



---

Universidad Michoacana  
de San Nicolás de  
Hidalgo



## **FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**

“Evaluación de Agregados Reciclados, para su  
implementación en Pavimentos Rígidos”.

TESIS PROFESIONAL  
Que para obtener el título de  
MAESTRO EN INFRAESTRUCTURA DEL TRANSPORTE  
EN LA RAMA DE LAS VÍAS TERRESTRES  
PRESENTA

**ELIZABETH CONTRERAS MARIN**

ASESOR

M.A. ING. Wilfrido Martínez Molina.

COASESORES

Dra. Angélica de Lourdes del Valle Moreno

Dr. José Trinidad Pérez Quiroz

Tesis apoyada por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.

Morelia, Michoacán Febrero del 2016

---



## RESUMEN

*El presente trabajo de investigación muestra el comportamiento de agregados gruesos reciclados en la implementación de concretos para pavimentos rígidos. Dado que los agregados reciclados no cuentan con altas especificaciones, resulta factible utilizarlos en concretos para pavimentos en los que los requerimientos no suelen ser altos. Una adecuada caracterización de dichos agregados hará posible su implementación, prestando especial atención a los siguientes parámetros: granulometría, absorción, densidad, índice de lajas, partícula alargada y coeficiente de desgaste de los ángeles. Dichas propiedades interrelacionadas han permitido obtener criterios de calidad. Con el objetivo de comparar resultados, se han elaborado diferentes mezclas del 100% de agregado grueso reciclado contra agregados naturales, con la adición de fluidificantes y emulsiones para poder mejorar su comportamiento. Por otro lado, se ha analizado el concreto fresco y endurecido en las pruebas de fluidez, compresión y flexión, así como en los ensayos no destructivos de resistividad y velocidad de pulso ultrasónico. En base a la compilación de experiencias internacionales y el Estado-Del-Arte, se ha observado que se cumple con las características que guardan los agregados reciclados, siendo muy parecidas a las de agregados naturales ligeros, a excepción de la absorción, la cual se ve afectada por la cantidad de mortero adherido en los agregados reciclados. Los resultados de las pruebas destructivas y no destructivas muestran una ligera disminución entre el 2% y el 16% en relación a concretos fabricados con agregados naturales. En prueba de flexión no se consideran relevantes las diferencias mostradas (del 2% al 6%).*

*Palabras claves: Agregados, Reciclados, Concreto, Reciclado, Residuo.*



## ABSTRACT

*The present research work shows the behavior of recycled coarse aggregates in the implementation of concrete in rigid paving. Since recycled aggregates does not have high specifications, it is feasible to use them on paving, where requirements are not usually high. A proper characterization of these aggregates will enable their implementation, with a particular focus on the following parameters: grading, absorption, density, flakiness index, elongated particle and los ángeles wear rate. The interrelation of these properties has allowed to obtain quality criteria. In order to compare results, different mixtures of recycled coarse aggregates have been elaborated against natural aggregates, by adding fluidizers and emulsions to improve its behavior. On the other hand, the fresh and hardened concrete has been analyzed through fluency, compression and bending tests, as well as the nondestructive testing of resistivity and ultrasonic pulse speed. Based on the compilation of international experiences and the State of the art, it has been noted that comply with the features of recycled aggregates, being similar to the lightweight natural aggregates, with the exception of the absorption, which is affected by the amount of mortar adhered in recycled aggregates. Results of destructive and nondestructive tests show a slight decline between 2% and 16 % in relation to concrete made with natural aggregates. The bending test shows differences from 2% to 6%, which are not considered to be relevant.*

*Keywords: Recycled Aggregates, Recycled Concrete*



## AGRADECIMIENTOS:

Quiero agradecer a toda **mi familia**, a mis padres en primer lugar por apoyarme siempre, soy lo que soy gracias a ustedes.

A mis **hermanas y hermano**, que en todos los momentos de mi vida han estado apoyándome, gracias por estar a mi lado.

A mis amigas, **Luga y Karen**, mis compañeras de aventuras.

A mi asesor el **M.A. Wilfrido Martínez Molina**, que siempre he admirado, demostrándome quien persevera alcanza, gracias por todo su apoyo.

A la **Dra. Elia Mercedes Alonso Guzmán**, motivándome siempre a conseguir mis objetivos, enseñándome siempre con su ejemplo, mil gracias.

A mis coasesores, el **Dr. José Trinidad Pérez Quiroz** y la **Dra. Angélica de Lourdes del Valle Moreno**, gracias por sus aportaciones al proyecto.

Al **Dr. Antonio Jaramillo Morilla**, por su apoyo en la estancia de investigación en la Universidad de Sevilla.

A las personas que he conocido a lo largo de mi paso por el Laboratorio de Materiales “Ing. Luis Silva Ruelas” en la Sección de Resistencia de Materiales. Gracias al **Dr Hugo Luis Chávez García** y la **M. I. Cindy Lara Gómez** por su apoyo. Gracias al **Maestro Jesús Zauno Zamudio** por las facilidades para llevar a cabo la experimentación, a mis compañeros (Noel, Marco, Eduardo, Isaías, Judith, Mauricio, Rosalía, Sergio, Cipriano, Sandra, Alberto y Maybelín), en especial a mis amigos **Zalapa, Ramón**, muchas gracias por su ayuda, compañía y amistad. A **Manuel** por ayudarme en la redacción de la tesis, muchas gracias.

Al **Instituto de Metalurgias** de la U.M.S.N.H. por su participación al inicio del proyecto para la trituración del material, como también a la empresa **Supra Construcciones S.A. de C.V.** Al **Laboratorio de Materiales de la Junta de Andalucía en Sevilla**, por permitirnos realizar la caracterización química de los agregados. Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología**, por su apoyo para la elaboración de esta tesis.



## ÍNDICE:

RESUMEN .....	1
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. OBJETIVO.....	3
3. JUSTIFICACION.....	4
4. MARCO TEÓRICO.....	5
<b>4.1. Pavimentos.</b> .....	5
4.1.1 Conceptos generales de los Pavimentos Rígidos.....	5
4.1.2 Diseño y construcción de pavimentos rígidos. ....	8
4.1.3 Pavimentos Rígidos en México.....	9
4.2. Concreto.....	10
4.2.1 Conformación de un concreto.....	11
4.3. Concreto Reciclado.....	16
4.3.1. Residuos de Construcción y Demolición (RCD).....	18
4.3.2. Tipos de agregados Reciclados.....	19
4.3.3. Reciclado parcial o total de la superficie de rodamiento. ..	20
4.3.4. Legislación de Agregados Reciclados en México.....	21
4.3.5. Características de los agregados reciclados.....	26
4.3.6. Ejemplos de implementación de agregados reciclados. ....	32
4.3.7. Implementación de Agregados Reciclados Internacionalmente. ....	35
5. METODOLOGÍA.....	41
5.1. Obtención y trituración del agregado.....	42
5.2. Caracterización del material.....	45
5.3. Elaboración de especímenes. ....	47
6. DESAROLLO EXPERIMENTAL. ....	49



<b>6.1. Pruebas al cemento.</b>	<b>49</b>
<b>6.1.1 Tiempos de Fraguado.</b>	<b>49</b>
<b>6.1.2 Óxidos de Hierro y Aluminio.</b>	<b>50</b>
<b>6.1.3 Óxido de calcio.</b>	<b>51</b>
<b>6.1.4 Óxido de magnesio.</b>	<b>52</b>
<b>6.2. Pruebas Físicas a los Agregados.</b>	<b>53</b>
<b>6.2.1. Humedad actual.</b>	<b>53</b>
<b>6.2.2. Humedad Superficial y Humedad de absorción.</b>	<b>54</b>
<b>6.2.3. Masa volumétrica seca y suelta (mvss).</b>	<b>55</b>
<b>6.2.4. Masa Volumétrica Seca y Varillada (mvsv).</b>	<b>56</b>
<b>6.2.5. Densidad.</b>	<b>57</b>
<b>6.3. Pruebas Geométricas a los Agregados.</b>	<b>58</b>
<b>6.3.1. Análisis Granulométrico.</b>	<b>58</b>
<b>6.3.2. Partículas Alargadas y Lajeadas de Materiales Pétreos.</b>	<b>60</b>
<b>6.3.3. Desgaste Mediante la Prueba de los Ángeles en Materiales Pétreos.</b>	<b>64</b>
<b>6.3.4. Coeficiente de Forma.</b>	<b>66</b>
<b>6.4. Pruebas Químicas a los Agregados.</b>	<b>67</b>
<b>6.4.1. Pérdida al fuego.</b>	<b>67</b>
<b>6.4.2. Residuos Insolubles.</b>	<b>68</b>
<b>6.4.3. Prueba de Cantidad de Oxina.</b>	<b>69</b>
<b>6.5. Determinación del contenido de cemento en Agregados Reciclados.</b>	<b>69</b>
<b>6.5.1. Determinación de SO<sub>3</sub> del Concreto.</b>	<b>70</b>
<b>6.6. Diseño de mezclas de concreto por el método del ACI (American Concrete Institute).</b>	<b>71</b>
<b>6.7. Pruebas Realizadas al Concreto Fresco.</b>	<b>72</b>
<b>6.7.1. Fluidez en el concreto.</b>	<b>72</b>



<b>6.8. Pruebas no Destructivas.</b> .....	<b>74</b>
<b>6.8.1. Velocidad de pulso Ultrasónico.</b> .....	<b>74</b>
<b>6.8.2. Resistividad Eléctrica.</b> .....	<b>77</b>
<b>6.8.3. Porosidad Efectiva</b> .....	<b>78</b>
<b>6.9. Pruebas destructivas.</b> .....	<b>80</b>
<b>6.9.1. Resistencia a la Compresión Concreto.</b> .....	<b>80</b>
<b>6.9.2. Resistencia a la Flexión del Concreto.</b> .....	<b>81</b>
<b>7. RESULTADOS.</b> .....	<b>84</b>
<b>7.1. Caracterización del Cemento.</b> .....	<b>84</b>
<b>7.1.1. Tiempos de Fraguado.</b> .....	<b>84</b>
<b>7.1.2. Óxidos de Hierro y Aluminio.</b> .....	<b>85</b>
<b>7.1.3. Oxido de Calcio.</b> .....	<b>85</b>
<b>7.1.4. Oxido de Magnesio.</b> .....	<b>85</b>
<b>7.2. Caracterización de los agregados finos (arena).</b> .....	<b>85</b>
<b>7.2.1. Humedad de absorción.</b> .....	<b>85</b>
<b>7.2.2. Masa Volumétrica Seca Suelto.</b> .....	<b>85</b>
<b>7.2.3. Masa Volumétrica Seca Varillada.</b> .....	<b>85</b>
<b>7.2.4. Densidad.</b> .....	<b>86</b>
<b>7.2.5. Análisis Granulométrico.</b> .....	<b>86</b>
<b>7.3. Caracterización de los agregados gruesos (grava).</b> .....	<b>87</b>
<b>7.3.1. Humedad de absorción.</b> .....	<b>87</b>
<b>7.3.2. Masa Volumétrica Seca Suelto.</b> .....	<b>88</b>
<b>7.3.3. Masa Volumétrica Seca Varillada.</b> .....	<b>88</b>
<b>7.3.4. Densidad.</b> .....	<b>89</b>
<b>7.3.5. Análisis Granulométrico.</b> .....	<b>90</b>
<b>7.3.6. Coeficiente de Forma.</b> .....	<b>92</b>
<b>7.3.7. Índice de partículas Alargadas y lajeadas.</b> .....	<b>95</b>



7.3.8. Coeficiente de Desgaste (prueba de los ángeles).....	95
7.4. Pérdida al fuego y Residuos Insolubles.....	96
7.5. Cantidad de Oxina.....	96
7.6. Determinación del contenido de cemento en Agregados Reciclados. ....	97
7.7. Proporcionamiento de las Mezclas.....	99
7.8. Pruebas realizadas al concreto fresco. ....	100
7.8.1. Revenimiento.....	100
7.9. Pruebas No destructivas. ....	100
7.9.1. Velocidad de Pulso Ultrasónico.....	100
7.9.2. Resistividad Eléctrica. ....	101
7.9.3. Porosidad Efectiva. ....	103
7.10. Pruebas Destructivas.....	104
7.10.1. Resistencia a la Compresión.....	104
7.10.2. Resistencia a la Flexión del Concreto. ....	105
7.11. Matrices de concreto.....	106
8. ANÁLISIS DE RESULTADOS. ....	109
9.1 Agregados Finos.....	109
Humedad de absorción.....	109
Masa Volumétrica Seca Suelto.....	109
Masa Volumétrica Seca Varillada.....	109
Densidad. ....	109
Módulo de Finura.....	109
8.2. Agregados Gruesos (Naturales y Reciclados).....	109
8.2.1. Comparativa de Agregados Reciclados y Normativas Internacionales.....	111
8.3. Pruebas realizadas al concreto fresco. ....	113
8.3.1. Revenimiento.....	113



<b>8.4. Pruebas no destructivas.....</b>	<b>114</b>
<b>8.4.1. Velocidad de pulso ultrasónico. ....</b>	<b>114</b>
<b>8.4.2. Resistividad Eléctrica. ....</b>	<b>114</b>
<b>8.4.3. Porosidad efectiva. ....</b>	<b>115</b>
<b>8.5. Pruebas destructivas. ....</b>	<b>115</b>
<b>8.5.1. Resistencia a la compresión. ....</b>	<b>115</b>
<b>8.5.2. Flexión.....</b>	<b>116</b>
<b>9. CONCLUSIONES.....</b>	<b>118</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>120</b>



## Índice de Ilustraciones:

<i>Ilustración 1 fluidificante CRISOTAN R-5 homogenizado en el agua para la elaboración especímenes.</i> .....	16
<i>Ilustración 2 Emulsión a base de Poliestireno.</i> .....	16
<i>Ilustración 3 Generación de Residuos de Manejo Especial, censo del 2005.</i> .....	24
<i>Ilustración 4 Incremento de cemento para obtener una resistencia a la compresión del concreto reciclado, línea superior CR50%, línea inferior CR100% (Geraldés, 2013).</i> .....	31
<i>Ilustración 5 Puente atirantado sobre el río Turia (Valencia, España).</i> .....	34
<i>Ilustración 6 Torre Médica principal del Instituto Mexicano del Seguro Social, Trituradora marca Denver de quijadas fijas.</i> .....	42
<i>Ilustración 7 especímenes de concreto ya probados, piezas de concreto en banqueta, calle Aldama.</i> .....	43
<i>Ilustración 8 Trituración en el Banco de Materiales Supra-Contrunstrucciones.</i> .....	44
<i>Ilustración 9 Localización del banco de materiales “La rocka”, ubicado en la localidad de Cuto de la esperanza en Tarímbaro, Michoacán.</i> .....	44
<i>Ilustración 10 Localización del banco de materiales “San José”, en la localidad de Cerritos Morelia, Michoacán.</i> .....	45
<i>Ilustración 11 Especímenes de 10 cm x 20 cm y vigas de 15 cm x 60cm de la Mezcla Testigo.</i> .....	48
<i>Ilustración 12 Solución proveniente de la prueba de la determinación de óxidos de hierro y aluminio en el cemento.</i> .....	52
<i>Ilustración 13 Llenado del Recipiente para la obtención de M.V.S.S del agregado Fino.</i> .....	56
<i>Ilustración 14 Dimensionamiento del agregado Grueso.</i> .....	60
<i>Ilustración 15 Calibrador de Espesores.</i> .....	61
<i>Ilustración 16 Calibrador de Longitudes.</i> .....	62
<i>Ilustración 17 Revenimiento para la mezcla testigo.</i> .....	74
<i>Ilustración 18 Toma de la lectura para la prueba de resistividad eléctrica.</i> .....	78
<i>Ilustración 19 Colocación de la parafina al contorno de las muestras.</i> .....	79
<i>Ilustración 20 Aplicación de Carga al espécimen Testigos de 10 x 20 cm</i> .....	81
<i>Ilustración 21 Aplicación de la Carga a Vigas de 15x60 cm.</i> .....	83
<i>Ilustración 22 Tiempos de fraguado para diferentes porcentajes de emulsión.</i> .....	84
<i>Ilustración 23 Curva Granulométrica del Agregado Fino Reciclado.</i> .....	87
<i>Ilustración 24 Granulometría agregado Grueso natural.</i> .....	91
<i>Ilustración 25 Granulometría agregado Grueso Reciclado Torre del médica.</i> .....	92
<i>Ilustración 26 Granulometría agregado Grueso Reciclado Mixto.</i> .....	92
<i>Ilustración 27 (1) agregado grueso natural (2) agregado grueso reciclado.</i> .....	96
<i>Ilustración 28 (1) cemento (2,3) agregados naturales (4) Agregados Reciclados.</i> .....	97
<i>Ilustración 29 (1) Mezcla Tes –FI (2) Tes-2-Cr (3) Tes-Em4%.</i> .....	99



<i>Ilustración 30.a Revenimiento de la mezcla realizada Tes-FI</i>	
<i>Ilustración 27.b Revenimiento de la mezcla Tes-EM</i>	
4%.....	100
<i>Ilustración 31 Velocidades de pulso ultrasónico obtenidas.....</i>	101
<i>Ilustración 32 Resistividades eléctricas obtenidas. ....</i>	102
<i>Ilustración 33 Prueba a compresión en especímenes Testigos (agregado natural) y especímenes con Testigos (agregados reciclados). ....</i>	104
<i>Ilustración 34 Resistencias a la compresión obtenidas. ....</i>	105
<i>Ilustración 35 Módulos de Ruptura (kg/cm<sup>2</sup>) en vigas de 15x15x60 cm. ....</i>	106
<i>Ilustración 36 Matrices de Concreto. ....</i>	108
<i>Ilustración 37 Comparativa de requerimientos granulométricos en agregados reciclados, T<sub>máx</sub> 3/4". ....</i>	113
<i>Ilustración 38 Revenimientos para las diferentes mezclas.....</i>	114
<i>Ilustración 39 % de Porosidad Efectiva de las Diferentes Mezclas. ....</i>	115
<i>Ilustración 40 Disminución porcentual de compresiones en las diferentes edades (7, 28, 45, 450 y 500 días). .</i>	116



## Índice de Tablas:

<i>Tabla 1 Resistencia aproximada a la compresión para cada valor de la resistencia a la flexión y para distintos tipos de agregados.</i> .....	6
<i>Tabla 2 Volúmenes de Concreto en Pavimentos Rígidos Mexicanos.</i> .....	10
<i>Tabla 3 Composición química del cemento.</i> .....	12
<i>Tabla 4 Principales aspectos del Concreto que son afectados por las características de los agregados.</i> .....	13
<i>Tabla 5 Instancias involucradas en la gestión de los residuos.</i> .....	23
<i>Tabla 6 Generación de Residuos de Manejo Especial por Fuente de Generación, 2005.</i> .....	25
<i>Tabla 7 Calidad del concreto reciclado según su porosidad (Sánchez Rodríguez, 2011).</i> .....	29
<i>Tabla 8 Coeficientes de corrección para concretos con agregados reciclados según el estudio bibliográfico de Geraldes (2013).</i> .....	32
<i>Tabla 9 Descensos o incrementos que experimenta un concreto reciclado con respecto a un concreto convencional de la misma dosificación.</i> .....	32
<i>Tabla 10 Reciclaje de RCD en la U.E. 2005-2006 (european Topic Centre)</i> .....	35
<i>Tabla 11 Especificaciones internacionales para los diferentes tipos de Agregados Reciclados (Sánchez Rodríguez, 2011; Sánchez, 2004).</i> .....	37
<i>Tabla 12 Clasificación de agregados reciclados Según RILEM. (Sánchez, 2004)</i> .....	39
<i>Tabla 13 Clasificación de los agregados reciclados según la norma belga ( Páramo, 2011).</i> .....	39
<i>Tabla 14 Clasificación de los agregados reciclados según la norma DIN 4223 (Sánchez, 2004)</i> .....	39
<i>Tabla 15 composición de agregados reciclados según BRE 433</i> .....	40
<i>Tabla 16 Requisitos granulométricos de los agregados reciclados para la fabricación de concreto según las normas existente, para tamaños de 19.0 a 4.75 mm (Páramo, 2011).</i> .....	40
<i>Tabla 17 Identificación de las Mezclas elaboradas.</i> .....	47
<i>Tabla 18 Cargas Abrasivas para Prueba de Desgaste.</i> .....	65
<i>Tabla 19 Valores representativos del Coeficiente de Forma.</i> .....	67
<i>Tabla 20 Requerimiento de agua, en kg/m<sup>3</sup> concreto para tamaño máximo, mm.</i> .....	71
<i>Tabla 21 Dependencia entre la relación agua/cemento y la resistencia a la compresión del concreto.</i> .....	71
<i>Tabla 22 Volumen de agregado grueso por volumen unitario de concreto.</i> .....	72
<i>Tabla 23 Tolerancia de la Fluidéz esperada (NMX-C-156-ONNCE, 2010).</i> .....	73
<i>Tabla 24 Clasificación del concreto según su velocidad ultrasónica (Durar 2000).</i> .....	76
<i>Tabla 25 Clasificación del concreto según su velocidad ultrasónica (Malhotra).</i> .....	76
<i>Tabla 26 Criterios de evaluación de la resistividad eléctrica (Durar, 2000).</i> .....	78
<i>Tabla 27 Criterios de Porcentaje de Porosidad Efectiva.</i> .....	80
<i>Tabla 28 Tiempos de fraguado para diferentes porcentajes de emulsión.</i> .....	84
<i>Tabla 29 Cantidad de FeO<sub>3</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>% en el Cemento.</i> .....	85
<i>Tabla 30 Cantidad de CaO% en el Cemento.</i> .....	85
<i>Tabla 31 Cantidad de MgO% en el Cemento.</i> .....	85



Tabla 32 Humedad de Absorción en Agregados Finos.....	85
Tabla 33 Masa Volumétrica Seca Suelto en Agregados Finos.....	85
Tabla 34 Masa Volumétrica Seca y Varillada en agregados Finos.....	85
Tabla 35 Densidad de los agregados Finos.....	86
Tabla 36 Granulometría en Agregado Fino Reciclado.....	86
Tabla 37 Humedad de Absorción en Agregados Gruesos Naturales.....	87
Tabla 38 Humedad de Absorción en Agregados Gruesos Reciclados de la torre médica.....	87
Tabla 39 Humedad de Absorción en Agregados Gruesos Reciclados Mixtos.....	88
Tabla 40 Masa Volumétrica Seca Suelta en agregados Gruesos Natural.....	88
Tabla 41 Masa Volumétrica Seca Suelta en agregados Gruesos Reciclados de la torre médica.....	88
Tabla 42 Masa Volumétrica Seca Suelta en agregados Gruesos Reciclados Mixtos.....	88
Tabla 43 Masa Volumétrica Seca suelta varillada en agregados Gruesos Natural.....	89
Tabla 44 Masa Volumétrica Seca Suelta Varillada en agregados Gruesos Reciclados de la torre médica.....	89
Tabla 45 Masa Volumétrica Seca Suelta Varillada en agregados Gruesos Reciclados Mixtos.....	89
Tabla 46 Densidad de los agregados gruesos Naturales.....	89
Tabla 47 Densidad de los agregados de la Torre Médica.....	89
Tabla 48 Densidad de los agregados gruesos reciclado Mixto.....	90
Tabla 49 Granulometría en Agregados Gruesos.....	90
Tabla 50 Límites Granulométricos para agregado máximo.....	90
Tabla 51. Factor de forma para el agregado Grueso Natural.....	93
Tabla 52 Factor de forma para el agregado Grueso reciclado mixto.....	94
Tabla 53 Índice de partículas Alargadas y lajeadas (comparativa Agregados Reciclados contra Agregados Naturales).....	95
Tabla 54 Coeficiente de Desgaste en Agregados Gruesos Naturales.....	95
Tabla 55 Coeficiente de Desgaste en Agregados Gruesos Mixtos.....	95
Tabla 56 pérdida al fuego y Residuos Insolubles.....	96
Tabla 57 Cantidad de SO <sub>3</sub> % de la muestra de agregado Reciclado.....	97
Tabla 58 Densidad Aparente de Muestra de Agregado Reciclado.....	97
Tabla 59 Contenidos de Cemento a partir de la cantidad de SO <sub>3</sub> %.....	98
Tabla 60 Cantidades de materiales requeridos por m <sup>3</sup> de concreto para las diferentes mezclas.....	99
Tabla 61 Revenimientos obtenidos de acuerdo a las mezclas usadas.....	100
Tabla 62 Resultados de la Velocidad de pulso ultrasónico (m/s) en muestras cilíndricas de 10 x 20 cm.....	100
Tabla 63 Resultados Resistividad eléctrica en cilindros de 10 x 20 cm.....	101
Tabla 64 Resultados de Porosidad efectiva obtenidos.....	103
Tabla 65 Resultados de los Esfuerzos a Compresión (kg/cm <sup>2</sup> ) en cilindros de 10 x 20 cm.....	104
Tabla 66 Porcentajes de pérdida de resistencia a la compresión.....	105
Tabla 67 Resultados de Módulos de Ruptura (kg/cm <sup>2</sup> ) en vigas de 15x15x60 cm.....	106
Tabla 68 % de agregado natural en Matrices de Concreto Convencional contra Concreto Reciclado.....	107



*Tabla 69 Resultados y límites permisibles para el agregado fino. .... 109*

*Tabla 70 Comparativa de Resultados con Normativa existente. .... 109*



## 1. INTRODUCCIÓN.

Hoy en día México cuenta con aproximadamente 95,000 km de caminos pavimentados, cuyas condiciones de servicio no son las más apropiadas. Una razón importante del bajo nivel de servicio es que estas carreteras se proyectaron, diseñaron y construyeron en su mayoría entre los años de 1925 a 1970. Esta red estuvo proyectada para soportar cargas vehiculares que varían entre las 6 y 8 toneladas, y en la actualidad llega a tener camiones cargados que en algunos casos alcanzan a pesar hasta 60 toneladas (IMT, 2001). Se tienen registros que antes del año de 1993, la especificación y construcción de pavimentos de concreto hidráulico en México fue relativamente escasa. Por aquel entonces, los pavimentos asfálticos en nuestro país resultaban en costo muy inferiores a los de concreto hidráulico. Además, existía una gran desinformación y desconocimiento sobre el diseño y construcción con nuevas tecnologías de los pavimentos de concreto hidráulico (IMCYC, 2002). Desde entonces, poco a poco los pavimentos rígidos le han ganado terreno a los pavimentos flexibles, sobre todo debido a los años de servicio que ofrecen los pavimentos rígidos en comparación con los flexibles. Estas diferencias pueden llegar a ser hasta de 15 años para unas mismas condiciones.

El tema de concreto reciclado en pavimentos rígidos surgió como una alternativa para revertir el problema ambiental que plantean los residuos de la construcción, derivados no sólo del creciente volumen de su generación, sino de su tratamiento, que todavía hoy es insatisfactorio en la mayor parte de los casos. En efecto, a la insuficiente prevención de la producción de residuos en origen se une el escaso reciclado de los que se generan. En México, la cantidad anual de residuos de demolición y construcción es cercana al 77 % de las 235.8 millones de toneladas generadas de residuos en general, y sólo un 5% de esto va a una disposición final adecuada. (Instituto Mexicano del Transporte, 2014).

El manejo y la gestión de los residuos se han convertido en una prioridad ambiental en todo el mundo. En algunas partes esto ha llegado, incluso, a ser una problemática de salud pública y social, repercutiendo de manera directa o indirecta en la economía del país que la sufre.



Con el objetivo de aprovechar recursos reciclados para evitar el consumo de agregados pétreos naturales, cuyo impacto ambiental es enorme, y además intentar reducir la superficie destinada a vertederos, han surgido muchas investigaciones que han abordado el tema de concretos con agregados reciclados. Algunos de estos estudios se han centrado en las características de los agregados reciclados. Otras investigaciones profundizan en las propiedades de los concretos resultantes de diferentes porcentajes de sustitución del agregado natural. Por último, existe también el estudio de aplicaciones de los agregados reciclados.

Lamentablemente, existen pocos países que dispongan de normativas para la implementación de agregados reciclados, y de las pocas que se tienen, se ven distintas tendencias en cuanto a la calidad de los agregados, al contenido máximo permitido en el concreto o a las aplicaciones de éste. Así, por ejemplo, mientras las recomendaciones que establece Rilem, que ha sido uno de los primeros organismos en establecer limitaciones (adoptadas por Bélgica o Hong Kong) permiten la implementación de agregados reciclados con absorciones menores al 10% en concretos de hasta 50MPa (509.85 kg/cm<sup>2</sup>), las normas japonesas son mucho más estrictas, y restringen agregados con absorciones menores al 7% en concretos de hasta 24MPa (244.56 kg/cm<sup>2</sup>) (Alaejos Gutierrez, 2002).

