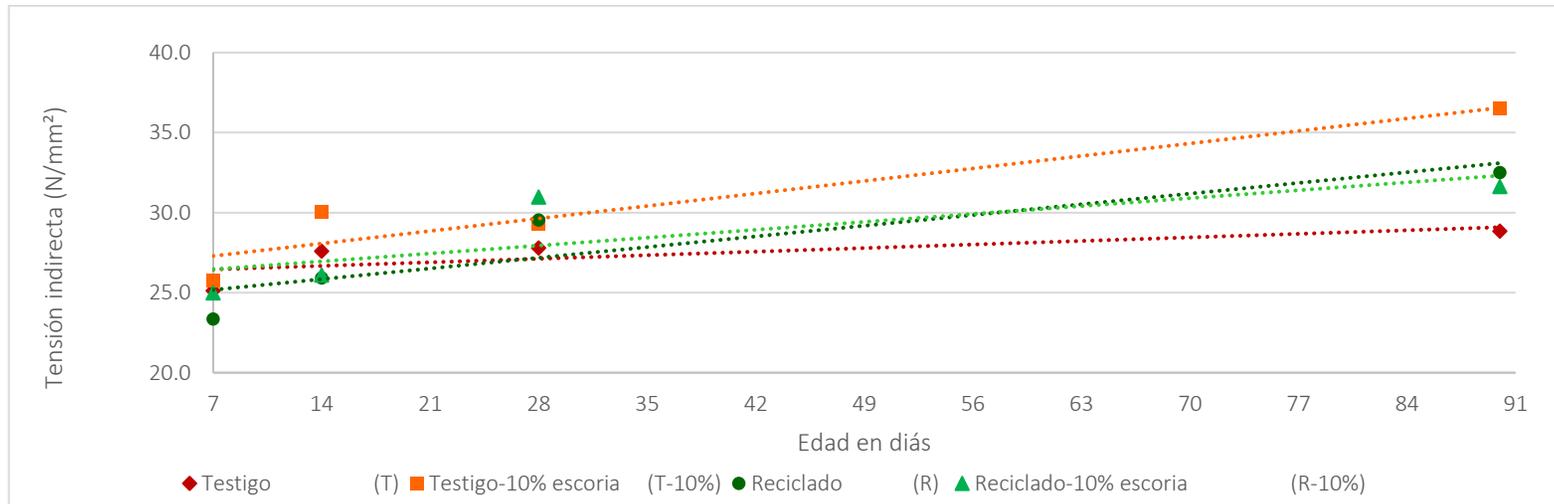
se separan notoriamente del testigo, incrementando su resistencia en 49.5 % Y 51% más respectivamente y se separan de la mezcla T-10% en 2.8% y 4% en el mismo orden.

Los mejores resultados los muestra la mezcla R-10% sobresaliendo ligeramente de la mezcla R. y van incrementando Los especímenes han fallado en forma de reloj de arena que es una forma satisfactoria en la prueba de compresión. De acuerdo a investigaciones realizadas la resistencia a la compresión es alta en los concretos RCA se debe principalmente a la alta capacidad de absorción del mortero viejo adherido a los agregados reciclados y a la textura rugosa de los RCA que proporcionan una mejor unión y entrelazado entre el mortero y el reciclado. (Etxeberria, Vazquez, Mari, & Barra, 2007)

### 9.3.2 Tensión indirecta

Tabla 49 Resultados de tensión indirecta

PROMEDIOS	N/mm <sup>2</sup>		Edad en días	
muestra	7	14	28	90
Testigo (T)	25.1	27.6	27.8	28.8
Testigo-10% escoria (T-10%)	25.8	30.0	29.3	36.5
Reciclado (R)	23.3	25.9	29.5	32.5
Reciclado-10% escoria (R-10%)	25.0	26.1	31.0	31.6