La mayoría de investigaciones, ensayos y aplicaciones se han centrado en los agregados reciclados mixtos, con un porcentaje de fracción cerámica entre el 10% y el 70% en peso y de asfalto hasta el 5% (y en algún caso, hasta el 30% como máximo). Sin embargo, este trabajo pretende dar a conocer el comportamiento de agregados gruesos reciclados que contienen el 100% de concreto demolido. Se esperaría que a efectos de propiedades, éstos fueran superiores a las que tienen los agregados mixtos.

En el campo de la construcción es cada día mayor la presión social impulsada por la conciencia ciudadana para potenciar el reciclaje de los residuos, tanto los derivados de su propia actividad, como los procedentes de otros sectores. La ventaja más destacada de este reciclaje es la solución, a un mismo tiempo, de la problemática originada por la gran cantidad de residuos que se destinan a vertedero sin aprovechamiento, así como la obtención de una nueva materia prima, con lo que se reduce la cantidad de recursos naturales primarios a extraer.



## 2. OBJETIVO.

### **Objetivos Generales:**

Determinar si es factible o no el utilizar agregados gruesos reciclados en la elaboración de concretos para pavimentos rígidos.

### **Objetivos Particulares:**

1. Identificar y describir las propiedades de los agregados gruesos reciclados.
  - 1.1 Analizar las características físicas, químicas y geométricas de agregados reciclados en comparativa con agregados naturales.
  - 1.2 Comparar las propiedades de agregados reciclados con la normativa existente para dichos agregados (RILEM, EHE08, ALEMANA, HOLANDESA, etc), y poder dar un criterio de calidad para los agregados gruesos reciclados del estudio.
- 2 Encontrar la proporción óptima de los diferentes elementos que conforman un concreto hidráulico, para su uso en pavimentos. Se utilizará el método de diseño ACI.
- 3 Comparar el comportamiento de especímenes de concreto hidráulico elaborados con agregados gruesos reciclados, contra especímenes de concreto con agregados gruesos naturales, y así definir si es factible el uso de agregados reciclados gruesos en la elaboración de concretos para pavimentos rígidos.



### 3. JUSTIFICACION.

A partir del crecimiento de la población desmedida en todo el mundo, se ha generado la demanda de nuevas obras de infraestructura: viviendas, escuelas, hospitales y todo tipo de edificaciones, así como vías de comunicación en general, muchas de ellas a base de concreto hidráulico. Surge así la necesidad de aumentar la producción de los materiales necesarios para su elaboración, entre ellos los agregados pétreos de origen natural, los cuales constituyen aproximadamente del 60% al 75% del volumen total del concreto (Neville, 1999). En muchos casos, dichas obras ya han cumplido su vida útil y/o por diversas razones son demolidas, lo que genera una gran cantidad de material, producto de dichas demoliciones, que no es utilizado, contaminando así el medio ambiente. La propuesta es reutilizar esos desechos producidos, dándoles un sencillo tratamiento de trituración destinado a reducir sus tamaños, emulando a las partículas de agregados naturales inertes de granulometría controlada, y poder así utilizarlos en la fabricación de losas de pavimentos rígidos. Dichos agregados cumplen con las características para concretos en pavimentos rígidos al no tener altas especificaciones estructurales.

La nueva norma española EHE08 contiene un apéndice que presenta varias recomendaciones destinadas a introducir la sustitución de los recursos naturales por AGR (Agregados Gruesos Reciclados) hasta en un 20%. En Italia, el uso de CR (Concreto Reciclado) hasta con un 30% de sustitución en lugar de agregados naturales (AN) es admitido para los concretos que se producen con clase de resistencia de 30 a 37 MPa. Aún con las numerosas investigaciones que se han realizado, en México existe un grave problema de información sobre el tema de implementación de agregados reciclados, siendo aún necesario el estudio de todas las áreas que competen a las aplicaciones de dichos concretos y a la procedencia de sus agregados, como por ejemplo para su uso no estructural.



## 4. MARCO TEÓRICO.

### 4.1. Pavimentos.

Se define como pavimento al conjunto de capas de materiales seleccionados que reciben en forma directa las cargas de tránsito y las transmiten a las capas inferiores, distribuyéndolas con uniformidad, proporcionando una superficie de rodamiento en donde se opere de manera rápida y cómoda. Existen dos tipos de pavimentos: los flexibles y los rígidos. La elección de uno u otro dependerá del tipo de obra a ejecutar y de las especificaciones del tránsito vehicular según el caso (Olivera Bustamante, 2009).

Los objetivos particulares que se buscan en un concreto para pavimentos rígidos son (IMCYC, 2002):

- Su trabajabilidad, para ser colocado fácilmente.
- Resistencia y durabilidad satisfactoria.
- El logro de mezclas competitivas a costos lo más bajos posibles.

#### 4.1.1 Conceptos generales de los Pavimentos Rígidos.

Los pavimentos rígidos se diseñan en base a una serie de características: seguridad, comodidad, eficiencia y economía. Todas ellas tendrán que pertenecer en buenas condiciones según el plazo establecido de proyecto. Las condiciones que garantizan su buen funcionamiento se enlistan a continuación:

- Superficie regular tanto longitudinal como transversal
- Resistencias adecuadas al derrapamiento
- Facilidad para la eliminación de agua superficial
- Capacidad de carga de proyecto
- Bajo nivel de ruido y desgaste de llantas
- Adecuadas propiedades de reflexión luminosa
- Apariencia agradable

Para garantizar que los objetivos se cumplan y se cuente con el buen funcionamiento del pavimento rígido, es indispensable conseguir la mejor selección de materiales para llevar a cabo el concreto. A continuación se presenta una comparativa de la resistencia a la flexión VS resistencia a la compresión a partir de 3 tipos de agregados (tabla1):



Tabla 1 Resistencia aproximada a la compresión para cada valor de la resistencia a la flexión y para distintos tipos de agregados.

Resistencia a la Flexión (kg/cm <sup>2</sup> )	Tipo de Agregado		
	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3
30*	230	250	300
32*	246	266	320
34*	260	283	340
36*	277	300	360
38*	292	317	380
40*	307	333	400
42	323	350	420
44	338	366	440
46	353	383	460

\*rango de resistencias empleadas únicamente para diseños de pavimentos con tránsitos de vehículos ligeros o para caminos de acceso residencial.

Tipo 1: plantas con buen nivel de producción, con más del 50% de material producto de trituración.

Tipo 2: control de calidad y de producción en planta, de regular a bueno, con agregados compuestos por mezclas de partículas angulosas y redondeadas.

Tipo 3: nivel de producción de pobre a regular y agregados de partículas redondeadas de origen aluvial, cantos rodados, etc.

### Tipos de Pavimentos Rígidos.

Existen tres tipos de pavimentos rígidos: los pavimentos de concreto en masa, los pavimentos continuos de concreto armado y los pavimentos de concreto armado con juntas.

- Los pavimentos de concreto sin refuerzo, con y sin juntas, son los más empleados actualmente, por su construcción más sencilla y de menor costo que la de los otros pavimentos, sólo apropiados en determinadas circunstancias.
- El pavimento continuo de concreto armado es una nueva estructura que ha empezado a emplearse en Francia y Estados Unidos. Es una losa gruesa sin



capa de base ni pasadores en juntas y que no se apoya directamente sobre la explanada, sino sobre una delgada capa drenante granular o sobre un geotextil.

- Los pavimentos de concreto armado con juntas han caído en desuso por su alto costo y problemas de corrosión interna. A veces se utilizan en la aproximación de puentes para amortiguar los asentamientos diferenciales.

### **Elementos que constituyen un pavimento rígido y sus funciones.**

La sección transversal típica de un pavimento rígido cuenta con los siguientes elementos estructurales: por un lado, una losa de concreto como superficie de rodamiento y acotamientos laterales, los cuales podrán ser también de concreto o de algún otro material no erosionable. A continuación tenemos la sub-base, que puede ser de concreto pobre, base hidráulica estabilizada con cemento o asfalto o simplemente de agregados pétreos. Por último, el terreno de cimentación y/o subrasante estarán contruidos por materiales predominantes en la región y con tratamiento acorde al proyecto y las especificaciones particulares (IMCYC, 2002).

A continuación se describen brevemente cada una de ellas.

- **Losa de Concreto Hidráulico.** Constituye la parte fundamental de los pavimentos rígidos. Se encarga de resistir los esfuerzos originados por el tránsito y los efectos de intemperismo, proporcionando además una superficie de rodamiento segura, cómoda y de características permanentes bajo el efecto combinado del tránsito y de los factores ambientales durante su vida útil.
- **Sub-base.** Tiene como funciones principales controlar los cambios volumétricos de la subrasante e incrementar su módulo de reacción. Se trata de un elemento que garantiza la uniformidad del soporte de la losa, construido generalmente con materiales granulares no cementados. Cuando el tráfico es ligero se puede suprimir esta capa, apoyando la losa directamente en la subrasante.
- **Subrasante.** Constituye la capa superior de la terracería y puede estar formada por el propio terreno natural adecuadamente compactado perfilado. Constituye el elemento de apoyo del pavimento, por lo que debe resistir adecuadamente los esfuerzos que le son transmitidos, incluso en condiciones severas de humedad.
- **Acotamientos.** Son elementos que cubren funciones muy importantes para la seguridad del usuario y para la protección del pavimento.



Para el tipo de pavimentos que se han construido en nuestro país, el contacto entre la losa y la sub-base es muy importante, ya que una fricción muy baja entre esas capas puede generar desniveles entre juntas, mientras que una fricción muy alta puede provocar agrietamientos en las losas.

#### **4.1.2 Diseño y construcción de pavimentos rígidos.**

Para el diseño y construcción de pavimentos de concreto hidráulico en México se han seguido ciertos criterios. Por ejemplo, el espaciamiento de juntas de contracción sin pasajuntas varía de 4.2 a 4.5 m. En cambio, con el uso de pasajuntas la distancia de separación de juntas transversales se ha construido en rangos de 4.5 a 6 m. El criterio utilizado para la separación de juntas se basa en colocarlas de 24 a 36 veces el espesor del pavimento en centímetros, según el tipo de materiales sobre los que se construye y se usan dispositivos mecánicos para la transferencia de carga. Las juntas longitudinales se han construido con separaciones de 3.5 a 6.0 m, siempre tratando que la relación de largo/ancho de las losas de rodamiento esté en rangos de 1 a 1.4.

Los factores involucrados en el diseño de pavimentos rígidos que se tienen que considerar son:

- Valor soporte de los suelos de subrasante.
- Tipos, espesores y Módulos de las distintas capas (kc).
- Propiedades mecánicas del concreto (MR, E).
- Período de diseño.
- Tránsito. Configuración de cargas por eje. Crecimiento, Distribución, etc.
- Transferencia de cargas en juntas transversales (pasadores / trabazón entre agregados).
- Transferencia de carga en bordes (Tipo de banquina / sobreanchos de calzada).
- Confiabilidad.
- Porcentaje de losas fisuradas.

Un pavimento rígido no solo dependerá de las condiciones o características del concreto con el cual se elaboró la losa de rodadura. Además, es necesario considerar factores externos que afectan al buen funcionamiento del pavimento. Para ello a continuación se enlistan factores externos al concreto:



**Tráfico:** Carga bruta y presión de llanta, propiedades del terreno de cimentación y materiales del pavimento, repetición de carga, radio de influencia de carga, velocidad.

**Clima:** precipitación pluvial (Aquaplaning), expansión por congelamiento, deshielo del inicio de primavera, contracción y expansión, congelamiento-deshielo y húmedo-seco.

**Geometría del proyecto (diseño vial):** distribución del tráfico en el pavimento.

**Posición de la estructura:** secciones de corte y relleno, profundidad del nivel freático, deslizamientos y problemas relacionados, depósitos ligeramente profundos.

**Construcción y Mantenimiento:** Deficiencia en la compactación del terreno de desplante y/o cimiento.

**Fallas:** Instalación y mantenimiento de juntas, inadecuada colocación de Guías en los niveles, escarificado y eliminación de materiales superiores al especificado, durabilidad del agregado.

#### 4.1.3 Pavimentos Rígidos en México.

Se tiene registrado que la primera carretera diseñada de concreto hidráulico en México siguiendo especificaciones internacionales con estrictas normas de calidad tanto en la producción del concreto como en el tendido, se llevó a cabo en el año 1993 por la SCT (Secretaría de Comunicaciones y Transportes), con una longitud de 8.5 Km, en donde se contemplaron alternativas en las especificaciones para poder hacer comparativas y de esta manera establecer las características adecuadas.

Se tiene registro de que antes del año de 1993 la especificación y construcción de pavimentos de concreto hidráulico en México fue relativamente escasa, debido principalmente a que nuestro país es un importante productor de petróleo y por consiguiente de asfalto. Se da la circunstancia de que existía un subsidio importante en el precio del asfalto, así que los pavimentos asfálticos en nuestro país resultaban en costo muy inferiores a los de concreto hidráulico. Adicionalmente, existía una gran desinformación y desconocimiento sobre el diseño y construcción con nuevas tecnologías de los pavimentos de concreto hidráulico. Otro factor importante es que cuando se diseñaron los caminos de México para el tránsito que se pensaba debían soportar, los pavimentos de asfalto parecían ser una



alternativa suficiente (Hernández Michaca, Sánchez Granados, Castillo Chaires, Damián Hernández, & Téllez Gutiérrez, 2001).

A continuación se presenta la evolución que han tenido los pavimentos rígidos a lo largo de los años. La implementación de pavimentos rígidos ha sido cada vez mayor, como se observa en la Tabla 2.

Tabla 2 Volúmenes de Concreto en Pavimentos Rígidos Mexicanos( IMCYC, 2002).

Año	Tramo:	Volúmenes de concreto (m <sup>3</sup> )
1993	Libramiento Ticumán.	18,300.00
1994	Autopista Guadalajara – Tepic, Tuxpan-Tihuatlán y Tihuatlán-Poza Rica.	293,400.00
1995	Yautepec-Jojutla, Atlapexco-Tianguistengo, Jiutepec-Zapata, Autopista Querétaro-San Luis Potosí.	243,900.00
1996	Entronque Aeropuerto de San Luis Potosí, Entronque Libramiento de San Luis Potosí y el tramo Aeropuerto Ixtapa-Zihuatanejo.	543,800.00
1997	Autopista Pirámides _Tulancingo, Ixtapa-Aeropuerto, el libramiento Ruta dos en Nuevo Laredo, la Autopista Cancún-Tulum, la Autopista Huaizache-Matehuala, 3 tramos de la Autopista Querétaro- palmillas y el tramo de Chihuahua-Aldama.	1997- 1,192,200.00
1998	Autopista Rosario- Escuinapa en Sinaloa, Aeropuerto Vallarta-Río Ameca en Jalisco, Río Ameca-Cruz de Huanacaxtle en Nayarit, la carretera Yautepec- Oacalco, el tramo Poxila- Límite de los Estados de Yucatán, Libramiento de Colima, Chajul-Flor de Café en el estado de Chiapas, el acceso al puerto de Altamira, las laterales del Paseo Tollocán en Toluca Estado de México, así como la aeropista del aeropuerto de Kaua en el estado de Yucatán.	1998- 908,400.00
1999		1,496,300.00

Además de este inventario, longitudes considerables de pavimentos de concreto hidráulico han sido construidas en caminos estatales, libramientos urbanos, etc.

#### 4.2. Concreto.

Según la norma mexicana (NMX-C-403-ONNCCE-1999) establece:

*“Concreto hidráulico, es una mezcla de agregados, naturales, procesados o artificiales, cementante y agua, a la que además se le pueden agregar algunos aditivos (cantidades no mayores a 5%); debe ser dosificada en masa o en volumen”.*

De acuerdo a la resistencia a la compresión que logran soportar pueden clasificarse:

- Concreto de baja resistencia: menos de 20 MPa (204 kgf/cm<sup>2</sup>) de resistencia a la compresión.
- Concreto de moderada resistencia: toma un rango de 20 a 40 MPa (204 kgf/cm<sup>2</sup> a 408 kgf/cm<sup>2</sup>) de resistencia a la compresión.



- Concreto de alta resistencia: más de 40 MPa (408 kgf/cm<sup>2</sup>) de resistencia a la compresión.

El valor de la resistencia mecánica, por sí solo, no es indicativo de la durabilidad del concreto, ya que dependerá de varios factores como: relación a/c, dosificación, tipo de cemento ó espesor de recubrimiento de la armadura. Se dice que para concretos de elevada resistencia (> de 450 kgf/cm<sup>2</sup>) son concretos durables y que para concretos de baja resistencia (< de 200 kgf/cm<sup>2</sup>) son de baja durabilidad (Red Durar, 2000).

#### 4.2.1 Conformación de un concreto.

La pasta constituye aproximadamente del 25% hasta 40% del volumen total del concreto. El volumen absoluto del cemento está normalmente entre 7% y 15% y el volumen del agua está entre 14% y 21%. El contenido de aire atrapado varía del 4% hasta 8% del volumen. Los agregados constituyen aproximadamente del 60% al 75% del volumen total del concreto, su selección es muy importante. (Neville, 1999). Generalmente, los agregados se dividen en dos grupos: finos y gruesos. Los agregados finos pueden ser arena natural o artificial (manufacturada) con partículas de hasta 9.5 mm (3/8 pulg.); agregados gruesos son las partículas retenidas en la malla 1.18 mm (tamiz no.16) y pueden llegar hasta 150 mm (6 pulg.). El tamaño máximo del agregado grueso comúnmente empleado es 19 mm o 25 mm (3/4 pulg. o 1 pulg.). Un agregado de tamaño intermedio, cerca de 9.5 mm (3/8 pulg.) es, algunas veces, adicionado para mejorar la granulometría general del agregado.

##### **Cemento Portland.**

Según la norma mexicana NMX-C-414-ONNCCE-2010, establece:

*“el cemento hidráulico es un material inorgánico finamente pulverizado, comúnmente conocido como cemento, que al agregarle agua, ya sea solo o mezclado con arena, grava u otros materiales similares, tiene la propiedad de fraguar y endurecer, incluso bajo el agua, una vez endurecido, conservará su resistencia y estabilidad”.*

Se suele considerar cuatro compuestos como los componentes principales del cemento (tabla 3). Estos constituyen aproximadamente un 90% de la masa del cemento. Durante la molienda, se añaden yeso (4% hasta 6%) u otra fuente de sulfato de calcio y otros auxiliares de molienda (Kosmatka et al, 2004).



Tabla 3 Composición química del cemento (NMX-C-414-ONNCCE-2010).

NOMBRE	COMPOSICIÓN	ABREVIATURA
Silicato Tricálcico ó Alita	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C3S
Silicato Dicálcico ó Belita	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C2S
Aluminato Tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C3A
Aluminoferrito Tetracálcico	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	C4AF

La alita es la fase principal, reacciona rápidamente con el agua y es el más importante en cuanto a desarrollo de propiedades mecánicas hasta los 28 días. Constituye del 50% al 70% del clínker. La belita constituye del 15% al 30% y reacciona lentamente con el agua y durante los primeros 28 días contribuye poco a la resistencia mecánica, haciéndolo sustancialmente en etapas posteriores. Los compuestos de aluminato reaccionan rápidamente pudiendo ocasionar el fraguado rápido. Los cementos con bajos porcentajes de C3A resisten mejor a suelos y aguas con sulfatos, constituyendo aproximadamente del 5% al 10% del clínker. La mayoría de los efectos de color para la producción del cemento gris se deben a los compuestos de ferrita, que constituyen del 5% al 15% del clínker (Neville, 1999).

#### **Agregados pétreos.**

Los agregados deben componerse de partículas con resistencia mecánica adecuada y con resistencia a las condiciones de exposición, y no deben contener materiales que puedan causar deterioro del concreto. La granulometría continua de tamaños de partículas es deseable para el uso eficiente de la pasta.

Se requiere del conocimiento de ciertas características del agregado para la elaboración de las mezclas de concreto, ya que afectan a dos aspectos: las proporciones de la mezcla y el comportamiento del concreto fresco y endurecido. Debido a la relación entre los dos aspectos, es más apropiado dividir las propiedades en los siguientes grupos:

- Características que dependen de la porosidad: densidad, absorción de humedad, resistencia, dureza, módulo de elasticidad y sanidad.
- Características que dependen de la previa exposición de los factores de procesamiento: dimensión de partículas, forma y textura.



- Características que dependen de la composición química y mineralógica: resistencia, dureza, módulo de elasticidad y sustancias nocivas presentes.

A continuación se presenta la Tabla 4 que contienen las principales características de los agregados y sus efectos en el concreto:

*Tabla 4 Principales aspectos del Concreto que son afectados por las características de los agregados (Olivera Bustamante, 2009).*

Característica de los agregados	Aspecto de los agregados que influyen en el concreto	
	Concreto Fresco	Concreto Endurecido
<b>Granulometría</b>	Manejabilidad Requerimiento de agua Sangrado	Resistencia Mecánica Cambios Volumétricos
<b>Limpieza (materia orgánica, limo, arcilla y otros finos indeseables)</b>	Requerimiento de agua Contracción plástica	Durabilidad Resistencia mecánica Cambios Volumétricos
<b>Densidad (gravedad específica)</b>	Peso Unitario	Peso Unitario
<b>Sanidad</b>	Requerimiento de agua	Durabilidad
<b>Absorción y Porosidad</b>	Pérdida de revenimiento Contracción plástica	Durabilidad Permeabilidad
<b>Forma de la Partícula</b>	Manejabilidad Requerimiento de agua Sangrado	Resistencia mecánica Cambios Volumétricos Economía
<b>Textura Superficial</b>	Manejabilidad Requerimiento de agua	Durabilidad Resistencia al desgaste Economía
<b>Tamaño Máximo</b>	Segregación Peso unitario Requerimiento de agua	Resistencia mecánica Cambios volumétricos Peso unitario Permeabilidad Economía
<b>Reactividad con los álcalis</b>		Durabilidad
<b>Módulo de elasticidad</b>		Módulo elasticidad Cambios Volumétricos
<b>Resistencia a la abrasión</b>		Resistencia a la abrasión Durabilidad
<b>Resistencia Mecánica</b>		Resistencia Mecánica
<b>Partículas friables y terrones de arcilla</b>	Contracción plástica	Resistencia Mecánica Durabilidad Reventones superficiales
<b>Coefficiente de expansión térmica</b>		Propiedades Térmicas

Al emplearse agregados de buena densidad ( $\geq 2.25$ ) el concreto resultante podría ser mayor o igualmente denso, lo cual tendría una influencia directa sobre el peso volumétrico y la resistencia a la compresión del mismo. La absorción es quizá la propiedad del agregado que más influye en la consistencia del concreto, puesto que



las partículas absorben el agua que está dirigida a la pasta de cemento, lo cual reduce la trabajabilidad de la mezcla (Chan Yam ed. al., 2003).

La resistencia a la abrasión y módulo de elasticidad del agregado son propiedades interrelacionadas, en las que influye la porosidad, composición, textura y estructura. Las variaciones en la granulometría pueden afectar seriamente la uniformidad del concreto de una mezcla a otra. Si partimos de la idea de que la pasta de cemento tiene que cubrir todo el perímetro de los agregados, las arenas muy finas serían antieconómicas, mientras que arenas y gravas gruesas pueden producir mezclas sin trabajabilidad; los agregados que contengan una gran deficiencia o exceso de cualquier tamaño y presenten una curva granulométrica suave, producirán resultados insatisfactorios. Una adecuada combinación de estos agregados podrá reducir la cantidad de vacíos que repercutirán en el espacio a llenar por pasta, ya que la demanda de pasta de cemento para el concreto se relaciona con la cantidad de vacíos de la combinación de agregados (Kosmatka et al, 2004).

La forma y la textura de la superficie de las partículas del agregado influyen en las propiedades de las mezclas de concreto. Las partículas con textura áspera, angulares, requieren más agua para producir un concreto trabajable que agregados lisos, redondeados y compactos. Las partículas planas se deben evitar o, por lo menos, limitar a cerca del 15% de la masa total del agregado.

### **Agua para el concreto.**

Como componente del concreto convencional, el agua suele representar aproximadamente entre 10 y 25 por ciento del volumen del concreto recién mezclado, dependiendo del tamaño máximo de agregado que se utilice y del revenimiento que se requiera.

El exceso de impurezas en el agua de mezcla no sólo puede afectar al tiempo de fraguado y las resistencia del concreto, sino también puede causar eflorescencias, manchado, corrosión del refuerzo, inestabilidad del volumen y reducción de la durabilidad (Kosmatka Steven H., 2004)

### **Aditivos en el concreto.**

Según Neville (2004) un aditivo es un producto químico, que excepto en casos especiales, se agrega a la mezcla de concreto en cantidades no mayores al 5 por ciento de la masa del cemento durante el mezclado o durante una operación adicional de mezclado antes de la colocación del concreto, con el propósito de realizar



una modificación específica, o modificaciones, a las propiedades normales del concreto.

El concreto debe ser trabajable, fuerte, durable, resistente al desgaste. Estas cualidades se pueden obtener fácil y económicamente con la selección de los materiales adecuados. Sin embargo, muchas veces es necesario agregar un aditivo para compensar las necesidades que requieran.

Para las mezclas en donde se requiere tener una relación agua cemento baja será necesario hacer uso de algún aditivo fluidificante, o en su defecto de un aditivo reductor de agua, los cuales permiten una reducción en la relación agua/cemento mientras se conserva la trabajabilidad de las mezclas.

Para la elaboración de concreto con agregados reciclados es recomendable utilizar superplastificantes para evitar así la necesidad de añadir más agua. Este procedimiento implica un mayor coste, aunque produce concretos de mayor resistencia ya que la relación agua/ cemento efectiva es menor (Sánchez Rodríguez, 2011).

### **Aditivos Utilizados en esta Investigación.**

Para la elaboración de los especímenes se utilizaron dos aditivos:

- **Fluidificante CRISOTAN R-5.** Es un agente dispersante que promueve la separación de las partículas de cemento, venciendo las fuerzas cohesivas que las atraen unas a otras. Provoca que las mezclas de concreto fluyan con más facilidad que las mezclas convencionales.

Beneficios de CRISOTAN R-5:

- Permite reducir la relación agua / cemento
- Ayuda a tener una mejor y más rápida colocación del concreto.
- Permite disminuir el contenido de cemento, manteniendo la resistencia a la compresión.
- Mejora el acabado en concretos premoldeados.
- No afecta al calor de hidratación del concreto.
- No contribuye a la corrosión del acero.

El porcentaje de adición se hace con respecto al peso del cemento. En el momento de elaborar las mezclas se adiciona al agua con que se elaborará el concreto para tener la mayor distribución entre toda la mezcla. (Ilustración 1).



*Ilustración 1 fluidificante CRISOTAN R-5 homogenizado en el agua para la elaboración especímenes.*

- **Emulsión a base de Poliestireno.** está elaborada a partir de un poliestireno post-consumo disuelto en solvente (acetato de etilo), lecitina de soya y agua. Unas de las finalidades de este aditivo es retardar los tiempos de fraguado y ayudar a la trabajabilidad de las mezclas, mejorar la propiedad de adhesión de la capa interfacial de las partículas de cemento y del agregado (Ilustración 2).



*Ilustración 2 Emulsión a base de Poliestireno.*

#### **4.3. Concreto Reciclado.**

Los agregados reciclados están constituidos fundamentalmente por concreto, materiales cerámicos, agregados naturales, asfalto, madera, metales, plásticos, vidrio, tierra, yeso y otros residuos. Se define como un agregado reciclado al producto de demoliciones en donde se cuenta con más del 90% de concreto triturado y piedra natural sin mortero (GERD, 2012).

Los residuos de concreto de cemento con Clínter Portland y agregados naturales triturados, cribados y procesados en plantas de reciclado dan lugar al



material secundario “agregados reciclados de concreto”. Éste se deriva de un solo tipo de material primario, el concreto, cuya composición es heterogénea (cemento, agua, agregados, aditivos y adiciones). Dicho material no se puede considerar un material uniforme, ya que las diferencias pueden ser notables dependiendo de las composiciones de mortero. (ACHE grupo de trabajo Hormigon, Septiembre 2006).

Los agregados reciclados presentan inferiores resultados en las propiedades que los agregados naturales, teniendo importantes descensos en la calidad del concreto. Las propiedades que presentan mayores diferencias con respecto al agregado natural son las siguientes:

- Elevada absorción
- Elevado contenido de sulfato
- Elevado contenido de impurezas

El concreto como material de construcción requiere un volumen importante de recursos, especialmente agregados pétreos. En los últimos años, estudios nacionales e internacionales han demostrado que las propiedades físicas y mecánicas del concreto constituido por adiciones racionales de agregado reciclado en su mezcla garantizan la utilización adecuada de este material (Gonzalo A. Valdés, 2007).

La implementación de agregados reciclados es una práctica cada vez más habitual en los ámbitos de la construcción. En la implementación de pavimentos rígidos se suele usar la mayor parte del agregado reciclado en aplicaciones de bajo valor añadido, tales como rellenos para vertederos, material para bases y sub-bases, terraplenes o pistas provisionales en obras constructivas. Se ha convertido en algo habitual utilizar los agregados reciclados en aplicaciones secundarias de obra civil.

El proceso de trituración en los agregados reciclados es una de las etapas más importantes, ya que de ello dependerán las propiedades físicas del agregado y algunas propiedades mecánicas. La manera en que se fractura una roca depende de sus características mecánicas y de su composición mineralógica. Así, por ejemplo, las rocas vitrificadas son relativamente frágiles, y aún más si cuentan con formas irregulares y planos de fisuramiento, mientras que las de alto contenido de sílice son bastante duras (Hernández Michaca, Sánchez Granados, Castillo Chaires, Damián Hernández, & Téllez Gutiérrez, 2001). Puesto que no existe un equipo universal que proporcione las granulometrías demandadas para las obras de ingeniería, es necesario optar por diferentes procesos de triturado. Las trituradoras por impacto son



las que reducen en mayor medida el tamaño de las partículas y producen mayor cantidad de finos, seguidas de las trituradoras de conos y las de mandíbulas.

#### **4.3.1. Residuos de Construcción y Demolición (RCD).**

La eliminación de residuos se ha convertido en un grave problema social y medioambiental en el mundo. A la mayor demanda de construcciones se ha unido un vertido incontrolado, de ahí que estemos acostumbrados a ver vertederos ilícitos a lo largo y ancho del país y bancos de materiales en altos niveles de explotación, lo que proyecta un grave problema social y medioambiental.

El aprovechamiento de RCD puede implicar las siguientes mejoras:

- Disminución de las actividades extractivas de bancos de materiales, debido a la sustitución de estos materiales pétreos por reciclados.
- Disminución de la entrada de residuos en los vertederos, alargando significativamente su vida útil.
- Posible obtención de ahorros en el transporte de RCD y materias primas.

Los residuos de demolición y construcción (denominados RDC) carecen de una gestión adecuada que permita la promoción de su uso o reciclaje en nuevas obras o proyectos. Sin embargo, las necesidades actuales de materiales en la construcción de infraestructura (carreteras, puentes, entre otros) y el aumento de la demanda de vivienda y la gestión medioambiental casi nula en este tipo de residuos, han generado una problemática en torno a su disposición y regulación.

En la última década ha habido un fuerte desarrollo de tecnología y alternativas para buscar el aprovechamiento de estos residuos y sub-productos y minimizar así su producción en los procesos que los generan. Debido a que la construcción de pavimentos requiere grandes volúmenes de materiales, los organismos viales se han convertido en participantes de estos esfuerzos de reutilización y reciclaje. (Instituto Mexicano del Transporte, 2014).

El Instituto Mexicano del Transporte (IMT), con la finalidad de generar carreteras sostenibles, aborda el tema del empleo de residuos de la construcción de carreteras como una práctica para solucionar el problema del manejo de residuos y la valoración de éstos dentro de los procesos constructivos del sector de construcción. Una ingeniería en carreteras sostenible se basa en incluir todos los impactos dentro de un proyecto, desde el diseño hasta la construcción, operación y mantenimiento. (Instituto Mexicano del Transporte, 2014).



Según la Secretaría del Medio Ambiente del Distrito Federal, el uso potencial de los agregados reciclados abarca los siguientes elementos constructivos:

- Sub-bases en caminos y estacionamientos.
- Cubierta en rellenos sanitarios.
- Construcción de lechos para tuberías.
- Carpetas asfálticas para vialidades secundarias.
- Construcción de andadores o ciclopistas.
- Construcción de bases de guarniciones y banquetas.
- Construcción de terraplenes. Bases hidráulicas.
- Rellenos y pedraplenes.

De acuerdo con la empresa Concretos Reciclados SA de CV, el costo de los agregados reciclados es menor que el de los agregados naturales (entre un 40 a un 60%). Esto es debido a que se cobra por la recepción del escombros. Por otro lado, para las obras del Distrito Federal la distancia de transporte es de 26 km menor que los bancos de agregados naturales, a un costo de \$3.50 o \$4.00/m<sup>3</sup>-km., se tiene un costo de agregado reciclado de \$90.00 a \$104.00/m<sup>3</sup>; aunado a que si el reciclaje del escombros se ejecuta “In situ” los ahorros podrían ser mayores. Además, se tendrían que añadir los ahorros por emisiones de carbono por menores distancias de acarreo, los impactos negativos que no se realizan a los bancos naturales y los que se evitan en los sitios de disposición del escombros.

Los residuos generan un alto impacto al ambiente, en especial al suelo. El suelo absorbe al óxido de calcio (cao) del residuo, que con el tiempo provoca que el suelo se vuelva infértil y no permita el crecimiento vegetal (Rodríguez, 2012).

#### **4.3.2. Tipos de agregados Reciclados<sup>1</sup>.**

Según las recomendaciones de RILEM, el agregado grueso reciclado se puede clasificar en tres categorías en función de su composición:

- Tipo 1: agregado procedente en su mayoría de escombros de fábrica de ladrillo.
- Tipo 2: agregados procedentes en su mayoría de escombros de concreto.

---

<sup>1</sup> Las fuentes son de origen español, por lo que en muchas ocasiones se encontrará la palabra árido refiriéndose al agregado, u hormigón refiriéndose al concreto, en la literatura es muy común encontrar estas diferentes formas de nombrar al agregado como al concreto.



- Tipo 3: agregados compuestos por una mezcla de agregados naturales superior al 80% y agregado de fábrica de ladrillo inferior al 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 Hormigon, 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>.

#### **4.3.3. Reciclado parcial o total de la superficie de rodamiento.**

Consiste en el reaprovechamiento de los materiales que constituyen un pavimento viejo para elaborar uno nuevo. Con el reciclado de los pavimentos se han encontrado las siguientes ventajas:

- Los bancos de materiales cada vez están más retirados de las obras o los materiales de bancos cercanos son de más difícil extracción, lo que incrementa los costos de construcción del pavimento. En estos casos, el reciclado de los materiales del pavimento viejo puede constituir un ahorro en el costo del pavimento nuevo (IMT, 2001).
- Se utilizan los procedimientos y el proyecto adecuados, la calidad del pavimento reciclado es similar a la de un pavimento nuevo.



- Ventajas ecológicas. En el mundo contemporáneo son un grave problema los tiraderos de desperdicios, por lo que la reutilización de los materiales de un pavimento viejo, reciclándolos, evita el problema de encontrar un lugar adecuado para colocarlos y ocasionar daños ecológicos. Adicionalmente, se protege al medio ambiente al reducir la explotación de más bancos de materiales.

La trituración y cribado de los trozos de concreto así obtenidos. Si la losa de concreto vieja contiene acero de refuerzo, será necesario eliminarlo antes de la trituración. El concreto triturado y cribado pasa a formar parte como agregado pétreo del nuevo concreto. Es necesario proyectar la mezcla del nuevo concreto con base a nuevas pruebas de laboratorio, para obtener la resistencia y espesor adecuados que debe tener el pavimento nuevo (IMT, 2001).

En la actualidad existen diferentes equipos que se pueden utilizar para la demolición del pavimento rígido. La elección de uno u otro dependerá de las condiciones de la obra, el tipo de concreto, la resistencia y la utilización que se dará del agregado reciclado. Estos son los equipos más utilizados (CEDEX, 2011):

- **Martillos hidráulicos** montados en retroexcavadoras. Tienen bajos rendimientos (50m<sup>2</sup>/h). Se usan por lo regular en espesores de losas gruesas.
- **Fragmentadoras de impacto.** Rompen el pavimento al dejar caer grandes bloques. Su rendimiento (150m<sup>2</sup>/h) está influenciado por el espesor de la losa y la resistencia del concreto.
- **Mandíbulas hidráulicas** montadas sobre equipos tractores. Empujan el material hasta que se destruye y reduce el tamaño de los bloques.
- **Fracturadores por resonancia.** Permiten la trituración de losas de concreto armado de hasta 30 cm de espesor. Su rendimiento (500m<sup>2</sup>/h) es muy grande y permite la separación de acero y concreto.

#### 4.3.4. Legislación de Agregados Reciclados en México.

De acuerdo con la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR) son facultades de la Federación:

*“Formular, conducir y evaluar la política nacional en materia de residuos así como elaborar el Programa Nacional para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos y el de Remediación de Sitios Contaminados con éstos, en el marco del*



*Sistema Nacional de Planeación Democrática, establecido en el artículo 25 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos” (Gutiérrez Avedoy, 2006).*

En el país se estima que se generan un total de 137,280 toneladas diarias de residuos. Se estima que el 58.4% de estos residuos cuentan con un manejo ambiental adecuado. Asimismo, el 15.6% del total de residuos son aprovechados, ya sea por métodos biológicos, químicos, físicos, fisicoquímicos, térmicos o son exportados. Finalmente, el 40.3% de los residuos totales son dispuestos de forma adecuada. (Subsecretaría de Normatividad, 2008).

La actual carencia de un marco de referencia relativo a la situación que guarda el manejo de los residuos en México, unido a otras razones como la ausencia de políticas claras para el manejo adecuado de ciertas corrientes de residuos, las discrepancias en la información disponible según las fuentes consultadas, o la ausencia de criterios de prevención de la generación de residuos, hacen que la elaboración de una política orientada a cambiar patrones culturales para que la sociedad como un todo se oriente a esquemas de reducir, reusar y reciclar, considerando con ello los principios del desarrollo sustentable así como los compromisos internacionales que en la materia han sido suscritos por México, resulte una actividad urgente y prioritaria que no debe ser postergada. (Gutiérrez Avedoy, 2006).

El órgano federal encargado de la supervisión y legislación de los residuos de la construcción es la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), junto con la Procuraduría Federal de Protección de Ambiente (PROFEPA).

### **Problemática**

La necesidad de formular una política nacional para la prevención y gestión de los residuos que vaya más allá del tema ambiental y se constituya en acciones y estrategias, tendrá que considerar los siguientes aspectos (Gutiérrez Avedoy, 2006):

- Inadecuada coordinación y distribución de competencias entre Obras Públicas, Servicios Urbanos y Dirección de Medio Ambiente municipales en los gobiernos locales, que pueden llegar a ser contraproducentes.
- La casi inexistente planificación estratégica a nivel local y estatal que prevé la LGPGIR, siendo la elaboración e implementación de programas municipales o estatales un instrumento adecuado.



- Las relaciones laborales vigentes que dificultan la modernización de las estructuras administrativas y la participación del sector privado.
- La insuficiente difusión de la normatividad en materia de residuos, y las insuficientes acciones de inspección del cumplimiento de la normatividad vigente.

En la Tabla 5 se muestran las instancias involucradas:

*Tabla 5 Instancias involucradas en la gestión de los residuos.*

<b>Instancia</b>	<b>Responsabilidad y Funciones</b>
<b>GOBIERNO FEDERAL</b>	Definición de roles del estado mexicano Asignación de presupuesto
<b>SEMARNAT</b>	Elaboración de políticas y estrategias para el control ambiental. Entidad responsable de normar y fiscalizar el marco regulatorio ambiental. Regulación de licencias para el manejo de residuos peligrosos. Coordinación de programas nacionales de gestión ambiental.
<b>SEDESOL</b>	Fomento y creación de infraestructura. Promoción del desarrollo urbano y social. Elaboración de estudios y proyectos.
<b>OTRAS SECRETARIAS</b>	Apoyo a la Gestión de los residuos en sus respectivos ámbitos (turismo, industria, pesca, energía y minas, transporte, vivienda, otros) Sostenibilidad económica de los servicios. Regulación del manejo de los residuos sólidos en sus respectivos ámbitos de intervención.
<b>GOBIERNOS ESTATALES</b>	Apoyo a la Gestión de los residuos no peligrosos. Fomento y creación de infraestructura Regulación del manejo de los residuos sólidos no peligrosos en sus respectivos ámbitos de intervención.
<b>GOBIERNOS MUNICIPALES</b>	Manejo de los residuos sólidos no peligrosos: barrido, recolección, transferencia, disposición final. Formulación del marco regulatorio local. Aplicación de sanciones por incumplimiento en el manejo de los residuos sólidos. Formulación e implementación de tarifas obligatorias por los servicios brindados.
<b>OTRAS ENTIDADES</b>	Gestión y provisión de fondos para instrumentación de proyectos. Asesoría y apoyo técnico. Capacitación y adiestramiento.



Programas de aprovechamiento de residuos.  
Promoción de la participación ciudadana y la educación ambiental  
Ejecución de proyectos a nivel comunitario

En México, la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) en la Ley General para la Prevención y Gestión de Residuos (LGPGR) promulgada en el 2003, define los llamados Residuos de Manejo Especial (RME) como los residuos generados en los procesos de producción de grandes volúmenes (más de 10 toneladas al año) de residuos sólidos urbanos, pero que no tienen las características para ser considerados residuos peligrosos.

La Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos, hace la clasificación y definición de residuos, con la finalidad de que sean recuperados, aprovechados o revalorizados para su reciclaje, reprocesamiento o aprovechamiento energético, fomentando en el país el desarrollo de tecnología y métodos para este fin.

Se estima que de la generación de RME en 2005 para servicios a través de los productos, donde la mayor parte de ésta es para la construcción y demolición o de la industria (77%), 18% son de los lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales. Un 3% se relaciona con los residuos generados por los servicios de transporte y el 2% se refiere a los generados en los servicios de salud (SEMARNAT-INE, 2006).

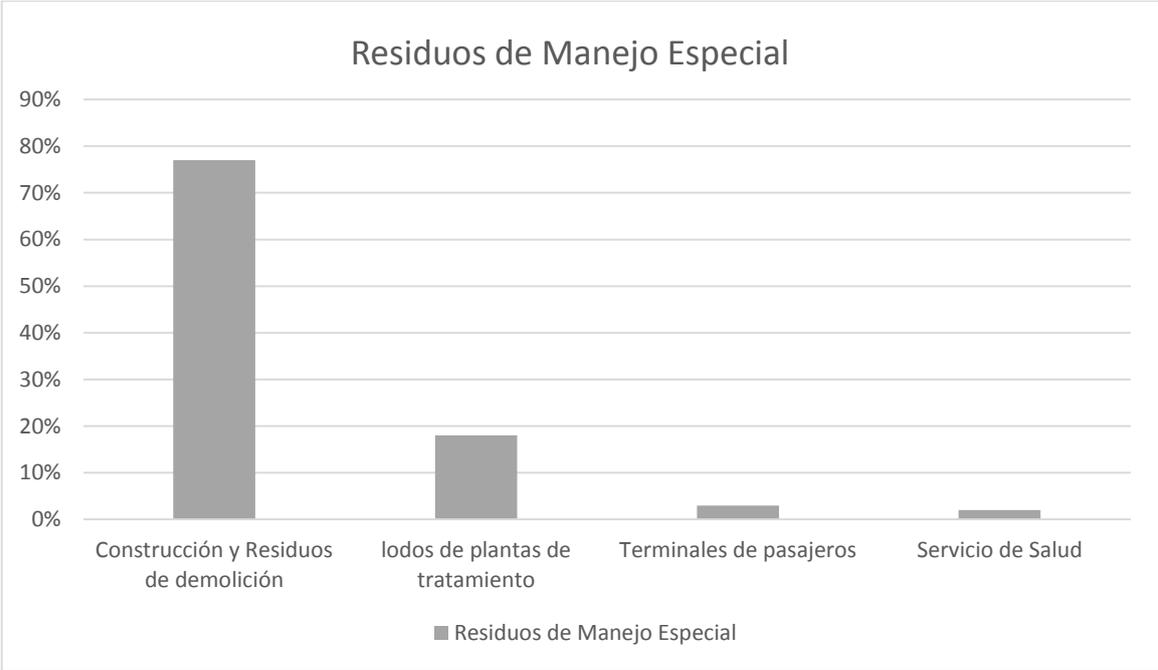


Ilustración 3 Generación de Residuos de Manejo Especial, censo del 2005 (SEMARNAT-INE, 2006).



La categoría de Residuos de Manejo Especial (RME) fue creada recientemente por la LGPGIR. Debido a ello, no se cuenta con información específica sobre su manejo y disposición final. Se observan lagunas en los ordenamientos y en los distintos instrumentos para su cumplimiento. A pesar de que la legislación aplicable es abundante, está dispersa en varios cuerpos legales y carece de una orientación intersectorial, lo cual produce inconsistencias y vacíos que hacen difícil su interpretación y cumplimiento, además de carecer de la reglamentación y de la normatividad básica que haga fácil su cumplimiento. Aunado a lo anterior, no están respaldadas por políticas y estrategias que les permitan coexistir como un medio de desarrollo y no como un fin específico. (Gutiérrez Avedoy, 2006).

Los residuos de la construcción están constituidos por el 43.16% de material de excavación, 24.38% de concreto, 24.33% de block tabique, 4.05% de tablaroca yeso, 1.52% de madera, 0.85% de cerámica, 0.78% plástico, 0.62% de piedra, 0.49% de Papel, 0.48% de varilla, 0.25% de asfalto y 0.09% de lámina (IMCYC, 2007).

En la Tabla 6 se presenta una aproximación de la producción de los principales RME (Residuos de Manejo Especial) según la fuente de generación.<sup>2</sup>

*Tabla 6 Generación de Residuos de Manejo Especial por Fuente de Generación, 2005 (SEMARNAT-INE, 2006).*

Fuente Generadora	Producción	Producción	Producción
	Mínima Ton/día	Máxima Ton/día	Media Ton/día
Servicios de salud	151	495	323
Servicios de Transporte	404	586	495
Lodos – PTAR municipales	1,600	4,801	3,201
Residuos Construcción	11,161	15,100	13,130

<sup>2</sup> Fuente: IDS 2005, con datos de la bibliografía consultada en la elaboración del documento correspondiente a RME.



Los residuos de la construcción y demolición provienen de obras para vivienda, comercios, industria e infraestructura. Tal vez es donde más reciclables se encuentran, por la tradición y por su recuperación y aplicaciones.<sup>3</sup> Se estima una generación promedio de 13,130 ton/día para esta corriente de RME en el país.

De acuerdo con las políticas y desarrollo institucional, es indispensable que se reconozca al sector de los residuos como un escenario económicamente viable, con los objetivos, recursos y restricciones que le son particulares. Se requiere a corto plazo, trabajar en la formulación de la política de gestión integral de los residuos, la cual considere forzosamente:

- Medio ambiente y sustentabilidad
- Factibilidad técnica, económico y financiera
- Desarrollo social y cultura ambiental
- Calidad de vida
- Marco legal que garantice su instrumentación
- Corresponsabilidad intersectorial

#### **4.3.5. Características de los agregados reciclados.**

La calidad del agregado reciclado depende de la presencia de mortero adherido al agregado natural, cuyo porcentaje varía entre 25-60%. Los estudios de M. Sánchez (2006) han demostrado que el contenido de mortero está directamente relacionado con otras propiedades como la densidad, el coeficiente de absorción y el desgaste de los Ángeles. Las fracciones más finas presentarán mayor contenido de mortero y por lo tanto peor calidad.

Julie Anne Chauveinc (2010) analizó diferentes porcentajes de sustitución de agregado reciclado grueso y observó que mientras más alto es el contenido de agregado reciclado, más baja la resistencia a compresión. Por otro lado, el método de mezclado en etapas no mejoró la resistencia a compresión de los concretos con agregado reciclado. Sin embargo, se lograron valores de resistencia a compresión altos y suficientes para usar este material como concreto estructural. La resistencia a la flexión de concretos reciclados con un contenido superior al 50%, disminuye de

---

<sup>3</sup> Por ejemplo, adocretos, arcillas, tabiques, ladrillos, mampostería, concreto armado, fresado de carpeta asfáltica, etc.



media un 5% y 16% respectivamente (ACHE grupo de trabajo Hormigon, Septiembre 2006).

La durabilidad de concretos reciclados es muy inferior a la de un concreto convencional: su elevada porosidad produce valores altos en la prueba de profundidad de penetración de agua, una elevada velocidad de carbonatación y una alta penetrabilidad de cloruros. La resistencia a los sulfatos ha resultado ser adecuada, aunque ligeramente inferior al concreto convencional. (CEDEX, 2011).

El agregado reciclado puede funcionar como un foco de propagación de la carbonatación, porque no impide el paso del CO<sub>2</sub> como un agregado convencional, por lo que se debe tener un especial cuidado con la prueba de la carbonatación (Alaejos Gutiérrez, 2008).

Para concretos de resistencias medias (25-35 MPa), en específico para concreto de 35Mpa, se pueden mantener las resistencias de diseño cuando el agregado reciclado sea procedente de concretos de elevada resistencia (55 MPa) (Sánchez, 2004).

Cuando los agregados reciclados son producto de una sola etapa de trituración (cono o mandíbula) la resistencia del concreto varía entre el 93% al 97% de la resistencia del concreto de control, en dos etapas de trituración. La resistencia del concreto reciclado puede llegar a superar ligeramente a la del concreto de control (Sánchez, 2004)

### **Granulometría:**

En general, las granulometrías de agregados reciclados se sitúan dentro de los usos que se fijan para agregados naturales. El proceso de trituración del agregado reciclado produce cambios en la forma y textura de las partículas, además de cambios significativos en su granulometría, lo que influye en la resistencia mecánica, la trabajabilidad y el consumo de cemento en los concretos con agregados reciclados. Al tener granulometrías continuas, se obtiene una clasificación uniforme en todos los tamaños, lo que conduce a una mayor compacidad, y por lo tanto, una mayor resistencia y durabilidad del concreto. Las trituradoras de impacto son las que producen en mayor medida el tamaño de partícula y producen mayor cantidad de finos, seguidas de las trituradoras de cono y las de mandíbulas. Al generar gran contenido de finos, que son eliminados en la trituración, se reducen el contenido de mortero adherido, y por lo tanto se producen agregados gruesos de mejor calidad



(Sánchez, 2004). El porcentaje de agregado reciclado que se obtiene suele variar entre el 70% y 90% del agregado total producido.

#### **Porcentaje de finos:**

La presencia de partículas finas en la superficie del agregado reciclado puede originar problemas de adherencia entre éste y la pasta de cemento, además de provocar aumento en la cantidad de agua en el amasado. Las recomendaciones que incluyen especificaciones sobre esta propiedad admiten entre un 2% y un 5% (GERD, 2012).

#### **Forma y Textura superficial:**

El mortero que se encuentra adherido al agregado natural provoca una textura más rugosa y porosa. El coeficiente de forma de agregados reciclados es similar a agregados convencionales, encontrándose en la bibliografía entre 0.17 y 0.35 (ACHE grupo de trabajo Hormigon, Septiembre 2006). En el índice de lajas y partículas alargadas de agregados reciclados se han encontrado ciertas diferencias, siendo menor el valor del índice en el caso de agregados reciclados. Esto puede deberse a que el mortero que queda adherido en las caras planas tiende a aumentar el espesor de las partículas en forma de laja, disminuyendo así el porcentaje de lajas. El índice de lajas y partículas alargadas en agregados reciclados es  $\leq 35\%$  (CEDEX, 2011).

Por lo regular, fracciones menores de agregados reciclados presentan una forma más desfavorable en el coeficiente de forma como en el índice de lajas y partículas alargadas.

#### **Densidad y absorción:**

La pasta de cemento adherida al agregado natural genera densidades inferiores que agregados naturales. La densidad de agregados reciclados oscila entre 2100 y 2400 kg/m<sup>3</sup> (ACHE grupo de trabajo Hormigon, Septiembre 2006).

La absorción es una de las propiedades físicas de agregados reciclados que presenta mayor diferencia con respecto a los agregados naturales. Los valores se encuentran entre el 4-10%. Los principales aspectos que influyen son:

- Tamaño de la partícula: las fracciones pequeñas presentan menor densidad y mayor absorción, debido a que se cuenta con una mayor concentración de pasta.



- Calidad del concreto original: los concretos de baja relación a/c suelen tener agregados de mejor calidad.
- Técnicas de procesado: cuando se realizan etapas sucesivas de trituración, se elimina un mayor contenido de mortero y la calidad del agregado mejora sustancialmente.

Algunos estudios han empleado la microscopia óptica y electrónica para evaluar la forma del agregado reciclado, observando que las partículas presentan una forma más redondeada, con fisuras en el mortero adherido de 2-4 micras de ancho, siendo éste uno de los motivos de la elevada absorción que presentan los agregados reciclados (Sánchez, 2004).

La elevada absorción de los agregados reciclados provoca que durante el amasado, 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. (Tabla 7):

Tabla 7 Calidad del concreto reciclado según su porosidad (Sánchez Rodríguez, 2011).

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

### **Coefficiente de Desgaste (prueba de los ángeles):**

Los agregados reciclados presentan un elevado coeficiente de desgaste. A partir del ensayo se elimina toda el mortero adherido, además de la pérdida de peso del propio agregado natural. En estudios se encontró una relación entre la absorción y el coeficiente de desgaste, en donde se observa que a mayor absorción mayor será el coeficiente de desgaste (ACHE grupo de trabajo Hormigon, Septiembre 2006).

El coeficiente de desgaste es superior al del agregado natural, y suele variar entre 28% y 47%. En general, los valores más elevados corresponden a muestras con un elevado contenido de partículas con mortero, y los valores más reducidos a muestras mayoritariamente de origen cerámico.



Según la normativa UNE 146120:97, para concretos no estructurales, el límite varía entre 20-40%. Se suelen requerir en agregados para pavimentos en carretera coeficientes de desgaste  $\leq 40$ .

El estudio del coeficiente de desgaste puede ser una vía para controlar la calidad del agregado reciclado, ya que en general valores elevados del coeficiente indican porcentajes de mortero adheridos también elevados. Por lo tanto, indica una peor calidad del agregado (Sánchez, 2004).

#### **Propiedades químicas:**

Los agregados reciclados contienen una apreciable cantidad de cloruros. Se encuentra dada en función del lugar de procedencia, especialmente en concretos de obras marítimas, puentes o pavimentos expuestos a sales. En general, cuando los concretos no han estado expuestos a estas condiciones, los valores tanto de los cloruros solubles en agua como de los cloruros totales suelen oscilar entre 0.001-0.05%. La EHE (Instrucciones de concreto estructural) establece un contenido máximo de cloruros solubles en agregados gruesos de 0.05% para concretos armados y 0.03% para concretos pretensados. Para concretos en masa se admite un porcentaje de 0.15% (ACHE grupo de trabajo Hormigon, Septiembre 2006). Los sulfatos combinados del agregado natural y el mortero adherido pueden tener valores que oscilan entre el 0.10 y 0.62%, la normativa restringe límites inferiores al 1%.

#### **Mortero adherido:**

El agregado grueso reciclado posee una cantidad de mortero adherido, que es el causante de la disminución de las propiedades del agregado: menor densidad, mayor absorción, susceptibilidad a las heladas y ataque de sulfatos, entre otros. Estas propiedades afectan negativamente al concreto: módulo de elasticidad, retracción, fluencia y problemas asociados a la durabilidad. La cantidad de mortero en agregados gruesos reciclados oscila entre 23-52%. La resistencia del concreto apenas se ve afectada por la cantidad de mortero adherido (ACHE grupo de trabajo Hormigon, Septiembre 2006).

En el análisis de la cantidad de mortero adherido en los agregados en función del tamaño, se sabe que entre menor es el tamaño del agregado mayor es la cantidad de mortero. En los estudios realizados por (Sánchez, 2004) se encontró relacionada la cantidad de mortero con propiedades del agregado grueso: densidad, coeficiente de los ángeles y la absorción, que determinan propiedades del concreto, tales como: revenimientos, durabilidad.