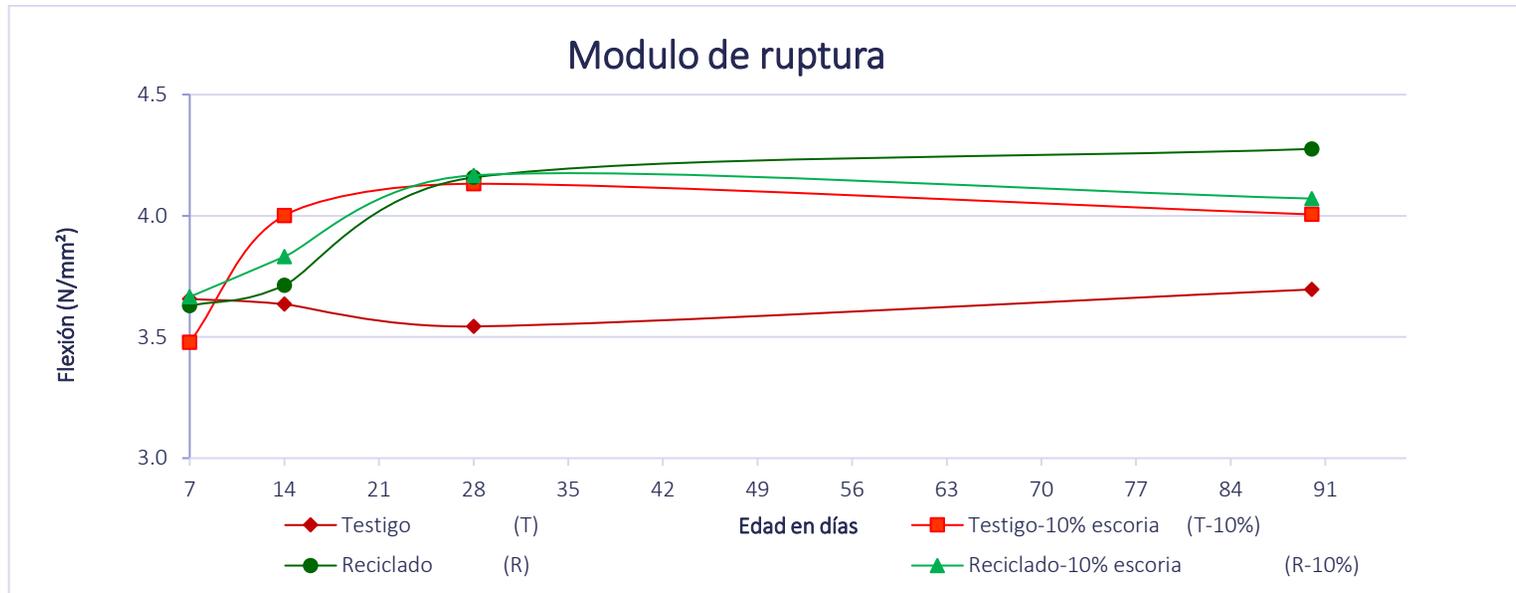
Gráfica 14 Tensión indirecta

En esta prueba observamos que el concreto T-10% tiene un mejor comportamiento en pruebas a tensión.

### 9.3.3 Flexión en vigas

Tabla 50 Resultados de flexión

muestra	edad en días			
	7	14	28	90
Testigo (T)	3.7	3.6	3.5	3.7
Testigo-10% escoria (T-10%)	3.5	4.0	4.1	4.0
Reciclado (R)	3.6	3.7	4.2	4.3
Reciclado-10% escoria (R-10%)	3.7	3.8	4.2	4.1



Gráfica 15 Modulo de ruptura

En los resultados obtenidos para el módulo de ruptura se observa en la gráfica 15 que los mejores resultados están en los concretos con AR, por lo tanto, se infiere que las muestras T y T-10% tienen un mayor potencial al agrietamiento por fatiga en las losas de concreto.



## 10 Propuesta de ficha técnica para el de agregados reciclados.

### 10.1 INTRODUCCIÓN

Las siguientes recomendaciones se hacen basadas en la el ANEJO 15 de Recomendaciones para la utilización de hormigones reciclados emitido por el ministerio de transportes, movilidad y agenda urbana de España y tomando en cuenta los resultados obtenidos en esta investigación, además, de consultar la normativa emitida en algunos países europeos. Esta ficha técnica de recomendaciones tiene como objetivo marcar algunos lineamientos que ayudan a crear mejores concretos con agregados de concreto reciclado, tomando en cuenta aspectos de calidad que sirven para el diseño de mezclas de concreto.

### 10.2 Alcance

Se define como agregados de concreto reciclado (RAC), los agregados producto de la trituración de fragmentos de concreto de estructuras demolidas. Para su aplicación en concretos no estructurales, se recomienda limitar su aplicación hasta un 25% en peso sobre el contenido total de agregado grueso. Con esta limitación las propiedades del concreto no se ven afectadas en relación a las que presenta un concreto convencional. Para porcentajes superiores se recomienda realizar estudios específicos y experimentación complementaria en cada aplicación.