El proceso de trituración podría ayudar a reducir la cantidad de mortero. Mediante sucesivos procesos de trituración se puede llegar a conseguir una mejor calidad del agregado, ya que se puede reducir considerablemente la cantidad de mortero adherido. Con un proceso de trituración (empleando trituradora de impacto), el agregado grueso reciclado puede contener aproximadamente un 35 a 40% de mortero. Cuando el agregado así obtenido se le somete a una segunda trituración (mediante trituración de rodillo), se puede reducir este porcentaje hasta 17 a 26%. Con una tercera etapa de procesado (triturado por rodillo), se puede conseguir un agregado con un 7 a 10% (Sánchez, 2004).

### Resistencias:

La diferencia de la resistencia entre un concreto con agregados reciclados y un concreto convencional aumenta con el aumento de la clase de resistencia del concreto, manteniendo una curva granulométrica y trabajabilidad del concreto fresco idénticas. La resistencia en comparativa tendrá valores satisfactorios (Métodos de evaluación de las reacciones álcali-sílice en hormigones con áridos reciclados, 2009).

Para obtener una resistencia determinada, el concreto reciclado requerirá una menor relación agua/cemento que el concreto convencional, lo que se conseguirá con un incremento en el contenido de cemento (Ilustración4):

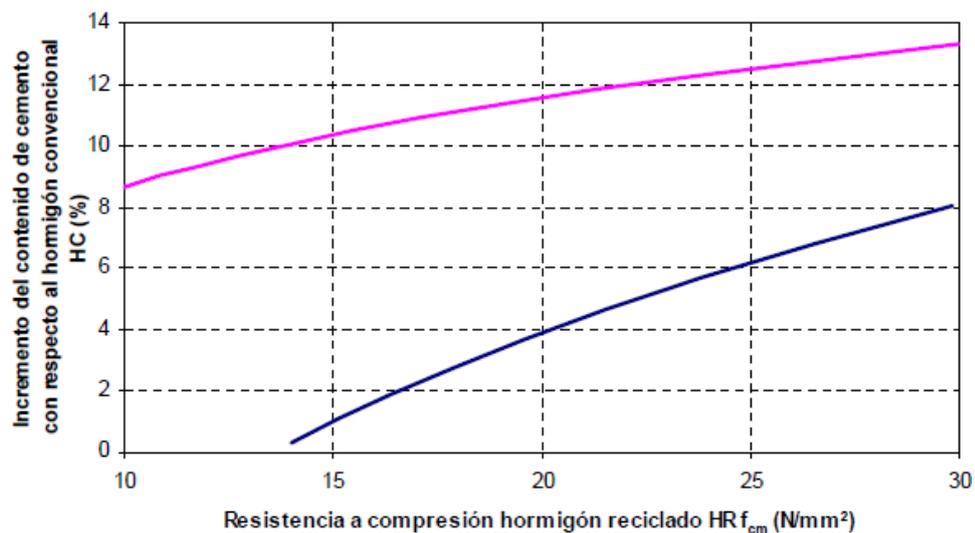


Ilustración 4 Incremento de cemento para obtener una resistencia a la compresión del concreto reciclado, línea superior CR100%, línea inferior CR50% (Geraldés, 2013).

Según los estudios de Geraldés (2013) acerca de la bibliografía existente del estado del arte de agregados reciclados mixto o cerámicos, se han obtenido coeficientes de corrección de pruebas al concreto (Tabla 8):



**Tabla 8 Coeficientes de corrección para concretos con agregados reciclados según el estudio bibliográfico de Geraldés (2013).**

Cantidad de agregado reciclado Mixto o Cerámico	Resistencia a Compresión	Resistencia a Flexión	Resistencia a tracción	Módulo de elasticidad	Coefficiente de Fluencia	Retracción
≤50%	0.91	0.95	0.91	0.88	-	-
50%-100%	0.75	0.84	0.91	0.77	1.32	1.45

Geraldés (2013) recogió rangos y valores medios para los descensos o incrementos en varias propiedades del concreto endurecido, que experimenta un concreto reciclado con agregados reciclados mixtos o cerámicos, respecto a concretos convencionales según la bibliografía consultada (Tabla 9):

**Tabla 9 Descensos o incrementos que experimenta un concreto reciclado con respecto a un concreto convencional de la misma dosificación.**

Propiedad	Porcentaje de agregado reciclado cerámico o mixto			
	≤50%		50%-100%	
	Rango	Valor medio	Rango	Valor medio
Resistencia a Compresión	+5% a -30%	-9%	+5% a -55%	-25%
Resistencia a tracción	+9% a -30%	-7%	+2% a -35%	-14%
Resistencia a Flexo tracción	+20% a -33%	-5%	+10% a -35%	-16%
Módulo de elasticidad	+9% a -32%	-12%	+5% a -35%	-23%
Retracción	-	-	+10% a +80%	+45%
Fluencia	.	-	+10% a +55%	+32%
Absorción por capilaridad e inmersión	+5% a +10%	+7%	+10% a +15%	+12%
Carbonatación	+8% a +28%	-	-	-

La resistencia a la compresión se ve afectada cuando se sustituye el 100% de agregado reciclado, disminuyendo entre un 10 y 20%. Esto dependerá de la calidad del árido reciclado utilizado. Cuando la sustitución es menor al 30% de agregado grueso reciclado por agregado natural, el concreto nuevo no sufre ninguna afectación. Las aplicaciones que se tiene del concreto reciclado en la normativa Española, limita para concretos menores a F<sub>c</sub> de 40 MPa. La disminución de la resistencia a la compresión en concreto reciclado a diferencia de concretos convencionales, es más acentuada a bajas relaciones agua/cemento (CEDEX, 2010).

La resistencia a la flexión es una de las pruebas que presenta una menor variación con respecto a concretos reciclados. En la bibliografía se encuentran descensos del 10 al 15% (Geraldés, 2013).

#### 4.3.6. Ejemplos de implementación de agregados reciclados.



### **Empresa Concretos Reciclados SA de CV.**

Es una empresa 100% mexicana. Primera empresa en Latinoamérica dedicada al reciclaje de agregados. Fundada en el 2004, se encarga del procesamiento de agregados provenientes de demoliciones y desechos de la industria de la construcción (edificaciones, excavaciones, vialidades, urbanizaciones, caminos, etc.)

Los tipos de agregados que ofrecen se enlistan a continuación:

- Material de 3”, para la estabilización de suelos, rellenos, filtros o pedraplenes, conformación terrenos, parques, jardines.
- Material de 3” a finos, para aplicaciones de sub-base en vialidades, relleno en estacionamientos o jardines, construcción de terraplenes.
- Material de 1 ½” a finos, para base en vialidades, construcciones de terraplenes o como material para plantillas, para recibir firmes o demás elementos de concreto.
- Material 1”, para recibir y acostillar tuberías, rellenos, recibir firmes en banquetas o edificaciones pequeñas.
- Material de ¼” a finos o arena reciclada, con propiedades equivalentes al tepetate (arcillas) y sin los inconvenientes de los índices plásticos, presenta valores soporte de California (CBR) superiores al 5%, de tal modo que puede ser empleado en subrasantes, terraplenes, cubierta en rellenos sanitarios, andadores y ciclo pistas.

Algunos ejemplos de la aplicación de agregados reciclados se enlistan a continuación:

- Acondicionamiento de 16 Km. de caminos de terracerías en los Ex-ejidos de Xochimilco y San Gregorio (reciclaje de 20,000 m<sup>3</sup>. de RCD), Delegación Xochimilco.
- Acondicionamiento de 15 Km. de caminos en el Bosque de Tlalpan, Delegación Tlalpan.
- Línea 12 “Dorada” del metro (Recepción de 518,279 ton. de RCD y consumo de 114,431 ton. de agregados reciclados; principalmente subrasantes, sub-bases y bases hidráulicas)
- Autopista Urbana Sur (Recepción de 175,022 ton. de RCD y consumo de 11,918 ton. de agregados reciclados; principalmente sub-bases y bases hidráulicas).



- Parque Bicentenario (Reciclaje “In situ” de la totalidad de los RCD generados durante la construcción del parque), Ex-Refinería 18 de Marzo, Delegación Azcapotzalco.
- Reciclado “In situ” de Banquetas en la segunda sección de Chapultepec (circuito 3.6 Km.) para la elaboración de bases hidráulicas en plazas y banquetas. Delegación Miguel Hidalgo.

### ***Puente atirantado sobre el rio Turia***

Puente atirantado mixto de concreto reciclado de 145 metros de longitud. La geometría resuelve de forma eficaz los condicionantes hidrológicos al evitar los apoyos en el cauce y elevar en 4 metros la rasante del tablero. Los materiales de demolición del puente preexistente se reutilizaron en el concreto de la nueva estructura (Cmd Domingo y Lazaro ingenieros, 2016) (Ilustración 5).



*Ilustración 5 Puente atirantado sobre el rio Turia (Valencia, España).*

La obra propuso la utilización de concreto reciclado en el puente atirantado de concreto armado, situado en Manises (Valencia). El objetivo del proyecto fue reciclar el material de concreto procedente de esta estructura para la fabricación de parte del concreto de la nueva estructura, utilizando una sustitución del 20% del agregado natural por agregado reciclado en el concreto de un tramo de la losa, cumpliendo así con la normativa establecida en la instrucciones de concreto estructural (EHE08), (Alaejos Gutiérrez, 2008).



### 4.3.7. Implementación de Agregados Reciclados Internacionalmente.

A partir de los cambios climáticos en los últimos tiempos, la sociedad ha tomado conciencia del problema que conlleva la generación de residuos. El problema ambiental que producen los RCD (Residuos de construcción y demolición) se deriva tanto del volumen de su generación como de su tratamiento. Por eso muchos de los gobiernos europeos han establecido normas y procedimientos para fomentar su reutilización.

Lamentablemente existen pocos países que dispongan de normativas para la implementación de agregados reciclados, encontrándose distintas tendencias en cuanto a la calidad de los agregados, al contenido máximo permitido en el concreto o a las aplicaciones de éste. Así por ejemplo, mientras las recomendaciones que establece Rilem, que ha sido uno de los primeros organismos en establecer limitaciones (adoptadas por Bélgica o Hong Kong) permiten la implementación de agregados reciclados con absorciones menores al 10% en concretos de hasta 50N/mm<sup>2</sup> (509.85 kg/cm<sup>2</sup>), las normas japonesas son mucho más estrictas, y restringen agregados con absorciones menores a 7% en concretos de hasta 24N/mm<sup>2</sup> (244.56 kg/cm<sup>2</sup>) (Alaejos Gutierrez, 2002).

Se ha producido en diferentes países europeos un incremento en la producción de RCD de forma paralela a su crecimiento económico. La tabla 10 muestra los índices de reciclaje de los RCD, durante el período 2005-2006. Se observa que países como Dinamarca, Estonia y Holanda son países que encabezan la lista de reciclado de RCD.

Tabla 10 Reciclaje de RCD en la U.E. 2005-2006 (European Topic Centre)

País	Índice de reciclado de RCD	País	Índice de reciclado de RCD
Dinamarca	95.90	Noruega	61.00
Estonia	94.90	Lituania	59.70
Holanda	95.10	Austria	59.50
Alemania	86.30	Polonia	28.30
Irlanda	79.50	República Checa	23.00
Bélgica	67.50	Hungría	15.50
Reino Unido	64.80	España	13.60

En España, de acuerdo con el Plan Nacional de Residuos (PNIR 2008-2015) se estableció como objetivo para el 2015 tratar el 55% de los RCD que se generarán y reciclar el 35%, y con ello tener para antes del 2020 el 70% en peso de los RCD. Las especificaciones técnicas que se refieren a la utilización de agregados reciclados para la construcción de pavimentos rígidos se encuentran en la normativa UNE-EN,



en el pliego de prescripciones técnicas generales para Obras de Conservación de carreteras. También se cuenta con el Anejo 15, donde se indican las condiciones que deberán tener los agregados reciclados y sus posibles aplicaciones. Se establecen criterios de durabilidad: un uso no mayor de 20% de agregado reciclado en concretos estructurales, ya que indican que la durabilidad del concreto no se ve afectado y es muy similar su comportamiento, y permite un 100% de agregados reciclados en concretos que cumplan con una resistencia mínima de  $15 \text{ N/mm}^2$  ( $150.5 \text{ kg/cm}^2$ ).

La mayoría de investigaciones, ensayos y aplicaciones se han centrado en los agregados reciclados mixtos, con un porcentaje de fracción cerámica entre el 10% y el 70% en peso y de asfalto hasta el 5% (y en algún caso, hasta el 30% como máximo). De un estudio de 77 plantas de reciclaje analizadas en la Guía Española de Agregados Reciclados, el 55% producen exclusivamente agregados mixtos, el 30% produce las dos categorías de agregados reciclados y, finalmente, solo el 15% produce exclusivamente agregados de concreto (GERD, 2012).

La normativa holandesa especifica agregados reciclados con un contenido mínimo del 80% de concreto procesado, con densidades de  $2100 \text{ kg/m}^3$ . En aplicaciones de carreteras se admite un 5% de asfalto. (ACHE grupo de trabajo Hormigon, Septiembre 2006).

En la tabla 11 se muestran las especificaciones Internacionales para agregados reciclados (Sánchez Rodríguez, 2011).



Tabla 11 Especificaciones internacionales para los diferentes tipos de Agregados Recicladados (Sánchez Rodríguez, 2011; Sánchez, 2004).

Requisitos	RILEM			Japón			Bélgica		Hong Kong	Alemania				Reino Unido		Australia	Brasil	España EHE-08	Holandesa	
	I	II	III	1	2	3	GBSBI	GBSBII		1	2	3	4	RCA	RA					
Densidad seca (kg/m <sup>3</sup> )	≥1500	≥2000	≥2400	≥2200	≥2200	≥2200	≥1600	≥2100	≥2200	≥2200	≥2200	≥1800	≥1500	-	-	≥2100	-	-	≥2100	
Absorción (%)	≤20	≤10	≤3	≤3	≤5	≤7	≤18	≤9	≤10	≤10	≤15	≤20	-	-	≤10	≤12	≤10	-		
Densidad <2200kg/m <sup>3</sup> (%)	-	≤10	≤10	-	-	-	-	≤10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Densidad <1800kg/m <sup>3</sup> (%)	≤10	≤1	≤1	-	-	-	≤10	≤1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Densidad <1000kg/m <sup>3</sup> (%)	≤1	≤0,5	≤0,5	-	-	-	≤1	≤0,5	≤40	-	-	-	-	≤1	≤1	-	-	≤1	-	
Externos (metales, vidrios) (%)	≤5	≤1	≤1				≤1	≤1	≤0,6					≤5	≤1	≤2	≤3	≤1	-	
Índice de lajas	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	≤40
Índice de trituración	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	≤30	-	-	-	
Contenido de metales (%)	≤1	≤1	≤1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Contenido de materia orgánica (%)	≤1	≤0,5	≤0,5	-	-	-	≤0,5	≤0,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	≤0,5	
Contenido de finos (<0,063mm) (%)	≤3	≤2	≤2	-	-	-	≤5	≤3	≤4	≤4	≤4	≤4	≤4	≤5	≤3	-	-	-	≤3	
Pérdida por limpieza (%)	-	-	-	≤1	≤1	≤1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	≤1	-	-	-	
Resistencia a las heladas (%)	-	-	-	≤12	≤12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	



Contenido de arenas (<4mm) (%)	≤5	≤5	≤5	-	-	-	-	-	≤5	-	-	-	-	-	-	-	-	≤5	
Contenido de sulfatos (SO3) (%)	≤1	≤1	≤1	-	-	-	≤1	≤1	≤1	-	-	-	-	≤1	≤1	-	≤1	≤0,8	≤1%
Contenido de cloruros (%)	-	-	-	-	-	-	≤0,06	≤0,06	≤0,05	≤0,04	≤0,04	≤0,15	≤0,15	-	-	-	≤1	≤0,05	≤1% ≤0.5%
Contenido de asfalto (%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	≤1	≤1	-	≤5	≤10	-	-	≤1	
Contenido de material cerámico (%)	≤100	-	-	-	-	-	≤100	-	-	-	≤30	≥80	-	≤100	≤100	-	-	≤5	
Desclasificados inferiores (%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	≤10	

- El agregado tipo 1 es el de mayor calidad y se puede emplear en concreto en masa o armado con fines estructurales, el agregado tipo 2 es adecuado para concreto en masa o lajas de concreto y el tipo 3 (agregados procedentes mayoritariamente de escombros de fábrica de ladrillo) para concretos pobres.
- El agregado tipo GBSB-I correspondería al agregado Tipo I de la RILEM, compuesto principalmente de escombros de fábrica de ladrillo, mientras que el agregado GBSB-II es similar al tipo II, y correspondería a agregado procedente mayoritariamente de concreto.



Según las especificaciones de la RILEM, se distinguen tres tipos de agregados reciclados en su composición u origen (Tabla 12):

*Tabla 12 Clasificación de agregados reciclados Según RILEM. (Sánchez, 2004)*

TIPO	ORIGEN
<b>TIPO I</b>	Agregados procedentes mayoritariamente de escombros de fábrica de ladrillo (definidos en este capítulo como agregado cerámico).
<b>TIPO II</b>	Agregados procedentes mayoritariamente de escombros de concreto (contenido de cerámicos <10%).
<b>TIPO III</b>	Agregados compuestos por una mezcla de agregados naturales superior al 80% y agregados TIPO I inferior al 10% (o hasta un 20% de agregado TIPO II).

Las especificaciones belgas para el uso del agregado reciclado (Páramo, 2011) son muy similares a las recomendaciones de la RILEM, estableciendo una clasificación del agregado reciclado en dos grupos, GBSB-I y GBSB-II (Ver Tabla13).

*Tabla 13 Clasificación de los agregados reciclados según la norma belga ( Páramo, 2011).*

TIPO	ORIGEN
<b>GBSB-I</b>	Agregados procedentes de residuos cerámicos
<b>GBSB-II</b>	Agregados procedentes mayoritariamente de escombros de concreto.

La norma alemana por su parte, establece cuatro categorías de agregado reciclado, en función también de la composición de este, según los criterios que se recogen en la siguiente Tabla 14.

*Tabla 14 Clasificación de los agregados reciclados según la norma DIN 4223 (Sánchez, 2004)*

TIPO	ORIGEN
<b>TIPO 1</b>	Agregados procedentes mayoritariamente de escombros de concreto o agregados minerales ( $\geq 90\%$ ) y con un contenido máximo de clínker, cerámica y / o gres calcáreo del 10%.
<b>TIPO 2</b>	Agregados procedentes mayoritariamente de escombros de concreto o agregados minerales ( $\geq 70\%$ ) y con un contenido máximo de clínker, cerámicos y / o gres calcáreo del 30%.
<b>TIPO 3</b>	Agregados procedentes mayoritariamente de escombros de cerámicos ( $\geq 80\%$ ), con un contenido máximo de materiales procedentes de concreto o agregados minerales del 20%.
<b>TIPO 4</b>	Agregados procedentes de la mezcla de RCD con un contenido mínimo del 80% de material procedente de concreto, agregados minerales o productos cerámicos.



De acuerdo con la normativa de Reino Unido BRE 433 (Building Research Establishment<sup>4</sup>), la clasificación de agregados reciclados es igual a la que maneja RILEM, con los siguientes límites de contenido de ladrillos (Tabla 15).

Tabla 15 Composición de agregados reciclados según BRE 433

Clase	Origen	Contenido de ladrillo
RCA 1	Fábrica de Ladrillo	0-100%
RCA 2	Concreto	0-10%
RCA 3	Concreto + fábrica de ladrillo	0-50%

La granulometría de los agregados reciclados varía según el proceso de trituración que se realice, y puede ser modificada mediante pequeños ajustes de la apertura de las trituradoras. Tal y como se ha comentado anteriormente, las normativas existentes dan los siguientes requisitos (Tabla 16<sup>5</sup>):

Tabla 16 Requisitos granulométricos de los agregados reciclados para la fabricación de concreto según las normas existente, para tamaños de 19.0 a 4.75 mm (Páramo, 2011).

Tamaño nominal, mm (pulg)	Porcentaje en peso que pasa (%)				
	19 ( <sup>3</sup> / <sub>4</sub> )	12.5 ( <sup>1</sup> / <sub>2</sub> )	9.5 ( <sup>3</sup> / <sub>8</sub> )	No. 4 (4.75)	No. 16 (1.18)
<b>Norma Japonesa</b>	95 a 100	-----	10 a 60	0 a 15	---
<b>Norma Belga</b>	90 a 100	-----	30 a 65	0 a 15	0 a 5

<sup>4</sup> Instituto de Gobierno de Reino Unido dedicado a la investigación, asesoría y desarrollo de experiencias para sectores de la construcción y del entorno construido en el Reino Unido

<sup>5</sup> Los requisitos de la norma japonesa se tomaron para especificaciones granulométrías para concreto en edificación, para la normativa belga se tienen diferentes rangos que se pueden ajustar a los porcentajes de peso que pasan a partir de los diferentes tamaños de tamices.



## 5. METODOLOGÍA.

A continuación se enlistan una serie de pasos que se propusieron para llevar a cabo la experimentación:

1. Identificación de vertederos de residuos de concreto, así como distintas obras en construcción y demolición en la ciudad Morelia, Michoacán y sus áreas circundantes. La selección será determinada de acuerdo a la ubicación y disponibilidad de material.
2. Acopio del material en forma selectiva, cuidando que se encuentren libres de residuos como plásticos, acero, cartón y vidrio, entre otros. El material trasladado a la planta trituradora será colocado en cajones para su almacenamiento en un área específica.
3. Trituración de los materiales pétreos heterogéneos:
  - a. **Agregado Grueso reciclado de la torre médica.** El triturado se llevó a cabo en el Instituto de Investigaciones Metalúrgicas de la Universidad Michoacana.
  - b. **Agregado Grueso reciclado Mixto.** El triturado se llevó a cabo en una planta industrial de producción de agregados de la localidad (SUPRA CONTRUCCIONES, SA DE CV).
4. Caracterización física, química y geométrica del material reciclado, en comparativa con agregados convencionales, las cuales son:
  - a. Peso volumétrico seco suelto para obtener el peso de las partículas sólidas por unidad de volumen, expresado en kg. por metro cúbico.
  - b. Densidad, a obtener como la relación de la densidad absoluta, incluyendo sus vacíos.
  - c. Porcentaje de absorción, para determinar la cantidad de agua absorbida por el material pétreo previamente saturado en agua durante 24 horas.
  - d. Análisis granulométrico para clasificar por tamaño las partículas del material pasándolo por una sucesión de mallas, obteniendo el peso de los retenidos como porcentaje de la muestra total.
  - e. Porcentaje de desgaste, a fin de conocer la calidad del material pétreo en cuanto al grado de alteración y presencia de planos de debilitamiento que pudieran provocar una desintegración de las partículas.
  - f. Coeficiente de forma de los agregados gruesos, para determinar cómo se encuentra la superficie de contacto entre agregados.



- g. Índice de lajas y partículas alargadas para conocer el acomodo de las partículas y poder determinar su comportamiento ante cargas.

Las últimas 3 pruebas son exclusivamente para agregados que se utilizan en concretos de pavimentos rígidos.

5. Identificación de aditivos al concreto, para mejorar sus características físicas, principalmente porosidad y absorción que repercuten en la trabajabilidad en el momento del colado.
6. Diseño de mezclas a partir del método ACI.
7. Curado de las muestras de concreto: cilindros de 10 x 20 cm, vigas de 15 x 15 x 60 cm, para las edades de pruebas. Dichas pruebas son: resistividad eléctrica, velocidad de pulso ultrasónico, resistencia a la compresión, Módulos de ruptura, Fagerlund, entre otras.

### 5.1. Obtención y trituración del agregado.

Para llevar a cabo una comparativa entre diferentes tipos de agregados reciclados se utilizaron agregados de diferentes sitios de recopilación. Se observó que ninguno de los agregados reciclados presentara impurezas del tipo madera, vidrios, plásticos, etc. ni la presencia de arcillas. Independientemente de otros factores, el origen de los agregados estará influenciado en características de los agregados, que fundamentalmente estarán vinculadas al envejecimiento y grado de hidratación del mortero adherido.

**5.1.1. Agregados reciclado de la torre médica:** del Instituto Mexicano del Seguro Social, ubicada en la avenida Madero Poniente No. 1200, C.P. 58000, de la ciudad de Morelia, Michoacán, México. El triturado se llevó a cabo en el Instituto de Investigaciones Metalúrgicas de la Universidad Michoacana. (Ilustración 6).



*Ilustración 6 Torre Médica principal del Instituto Mexicano del Seguro Social, Trituradora marca Denver de quijadas fijas.*



La trituradora marca Denver de quijadas fijas tiene 5 cm por 10 cm de separación entre quijadas (Ilustración 6). El dimensionamiento de las quijadas dio el parámetro para la elección de bloques en el lugar de la demolición.

Una vez triturado el material se realizó una clasificación con respecto a su diámetro, por medio de la malla número 4. El material que pasa la malla número 4, es decir, material con dimensiones menores a 4.76 mm, correspondían a material que podría sustituirse por arena. Mientras, el material que se retenía en la malla número 4 se podría sustituir por la grava. Se lograron triturar 826 kg de los cuales el 67.67% correspondía a grava y 32.33% correspondía a arena. Aproximadamente un tercio del material era arena.

**5.1.2. Agregado reciclado Mixto:** Se recopilaron diferentes tipos de piezas de concreto con la finalidad de tener una muestra representativa de lo que podría ser en campo una muestra de agregados reciclados. Las diferentes muestras representativas fueron: especímenes de concreto ya probados con diferentes  $F'c$  de proyecto, piezas de pavimentos rígidos de banquetas de la ciudad de Morelia que ya habían cumplido su vida útil, piezas de la torre del seguro social, entre otras piezas de concreto que se recopilaron. (Ilustración 7).



*Ilustración 7 Especímenes de concreto ya probados, piezas de concreto en banqueta, calle Aldama.*

Una vez hecha la recopilación de los diferentes tipos de piezas de concreto, se llevó a cabo la trituración del material en el banco de materiales de la empresa Supra-Construcciones SA de CV, ubicado en el Km 55 de la carretera Morelia- Salamanca No. 5856. De la trituración se obtuvo  $\frac{3}{4}$  partes de grava y  $\frac{1}{4}$  de arena. (Ilustración 8).



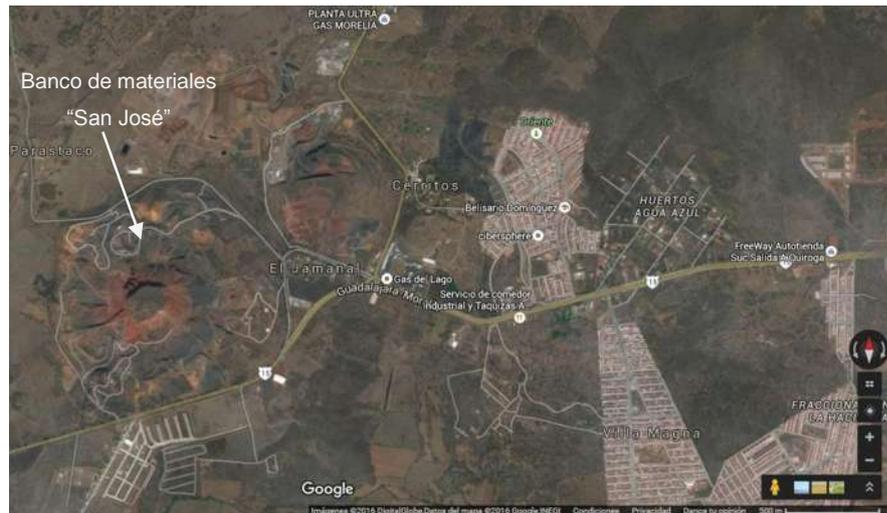
*Ilustración 8 Trituración en el Banco de Materiales Supra-Construcciones.*

**5.1.3. Agregado Grueso Natural:** Se decidió utilizar grava triturada, ya que la de origen volcánico es demasiado porosa, afectando así las propiedades mecánicas del agregado. Los materiales pétreos empleados en la presente investigación son materiales de la región, el agregado pétreo grueso, es decir la grava, se obtuvo del banco “La rocka” ubicado en la localidad de Cuto de la Esperanza en Tarímbaro, Michoacán. (Ilustración 9).



*Ilustración 9 Localización del banco de materiales “La rocka”, ubicado en la localidad de Cuto de la Esperanza en Tarímbaro, Michoacán.*

**5.1.4. Agregado Fino Natural:** Este material se extrajo del banco de materiales “San José”, en la localidad de Cerritos Morelia, Michoacán. (Ilustración 10).



*Ilustración 10 Localización del banco de materiales “San José”, en la localidad de Cerritos Morelia, Michoacán.*

El banco de materiales se encuentra a espaldas del banco de materiales “El Jamacal”. Para el caso en particular de este trabajo, se tomó una pequeña porción, cerca de  $1.5 \text{ m}^3$ , de un lote de aproximadamente  $360 \text{ m}^3$ . Uno de los factores para la elección del material a emplear fue la cercanía y factibilidad, ya que es uno de los bancos de material que abastece a la ciudad de Morelia.

## **5.2. Caracterización del material.**

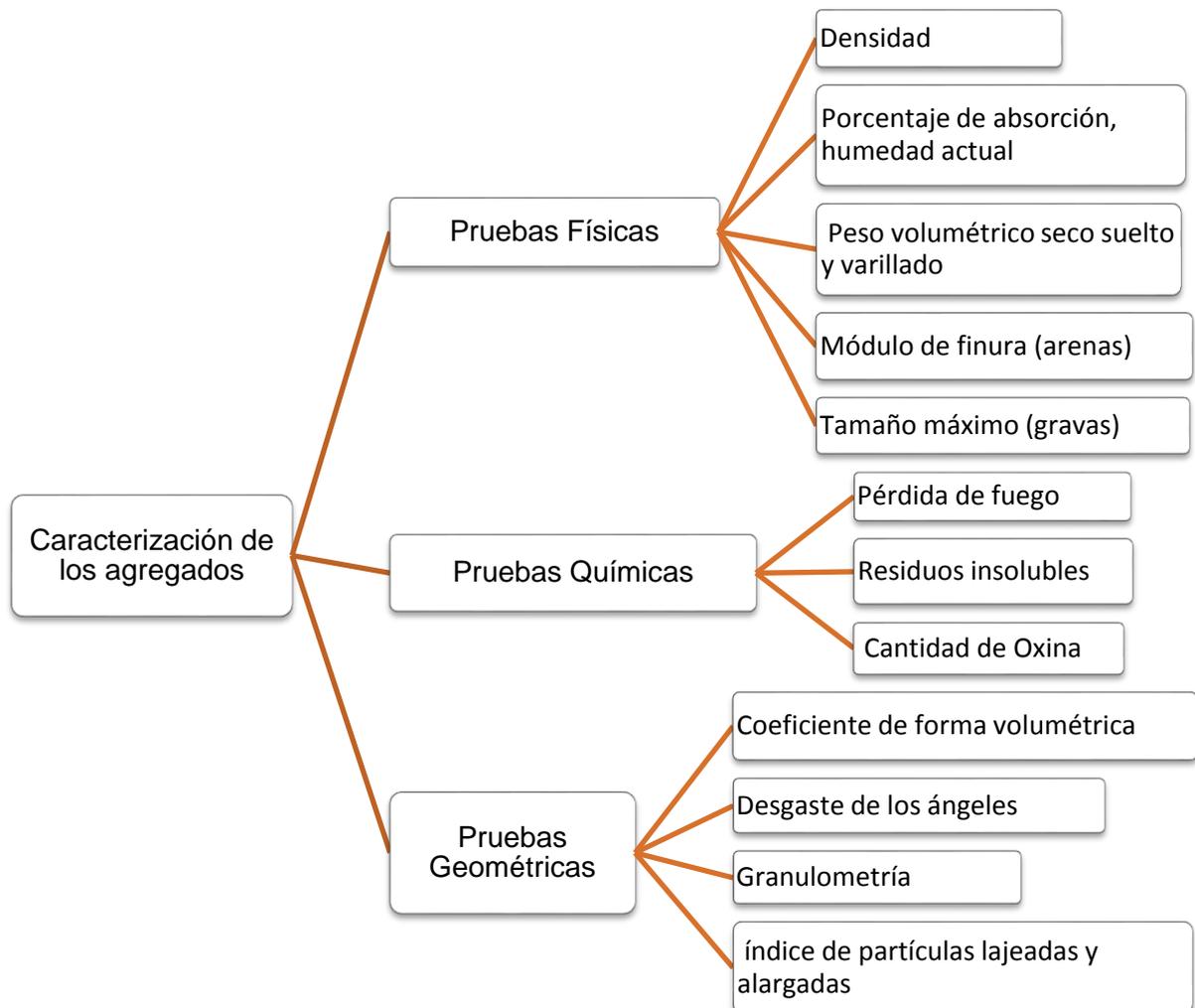
Las pruebas físicas y geométricas se llevaron a cabo en el laboratorio de materiales “Ing. Luis Silva Ruelas” de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Las pruebas en los agregados finos y gruesos fueron: densidad, porcentaje de absorción, humedad actual, peso volumétrico seco suelto, peso volumétrico seco varillado, granulometría, módulo de finura (arenas) y tamaño máximo (gravas), que son las pruebas generalmente se le hacen a los agregados. Como parte de los objetivos era obtener un estudio más a fondo de los agregados reciclados, se realizaron las siguientes pruebas: coeficiente de forma volumétrica, desgaste de los ángeles, índice de partículas lajeadas y alargadas, tanto a los agregados gruesos reciclados como a los naturales.

En el caso de las pruebas químicas, se llevaron a cabo en el laboratorio de la Junta de Andalucía en convenio con la Universidad de Sevilla, de acuerdo al Pliego de Prescripciones Técnicas Generales. Las pruebas a los agregados fueron: pérdida de fuego, residuos insolubles. Las pruebas al cemento fueron: Cantidad de Hierro y Aluminio, óxido de magnesio, óxido de calcio. Se realizaron las pruebas de cantidad



de sulfato y densidad aparente para determinar la cantidad de cemento a posteriori para los agregados reciclados.

Para tener un panorama más amplio de la caracterización de los materiales, a continuación se muestra un diagrama de las pruebas que se llevaron a cabo:





### 5.3. Elaboración de especímenes.

Los especímenes de concreto se elaboraron de acuerdo a las Normas Mexicanas (NMX) vigentes, siguiendo el método del ACI (American Concrete Institute) para el cálculo del proporcionamiento. Con un cemento Portland compuesto de 30 MPa de resistencia (CPC-30R) de fabricación mexicana, equivalente al Portland tipo I con adición de caliza (NMX-C-414-ONNCCE, 1999). Para una comparativa se realizaron 8 mezclas distintas (Tabla 17):

*Tabla 17 Identificación de las Mezclas elaboradas.*

<b>Identificación de la Mezcla</b>	<b>Fecha de Elaboración</b>
<i>Tes-Em 1%</i>	22/07/2014
<i>Tes.Em 4%</i>	01/08/2014
<i>Cr-Em 1%</i>	05/08/2014
<i>Cr-Em 4%</i>	06/08/2014
<i>Tes-Cr-FI</i>	07/08/2014
<i>Tes-FI</i>	23/07/2014
<i>Tes-2-Cr</i>	08/05/2015
<i>Tes-2</i>	01/05/2015

Tomando un  $f'c$  de 350 kg/cm<sup>2</sup> de proyecto para las diferentes mezclas, y una relación agua/cemento de 0.48. Se adiciono con base a lo experimentado 0.66% del peso del cemento en fluidificante en las mezclas con abreviatura FI, para ayudar a tener una buena trabajabilidad y fluidez en las mezclas. Para las mezclas con abreviatura Em se adicionó el 1% y 4% en peso de cemento. Esto se determinó a partir de la prueba de tiempos de fraguado, en la cual se observó que adiciones del 1% al 6% retardaban los tiempos de fraguado inicial, siendo no mayores a 7 horas. La normativa mexicana NMX-C-177-1997 ONNCCE, de la industria de la construcción, indica que las adiciones tienen que estar por debajo del 5% en todos los casos.

El  $f'c$  de 350 kg/cm<sup>2</sup> se decidió en base a la resistencia a la flexión. Para la elaboración de un concreto de resistencias moderadas de 20 a 40 MPa (204-408 kg/cm<sup>2</sup>) se obtienen resistencias a la flexión de 45 a 55 Kg/cm<sup>2</sup> a los 28 días, que se han usado convencionalmente en el diseño de pavimentos rígidos.

En base a las pruebas, se determinó que el agregado fino reciclado no cumplía con las especificaciones. Todos los estudios y experiencias previas coincidían en que la fracción de agregado fino reciclado empeoraba sustancialmente la calidad del concreto reciclado, y por tanto se desechó. El uso de agregados finos reciclados



aumenta la retracción por secado y de la fluidez debido a la mayor cantidad de agua que requiere el mezclado.

Se procedió a la elaboración de cilindros para las pruebas tales como: resistencia a la compresión axial en cilindros de 10 centímetros de diámetro por 20 centímetros de altura, a los cuales también se les realizaron pruebas no destructivas: Resistividad eléctrica y velocidad de pulso ultrasónico. Para ellos se elaboraron 3 especímenes por edad para cada una de las mezclas. Para la prueba de módulos de ruptura se elaboraron vigas de 15 x 60 cm para probarse tanto a edades tempranas como tardías. (Ilustración 11).



*Ilustración 11 Especímenes de 10 cm x 20 cm y vigas de 15 cm x 60cm de la Mezcla Testigo.*

Para la prueba de Fagerlund se cortaron los cilindros para tener especímenes de 10 cm de diámetro por 5 cm de altura. Se utilizaron 4 especímenes por cada mezcla.

La calidad de elaboración de probetas se puede conocer por medio de la dispersión entre dos o más especímenes de la misma mezcla y edad. De acuerdo con la norma ASTM C 306, la dispersión no debe ser mayor al 6.6%.



## 6. DESAROLLO EXPERIMENTAL.

Las pruebas físicas y geométricas de la experimentación a los agregados fueron realizadas conforme a normas mexicanas. Dichas pruebas se encuentran en el Libro de Análisis de Materiales del Laboratorio de Materiales “Ing. Luis Silva Ruelas”, de la Facultad de Ingeniería Civil, de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Las pruebas químicas se llevaron a cabo en el laboratorio de la Junta de Andalucía en convenio con la Universidad de Sevilla, de acuerdo al Pliego de Prescripciones Técnicas Generales. Cabe resaltar que para realizar cada una de las pruebas fue necesario obtener una muestra representativa. Para ello se llevó a cabo el procedimiento de cuarteo. La presente prueba está referida a la norma NMX–C–170–1997–ONNCCE.

### 6.1. Pruebas al cemento.

#### 6.1.1 Tiempos de Fraguado.

Los tiempos de fraguado en el cemento hidráulico se utilizan como un parámetro para conocer el comportamiento del concreto en estado fluido y el plazo de tiempo en que alcanza dureza. La determinación de tiempo de fraguado puede emplearse para determinar los efectos de variables, tales como la temperatura, cemento, diseño de mezclas, aditivos, modificadores del tiempo de fraguado y características del endurecimiento del concreto. En este caso, se emplea con la finalidad de saber la cantidad adecuada de emulsión que se debe agregar a la mezcla de mortero.

Para poder realizar esta prueba, se necesita el aparato de Gillmore. Este elemento tiene dos agujas, la de menor área para determinar el fraguado inicial y la de mayor área para el fraguado final. La norma que rige esta prueba es la (NMX-C-059-ONNCCE, 2010). En esta norma se establece que el tiempo de fraguado inicial debe ser mayor a 45 minutos y el fraguado final no debe exceder las 7 horas.

#### PROCEDIMIENTO

- Se aplana la muestra de la pasta sobre el cuadro de cristal formando una circunferencia de aproximadamente 12 cm de diámetro y 1 cm de espesor. Para nuestro caso fueron 300 gramos de cemento y 100 ml de agua.
- Para determinar el fraguado inicial, se coloca la circunferencia por debajo de la aguja, se deja caer la aguja en la pasta y si ésta ya no deja marca, se mide el



tiempo en el que entró en contacto el agua con el cemento y en el que ya no dejó marca la aguja sobre la pasta. De igual manera se realiza para el fraguado final, usando en este caso la aguja de menor área.

El tiempo de fraguado inicial (límite de manejabilidad) es el tiempo que transcurre a partir del momento del contacto inicial del cemento con el agua, hasta que el mortero obtenido por el cribado del concreto presenta una resistencia a la penetración de 25 kg/cm<sup>2</sup>. El tiempo de fraguado final es el tiempo que transcurre a partir del momento en que el cemento entra en contacto con el agua, hasta que el mortero obtenido por el cribado del concreto presenta una resistencia a la penetración de 280.7 kg/cm<sup>2</sup>.

Se recomienda realizar la penetración cada 15 minutos para el fraguado inicial, y después de 5 horas cada media hora para el fraguado final.

### **6.1.2 Óxidos de Hierro y Aluminio.**

#### **PROCEDIMIENTO**

Al filtrado procedente de la determinación de sílice, llevado a 250 centímetros cúbicos, se le añaden 5 centímetros cúbicos de ácido clorhídrico concentrado, unas gotas de rojo de metilo y se calienta a ebullición. Se añade amoníaco concentrado gota a gota hasta que el color de la solución pase a amarillo marcado. Se filtra y lava el precipitado cuatro veces con solución caliente de nitrato amónico al 2 por 100. Se guarda el filtrado y se pasa el filtro con el precipitado al vaso donde se hizo la precipitación. Se disuelve aquel en 15 centímetros de ácido clorhídrico diluido (1:3) y caliente. Se desmenuza el filtro con la varilla de vidrio. Se diluye a 100 centímetros cúbicos con agua destilada caliente y se precipitan los hidróxidos como la primera vez. Se filtra y lava el precipitado sobre el filtro cuatro veces con solución caliente de nitrato amónico al 2 por 100. El filtrado obtenido se mezcla con lo anterior, guardándolos para la determinación de la cal. El precipitado se pasa a un crisol previamente pesado, se quema primero a baja temperatura hasta completa combustión del filtro y se calcina después entre 1000 a 1050°C hasta constancia de peso y en crisol abierto. El aumento de peso de la suma de óxidos de aluminio y de hierro. Para obtener el contenido de alúmina en el cemento se resta del tanto por ciento totales de óxidos de aluminio y hierro, calculados a partir de este peso, el tanto por ciento de óxido férrico determinado.



### CÁLCULOS:

$$Fe_2O_3 + Al_2O_3\% = 100 * \frac{P_2 - t}{P_1}$$

Donde:

$Fe_2O_3 + Al_2O_3\%$  = Cantidad de Óxidos de Hierro y Aluminio.

t = Peso de Crisol.

$P_1$  = Peso de la muestra.

$P_2$  = Peso después de la calcinación.

#### 6.1.3 Óxido de calcio.

### PROCEDIMIENTO

Los filtrados procedentes de la determinación de los óxidos de hierro y aluminio se llevan a ebullición después de haberles añadido unas gotas de amoníaco concentrado. Se añaden entonces 25 centímetros cúbicos de solución hirviente de oxalato amónico al 5 por 100 y se continúa la ebullición unos minutos. Se deja en reposo sobre baño de agua 15 ó 20 minutos, se filtra en caliente y se lava el precipitado con el chorro del frasco lavador, que contiene agua caliente. Sin separar el filtro de la pared del vaso, se completa el volumen con agua hirviente hasta 200 centímetros cúbicos, se agregan 10 centímetros cúbicos de ácido sulfúrico diluido (1:1) y se calienta hasta iniciarse la ebullición. Se valorará añadiendo solución de permanganato potásico 0.18N hasta obtener un color rosado persistente durante más de 10 segundos. Conforme a la normativa citada, corresponde muy aproximadamente 1 centímetro cúbico de la misma por cada 1 por 100 de óxido cálcico (Ilustración 12). De todas formas, si no corresponde a la indicada normativa la solución del permanganato de potásico empleada, conocido el equivalente en cal de 1 centímetro cúbico de la solución de permanganato empleada, se calcula el tanto por ciento de cal en el cemento.



*Ilustración 12 Solución proveniente de la prueba de la determinación de óxidos de hierro y aluminio en el cemento.*

CÁLCULOS:

$$CaO\% = .504 * \frac{Vf}{P_2 * t}$$

Donde:

CaO% = Contenido de óxido de calcio.

Vf = Volumen Final de recipiente.

t = Peso de Crisol.

P<sub>2</sub> = Peso después de la calcinación.

#### **6.1.4 Óxido de magnesio.**

PROCEDIMIENTO.

Después de acidificar con unas gotas de ácido clorhídrico concentrado el filtrado procedente de la determinación del óxido cálcico, se concentra a 250 centímetros cúbicos y se enfría a la temperatura ambiente, se agregan 10 centímetros cúbicos de solución de fosfato diamónico al 10 por 100 y a continuación, en pequeñas proporciones, 30 centímetros cúbicos de amoníaco. La solución se agita enérgicamente con la varilla de vidrio durante la adición del amoníaco y se continúa después agitando durante 10 minutos. Déjese la solución en reposo hasta el día siguiente, fíltrese y lávese el residuo unas diez veces con amónico diluido (1:20) pásense filtro y precipitado a un crisol previamente pesado, caliéntese gradualmente hasta carbonización y combustión del filtro, calcínese luego entre 1000 y 1050° C y pésese el crisol, una vez frio, con el pirofosfato magnésico formado. Multiplicando el peso del pirofosfato magnésico por 0.3621 se obtiene el peso del óxido magnésico contenido en la muestra analizada.



Nota: En los cementos Portland cuyo contenido en magnesia sea superior al límite establecido para estos cementos, convendrá ensayar el contenido de manganeso para, en caso de ser esto notable, proceder a la separación cuantitativa de manganeso y evitar así su posible precipitación conjunta con el magnesio.

CÁLCULOS:

$$MgO\% = 36.21 * \frac{P_2 - t}{P_1}$$

Donde:

$MgO\%$  = Contenido de Óxido de Magnesio.

t = Peso de Crisol.

$P_1$  = Peso de la muestra.

$P_2$  = Peso después de la calcinación.

## 6.2. Pruebas Físicas a los Agregados.

### 6.2.1. Humedad actual.

El objetivo es determinar el porcentaje de humedad que contiene el agregado en el momento en que se va a utilizar para elaborar una mezcla, para así poder realizar la corrección correspondiente por humedad. Esta prueba se realiza unas pocas horas antes de la elaboración de concreto para que sea más significativa.

EQUIPO.

- Muestra representativa de agregado de 500 gramos aproximadamente.
- Balanza con aproximación al décimo de gramo.
- Parrilla eléctrica.
- Charolas metálicas.
- Espátulas.
- Cristal.

PROCEDIMIENTO.

De la muestra representativa se pesan 300 gramos, registrando este valor como masa inicial de la muestra o masa húmeda actual (Mh). Posteriormente, esta muestra se coloca en una charola metálica sobre la parrilla eléctrica para hacer el secado del material moviéndolo con la espátula en forma constante para que el secado sea homogéneo hasta eliminar completamente la humedad del material. Para saber cuándo está seco el material, se coloca el cristal sobre el material y en el momento que ya no se empañe será cuando el material ya está seco. Procediendo a dejar enfriar



el material a temperatura ambiente y pesarlo. Este peso se registrará como masa final o masa seca de la muestra (Ms).

CÁLCULOS.

$$\% \text{ humedad actual} = \frac{Mh - Ms}{Ms} * 100$$

Donde:

Mh= masa de la muestra en gramos.

Ms = masa seca del material en gramos.

### 6.2.2. Humedad Superficial y Humedad de absorción.

El objetivo es determinar la capacidad máxima de absorción que tiene una arena expresada en porcentaje. 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 Fino: Se coloca en la charola, después se procede hacer el secado de la arena solo en forma superficial para realizar la eliminación de agua que tiene en exceso. Para saber cuándo la arena está seca superficialmente, se coloca el molde truncocónico dentro de la charola con el diámetro mayor hacia abajo, se llena el molde con la arena en tres capas distribuyendo 25 golpes dados con el pizón, dando 12 a la primera, 8 a la segunda y 5 a la tercera.



Inmediatamente después se retira el cono y si la arena trata de disgregarse quiere decir que ya está seca superficialmente. Por el contrario, si la arena mantiene la forma del cono significa que todavía tiene agua en exceso, y por lo tanto hay que seguir secando el material hasta que se obtenga el secado superficial.

- 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.

5. Para saber cuándo está seco el material, se coloca el cristal sobre el material. Si no lo empaña retiramos el material del fuego y lo dejamos enfriar un poco, procediendo a pesarlo 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).

#### 6.2.3. Masa volumétrica seca y suelta (mvss).

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 (Ilustración 13).

## 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>).



*Ilustración 13 Llenado del Recipiente para la obtención de M.V.S.S del agregado Fino.*

### 6.2.4. Masa Volumétrica Seca y Varillada (mvsv).

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 o báscula.
- Cucharón.
- Pala.

#### PROCEDIMIENTO.

Se procede a llenar el recipiente con agregado a volteo, 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 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>).

#### 6.2.5. 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 esperarían un comportamiento mejor en el concreto.

#### EQUIPO.

- Muestra representativa.
- Charolas.
- Espátulas.
- Parrilla eléctrica.
- Molde troncocónico, para el secado del agregado fino.
- Pizón.
- 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.

2. En la probeta (para agregados fino) o en el picnómetro (para agregados gruesos) 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, 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  $\text{cm}^3$ .

### 6.3. Pruebas Geométricas a los Agregados.

#### 6.3.1. Análisis Granulométrico.

El objetivo es pasar por una serie de mallas o tamices la muestra representativa para conocer la distribución de los diámetros de las partículas, conocer el módulo de finura y el tamaño máximo de partícula que se requiere como datos para realizar el proporcionamiento.

El análisis granulométrico es uno de los parámetros más importantes en la caracterización de los agregados, ya que se conocen los diferentes tamaños de partícula que se tienen. Por ejemplo, al tener cantidades de partículas uniformemente distribuidas con relación a su tamaño, tendremos mejor acomodo de las partículas y por consiguiente se requerirá menos pasta de cemento para cubrir espacios que el



agregado no puede. Lo ideal sería tener una granulometría uniforme, de acuerdo a lo establecido en la norma (NMX-C-111-ONNCCE, 2004), en donde de acuerdo al tamaño máximo del agregado se establece un rango del porcentaje que pasa para cada malla.

#### EQUIPO.

- Juego de mallas con abertura rectangular o circular:
  - Agregado Fino: mallas de la N° 4, 8, 16, 30, 50, 100,200
  - Agregado Grueso: mallas N° 2", 1 1/2", 1", 3/4", 1/2 ",3/8",1/4", y N° 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.

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

5. 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.

6. 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.

7. 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:

$$\% \text{ retenido} = \frac{\text{Peso Retenido}}{\text{Suma del peso Retenido}} * 100$$

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

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

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

$$\% \text{ Que pasa de la malla} = 100 - \% \text{ acumulativo de la malla}$$

5. Módulo de finura:

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

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 (Ilustración 14).



Ilustración 14 Dimensionamiento del agregado Grueso.

### 6.3.2. Partículas Alargadas y Lajeadas de Materiales Pétreos.

Esta prueba permite determinar el contenido de partículas de forma alargada y lajeada presentes en los materiales pétreos empleados en concretos. La prueba consiste en separar el retenido en la malla N° 4 de una muestra de materiales pétreos para determinar la forma de cada partícula, empleando para ello calibradores de espesor y de longitud.



## EQUIPO

- Juego de Mallas (Cribas). Fabricadas con alambre de bronce o de acero inoxidable de diversos calibres, tejidos en forma de cuadrícula con abertura, cucharón, charolas.
- Balanza con capacidad de 20 Kg y aproximación de 1.0 g.
- Máquina agitadora para las mallas.
- Calibrador de Espesores. Con la forma y dimensiones que se muestran en la Ilustración 15.



*Ilustración 15 Calibrador de Espesores.*

**Nota:** junto a cada ranura estarán marcadas las designaciones de las mallas que definen la fracción de prueba correspondiente.

- Calibrador de longitudes, con la forma y dimensiones que se muestran en la Ilustración 16.

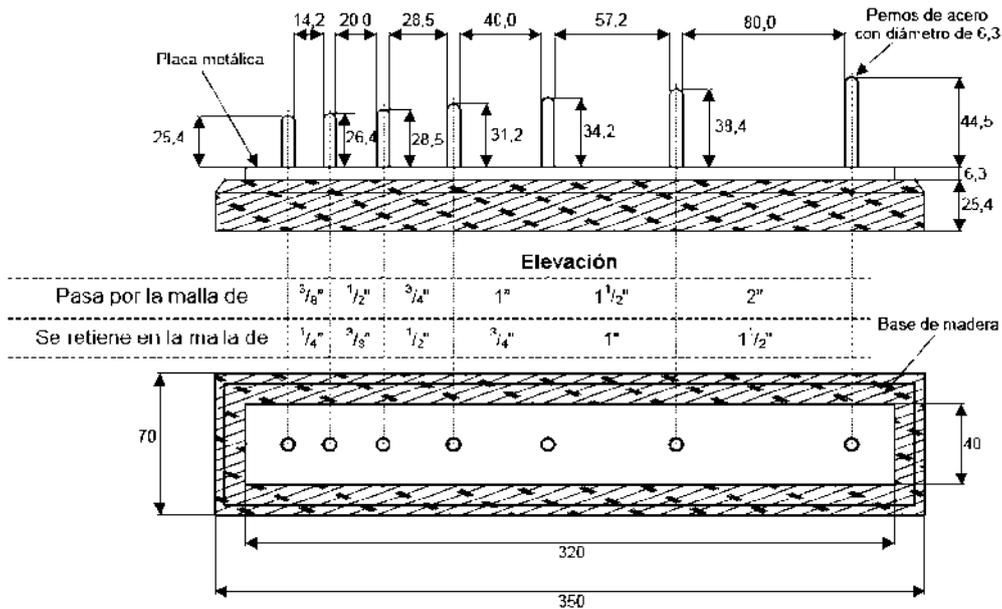


Ilustración 16 Calibrador de Longitudes.

**Nota:** En cada claro estarán marcadas las designaciones de las mallas que definen la fracción de prueba correspondiente.

## PROCEDIMIENTO

Obtención de la muestras de prueba.

Esta prueba se realiza por duplicado, por lo cual se requieren dos muestras. Para la obtención de cada una de éstas se aplicarán cuarteos sucesivos.

1. Se selecciona una porción del material retenido en la malla N° 4 que contenga más de 200 piezas.
2. Se registra el número de partículas retenido en cada malla verificando que al final el total de partículas retenidas por todas las mallas sea de 200 piezas como mínimo.
3. La masa total de cada una de las dos muestras obtenidas se designará como  $M_1$  y  $M_2$  respectivamente, en gramos.

### Para las partículas con forma alargada.

1. Para cada porción clasificada de cada una de las dos muestras de prueba, es decir, del número de partículas retenidas en cada malla, se verifica que cada pieza pasa por la ranura correspondiente del calibrador de longitudes, buscando la posición tal que su dimensión mayor sea paralela al eje del calibrador.



2. Se reúnen todas las partículas que hayan pasado por las ranuras del calibrador de longitudes y se determina su masa, designándola como  $m_a$ , en gramos.

**Para las partículas con forma de laja (aplanada).**

1. Para cada porción clasificada de cada una de las dos muestras de prueba, es decir, del número de partículas retenido en cada malla, se verifica que cada pieza pase por la ranura correspondiente del calibrador de espesores, buscando la posición más adecuada.
2. Se reúnen todas las partículas que hayan pasado por las ranuras del calibrador de espesores y se determina su masa, designándola como  $m_e$ , en gramos.

**CÁLCULOS**

Se calcula el porcentaje de las partículas con la forma alargada, en relación a la masa de la muestra de prueba utilizada, empleando la siguiente expresión:

$$Ca = \left( \frac{ma}{M} \right) * 100$$

Donde:

Ca= Por ciento en masa de partículas con forma alargada, (%)

$m_a$ = Masa de las partículas con forma alargada, determinada en cada una de las muestras de prueba, según corresponda, (g).

M= Masa total de la muestra para cada una de las muestras de prueba, es decir,  $M_1$  ó  $M_2$ , según corresponda, (g).

Se calcula el porcentaje de las partículas con la forma de laja, con relación a la masa de la muestra de prueba utilizada, empleando la siguiente expresión:

$$Cp = \left( \frac{me}{M} \right) * 100$$

Donde:

Cp= Por ciento en masa de partículas con forma laja, (%)

$m_e$ = Masa de las partículas con forma laja, determinada en cada una de las muestras de prueba, según corresponda, (g).

M= Masa total de la muestra para cada una de las muestras de prueba, es decir,  $M_1$  ó  $M_2$ , según corresponda, (g).