El agregado reciclado en porcentaje de 25% puede emplearse en concretos con de baja a resistencia normal (<150 kg/cm<sup>3</sup> a de 350 kg/cm<sup>2</sup>) excluido su empleo en concretos pretensados.

Se excluyen de los objetivos de esta ficha:

- Los concretos fabricados con agregado fino reciclado



- Los concretos fabricados con agregados reciclados de naturaleza distinta al concreto (cerámicos, asfálticos, etc)
- Los concretos fabricados con agregados reciclados procedentes de concretos especiales como aluminoso, con fibras, con polímeros, etc.

## 10.3 Propiedades tecnológicas de los materiales

### Cementos

Los tipos de cemento utilizados en la fabricación de concretos con RCA serán los mismos que se emplean en un concreto convencional para las mismas aplicaciones.

### Agregados

Los agregados gruesos naturales deben cumplir con la normativa ya establecida en el país, en cuanto a los RCA han de satisfacer las especificaciones para agregados establecidas en estas recomendaciones. Para ambos agregados las caracterizaciones se deben llevar a cabo como la normativa establecida lo indica.

Es aconsejable que los áridos reciclados procedentes de concretos de muy distintas calidades se almacenen separadamente, debido a que la calidad del concreto de origen influye en la calidad del RCA, obteniéndose áridos con mejores propiedades a partir de concretos de buena calidad. Una posible distinción puede ser almacenar en acopios procedentes de hormigones no estructurales, permitiendo así una mayor uniformidad en las propiedades de los áridos producidos.

#### **10.3.1 Requisitos físicos mecánicos**

El concreto reciclado con un contenido máximo al 25% de RCA, el contenido de terrones de arcilla de este no será superior al 0.6%.

Si el concreto reciclado incorpora cantidades de RCA superiores al 25% habrá que extremar las precauciones durante su producción para eliminar al máximo



las impurezas de tierras que lleve la materia prima, y así facilitar que el agregado reciclado combinado cumpla las especificaciones de la normativa mexicana.

## 10.4 REQUISITOS DE CLARIDAD DE LOS AGREGADOS GRUESOS

### 10.4.1 **TAMAÑO MÁXIMO Y MÍNIMO DE UN AGREGADO Y GRANULOMETRIA DE LOS AGREGADOS**

Las plantas productoras de agregados reciclados consiguen en general una fracción gruesa con un coeficiente de forma, índice de lajas y una granulometría adecuada dentro de los recomendados para su empleo en concretos.

El tamaño mínimo permitido de agregado reciclado es de 4mm es decir lo retenido en la malla no. 4, para realizar la caracterización de granulometrías y tamaño del agregado se recomienda seguir el proceso establecido en la NMX-C-077-2019-ONNCCE, “Agregados para concreto-análisis granulométrico, métodos de prueba”.

### 10.4.2 **RESISTENCIA AL DESGASTE**

Los agregados RCA probados al desgaste tendrán una pérdida, en masa, del cincuenta (50) por ciento como máximo. Dicha pérdida se determinará en una muestra de agregados siguiendo el procedimiento indicado e el manual M-MM-2-02-032, Resistencia a la Degradación del Agregado Grueso mediante la Máquina de Los Ángeles.

### 10.4.3 **DENSIDAD Y ABSORCIÓN**

Los agregados RCA deben someterse a la prueba de densidad bajo el procedimiento indicado en la Norma Mexicana NMX-C-164-ONNCCE-2014, Agregados- Determinación de la Densidad Relativa y Absorción de Agua del Agregado Grueso. Teniendo en cuenta que deben cumplir como valor mínimo de Densidad 2000 kg/m<sup>3</sup> y el respectivo a porcentaje máximo de absorción como 10%.



#### **10.4.4 MASA VOLUMÉTRICA**

La masa volumétrica Seca y Suelta y la masa volumétrica seca suelta varillada se recomienda seguir el procedimiento establecido en la norma NMX-C-073-ONNCCE-2004.