En caso de que se presente una variación entre los cálculos del contenido de partículas con forma alargada (Ca) igual al 20 % o mayor entre una muestra y otra. Se considerará para el cálculo del resultado de la prueba el promedio de ambas; en caso contrario se considerará el valor que resulte mayor. Lo mismo se hará para el contenido de partícula en forma de laja (Cp).

Se reportan los contenidos de partículas alargadas (Ca) y lajeadas (Cp), considerando lo indicado en la fracción anterior. Asimismo, se reporta como resultado de la prueba, el por ciento en masa de partículas alargadas y lajeadas, como la suma de Ca más Cp.

### **6.3.3. Desgaste Mediante la Prueba de los Ángeles en Materiales Pétreos.**

El objetivo de la prueba es determinar la resistencia a la trituración de los materiales pétreos empleados. 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.**

El equipo para la ejecución de la prueba estará en condiciones de operación, calibrado. Limpio y completo en todas sus partes. Todos los materiales por emplear serán de alta calidad, considerando siempre la fecha de su caducidad.

- 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**

##### **Procedimiento de la prueba.**

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.
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 18. 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.

Tabla 18 Cargas Abrasivas para 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	1½" - 1"	1 250 ± 25	12	5 000 ± 25
	25 - 19	1" - ¾"	1 250 ± 25		
	19 - 12,5	¾" - ½"	1 250 ± 10		
	12,5 - 9,5	½" - ⅜"	1 250 ± 10		
	Masa total de la muestra de prueba		5 000 ± 10		
B	19 - 12,5	¾" - ½"	2 500 ± 10	11	4 584 ± 25
	12,5 - 9,5	½" - ⅜"	2 500 ± 10		
	Masa total de la muestra de prueba		5 000 ± 10		
C	9,5 - 6,3	⅜" - ¼"	2 500 ± 10	8	3 330 ± 20
	6,3 - 4,75	¼" - N°4	2 500 ± 10		
	Masa total de la muestra de prueba		5 000 ± 10		
D	4,75 - 2	N°4 - N°10	5 000 ± 10	6	2 500 ± 15

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

### CÁLCULOS

$$Pa = \left( \frac{p_i - p_f}{p_i} \right) * 100$$

Donde

$P_a$ = Desgaste por trituración los ángeles (%)

$P_i$ = Masa inicial de la muestra de prueba, (g)



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

### **Precauciones para evitar errores**

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.

### **6.3.4. Coeficiente de Forma.**

La redondez mide la angulosidad o agudeza relativa de los vértices y las esquinas de una partícula. La redondez real es consecuencia de la resistencia al desgaste y a la abrasión de la roca de origen, y el grado de desgaste a que ha sido sometida la partícula. Un aspecto importante del agregado grueso es su esfericidad, que se define como la función del coeficiente de forma, ya que proporciona una idea cuantitativa de la regularidad del agregado, atendiendo a las características de la roca y del equipo de la trituradora. Tal fuera el caso de ser triturado, se debe de evitar a toda costa que los agregados tengan una forma de lascas y agujas, pues no son aptas para la construcción, tanto en obras de tierra como en la fabricación de concretos hidráulicos y asfálticos.



## PROCEDIMIENTO

Se toma una muestra representativa de agregado grueso, un mínimo de 50 piezas, totalmente secas, y se toma el peso bruto de las piezas. Se saturan las piezas por un mínimo de 24 horas, y se toma el peso saturado. Se extraen y se mide el diámetro de cada una de las partículas, éste tiene que ser la dimensión más larga que pueda tener la pieza.

## CÁCULOS

El coeficiente de forma se puede calcular de la siguiente manera:

$$Cf = \frac{6V}{\pi L^3}$$

Donde:

Cf = coeficiente de forma

V = volumen del fragmento

L = dimensión mayor del fragmento

En la Tabla 19 se enlistan diferentes valores representativos de coeficientes de forma:

*Tabla 19 Valores representativos del Coeficiente de Forma.*

Forma del Fragmento	Coeficiente de forma
Esférica	1
Canto Rodado	0.34
Grava triturada	0.22
Lajas	0.07
Agujas	0.01

La trituración por impacto suele dar coeficientes de forma altos los cuales suelen ser buenos en el análisis de los agregados.

## 6.4. Pruebas Químicas a los Agregados.

### 6.4.1. Pérdida al fuego.

#### PROCEDIMIENTO.

Se coloca 1 gramo del material en un crisol de porcelana pesado de unos 20 centímetros cúbicos de capacidad, pesado. Caliéntese el crisol, tapado al rojo vivo entre 900 y 1000 °C durante 15 minutos en la mufla eléctrica o, en su defecto sobre un mechero de gas y colocado el crisol por debajo del cual venga a quedar más de la



mitad del mismo. Enfriarse en el desecador, pésese y caliéntese nuevamente durante 15 minutos en las mismas condiciones para asegurar la constancia del peso. La diferencia entre la última pesada y el peso del crisol con el cemento da la pérdida al fuego correspondiente a la muestra empleada.

CÁLCULOS:

$$P_f\% = 100 * \frac{(P_1 + t) - P_2}{P_1}$$

Donde:

$P_f\%$  = Pérdida de fuego en porcentaje.

t = Peso de Crisol.

$P_1$  = Peso de la muestra.

$P_2$  = Peso después de la calcinación.

#### 6.4.2. Residuos Insolubles.

PROCEDIMIENTO.

Se coloca 1 gramo de cemento en una cápsula de porcelana de unos 12 centímetros de diámetro. Se añaden 25 centímetros cúbicos de agua destilada fría y 5 centímetros cúbicos de ácido clorhídrico concentrado poco a poco y removiendo con la varilla de vidrio. Se calienta el baño de agua, cubriéndola con un vidrio de reloj y removiendo el contenido con la varilla frecuentemente hasta el complejo ataque de cemento. Se diluye a 50 centímetros cúbicos con agua destilada y se deja en digestión sobre el baño de agua durante 15 minutos. Fíltrese en caliente y lávese bien el residuo con agua caliente. Los filtrados obtenidos se guardarán para la determinación del anhídrido sulfúrico. El filtro con el residuo se pasa a un vaso de precipitado de 150 centímetros cúbicos, se añaden 30 centímetros cúbicos de solución de carbonato sódico al 5 por 100 y se mantiene a una temperatura próxima a la de ebullición durante 15 minutos. Se filtran unas gotas de ácido clorhídrico diluido con agua caliente, se vierten luego sobre el filtro unas gotas de ácido clorhídrico diluido (1:9) y, finalmente, se sigue lavando con agua caliente hasta que el agua de lavado no acuse reacción sensible de cloruros. El filtro, con el residuo que contiene, se pasa a un crisol de porcelana previamente pesado, se quema lentamente primero, se calcina después entre 900 y 1000°C y se pesa. La diferencia de peso corresponde al residuo insoluble.



## CÁLCULOS:

$$Ri\% = 100 * \frac{P_2 - t}{P_1}$$

Donde:

Ri% = Residuos insolubles.

t = Peso de Crisol.

P<sub>1</sub> = Peso de la muestra.

P<sub>2</sub> = Peso después de la calcinación.

### 6.4.3. Prueba de Cantidad de Oxina.

El objetivo de esta prueba es determinar si el cemento que contienen los agregados reciclados contiene gran cantidad de compuestos de aluminio y, por tanto, si es altamente aluminoso.

#### PROCEDIMIENTO

Se requiere una cantidad de muestra de aproximadamente un gramo de muestra representativa. Se coloca en un tubo ensayo aforado. Se le añade hidróxido sódico hasta llegar al nivel marcado en el tubo de ensayo (10 ml), se agita la mezcla durante más de 2 minutos y menos de 3 minutos.

Se filtra la solución obtenida y se adicionan 6 gotas de ácido clorhídrico para neutralizar la disolución y crear un medio adecuado para que se produzca la reacción de la Oxina. Se añaden 15 gotas de ácido amónico y se deja unos instantes en reposo.

La prueba es meramente visual: cuando el precipitado presenta un medio cohesionado o grandes copos amarillentos flotando en la disolución, se manifiesta una gran presencia de compuestos de aluminio. De modo comparativo también se podrá hacer en escala de colorimetría.

### 6.5. Determinación del contenido de cemento en Agregados Reciclados.

#### PROCEDIMIENTO

1. Se corta un trozo de concreto con el disco de diamante para que pese menos de 4 Kg (capacidad de la balanza). Se hierve durante 1 hora y se deja enfriar el trozo de concreto bajo el agua, de modo que se llenen los huecos de agua.
2. Una vez frío, se le ata un hilo fino de nylon o bramante al trozo de concreto hervido y frío y se pesa sumergido en agua destilada, obteniéndose el peso en agua (P<sub>H<sub>2</sub>O</sub>).



3. Se saca del agua y sin escurrir, con objeto de que no se vacíen los poros abiertos del agua que contienen, se pesa el trozo de mortero y concreto, obteniéndose el peso en aire ( $P_{aire}$ ).
4. Después se coloca en una estufa a  $105^{\circ}\sim 110^{\circ}\text{C}$ , hasta constancia de peso, obteniéndose el peso seco ( $P_{seco}$ ).
5. El trozo de concreto seco se tritura a tamaño inferior de 1mm, se cuartea y se toma una muestra representativa de unos 25 gr y se determina el contenido de  $\text{SO}_3$ .

### 6.5.1. Determinación de $\text{SO}_3$ del Concreto.

#### PROCEDIMIENTO

Se pesan  $10 \pm 0.0001$  gr de muestra y se ponen en un vaso de 400 ml. Se añaden 100 ml de agua y 20 ml de HCl concentrado, gota a gota y agitando. Si se produce efervescencia por descomposición de los carbonatos, se efectuará lentamente y se continuará la adición de HCl hasta la total descomposición y permanencia de un exceso de ácido y se hierve durante 15 minutos.

Se filtra a través de un papel de banda blanda y se lava el residuo cuatro veces con agua destilada hirviendo. El filtrado se lleva a ebullición, se añaden unas gotas de rojo metilo y se añade gota a gota de  $\text{NH}_4\text{OH}$  hasta viraje al amarillo y después unas gotas en exceso, con objeto de precipitar los hidróxidos. Se hierve un par de minutos.

Se filtra, se acidifica con HCl hasta viraje al rojo y se añade una gota más. Se lleva a un volumen de unos 400 ml con agua destilada y se calienta a ebullición, precipitando el  $\text{SO}_3$  con solución hirviendo de  $\text{Cl}_2\text{Ba}$  al 10% gota a gota agitando. Se deja en reposo durante 24 horas y se filtra en frío a través de papel de filtro banda azul y se lava cinco veces con agua destilada fría.

El papel con el precipitado se seca y se calcina a  $1000^{\circ}\text{C}$ , se determina el % de  $\text{SO}_3$  del cemento empleado.

CÁLCULOS:

$$\text{SO}_3\% = 34.29 * \frac{P_2 - t}{P_1}$$

$$\text{Densidad Aparente} = 100 * \frac{P_{seco}(gr)}{P_{Aire}(gr) - P_{Agua}(gr)}$$



$$\text{Contenido de Cemento} = \text{Dens Apar} * \frac{SO_3 \text{ del Concreto}}{SO_3 \text{ del Cemento}}$$

Donde:

SO<sub>3</sub>% = cantidad de Silice.

t = Peso de Crisol.

P<sub>1</sub> = Peso de la muestra.

P<sub>2</sub> = Peso después de la calcinación.

### 6.6. Diseño de mezclas de concreto por el método del ACI (American Concrete Institute).

El método ACI consiste en seguir en forma adecuada una secuencia de pasos y determinar la cantidad de cada material tanto en masa como en volumen para 1 m<sup>3</sup> de concreto, el cual debe cumplir con las siguientes cualidades:

(1) Trabajabilidad aceptable, (2) Durabilidad, resistencia y apariencia uniforme del concreto y (3) Economía.

Los mencionados pasos se describen a continuación:

1. De acuerdo con las especificaciones de proyecto, se determina el esfuerzo de diseño (f'c) y el revenimiento. Mediante el análisis granulométrico de la grava se obtiene el tamaño máximo.
2. Mediante la Tabla 20 se obtienen los requisitos aproximados de agua de mezclado y contenido de aire, los cuales dependen del revenimiento y el tamaño máximo nominal del agregado grueso.
- 3.

Tabla 20 Requerimiento de agua, en kg/m<sup>3</sup> concreto para tamaño máximo, mm.

Agua, kg/m <sup>3</sup> concreto para tamaño máximo, mm.							
Revenimiento cm.	12.5	19	25	38	50	75	150
<b>Concreto con aire incluido</b>							
De 2.5 a 5.0	175	168	160	150	142	122	107
De 7.5 a 10	193	184	175	165	157	133	119
De 15 a 17.5	205	197	174	174	166	154	---

4. Para la obtención de la relación agua / cemento se entra a la Tabla 21, de acuerdo con el f'c de proyecto.

Tabla 21 Dependencia entre la relación agua/cemento y la resistencia a la compresión del concreto.

<i>Relación agua/cemento</i>
------------------------------



<i>Resistencia a la compresión a los 28 días ((kg/cm<sup>2</sup>))</i>	<i>Concreto sin aire incluido</i>	<i>Concreto con aire incluido</i>
<b>420</b>	0.41	--
<b>350</b>	0.48	0.40
<b>280</b>	0.57	0.48
<b>210</b>	0.68	0.59
<b>140</b>	0.82	0.74

- Se calcula el consumo de cemento al despejar éste de la fórmula a/c.
- Mediante la Tabla 22 se obtiene el volumen de agregado grueso por volumen unitario de concreto, mediante la utilización de los datos de tamaño máximo y módulo de finura.

*Tabla 22 Volumen de agregado grueso por volumen unitario de concreto.*

<i>Tamaño máximo de agregado, mm</i>	<i>Volumen de agregado grueso varillado en seco, por volumen unitario de concreto para distintos módulos de finura de la arena</i>			
	2.40	2.60	2.80	3.00
<b>9.5 (3/8")</b>	0.50	0.48	0.46	0.44
<b>12.5 (1/2")</b>	0.59	0.57	0.55	0.53
<b>19 (3/4")</b>	0.66	0.64	0.62	0.60
<b>25 (1")</b>	0.71	0.69	0.67	0.65
<b>37.5 (1 1/2")</b>	0.75	0.73	0.71	0.69
<b>50 (2")</b>	0.78	0.76	0.74	0.72
<b>75 (3")</b>	0.82	0.80	0.78	0.76
<b>150 (6")</b>	0.87	0.85	0.83	0.81

- Para la obtención de la masa de la grava requerida, se multiplica lo obtenido en la tabla 15 por su densidad; ya que  $\text{Peso} = \text{volumen} / \text{Densidad}$ .
- Una vez conocido los consumos de agua, cemento y grava, el material restante que completa un metro cúbico de concreto debe consistir en arena y aire que pueda quedar incluido.
- Por último, se lleva a cabo una corrección por absorción y humedad actual de los materiales pétreos. Una vez conocidos los porcentajes que absorben estos agregados y la humedad que tiene que hace un ajuste con respecto a la cantidad de agua que se requiere para la mezcla.

## **6.7. Pruebas Realizadas al Concreto Fresco.**

### **6.7.1. Fluidéz en el concreto.**



Conocida como la prueba de revenimiento. Esta prueba sirve para medir la consistencia, plasticidad y trabajabilidad del concreto fresco en términos de la disminución de altura.

La norma mexicana (NMX-C-156-ONNCCE, 2010) que establecen los parámetros indicados en la Tabla 23.

*Tabla 23 Tolerancia de la Fluidez esperada (NMX-C-156-ONNCCE, 2010).*

<b>Revenimiento</b>	<b>Tolerancia</b>
R < 5 cm	±1.5
5 cm < R < 10 cm	± 2.5
R > 10 cm	± 3.5

En la normativa de la Secretaría de comunicaciones y Transportes (SCT N-CMT-2-02-005-04, 2004), los revenimientos que se encuentran en consistencia media (5 cm < R < 10 cm) son para pavimentos, losas para construcción, losas estructurales, columnas reforzadas normales, trabes y concreto para bombeo reforzado.

#### EQUIPO.

- Cono de revenimiento.
- Charola.
- Cucharón.
- Varilla punta de bala de 5/8 de diámetro.
- Pala.
- Flexómetro.

#### PROCEDIMIENTO.

1. Se obtiene una muestra representativa en una charola.
2. Se humedece el molde de revenimiento y el cucharón.
3. Se coloca el molde en una superficie horizontal, plana, rígida, húmeda y no absorbente y se sujeta colocando los pies en las orejas que tienen especialmente para ello.
4. Se mezcla el concreto y se vierte usando el cucharón, se llena aproximadamente el molde con 3 capas de igual volumen. La primera capa corresponde a una altura aproximadamente de 7 cm, se le dan 25 golpes con la varilla punta de bala, la mitad se hará en forma inclinada, (esto por la forma del molde), por la periferia del molde, los demás en forma vertical.



5. La segunda capa debe de llegar a una altura de aproximadamente 15 cm, dando de la misma manera 25 golpes, pero con el cuidado de no pasar a la primer capa. Esto es porque la primera capa tendría más de 25 golpes lo que da un mayor acomodo y como resultado un mayor revenimiento.

6. Y la tercera capa se llena al extremo del molde calculando que quede sobrado, es decir, que sobrepase un nivel para que al varillar 25 veces la tercera capa el nivel sobrepase ligeramente el nivel de enrase del mismo. Si quedara por debajo del nivel se le agrega más concreto hasta llegar al nivel de enrase del molde.

7. Se enrasa el molde rodando la varilla sobre la superficie superior del molde.

8. Inmediatamente después, levantar el molde con cuidado en dirección vertical. La operación para levantar completamente el molde de 30 cm de altura debe hacerse en  $5s \pm 2s$ , alzándolo verticalmente sin movimiento lateral o torsional. La operación desde el comienzo del llenado hasta que levanta el molde debe hacerse sin interrupción y en un tiempo no mayor de 2.5 min. Debido a la fluidez del concreto este tenderá a derrumbarse de la forma del cono hasta incluso quedar extendido sobre la superficie horizontal.

9. Se medirá con un flexómetro ese derrumbe, colocando el molde usado en la prueba cerca de la mezcla. Colocando la varilla sobre el molde, se medirá del nivel de enrase del molde y la altura promedio del cono que forme la mezcla al soltarla. (Ilustración 17).



*Ilustración 17 Revenimiento para la mezcla testigo.*

## **6.8. Pruebas no Destructivas.**

### **6.8.1. Velocidad de pulso Ultrasónico.**



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). Se introduce la altura del cilindro en el equipo y se toman 10



lecturas, el equipo realiza un promedio con 8 lecturas, despreciando el mayor y el menor de los 10 valores obtenidos.

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.

La calidad del concreto se clasifica a partir de categorías, con base a intervalos de velocidades, a continuación se presentan en la Tabla 24.

*Tabla 24 Clasificación del concreto según su velocidad ultrasónica (Durar 2000).*

<i>Velocidad ultrasónica, v (m/s)</i>	<i>Calidad del concreto</i>
$V < 2000$ m/s	Deficiente
$2001 < V < 3000$ m/s	Normal
$3001 < V < 4000$ m/s	Alta
$V > 4000$ m/s	Durable

Las primeras investigaciones acerca de estas pruebas se realizaron en Canadá por Malhotra (1985) en donde publicó criterios de aceptación del concreto sobre la base de la medición del concreto. Se presenta en la Tabla 25.

*Tabla 25 Clasificación del concreto según su velocidad ultrasónica (Malhotra).*

<i>Velocidad ultrasónica, v (m/s)</i>	<i>Clasificación del concreto</i>
$V < 2135$ m/s	Muy pobre
$2135 < V < 3050$ m/s	Pobre
$3050 < V < 3660$ m/s	Cuestionable
$3660 < V < 4755$ m/s	Bueno
$V > 4755$ m/s	Excelente

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.



### 6.8.2. 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 éstas 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:

$$\rho = R_e \left[ \frac{A}{L} \right]$$

Dónde:

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

$R_e$  = 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.

De esta manera, los criterios de resistividad eléctrica están dados por: (Tabla 26 e Ilustración 18):

Tabla 26 Criterios de evaluación de la resistividad eléctrica (Durar, 2000).

<b>Resistividad del concreto (<math>\rho</math>)</b> <b><math>K\Omega\text{-cm}</math></b>	<b>Riesgo de corrosión</b>
$\rho > 200$	Bajo
$200 > \rho > 10$	Moderado
$\rho < 10$	Alto



Ilustración 18 Toma de la lectura para la prueba de resistividad eléctrica

### 6.8.3. Porosidad Efectiva

La absorción capilar y la porosidad de concretos se pueden ver como una medida de la compacidad del concreto. La Red Temática DURAR establece especificaciones para porosidad efectiva, que señala los poros capilares, con respecto a la durabilidad del concreto.

El concreto tiene dos tipos de poros, poros aislados y poros intersticiales. La prueba de porosidad efectiva determina de manera directa, por medio de coeficientes, la cantidad de poros intersticiales; estos son los poros que están conectados entre sí y permiten una mayor velocidad del flujo de sustancias líquidas a través del concreto.

Los poros capilares, cuando se encuentran interconectados y abiertos al exterior constituyen la causa principal de la permeabilidad de la pasta de cemento endurecida, así como la vulnerabilidad a la acción de agentes externos. Por ello, la eliminación de la capilaridad interconectada es una condición necesaria para su durabilidad (Red Durar, 2000).

### EQUIPO



- Muestras de concreto de 10 cm de diámetro y 5.0 cm de altura.
- Recipiente de plástico, con el área suficiente para colocar las muestras a probar.
- Esponja de 2 cm de alto, que cubra el área del recipiente.
- Mezcla de cera con brea; parafina
- Recipiente para la parafina y una brocha de 1 pulgada.

#### PROCEDIMIENTO

- Se prepara la parafina utilizando 80% de cera y 20% de brea respecto a la masa, colocándolas en el recipiente y poniéndolas a fuego lento hasta que se fundan y mezclen.
- Las muestras se requieren totalmente secas. Para ello se recomienda un secado de 50°C por 48 horas o en su defecto peso constante. Se registra la masa seca (ms).
- Teniendo la parafina líquida y las muestras secas, con la ayuda de la brocha se unta parafina sobre el perímetro de las muestra. (Ilustración 21).



*Ilustración 19 Colocación de la parafina al contorno de las muestras.*

- Cuando la parafina haya enfriado, se colocan las muestras sobre la esponja en el recipiente con agua, se registra el tiempo en el que la muestra entró en contacto con el agua, para llevar un control del inicio de la prueba. La muestra debe tener un tirante de 3 mm por encima de la esponja de agua.
- Se deben registrar las masas a 5 min, 10 min, 15 min, 30 min, 1 h, 2h, 3h, 4h, 6h, 24h después de haber entrado en contacto con el agua. Después de las primeras 24 horas, las masas se registran cada 24 horas hasta que la masa ya no aumente, es decir, que se encuentre en masas constantes, lo que implicará



que ha dejado de absorber agua o en su defecto que ha llegado a su porosidad total.

Los criterios de evaluación se describen en la Tabla 27:

Tabla 27 Criterios de Porcentaje de Porosidad Efectiva.

<b>Porcentaje de Porosidad Efectiva.</b>	<b>Clasificación del concreto</b>
<b>≤ 10%</b>	Buena calidad y compacidad
<b>10% - 15%</b>	Moderada
<b>&gt;15%</b>	Durabilidad inadecuada

## 6.9. Pruebas destructivas.

### 6.9.1. Resistencia a la Compresión Concreto.

La resistencia a la compresión es considerada como una de las propiedades más importantes y necesarias para establecer una evaluación de la durabilidad y la capacidad de la resistencia mecánica. (Red Durar, 1998).

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 (máquina universal Forney o 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, 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.

5. Se continúa la carga del espécimen hasta la falla registrándola y observando su tipo de falla y la apariencia del material (Ilustración 20).

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:

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

Donde:

% Resistencia = Porcentaje 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>.



Ilustración 20 Aplicación de Carga al espécimen Testigos de 10 x 20 cm

### 6.9.2. Resistencia a la Flexión del Concreto.

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.
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.(Ilustración 21).

#### 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.



*Ilustración 21 Aplicación de la Carga a Vigas de 15x60 cm.*

En la literatura se suele referenciar la prueba de flexión con la prueba de compresión siendo esta, de orden de 1.99 a 2.65 la raíz de  $F'_c$  de proyecto, en  $\text{kg}/\text{cm}^2$  (Kosmatka Steven H., 2004).



## 7. RESULTADOS.

### 7.1. Caracterización del Cemento.

#### 7.1.1. Tiempos de Fraguado.

En la tabla 28 y la Ilustración 22 se muestran los tiempos de fraguado de la mezcla de cemento, agua y diferentes porcentajes de emulsión.

Tabla 28 Tiempos de fraguado para diferentes porcentajes de emulsión.

% de Emulsión	Tiempo de Fraguado Inicial	Tiempo de Fraguado Final
Testigo	322.00	529.00
0.50%	450	571.00
1%	396	597
2%	412.99	672.99
3%	417	678
4%	400.00	750
5%	382.00	760.00
6%	534	840

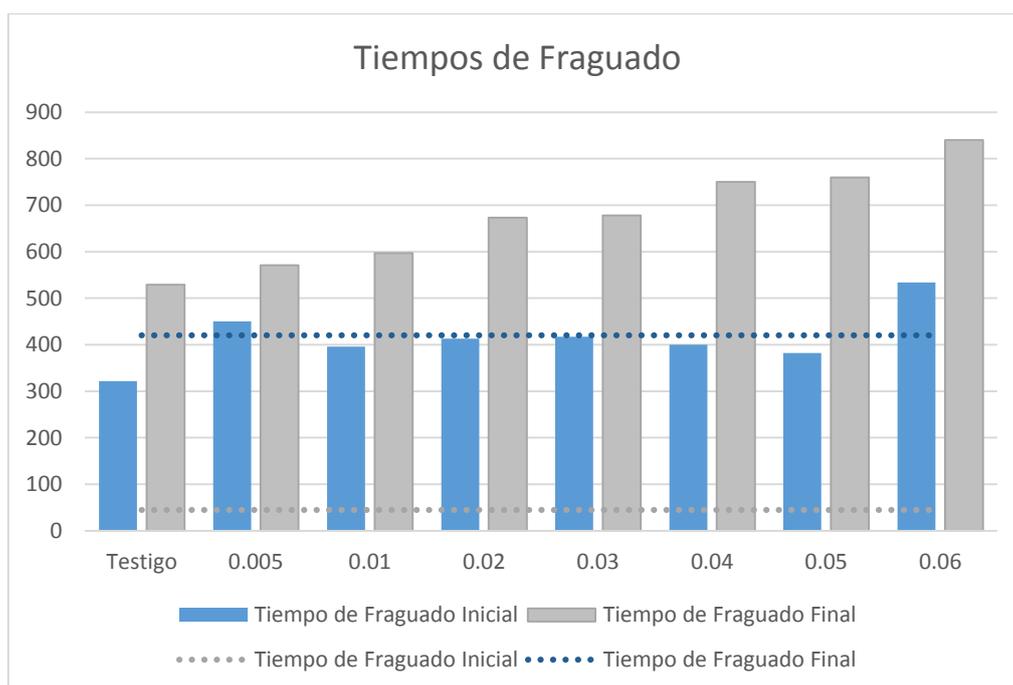


Ilustración 22 Tiempos de fraguado para diferentes porcentajes de emulsión.

Se observa que el tiempo de fraguado total se ve directamente incrementado con respecto al aumento de concentración de emulsión presente en la mezcla, por lo que es factible decir que la presencia de emulsión en los morteros actúa como retardante del tiempo de fraguado.



### 7.1.2. Óxidos de Hierro y Aluminio.

Tabla 29 Cantidad de FeO<sub>3</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>% en el Cemento.

Muestra.	Pm (gr).	T (gr).	P <sub>2</sub> (gr).	FeO <sub>3</sub> +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %
M <sub>1</sub>	1.00	16.57	16.67	9.21

### 7.1.3. Oxido de Calcio.

Tabla 30 Cantidad de CaO% en el Cemento.

Muestra.	Pm (gr).	T (gr).	P <sub>2</sub> (gr).	Vf	CaO%
M <sub>1</sub>	1.00	16.89	17.47	2.10	1.85

### 7.1.4. Oxido de Magnesio.

Tabla 31 Cantidad de MgO% en el Cemento.

Muestra.	Pm (gr).	T (gr).	P <sub>2</sub> (gr).	MgO%
M <sub>1</sub>	1.00	16.88	17.03	5.31

## 7.2. Caracterización de los agregados finos (arena).

A continuación se muestran los resultados obtenidos de la caracterización de los agregados finos.