## 11 CONCLUSIONES

Con esta investigación queda demostrado que los RCA son una buena opción para ser implementados en concretos de baja y media resistencia al alcanzar buenos resultados en las mezclas con RCA en las pruebas mecánicas de compresión además de lograr una resistencia mayor al testigo con la adición de otro residuo industrial como lo es la escoria de alto horno. Con la caracterización de los RCA se corrobora que el aspecto que difiere en mayor porcentaje de los agregados naturales es el % de absorción, que si bien, afecta en los diseños y elaboración de mezclas de concreto esto se puede aminorar con el uso de adiciones, aditivos e incluso implementando un método de diseño de mezclas un tanto diferente al convencional. Se ha analizado teóricamente que el diseño de la mezcla al implementar RCA es un factor importante para garantizar la resistencia del concreto, se recomienda analizar de manera practica los diferentes métodos de diseño para encontrar el más óptimo.

Los RCA caracterizados en esta investigación cumplen satisfactoriamente con los estándares internacionales por lo tanto pueden ser usados en distintos proyectos de construcción. Por lo tanto, se establece una serie de recomendaciones a seguir para el uso de RCA en nuevos concretos.

La ficha técnica de recomendaciones para el uso de agregados de concreto reciclado ha sido complementada y basada en los estándares internacionales, datos obtenidos dentro de esta investigación y como base para el escrito se ha considerado la ficha técnica utilizada por el ministerio de transportes, movilidad y agenda urbana de España (MITMA).



## 12 Bibliografía

- Alberto, G. R., & Otoniel, B. R. (2012). COMPOSICIÓN DE RESIUIOS SOLIDOS URBANOS EN DOS SITIOS DE DISPOSICIÓN FINAL. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 13-18.
- Alexandre Lorenzi, F. (2007). Ultrasonic Pulse Velocity Analysis in Cocrete Specimens. En I. C. Aires. Porto Alegre. Rio Grande do Sul: Asociación Argentina de Ensayos no Destructivos y Estructurales.
- Andrade, C., & DÁndrea, R. (2011). La resistividad eléctrica como parámetro de control del hormigón y de su durabilidad. *Revista de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción.*, 93-101.
- Ardavan Yazdanbakhsh, L. C. (2017). Comparative LCA of concrete with natural and recycled coarse aggregate in the New York City area. *BUILDING COMPONENTS AND BUILDINGS* , 1163-1173.
- ASTM. (2004). *ASTM-C128 DENSIDAD*.
- Ballester, A., Sancho, J., & Verdeja, L. F. (2003). *Metalurgia extractiva: Procesos de obtención. vol II* . España: Síntesis.
- Best Practice Guidelines on the Preparation of Waste Management Plans for Cosntruction & Ddemolition Projects. (2006).
- CANACERO. (2008). Camara Nacional de la Industria del Hierro y el Acero en México.
- Carcaño, E. I. (s.f.). *ingenieria uady*. Obtenido de <http://www.revista.ingenieria.uady.mx/volumen8/prediccion.pdf>
- Chávez, H. (2012). Análisis comparativo entre técnicas no destructivas y destructivas aplicadas a la caracterización del concreto hidráulico elaborado con agregados volcánicos y cmemtno CPC 30R. Tesis de doctorado.



Científicas, c. s. (s.f.). *Revista materconstrucc.* Obtenido de <http://materconstrucc.revistas.csic.es/index.php/materconstrucc/article/view/1160/1/294>.

científicas, consejo superior de investigaciones. (s.f.). *revista materconstrucc.* Obtenido de <http://materconstrucc.revistas.csic.es/index.php/materconstrucc/article/view/1160/1294>

Concretos reciclados y eficiencia energética. (2014). *CONSTRUCCIÓN Y TECNOLOGÍA EN CONCRETO*, 29-31.

CONSEJO MUNDIAL EMPRESARIAL PARA EL DESARROLLO SOSTENIBLE. (s.f.). *INICIATIVA POR LA SOSTENIBILIDAD DEL CEMENTO-RECICLANDO CONCRETO*.

de Brito, J., & Nabajyoti, S. (2013). *Recycled Aggregate in Concrete. Use of industrial, Construction and Demolition Waste*. London: Springer.

DEHLG, D. o. (junio de 2006). Best Practice Guidelines on the Preparation of Waste Management Plans for Construction & Demolition Projects. Ireland.

Etxeberria, M., Vazquez, E., Mari, A., & Barra, M. (2007). *Influence of amount of recycled coarse aggregates an production process on properties of recycled aggregate concrete* . Cem Concr Res.

Fernando López Gayarre, J. G.-C. (2015). Life cycle assessment for concrete kerbs manufactured with recycled aggregates. *Cleaner Production xxx*, 1-13.

Garrido, M. d. (septiembre de 2015). ESTUDIO DE LOS RESULTADOS EN OBRA Y A LARGO PLAZO DE LA UTILIZACION DE MATERIALES RECICLADOS DE RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN (RCD) EN FIRMES DE CARRETERAS Y URBANIZACIONES. Sevilla: Universidad de Sevilla .

GEAR, P. (s.f.). *GUÍA ESPAÑOLA DE ÁRIDOS RECICLADOS PRODECENTES DE RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN (RCD)*. España.



- Higgins, R. (1967). *Ingeniería Metalúrgica, Tomo I Metalurgia Física Aplicada*. México: Continental.
- Hoffmann, C., & S. Schubert, A. L. (2012). *evive Recycled concrete and mixed rubble as aggregates: Influence of variations in composition on the concrete properties and their use as structural material*. En *Construction and Building Materials* (págs. 701-709).
- IMT, I. M. (2002). *MECÁNICA DE MATERIALES PARA PAVIMENTOS*. Sanfandila, Qro.
- Instituto del Concreto. (1997). *Manual Tecnología y Propiedades*. Colombia: Asociación colombiana de productores de concreto-ASOCRETO.
- Kibert, C. (2008). *Sustainable construction: green building design and delivery*. wiley hoboken.
- Kimbert, C. (2005). *Sustainable construction: green building design and delivery*.
- Kosmatka, S. H. (2004). *Diseño y control de mezclas de concreto*. EE.UU.: Portland Cement Association.
- Lauch, K.-S., Vrijders, J., & Dooms, B. (2018). *Defining Limits for Standardization on Concrete Incorporating Recycled Concrete Aggregates*. En D. Hordijk, & M. Lukovic, *High Tech Concrete: Where Technology and Engineering* (págs. 2347-2355). Springer International Publishing.
- Letelier, V., Osses, R., Valdes, G., & Moricomi, G. (2014). *Utilización de metodologías para mejorar las propiedades mecánicas del hormigón estructural fabricado con áridos reciclados*. *Ingeniería y Ciencia*, 179-195.
- Luritzen, E. K., & Hahn, N. J. (s.f.). *Producción de residuos de construcción y reciclaje*. *Residuos*(8).
- Malhotra, V., & Carino, N. J. (2004). *Handbook on nondestructive testing of concrete*. Boca Raton, U.S.A: CRC Press.



- Martinez-Molina, W., Torres-Acosta, A., Alonso-Guzmán, E., Chávez-García, H. L., Hernández-Barrios, H., Lara-Gómez, C., . . . González-Valdéz, F. (2015). Concreto reciclado: una revisión. *Revista ALCONPAT*, 235-248.
- MINERÍA, C. G. (2018). *ESTUDIO DE LA CADENA PRODUCTIVA DE LOS MATERIALES PÉTREOS*. México: Secretaria de Economía.
- MITMA. (s.f.). ANEJO 15, "Recomendaciones para la utilización de hormigones reciclados".
- Neville, A. (1999). *Tecnología del Concreto*. México, Distrito Federal.: Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C.
- NRMCA. (s.f.). Hormigo El concreto en la Práctica . *National Ready Mixed Concrete Association*.
- ONNCCE. (2004). NMX-C-073-ONNCCE-2004. *Industria de la construcción-agregados-masa volumetrica-método de prueba*.
- OPALIS. (abril de 2019). Obtenido de OPALIS: <https://opalis.be/fr/%C3%A0-propos>
- P.C. Arnold, H. (1998). *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*. London, Great Britain.
- Panarese, K. S. (1992). *Diseño y control de Mezclas de Concreto*. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto A.C. (IMCYC).
- Pellegrin, C., & Faleschini, F. (2016). *Sustainability Improvements in the Concrete Industry*. Switzerland: Springer.
- Pellegrino, C., & Faleschini, F. (2016). *Sustainability Improvements in the Concrete Industry*. Italia: Springer International Publishing Switzerland.
- Pellegrino, C., & faleschini, F. (2016). *Sustainability Improvements in the Concrete Industry. Use of Recycled Materials for Structural Concrete Production*. Springer.