### 7.2.1. Humedad de absorción.

Tabla 32 Humedad de Absorción en Agregados Finos.

Muestra.	Masa Saturada (gr).	Masa seca (gr).	% H. Absorción.
M <sub>1</sub>	300	295.10	1.66
M <sub>2</sub>	300	295.70	1.45
		Promedio	1.56

### 7.2.2. Masa Volumétrica Seca Suelto.

Tabla 33 Masa Volumétrica Seca Suelto en Agregados Finos.

Muestra	Masa de la Arena (gr)	Volumen del recipiente (cm <sup>3</sup> ).	Masa volumétrica seca y suelta (gr/ cm <sup>3</sup> )
M <sub>1</sub>	3155	2783	1.13
M <sub>2</sub>	3205	2783	1.15
		Promedio	1.14

### 7.2.3. Masa Volumétrica Seca Varillada.

Tabla 34 Masa Volumétrica Seca y Varillada en agregados Finos.

Muestra	Masa de la Arena (gr)	Volumen del recipiente (cm <sup>3</sup> ).	Masa volumétrica seca y varillada (gr/ cm <sup>3</sup> ).
M <sub>1</sub>	2817	1874	1.50
M <sub>2</sub>	2887	1874	1.54



	Promedio	1.52
--	----------	------

**7.2.4. Densidad.**

*Tabla 351 Densidad de los agregados Finos.*

<i>Muestra</i>	<i>Masa de la grava (gr)</i>	<i>Volumen del recipiente (cm<sup>3</sup>).</i>	<i>% Densidad (gr/ cm<sup>3</sup>).</i>
<b>M<sub>1</sub></b>	300	118	2.54
<b>M<sub>2</sub></b>	300	120	2.50
		promedio	2.52

**7.2.5. Análisis Granulométrico.**

*Tabla 36 Granulometría en Agregado Fino Reciclado.*

<i>Malla</i>	<i>Masa Retenida (gr)</i>	<i>% retenido</i>	<i>% acumulativo</i>	<i>% que pasa</i>
4	0	0	0	100
8	194.5	20.62	20.62	79.38
16	385.5	40.87	61.49	38.51
30	203.6	21.58	83.07	16.93
50	77.6	8.23	91.3	8.7
100	42.6	4.52	95.81	4.19
200	22.5	2.39	98.2	1.8
Charola	17	1.8	100	0
Suma	0	0	0	100
			Mf	3.52

La ilustración 23 presenta la gráfica correspondiente a la Granulometría de agregado grueso reciclado:

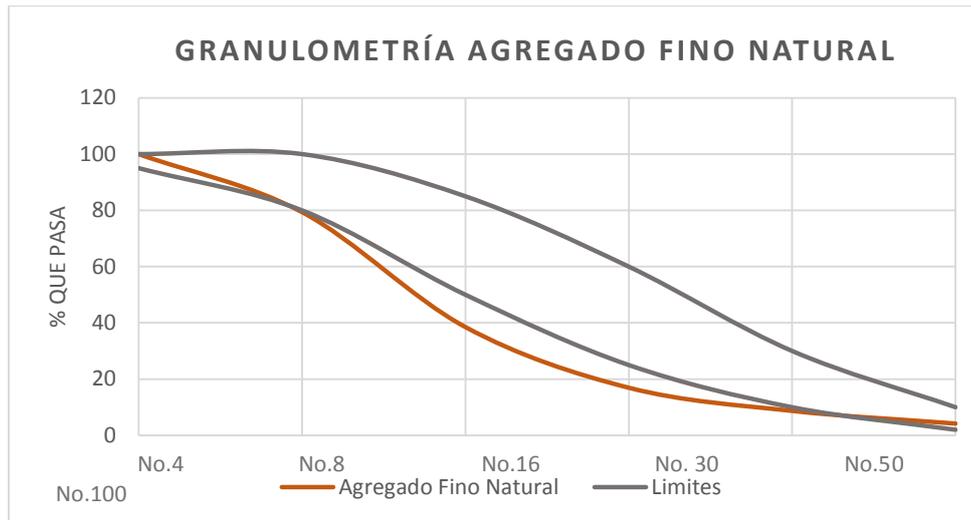


Ilustración 23 Curva Granulométrica del Agregado Fino Reciclado.

Las líneas de color gris indican los límites permisibles de una adecuada granulometría, la línea de color anaranjada es la correspondiente a la granulometría del agregado fino.

### 7.3. Caracterización de los agregados gruesos (grava).

Las Tablas 37 a 49 se muestran los resultados obtenidos de la caracterización de los agregados gruesos reciclados.

#### 7.3.1. Humedad de absorción

- **Agregados Grueso Natural.**

Tabla 37 Humedad de Absorción en Agregados Gruesos Naturales.

Muestra.	Masa Saturada (gr).	Masa seca (gr).	% H. Absorción.
M <sub>1</sub>	300	295.80	1.42
M <sub>2</sub>	300	294.30	1.94
M <sub>3</sub>	300	297.30	0.91
		promedio	1.42

- **Agregados Grueso reciclado de la torre médica.**

Tabla 38 Humedad de Absorción en Agregados Gruesos Reciclados de la torre médica..

Muestra.	Masa Saturada (gr).	Masa seca (gr).	% H. Absorción.
M <sub>1</sub>	300.60	276.20	8.83
M <sub>2</sub>	300.00	279.50	7.33



<b>M<sub>3</sub></b>	300.10	277.50	8.14
		promedio	8.11

- Agregado Grueso reciclado Mixto.**

*Tabla 39 Humedad de Absorción en Agregados Gruesos Reciclados Mixtos.*

<i>Muestra.</i>	<i>Masa Saturada (gr).</i>	<i>Masa seca (gr).</i>	<i>% H. Absorción.</i>
<b>M<sub>1</sub></b>	300.00	275.50	8.89
<b>M<sub>2</sub></b>	300.00	276.60	8.45
		promedio	8.68

### 7.3.2. Masa Volumétrica Seca Suelto.

- Agregados Grueso Natural.**

*Tabla 40 Masa Volumétrica Seca Suelta en agregados Gruesos Natural.*

<i>Muestra</i>	<i>Masa de la grava (gr)</i>	<i>Volumen del recipiente (cm<sup>3</sup>).</i>	<i>Masa volumétrica seca y suelta (gr/ cm<sup>3</sup>)</i>
<b>M<sub>1</sub></b>	16270	10600	1.53
<b>M<sub>2</sub></b>	16370	10600	1.54
<b>M<sub>3</sub></b>	16270	10600	1.53
		promedio	1.54

- Agregados Grueso Reciclado de la torre médica.**

*Tabla 41 Masa Volumétrica Seca Suelta en agregados Gruesos Reciclados de la torre médica.*

<i>Muestra</i>	<i>Masa de la grava (gr)</i>	<i>Volumen del recipiente (cm<sup>3</sup>).</i>	<i>Masa volumétrica seca y suelta (gr/ cm<sup>3</sup>)</i>
<b>M<sub>1</sub></b>	12370	10600	1.17
<b>M<sub>2</sub></b>	12370	10600	1.18
<b>M<sub>3</sub></b>	12370	10600	1.17
		promedio	1.17

- Agregado Grueso reciclado Mixto.**

*Tabla 42 Masa Volumétrica Seca Suelta en agregados Gruesos Reciclados Mixtos.*

<i>Muestra</i>	<i>Masa de la grava (gr)</i>	<i>Volumen del recipiente (cm<sup>3</sup>).</i>	<i>Masa volumétrica seca y suelta (gr/ cm<sup>3</sup>)</i>
<b>M<sub>1</sub></b>	11670	10600	1.10
<b>M<sub>2</sub></b>	11770	10600	1.11
		promedio	1.11

### 7.3.3. Masa Volumétrica Seca Varillada.

- Agregados Grueso Natural.**



Tabla 43 Masa Volumétrica Seca suelta varillada en agregados Gruesos Natural.

Muestra	Masa de la grava (gr)	Volumen del recipiente (cm <sup>3</sup> ).	Masa volumétrica seca y suelta (gr/ cm <sup>3</sup> )
M <sub>1</sub>	17770	10600	1.68
M <sub>2</sub>	17270	10600	1.63
M <sub>3</sub>	17320	10600	1.63
		promedio	1.65

- Agregados Grueso Reciclado de la torre médica.**

Tabla 44 Masa Volumétrica Seca Suelta Varillada en agregados Gruesos Reciclados de la torre médica.

Muestra	Masa de la grava (gr)	Volumen del recipiente (cm <sup>3</sup> ).	Masa volumétrica seca y suelta (gr/ cm <sup>3</sup> )
M <sub>1</sub>	13770	10600	1.30
M <sub>2</sub>	13870	10600	1.31
M <sub>3</sub>	13870	10600	1.31
		promedio	1.31

- Agregado Grueso reciclado Mixto.**

Tabla 45 Masa Volumétrica Seca Suelta Varillada en agregados Gruesos Reciclados Mixtos.

Muestra	Masa de la grava (gr)	Volumen del recipiente (cm <sup>3</sup> ).	Masa volumétrica seca y suelta (gr/ cm <sup>3</sup> )
M <sub>1</sub>	12870	10600	1.21
M <sub>2</sub>	12670	10600	1.20
		promedio	1.20

### 7.3.4. Densidad.

- Agregados Grueso Natural.**

Tabla 46 Densidad de los agregados gruesos Naturales.

Muestra	Masa de la grava (gr)	Volumen del recipiente (cm <sup>3</sup> ).	% Densidad (gr/ cm <sup>3</sup> ).
M <sub>1</sub>	300	111	2.70
M <sub>2</sub>	300	110	2.73
M <sub>3</sub>	300	107	2.80
		promedio	2.74

- Agregados Grueso Reciclado de la torre médica.**

Tabla 47 Densidad de los agregados de la Torre Médica.



<i>Muestra</i>	<i>Masa de la grava (gr)</i>	<i>Volumen del recipiente (cm<sup>3</sup>).</i>	<i>% Densidad (gr/ cm<sup>3</sup>).</i>
<b>M<sub>1</sub></b>	300	125	2.40
<b>M<sub>2</sub></b>	300	128	2.34
<b>M<sub>3</sub></b>	300	125	2.40
		promedio	2.38

• **Agregado Grueso reciclado Mixto.**

*Tabla 48 Densidad de los agregados gruesos reciclado Mixto*

<i>Muestra</i>	<i>Masa de la grava (gr)</i>	<i>Volumen del recipiente (cm<sup>3</sup>).</i>	<i>% Densidad (gr/ cm<sup>3</sup>).</i>
<b>M<sub>1</sub></b>	300	154	1.95
<b>M<sub>2</sub></b>	300	156	1.92
		promedio	1.94

**7.3.5. Análisis Granulométrico.**

La Tabla 49 se muestra los % que pasan para cada uno de los agregados Grueso en comparativa, junto con el tamaño máximo de cada uno de ellos

*Tabla 49 Granulometría en Agregados Gruesos.*

<i>Malla</i>	<i>Agregados Grueso Natural.</i>	<i>Agregados Grueso Reciclado de la torre médica.</i>	<i>Agregado Grueso reciclado Mixto.</i>
	<i>% que pasa</i>	<i>% que pasa</i>	<i>% que pasa</i>
<i>1'</i>	100.00	100.00	100.00
<i>3/4'</i>	89.61	99.68	85.76
<i>1/2'</i>	43.78	92.36	43.37
<i>3/8'</i>	18.48	68.16	20.45
<i>No. 4</i>	2.32	0.00	0.00
<i>Pasa No. 4</i>	0.00	0.00	0.00
<i>Tamaño Máx</i>	<i>3/4"</i>	<i>1/2"</i>	<i>3/4"</i>

En la Tabla 50 se presentan, para un tamaño máximo de 1/2" y 3/4", los límites granulométricos del agregado grueso, en masa, en porcentaje que pasa de acuerdo la norma Mexicana NMX-C-111-ONNCEE-2004:

*Tabla 50 Límites Granulométricos para agregado máximo.*



Tamaño nominal, mm (pulg)	19 (3/4)	12.5 (1/2)	9.5 (3/8)	No. 4 (4.75)	No. 16 (1.18)
19.0 a 4.75 mm (3/4 a No.4)	90 a 100	-----	20 a 55	0 a 10	0 a 5
12.5 a 4.75 mm (1/2 a No.4)	100	90 a 100	40 a 70	0 a 15	0 a 5

Las Ilustraciones 24 a 26 muestran las granulometrías para cada tipo de agregado grueso.

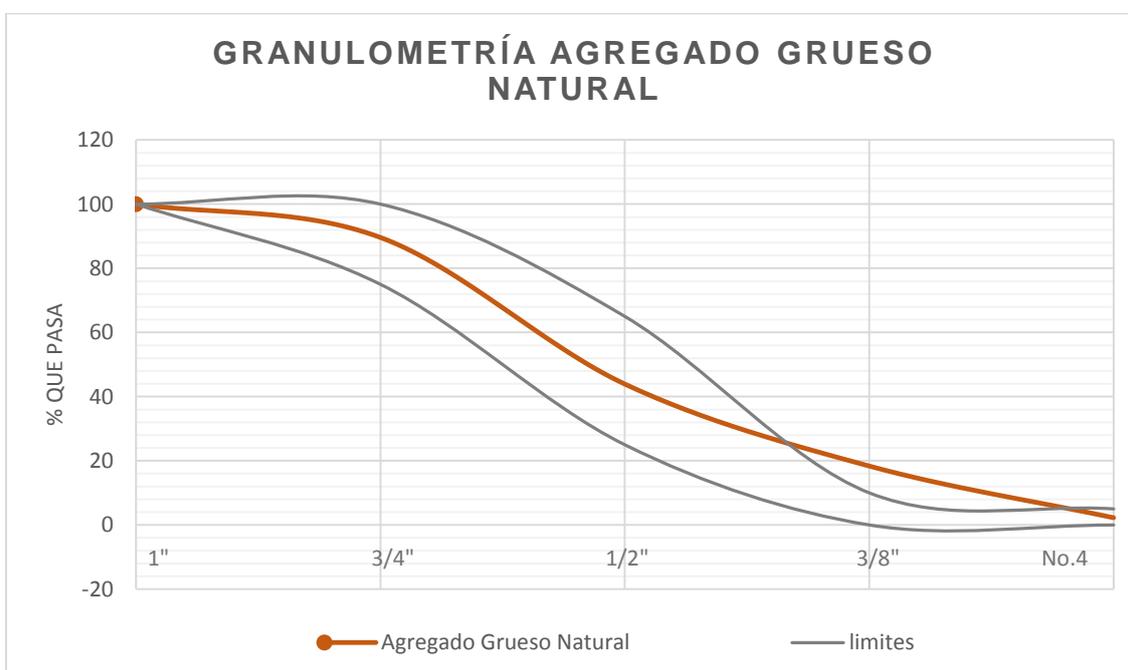
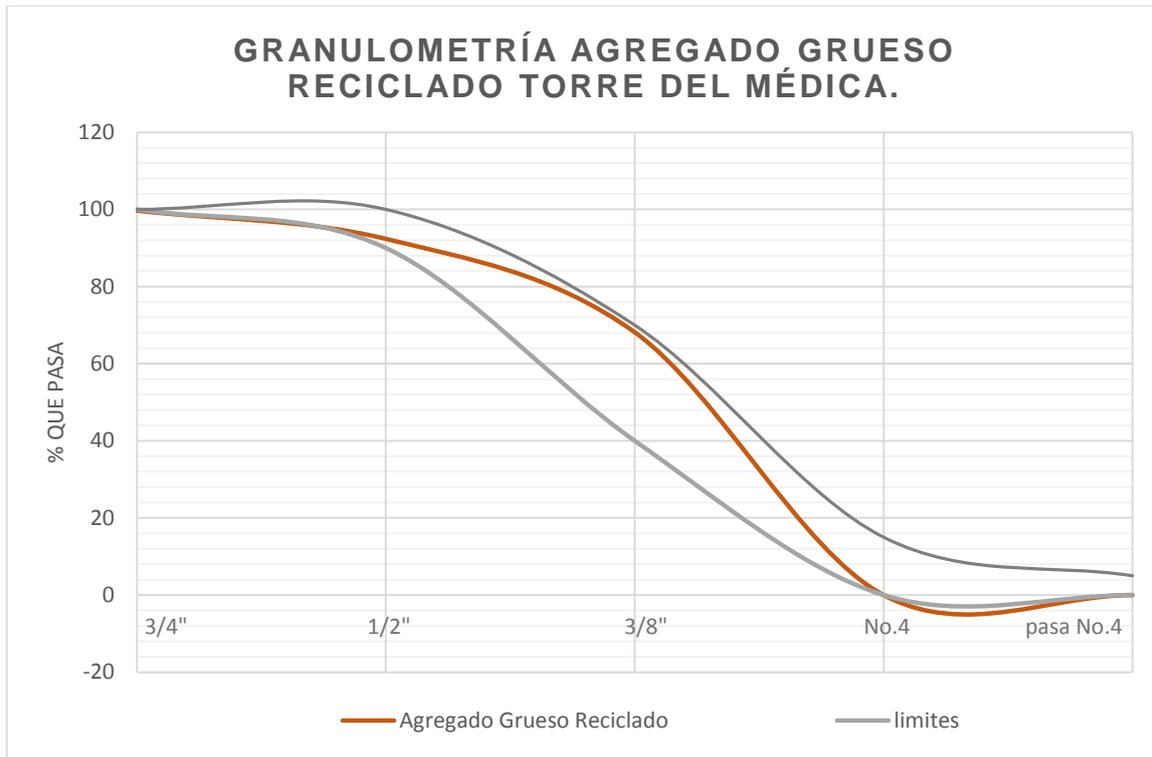
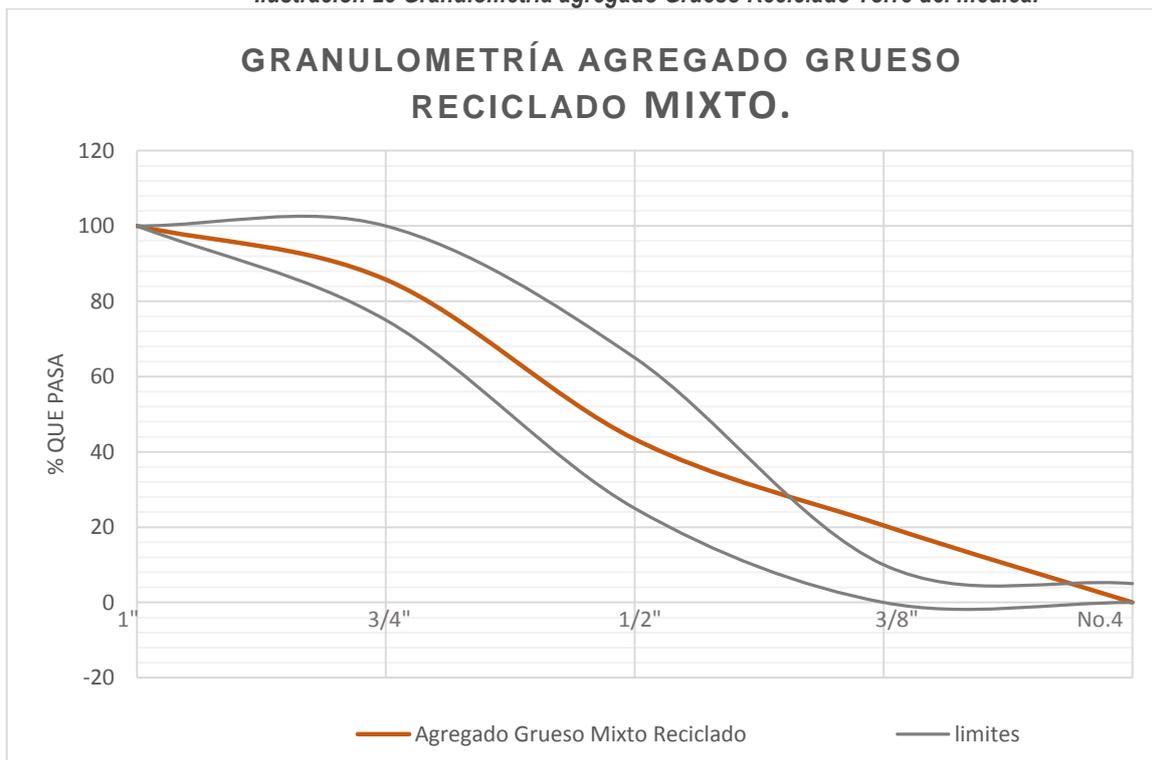


Ilustración 24 Granulometría agregado Grueso natural.

Las líneas de color gris indican los límites permisibles de una adecuada granulometría, la línea de color anaranjada es la correspondiente a la granulometría del agregado Grueso.



*Ilustración 25 Granulometría agregado Grueso Reciclado Torre del Médica.*



*Ilustración 26 Granulometría agregado Grueso Reciclado Mixto.*

### 7.3.6. Coeficiente de Forma.

Las Tablas 51 y 52 muestran los resultados del Factor de forma para los diversos tipos de agregados.



*Tabla 51. Factor de forma para el agregado Grueso Natural.*

Muestra	Di (cm)	Masa Bruta (b)	Masa ss	Vi (cm <sup>3</sup> )	Vr	Coef de Foma
1.00	3.05	15.90	6.80	14.86	2.52	0.26
2.00	2.78	14.50	6.10	11.25	4.69	0.48
3.00	2.88	17.60	13.60	12.51	3.09	0.32
4.00	2.25	14.10	3.20	5.96	3.56	0.37
5.00	3.44	17.40	12.50	21.31	2.98	0.31
6.00	2.05	14.00	3.30	4.51	4.13	0.43
7.00	3.32	17.30	12.50	19.16	3.05	0.31
8.00	2.36	15.10	7.10	6.88	3.74	0.39
9.00	2.27	15.90	8.10	6.12	3.00	0.31
10.00	1.52	14.00	1.70	1.84	2.13	0.22
11.00	2.31	14.10	2.90	6.45	3.22	0.33
12.00	2.38	14.60	4.40	7.06	3.14	0.32
13.00	3.20	16.90	11.10	17.16	3.00	0.31
14.00	1.50	13.50	0.80	1.77	2.67	0.28
15.00	2.98	19.10	16.00	13.86	2.71	0.28
16.00	2.40	16.00	10.20	7.24	3.64	0.38
17.00	3.18	16.50	9.70	16.84	2.94	0.30
18.00	1.34	13.40	1.10	1.26	5.50	0.57
19.00	2.59	18.20	13.70	9.10	2.74	0.28
20.00	2.40	16.00	7.70	7.24	2.75	0.28
21.00	2.58	16.70	9.20	8.99	2.63	0.27
22.00	1.62	13.90	2.00	2.23	2.86	0.29
23.00	2.46	16.30	7.50	7.79	2.42	0.25
24.00	2.53	16.40	8.30	8.48	2.59	0.27
25.00	2.46	15.00	5.10	7.79	2.83	0.29
26.00	1.60	14.30	2.20	2.14	2.00	0.21
27.00	2.20	16.05	6.80	5.58	2.39	0.25
28.00	3.20	15.60	8.10	17.16	3.38	0.35
29.00	1.63	14.00	2.40	2.27	3.00	0.31
30.00	2.88	15.00	7.00	12.51	3.89	0.40
31.00	3.10	16.30	10.50	15.60	3.39	0.35
32.00	2.11	14.40	6.50	4.92	5.42	0.56
33.00	1.56	13.40	2.00	1.99	10.00	1.03
34.00	3.79	17.00	12.20	28.50	3.21	0.33
35.00	2.60	14.10	6.30	9.20	7.00	0.72
36.00	1.89	13.60	2.80	3.53	7.00	0.72
37.00	2.83	16.30	10.40	11.87	3.35	0.35
38.00	4.34	16.10	12.10	42.80	4.17	0.43
39.00	2.55	14.10	4.40	8.68	4.89	0.50
40.00	2.40	14.60	4.20	7.24	3.00	0.31
41.00	2.38	15.80	7.50	7.06	2.88	0.30
42.00	2.59	16.20	8.90	9.10	2.97	0.31



43.00	2.99	14.60	4.10	14.00	2.93	0.30
44.00	2.76	14.50	4.50	11.01	3.46	0.36
45.00	2.49	15.80	6.50	8.08	2.50	0.26
46.00	2.24	15.10	5.80	5.88	3.05	0.31
47.00	3.00	15.50	7.00	14.14	3.04	0.31
48.00	2.50	14.50	3.40	8.18	2.62	0.27
49.00	1.81	13.70	2.10	3.10	4.20	0.43
50.00	1.71	13.90	2.90	2.62	4.14	0.43
<b>Promedio</b>						<b>0.36</b>

Tabla 52 Factor de forma para el agregado Grueso reciclado mixto.

Muestra	Di (cm)	Masa Bruta (b)	Masa ss	Vi (cm <sup>3</sup> )	Vr	Coef de Foma
1.00	3.05	16.00	10.10	14.86	3.48	0.40
2.00	2.22	14.00	4.80	5.73	5.33	0.62
3.00	2.94	15.00	6.70	13.31	3.53	0.41
4.00	1.88	13.90	3.20	3.48	4.00	0.46
5.00	2.79	17.00	11.00	11.37	2.82	0.33
6.00	3.46	16.00	10.20	21.69	3.52	0.41
7.00	1.65	13.40	1.30	2.35	4.33	0.50
8.00	2.21	15.20	6.00	5.65	2.86	0.33
9.00	2.39	15.30	7.10	7.15	3.23	0.37
10.00	2.98	15.70	8.90	13.86	3.42	0.40
11.00	1.71	13.40	1.40	2.62	4.67	0.54
12.00	1.37	14.00	1.70	1.35	1.89	0.22
13.00	2.95	16.90	10.60	13.44	2.79	0.32
14.00	2.01	14.00	2.80	4.25	3.11	0.36
15.00	2.85	15.20	6.50	12.12	3.10	0.36
16.00	2.31	14.40	5.00	6.45	3.85	0.45
17.00	2.64	15.00	5.30	9.63	2.79	0.32
18.00	2.99	15.40	6.90	14.00	3.00	0.35
19.00	2.76	16.40	9.50	11.01	2.88	0.33
20.00	1.51	13.40	0.90	1.80	3.00	0.35
21.00	1.95	14.00	1.40	3.88	1.56	0.18
22.00	2.46	16.00	9.30	7.79	3.21	0.37
23.00	2.70	16.40	9.70	10.31	2.94	0.34
24.00	2.84	15.00	6.60	11.99	3.47	0.40
25.00	2.86	18.50	15.50	12.25	2.87	0.33
26.00	2.82	16.10	11.10	11.74	3.70	0.43
27.00	2.06	13.90	2.00	4.58	2.50	0.29
28.00	2.08	15.30	7.50	4.71	3.41	0.40
29.00	2.63	17.30	13.30	9.53	3.17	0.37
30.00	3.12	15.30	7.20	15.90	3.27	0.38
31.00	2.75	17.10	12.10	10.89	3.03	0.35
32.00	2.38	14.20	4.30	7.06	3.91	0.45
33.00	3.23	17.80	14.80	17.64	3.15	0.37



34.00	2.58	15.90	9.90	8.99	3.54	0.41
35.00	1.79	13.90	2.60	3.00	3.25	0.38
36.00	2.57	16.30	10.50	8.89	3.28	0.38
37.00	2.35	14.30	4.20	6.80	3.50	0.41
38.00	2.86	13.80	2.90	12.25	4.14	0.48
39.00	2.45	15.30	7.30	7.70	3.32	0.38
40.00	2.72	14.00	2.60	10.54	2.89	0.34
41.00	2.74	17.00	11.70	10.77	3.00	0.35
42.00	2.01	13.80	2.40	4.25	3.43	0.40
43.00	1.61	13.60	2.60	2.19	5.20	0.60
44.00	2.27	15.30	5.90	6.12	2.68	0.31
45.00	2.17	14.20	4.00	5.35	3.64	0.42
46.00	2.30	15.50	7.30	6.37	3.04	0.35
47.00	2.89	14.90	7.80	12.64	4.33	0.50
48.00	2.38	16.20	9.90	7.06	3.19	0.37
49.00	2.17	14.00	3.60	5.35	4.00	0.46
50.00	2.53	15.60	7.90	8.48	3.16	0.37
<b>Promedio</b>						<b>0.39</b>

### 7.3.7. Índice de partículas Alargadas y lajeadas.

La Tabla 53 muestra el índice de partículas alargadas y lajeadas.