- Q., C. M. (31 de 10 de 2017). *Ciencia UNAM*. Obtenido de <http://ciencia.unam.mx/leer/666/-a-donde-van-los-residuos-de-la-construccion-y-la-demolicion->
- Qixian, L., & Bungey, J. (1996). *Using compression wave ultrasonic measure the velocity*.
- Quintana, I. E., & Quintana, I. N. (2015). Propiedades físico-mecánicas de los concretos reciclados. En *Construcción y Tecnología en concreto*.
- Rodriguez, S. (2011). Porosidad.
- Santamaria, F. S. (s.f.). Puzolanas y cementos puzolánicos. *Materiales de Construcción*, 615-645.
- SC Pal, A. M. (2005). Investigation of hydraulic activity of ground granulated blast furnace slag in concrete. *Cement and Concrete Research*, 1481-1486.
- SCT, & SECRETARIA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES. (2017). INVENTARIO DE BANCOS DE MATERIALES. Centro S.C.T MICHOACÁN; unidad General de servicios Tecnicos.
- SEMARNAT. (2003). Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los residuos. México.
- SEMARNAT. (05 de Enero de 2017). *Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales*. Obtenido de <http://www.semarnat.mx/leyes-y-normas/nom-residuos>
- Silverio, H. M. (noviembre-febrero de 2008). Diseño Sustentable de materiales de construcción; caso del concreto de matriz de cemento Pórtland. *Ciencia ergo sum*, 15(3), 306-310. Obtenido de Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=10415308>
- Torgal, F. P., & Jalali, S. (2011). *Eco-efficient Construction and Building Materials*. London: Springer .



- Transportation, M. D. (2011). *Using Recycled Concrete in MDOT's Transportation Infrastructure- Manual of Practice*. houghto, MI: Michigan Technological University Civil and Environmental Engineering Michigan Tech Transportation Institute.
- UN. (1987). Our Common Future, Chapter 2: Towards Sustainable Development. En N. C. Education, *UN documents: Gathering a Body of Global Agreements* (págs. 42-427).
- Vázquez, E. (2013). Methods in Mixture Proportioning and His Influence in the Properties. En RILEM, *Progress of Recycling in the Built Environment: Final Reporte of the RILEM*. (pág. 217).
- Vazquez, E. (2013). *Progress of recycling in the built environment, Final report of the RILEM technica Committee 217-pre.* . Berlin: Springer.
- Vázquez, E., & Barra, M. (s.f.). *Recycle Concrete*.
- Vázquez., G. R. (2014). *Geología aplicada a la ingeniería civil. Mexicana*. limusa.
- Vivian, T. W. (2008). Economic comparison of concrete recycling: A case study approach. *Resources Conservation & recycling*, 821-828.
- Yaman, G. I. (2001). Pulse Velocity in Concrete Using Direct and Indirect Transmission. *ACI MATERIALS JOURNAL*, 450-457.



## 13 Índice de tablas

TABLA 1 CANTIDAD DE CO2 EMITIDO A LA ATMOSFERA POR EL PROCESO DE CONSTRUCCIÓN .....	11
TABLA 2 PRINCIPIOS DE SUSTENTABILIDAD PARA LA CONSTRUCCIÓN .....	12
TABLA 3 RESUMEN DE DATOS DE CONCRETO RECICLADO .....	15
TABLA 4 COMPOSICIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS EN RELLENOS SANITARIOS .....	16
TABLA 5 VOLÚMEN DE PRODUCTOS POR PRODUCCIÓN MINERA EN MÉXICO.....	18
TABLA 6 VOLUMEN DE PRODUCCIÓN DE PRODUCTO MINERO EN MICHOACÁN .....	19
TABLA 7 COMPONENTES QUÍMICOS DEL CEMENTO .....	27
TABLA 8 APLICACIÓN DE LOS RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN .....	42
TABLA 9 PARÁMETROS DE CARACTERIZACIÓN EN NORMAS INTERNACIONALES .....	59
TABLA 10 PARÁMETROS DE CARACTERIZACIÓN DE ACUERDO CON LA RILEM .....	61
TABLA 11 CALIDAD DEL CONCRETO RECICLADO SEGÚN SU POROSIDAD (RODRIGUEZ, 2011) .....	64
TABLA 12 CLASIFICACIÓN DEL CONCRETO DE ACUERDO AL RANGO DE VPU .....	69
TABLA 13 RANGOS DE CALIDAD DE UN CONCRETO PARA LA PRUEBA DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA .....	72
TABLA 14 RELACIÓN DEL DIÁMETRO Y ALTURA EN ESPECÍMENES PARA ENSAYO.....	73
TABLA 15 TABLA PARA ELECCIÓN DEL NÚMERO DE BOLAS DE ACERO PARA LA PRUEBA DE DESGASTE .....	97
TABLA 16 DATOS QUE SE UTILIZAN EN LOS DISEÑOS DE MEZCLA.....	100
TABLA 17 MASAS VOLUMÉTRICAS PARA ARENA .....	108
TABLA 18 MASAS VOLUMÉTRICAS PARA LA GRAVA NATURAL .....	108
TABLA 19 MVS EN AGREGADOS GRUESOS RECICLADOS .....	109
TABLA 20 RESULTADOS DE ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO EN ARENAS .....	110
TABLA 21 RESULTADOS DE LA GRANULOMETRÍA EN GRAVA NATURAL Y GRAVA RECICLADA.....	110
TABLA 22 RESULTADOS DE PORCENTAJE DE ABSORCIÓN	TABLA 23 % HUMEDAD DE
ABSORCIÓN EN GRAVA NATURAL.....	112
TABLA 24 PORCENTAJE DE ABSORCIÓN A AGREGADO RECICLADO	TABLA 25 PORCENTAJE DE
ABSORCIÓN A AGREGADO RECICLADO (TRITURADO POR IMPACTO) .....	112
TABLA 26 RESULTADO DE DENSIDAD EN ARENA VOLCÁNICA	TABLA 27 RESULTADOS DE
DENSIDAD EN GRAVA NATURAL TRITURADA.....	113



TABLA 28 RESULTADOS DE DENSIDAD EN AGREGADOS RECICLADOS (TRITURADO POR MANDÍBULAS)	TABLA 29 RESULTADOS DE DENSIDAD EN RCA TRITURADOS POR IMPACTO .....	114
TABLA 30 RESULTADOS DE DESGATE DE LOS ÁNGELES.....		115
TABLA 31 DATOS QUE SE UTILIZAN EN LOS DISEÑOS DE MEZCLA .....		116
TABLA 32 CANTIDADES DE MATERIAL PARA 1CM3 DE CONCRETO .....		117
TABLA 33 CANTIDADES A USAR PARA LA MEZCLA R-N .....		118
TABLA 34 ANÁLISIS DE LA CANTIDAD DE GRAVA .....		118
TABLA 35 RESULTADOS DEL AJUSTE POR HUMEDAD EN R-N .....		118
TABLA 36 ANÁLISIS DE LA CANTIDAD DE AGUA PARA R-N.....		118
TABLA 37 CANTIDADES DE MATERIAL PARA LA MEZCLA T .....		119
TABLA 38 ANÁLISIS DEL CONTENIDO DE GRAVA EN T .....		119
TABLA 39 CANTIDAD DE AGUA PARA EL DISEÑO T .....		119
TABLA 40 COMPARACIÓN ENTRE LA CANTIDAD DE GRAVA EN EL DISEÑO R-N Y T.....		121
TABLA 41 COMPARACIÓN ENTRE LAS CANTIDADES DE AGUA PARA LOS DISEÑOS R-N Y T .....		121
TABLA 42 RESULTADOS DE VPU EN CILINDROS .....		122
TABLA 43 RESULTADOS DE VPU EN VIGAS.....		124
TABLA 44 RESULTADOS DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA.....		126
TABLA 45 RESULTADOS DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA EN VIGAS .....		127
TABLA 46 RESULTADOS DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN .....		129
TABLA 47 RESULTADOS DE TENSIÓN INDIRECTA .....		132
TABLA 48 RESULTADOS DE FLEXIÓN .....		133

## 14 Índice de Gráficos y Figuras

GRÁFICA 1 VOLUMEN DE PRODUCCIÓN MINERA POR PRODUCTO EN MÉXICO.....	18
GRÁFICA 2 VOLUMEN DE LA PRODUCCIÓN MINERA POR PRODUCTO EN MICHOACÁN .....	19
GRÁFICA 3 GRANULOMETRÍA EN ARENAS.....	110
GRÁFICA 4 GRANULOMETRÍA EN LA GRAVA NATURAL .....	111
GRÁFICA 5 GRANULOMETRÍA EN LOS AGREGADOS RECICLADOS TRITURADOS POR MÉTODO DIFERENTE.....	111
GRÁFICA 6 RESULTADOS DE VPU EN CILINDROS .....	123
GRÁFICA 7 RESULTADOS A DETALLE DE VPU EN CILINDROS .....	124
GRÁFICA 8 VPU EN VIGAS DE MANERA LONGITUDINAL .....	125
GRÁFICA 9 VPU EN VIGAS DE MANERA TRANSVERSAL.....	125
GRÁFICA 10 RESISTIVIDAD ELÉCTRICA EN CILINDROS.....	127
GRÁFICA 11 RESISTIVIDAD ELÉCTRICA EN VIGAS .....	128



GRÁFICA 12 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN.....	130
GRÁFICA 13 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN CON LÍNEA F´C PROYECTO.....	131
GRÁFICA 14 TENSIÓN INDIRECTA .....	133
GRÁFICA 15 MODULO DE RUPTURA.....	134
FIG. 1 PORCENTAJE DE MATERIAL USADO EN UN CONCRETO .....	23
FIG. 2PRODUCCIÓN DEL CEMENTO (NEVILLE, 1999) .....	26
FIG. 3PROCESO DE TRITURACIÓN DE LOS RCA (KIBERT, 2008).....	38
FIG. 4 CLASIFICACIÓN DE LOS RA .....	39
FIG. 5 DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DEL CIRCUITO DE PRUEBA DE VELOCIDAD DE PULSO.....	70
FIG. 6 CONFIGURACIONES PARA MEDICIÓN DE VELOCIDAD DE PULSTO, A) MÉTODO DIRECTO, B) MÉTODO SEMIDIRECTO, C) MÉTODO INDIRECTO O DE SUPERFICIE (MALHOTRA & CARINO , 2004) .....	71
FIG. 7 CLASIFICACIÓN SEGÚN EL PROCESO DE METALURGIA EXTRACTIVA .....	80
FIG. 8 PRODUCCIÓN DE ACERO .....	82
FIG. 9 LOCALIZACIÓN DEL SITIO DE RECOLECCIÓN DEL MATERIAL DE INVESTIGACIÓN .....	83
FIG. 10 RECOLECCIÓN DE RCA .....	84
FIG. 11 SITIO DE RECOLECCIÓN .....	84
FIG. 12 ACERO DESMONTADO EN EL SITIO .....	84
FIG. 13 RECOLECCIÓN 1 M3 .....	84
FIG. 14 RECOLECCIÓN PARA 7 M3 .....	84
FIG. 15 PLANTA TRITURADORA .....	85
FIG. 16 ACOMODO DEL MATERIAL TRITURADO .....	85
FIG. 17 CAPTACIÓN DEL RCA TRITURADO .....	85
FIG. 18 EXTENDIDO DE MATERIAL PARA SECADO.....	86
FIG. 19 CUARTEO DEL MATERIAL A USAR .....	88
FIG. 20 PRUEBA DE MVSS .....	88
FIG. 21 PRUEBA DE MVSV .....	88
FIG. 22 EVAPORACIÓN DEL AGUA EN EL AGREGADO .....	90
FIG. 23 COMPROBACIÓN DEL SECADO DEL MATERIAL .....	91
FIG. 24 SECADO DEL MATERIAL.....	91
FIG. 25 PESO DEL MATERIAL.....	91
FIG. 26 MEDICIÓN DE LA DENSIDAD .....	93



FIG. 27 SECADO SUPERFICIAL DEL RCA .....	93
FIG. 28 DESALOJO DE AGUA DEL PICNÓMETRO A LA PROBETA.....	93
FIG. 29 PESO DE LA MUESTRA.....	93
FIG. 30 TAMAÑOS PRODUCTO DE LA GRANULOMETRÍA APLICADA.....	95
FIG. 31 APARATO PARA LA MEDICIÓN DE VELOCIDAD DE PULSO .....	102
FIG. 32 MEDICIÓN DIRECTA DE VPU .....	102
FIG. 33 ACOMODO DEL ESPÉCIMEN EN LA PRENSA ELÉCTRICA.....	105
FIG. 34 FALLA DE LA MUESTRA A COMPRESIÓN.....	105
FIG. 35 ACOMODO DE LA VIGA EN LA MÁQUINA DE PRUEBAS .....	107
FIG. 36 VIGA PROBADA .....	107