Tabla 53 Índice de partículas Alargadas y lajeadas (comparativa Agregados Reciclados contra Agregados Naturales).

	Índice de lajas		índice de partículas alargadas		Suma		Promedios
	M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>	M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>	M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>	
<b>Agregado Natural</b>	9.48	12.22	9.48	10.71	18.96	22.93	20.95
<b>Agregado Reciclado Mixto</b>	4.77	4.92	5.28	6.64	10.05	11.57	10.81

### 7.3.8. Coeficiente de Desgaste (prueba de los ángeles).

Las Tablas 54 y 55 muestran los resultados de la prueba de desgaste para los diferentes tipos de agregados.

Tabla 54 Coeficiente de Desgaste en Agregados Gruesos Naturales.

Muestra.	Masa Inicial (gr).	Masa Final (gr).	% Desgaste de Abrasión.
<b>M<sub>1</sub></b>	5000	4040	19.20
<b>M<sub>2</sub></b>	5000	4125	17.50
		<b>promedio</b>	<b>18.35</b>

Tabla 55 Coeficiente de Desgaste en Agregados Gruesos Mixtos.



<i>Muestra.</i>	<i>Masa Inicial (gr).</i>	<i>Masa Final (gr).</i>	<i>% Desgaste de Abrasión.</i>
<b>M<sub>1</sub></b>	5000	3909	21.82
<b>M<sub>2</sub></b>	5000	3200	36.00
		promedio	28.91

En la ilustración 27 se muestra los diferentes tamaños de los agregados gruesos.



Ilustración 27 (1) agregado grueso natural (2) agregado grueso reciclado.

#### 7.4. Pérdida al fuego y Residuos Insolubles.

La Tabla 56 muestra los resultados de la prueba de pérdida al fuego y residuos insolubles.

Tabla 56 pérdida al fuego y Residuos Insolubles.

<i>Muestra</i>	<i>p1 (gr)</i>	<i>p2 (gr)</i>	<i>t (gr)</i>	<i>Pf%</i>	<i>RI%</i>
<i>Agregado Natural (arena)</i>	1.01	18.12	17.12	0.56	97.03
<i>Agregado Natural (Grava)</i>	1.00	18.41	17.43	2.24	93.33
<i>Agregado Reciclado</i>	1.00	17.63	16.72	3.68	67.39

#### 7.5. Cantidad de Oxina.

La prueba es meramente visual, cuando el precipitado presenta un medio cohesionado o grandes copos amarillentos flotando en la disolución, se manifiesta una presencia grande de compuestos de aluminio. De modo comparativo también se podrá hacer en escala de colorimetría. Ilustración 28.



Ilustración 28 (1) cemento (2,3) agregados naturales (4) Agregados Reciclad.

### 7.6. Determinación del contenido de cemento en Agregados Reciclad.

Para determinar la cantidad de cemento que tenía la muestra fue necesario determinar la cantidad de sulfato y la densidad aparente de la muestra, las Tablas 57 y 58 muestran los resultados:

Tabla 57 Cantidad de SO<sub>3</sub>% de la muestra de agregado Reciclad.

Muestra.	P <sub>m</sub> (gr).	T (gr).	P <sub>2</sub> (gr).	SO <sub>3</sub> %
CR	1.00	16.94	17.13	6.54

Tabla 58 Densidad Aparente de Muestra de Agregado Reciclad.

Muestra.	P <sub>s</sub> (gr).	P Aire (gr).	P Agua (gr).	Densidad Aparente
CR	189.40	215.30	114.30	187.52

Para encontrar el contenido de cemento en la muestra de concreto, fue necesario conocer la cantidad de sulfato de la muestra (ya calculado) y la cantidad de sulfato del cemento con el cual fue hecho la pieza de concreto, se estima que la cantidad de sulfato oscila entre 2.7 y 3.10 para un cemento CPC 30R, obteniéndose las cantidades de cementos en los agregados reciclados mostrados en la Tabla 59:



**Tabla 59** *Contenidos de Cemento a partir de la cantidad de SO<sub>3</sub>%.*

<i>SO<sub>3</sub>% en el Cemento</i>	<i>Contenido de Cemento del Agregado Reciclado</i>
2.70	454.16
2.80	437.94
2.90	422.84
3.00	408.75
3.10	395.56



### 7.7. Proporcionamiento de las Mezclas.

En la Tabla 52 se muestran las cantidades para un m<sup>3</sup> de concreto de las diferentes mezclas. Se les realizó correcciones por humedad actual al momento de su elaboración, a partir de los resultados de la caracterización de los agregados, tomando un f'c de 350 kg/cm<sup>2</sup>, relación agua/cemento de 0.48, revenimiento de 10 cm, para todas las mezclas. Ilustración 28.

Tabla 60 Cantidades de materiales requeridos por m<sup>3</sup> de concreto para las diferentes mezclas.

		Tes-Cr-FI	Tes-FI	TR-EM 1%	TR-EM 4%	CR-EM 1%	CR-EM 4%	Tes-2-Cr	Tes-2
<b>Cemento</b>		450.00	427.08	427.08	427.08	450.00	450.00	427.08	427.08
<b>Agua</b>		216.00	175.10	205.00	205.00	216.00	216.00	205.00	205.00
<b>Grava</b>	Natural	-	904.20	904.20	904.20	-	-	984.41	904.20
	Reciclada	626.18	-	-	-	626.18	6626.18	-	-
<b>Arena</b>	Natural	972.54	761.01	761.01	761.01	972.54	972.54	663.08	761.01
<b>Aditivo</b>	Fluidificante	2.97	2.81			-	-	-	-
	Emulsión	-	-	4.27	17.08	4.50	17.08	-	-



Ilustración 29 (1) Mezcla Tes-FI



(2) Tes-2-Cr



(3) Tes-Em4%

## 7.8. Pruebas realizadas al concreto fresco.

### 7.8.1. Revenimiento.

De acuerdo a la norma NMX-C-156-1997-ONNCCE se tiene una tolerancia de  $\pm 25$  mm, para revenimientos de 10 cm. La Tabla 61 muestra los resultados obtenidos. (Ilustración 30).

*Tabla 61 Revenimientos obtenidos de acuerdo a las mezclas usadas.*

Mezcla	Revenimiento	Fecha de Elaboración
Tes-Cr-FI	5.50	07/08/2014
CR-EM 1%	3.00	05/08/2014
CR-EM 4%	6.00	06/08/2014
Tes-2-Cr	4.00	08/05/2015
Tes-FI	9.00	23/07/2014
Tes-EM 1%	8.00	22/07/2014
Tes-EM 4%	12.00	01/08/2014
Tes-2	7.00	01/05/2015



*Ilustración 30.a Revenimiento de la mezcla realizada Tes-FI Ilustración 27.b Revenimiento de la mezcla Tes-EM 4%.*

## 7.9. Pruebas No destructivas.

### 7.9.1. Velocidad de Pulso Ultrasónico.

La Tabla 62 y la Ilustración 31 muestran las velocidades de pulso ultrasónico obtenidas para las diferentes mezclas usadas.

*Tabla 62 Resultados de la Velocidad de pulso ultrasónico (m/s) en muestras cilíndricas de 10 x 20 cm.*

Muestra/Edad	Velocidad de pulso ultrasónico (m/s)			
	7 días	300 días	450 días	500 días
Tes-Em 1%	4035	4210.73	4010.67	4103.33
Tes-Em 4%	3979.33	4207.68	4200.67	4264



<b>Tes-FI</b>	4280	4379.57	3898.33	4636.67
<b>Cr-Em 1%</b>	3770.33	3888.62	3941.33	3996
<b>Cr-Em 4%</b>	3508.67	3806.3	3873	3992.33
<b>Tes-Cr-FI</b>	3775.67	4316.58	4139.33	4216.33

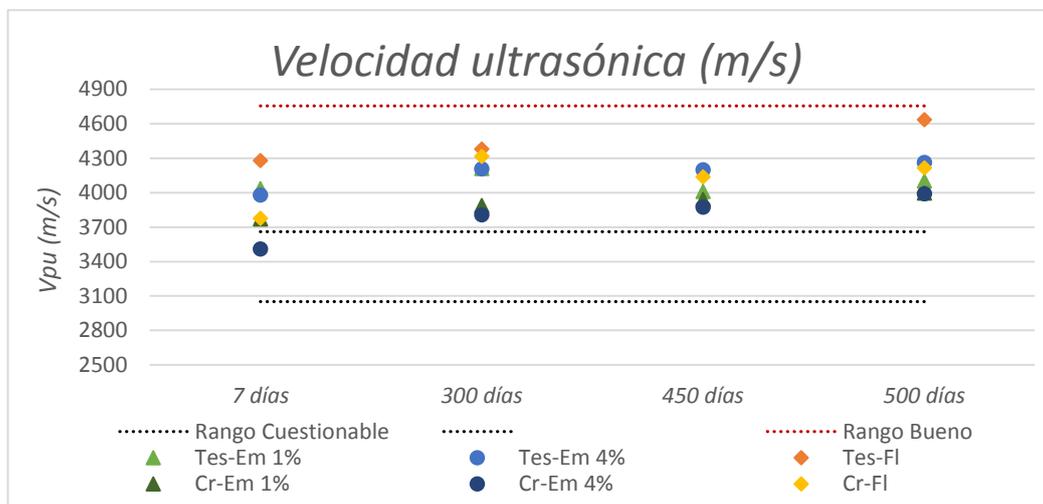


Ilustración 31 Velocidades de pulso ultrasónico obtenidas.

### 7.9.2. Resistividad Eléctrica.

En la Tabla 63 y la Ilustración 32, se muestran los resultados de la prueba de resistividad eléctrica, los resultados son el promedio de 3 especímenes. Se expresan por separado las mezclas Tes-2-Cr y Tes-2 debido a que las pruebas fueron realizadas a diferentes edades.

Tabla 63 Resultados Resistividad eléctrica en cilindros de 10 x 20 cm.

Muestra/Edad	Resistividad Eléctrica (KΩ-cm)			
	7 días	300 días	450 días	500 días
<b>Tes-Em 1%</b>	4.45	8.77	11.26	15.57
<b>Tes-Em 4%</b>	4.06	8.38	11.13	13.61
<b>Tes-FI</b>	4.84	14.40	18.85	20.81
<b>Cr-Em 1%</b>	4.32	1.16	15.05	10.73
<b>Cr-Em 4%</b>	3.93	9.82	11.78	10.08
<b>Cr-FI</b>	4.45	8.64	14.40	15.32

Muestra/Edad	Resistividad Eléctrica (KΩ-cm)			
	28 días	45 días	90 días	300 días
<b>Tes-2-Cr</b>	6.55	8.12	11.52	14.79
<b>Tes-2</b>	5.37	6.15	7.59	8.64

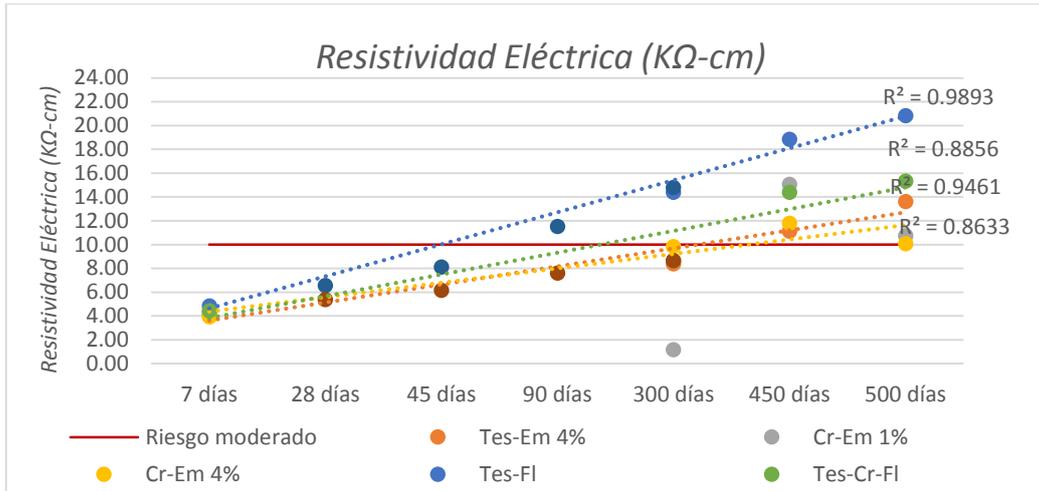


Ilustración 32 Resistividades eléctricas obtenidas.



### 7.9.3. Porosidad Efectiva.

La Tabla 64 muestra los resultados de porosidad efectiva obtenidos para las diferentes mezclas usadas.

Tabla 64 Resultados de Porosidad efectiva obtenidos.

MUESTRA	Sm (g/cm <sup>2</sup> s <sup>0.5</sup> )	Sm (g/m <sup>2</sup> s <sup>0.5</sup> )	t(s <sup>1/2</sup> )	t(s)	z (m)	z <sup>2</sup> (m <sup>2</sup> )	m (s/m <sup>2</sup> )	εe(%)	εe(%) Promedio
Tes-Em1% 1	0.0018	0.0180	350.9	123141	0.0500	0.0025	49256334.367	12.6	14.6
Tes-Em1% 2	0.0017	0.0170	424.4	180113	0.0471	0.0022	81190273.53	15.3	
Tes-Em1% 3	0.0021	0.0210	366.9	134588	0.0479	0.0023	58659208.14	16.1	
Tes-Em1% 4	0.0017	0.0170	385.4	148558	0.0458	0.0021	70821448.27	14.3	
Tes-Em4% 1	0.0019	0.0190	417.8	174585	0.0485	0.0024	74220297.35	16.4	14.0
Tes-Em4% 2	0.0007	0.0070	849.5	721664	0.0488	0.0024	303036892.09	12.2	
Tes-Em4% 3	0.0016	0.0160	440.3	193827	0.0456	0.0021	93214817.72	15.4	
Tes-Em4% 4	0.0011	0.0110	516.9	267174	0.0476	0.0023	117918104.06	11.9	
Tes-FI 1	0.0021	0.0210	335.1	112294	0.0460	0.0021	53068951.35	15.3	13.9
Tes-FI 2	0.0018	0.0180	314.0	98567	0.0458	0.0021	46989375.14	12.3	
Tes-FI 3	0.0020	0.0200	310.6	96468	0.0472	0.0022	43300964.15	13.2	
Tes-FI 4	0.0025	0.0250	285.1	81284	0.0480	0.0023	35279574.39	14.8	
Cr-Em4% 1	0.0015	0.0150	451.5	203818	0.0474	0.0022	90716196.08	14.3	15.2
Cr-Em4% 2	0.0018	0.0180	454.4	206457	0.0483	0.0023	88498232.07	16.9	
Cr-Em4% 3	0.0015	0.0150	487.4	237544	0.0484	0.0023	101403491.613	15.1	
Cr-Em4% 4	0.0016	0.0160	442.1	195427	0.0486	0.0024	82739397.771	14.6	
Cr-Em1% 1	0.0022	0.0220	373.9	139826	0.0478	0.0023	61197446.679	17.2	17.9
Cr-Em1% 2	0.0021	0.0210	388.1	150598	0.0482	0.0023	64822311.505	16.9	
Cr-Em1% 3	0.0027	0.0270	343.0	117636	0.0474	0.0022	52358087.628	19.5	
Cr-Em1% 4	0.0024	0.0240	353.7	125131	0.0470	0.0022	56646162.246	18.1	
Cr-fl 1	0.0032	0.0320	316.6	100225	0.0492	0.0024	41404273.886	20.6	19.2
Cr-fl 2	0.0032	0.0320	280.2	78526	0.0472	0.0022	35247637.028	19.0	
Cr-fl 3	0.0026	0.0260	356.9	127394	0.0462	0.0021	59685014.730	20.1	
Cr-fl 4	0.0032	0.0320	0.0	0	0.0484	0.0023	0.035	17.0	

## 7.10. Pruebas Destructivas.

### 7.10.1. Resistencia a la Compresión.

En la Tabla 65 y las Ilustraciones 33 a 34, se muestran los resultados de los esfuerzos a compresión en cilindros de 10 x 20 cm, los resultados son el promedio de 3 especímenes.

*Tabla 65 Resultados de los Esfuerzos a Compresión (kg/cm<sup>2</sup>) en cilindros de 10 x 20 cm.*

Muestra/ Edad	Compresión (kg/cm <sup>2</sup> )						
	7 días	28 días	45 días	90 días	360 días	450 días	500 días
Tes-Em 1%	255.23	348.31	344.27			409.91	476.23
Tes-Em 4%	258.23		370.82			391.1	392.29
Cr-Em 1%	236.83	335.25	330.75			377.78	383.38
Cr-Em 4%	237.25	299.93	330.37			368.25	383.95
Tes-FI	309.37	401.7	426.84		502.41	513.92	545.75
Tes-Cr-FI	281.2	375.02	386.54		432.68	439.31	492.69
Tes-2-Cr		379.75	424.97	462.61	520.56		
Tes-2		336.35	413.88	455.28	502.41		



*Ilustración 33 Prueba a compresión en especímenes Testigos (agregado natural) y especímenes con Testigos (agregados reciclados).*

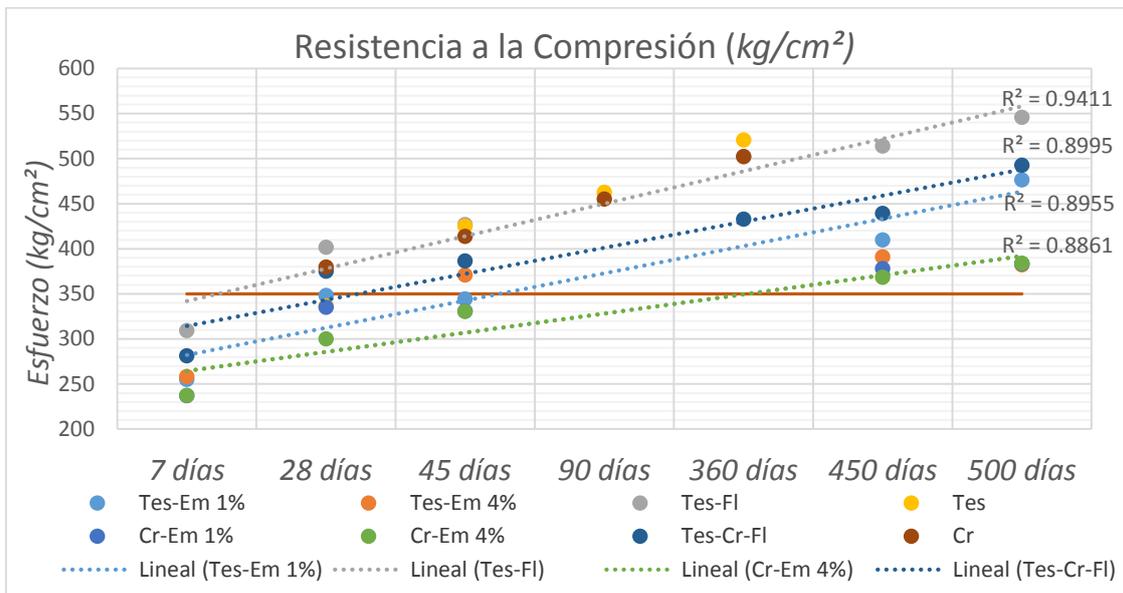


Ilustración 34 Resistencias a la compresión obtenidas.

### Comparativa de Compresión

Utilizando la siguiente relación, se obtuvo la comparativa entre el porcentaje de disminución en la resistencia a la compresión de las diferentes mezclas de agregados reciclados con respecto al promedio de las 3 mezclas elaboradas con agregados naturales (Tes-Em 1%, Tes-Em 4%, Tes-FI) a las diferentes edades, Tabla 66 :

$$\% \text{ disminución } R = \frac{R \text{ mezcla a comparar} - R \text{ mezcla Testigo}}{R \text{ mezcla Testigo}} \times 100$$

Tabla 66 Porcentajes de pérdida de resistencia a la compresión.

Mezcla/días	7 días	28 días	45 días	450 días	500 días
Cr-FI	-2.5242	-3.5624	-1.3236	-0.2281	-5.2554
Cr-Em 1%	-13.6529	-7.4202	-15.5658	-13.8099	-18.0969
Cr-Em 4%	-13.4998	-17.1739	-15.6628	-15.9841	-17.9752

### 7.10.2. Resistencia a la Flexión del Concreto.

La Tabla 67 y la Ilustración 35 muestran los módulos de ruptura obtenidos de cada una de las muestras, para las diferentes mezclas usadas.



Tabla 67 Resultados de Módulos de Ruptura (kg/cm<sup>2</sup>) en vigas de 15x15x60 cm.

Muestra/Edad	Flexión (kg/cm <sup>2</sup> ).		
	28 días	45 días	90 días
Tes-1	48.83	52.95	54.48
Tes-2	49.17	54.61	55.60
Cr-1	47.84	53.79	53.79
Cr-2	48.17	48.52	50.15
% de disminución	-2.02	-4.88	-5.58

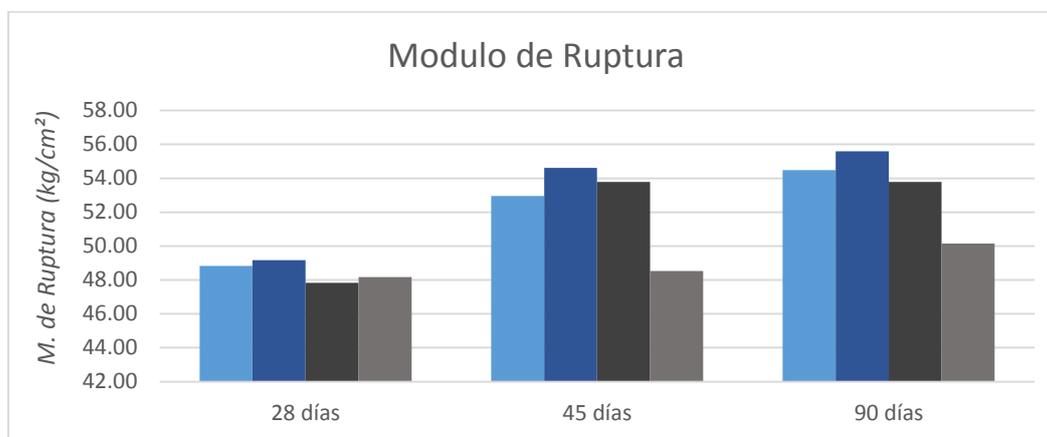


Ilustración 35 Módulos de Ruptura (kg/cm<sup>2</sup>) en vigas de 15x15x60 cm.

### 7.11. Matrices de concreto.

La composición volumétrica de las muestras de concreto en comparativa, se estimó en base empírico la cantidad de mortero de las muestras, existe una evidente mayor cantidad de mortero de pasta en la muestras de agregado reciclado, encontrándose densidades aceptables, pero no por ello menores absorciones.

La microestructura de los concretos reciclados es mucho más complicada que la de concretos convencionales, debido a que cuenta con dos tipos de interfase, agregado/mortero y mortero/mortero

El mortero adherido en los agregados reciclados está estrechamiento relacionado con otras propiedades como la absorción, la densidad y el coeficiente de desgaste, cuando se compara el contenido de mortero con la densidad de las muestras se observa que a mayor contenido de mortero menor densidad.

A partir de esta evaluación cualitativa en donde se midió área de total (78.540 cm<sup>2</sup>) de las muestras y el área que solo comprendía agregado natural visualmente, se obtuvo lo siguiente (Tabla 68):



Tabla 68 % de agregado natural en Matrices de Concreto Convencional contra Concreto Reciclado.

Matriz de Concreto Convencional			Matriz de Concreto Reciclado		
	área AN	% de AN	área AN	% de AN	
matriz 1	50.38		matriz 1	34.87	
matriz 2	39.89	<b>59.061</b>	matriz 2	39.79	<b>46.070</b>
matriz 3	48.89		matriz 3	33.89	
<b>Cantidad de Mortero</b>		32.15			42.35

Se observa que las matrices de concretos reciclados contienen un 13 % menos de agregados naturales, lo que indicaría que en comparativa contienen 10% de mortero más, lo que influirá negativamente en el resto de las propiedades del concreto endurecido (Ilustración 36-38).



Ilustración 36 Matrices de Concreto.



Ilustración 37 Matrices de Concreto (Agregado Reciclado)



*Ilustración 38 Matrices de Concreto (Agregado Natural).*



## 8. ANÁLISIS DE RESULTADOS.

### 9.1 Agregados Finos.

La caracterización de agregados finos presenta, en general, buenos resultados. Se observa que se cumple con la humedad de absorción de los agregados naturales con un valor de 1.56%, estando dentro del rango entre el 0.2% y el 2% que tienen la mayoría de los agregados finos naturales, y siendo inferior al 8%. Asimismo, tanto las masas volumétricas secas sueltas como las masas volumétricas secas varilladas se sitúan dentro de los límites permisibles (1.2 kg/cm<sup>3</sup>-1.75 kg/cm<sup>3</sup>), con valores de 1.14 kg/cm<sup>3</sup> y 1.52 kg/cm<sup>3</sup> respectivamente. La densidad de 2.52 gr/cm<sup>3</sup> se encuentra en los rangos convencionales (2.4 gr/ cm<sup>3</sup> a 2.9 gr/ cm<sup>3</sup>) de agregados finos naturales (Kosmatka Steven H., 2004).

Respecto a la granulometría de los agregados finos, el valor obtenido se sitúa muy próximo a los límites inferiores establecidos (NMX-C-111-ONNCCE, 2004), presentando un módulo de finura de 3.52, quedando fuera de los límites de 2.3 a 3.1. Esto refleja un exceso de partículas gruesas y una carencia de retenidos en las mallas 100 y 200, provocando un aumento en la cantidad de agua en el proporcionamiento de las mezclas. Sin embargo, se cumplen los requerimientos que establece la misma norma, donde los retenidos parciales en cada malla fueron inferiores al 45%.

En la Tabla 69 se enlistan los límites y los resultados obtenidos:

*Tabla 69 Resultados y límites permisibles para el agregado fino.*

Tipo de Prueba	Limitación	resultado	Cumple
% absorción.	0.2% al 2%	1.56%	Si
MVSS.	Sin limites	1.14 kg/cm <sup>3</sup>	Si
MVSV	1.2 kg/cm <sup>3</sup> -1.75 kg/cm <sup>3</sup>	1.52 kg/cm <sup>3</sup>	Si
Densidad.	2.4 gr/ cm <sup>3</sup> a 2.9 gr/ cm <sup>3</sup>	2.52 gr/cm <sup>3</sup>	Si
MF	2.3 a 3.1	3.52	No

### 8.2. Agregados Gruesos (Naturales y Reciclados).

A pesar de las diferencias que existen en relación a las características de agregados reciclados y agregados naturales, se pueden establecer algunos análisis en los que coinciden la mayoría de las investigaciones.

Por ejemplo, ambos agregados son de origen triturado, lo cual permite que compartan cierta similitud en sus propiedades. Por ejemplo, en la prueba de coeficiente volumétrico, con valores de 0.36 para agregados naturales y 0.39 en



agregados reciclados, ambos agregados cumplen las especificaciones (NMX-C-111-ONNCCE, 2004) de coeficientes volumétricos superiores a 0.20.

La densidad de los agregados reciclados es un 20% inferior a la de los agregados naturales, debido a que la densidad del mortero adherido es menor. Sin embargo, se cumple con los límites de  $2.4 \text{ gr/cm}^3$  a  $2.9 \text{ gr/cm}^3$  (NMX-C-111-ONNCCE, 2004) para agregados naturales. No obstante, este resultado no perjudica el comportamiento del concreto. Analizando el porcentaje de absorción de agua en el agregado natural (1.42%) y el agregado reciclado (8.39%, promedio de los dos agregados en estudio), este último registra aproximadamente seis veces la absorción del agregado natural, lo cual corrobora lo obtenido por Letelier (2014). La absorción es una de las pruebas físicas en las que existe mayor diferencia entre los agregados, y en ella se aprecia la influencia negativa de la cantidad de mortero adherido al agregado, aumentando la cantidad necesaria para la producción de concretos trabajables.

A partir de las pruebas que se llevaron a cabo en el análisis químico de agregados gruesos, se estima que la pérdida de fuego que tienen los agregados reciclados no es significativa, siendo inferior al 5%. Este parámetro se suele relacionar con la cantidad de materia orgánica, que normalmente se mide a partir de colorimetría. En el análisis de la cantidad de Oxina del agregado reciclado en comparación con los agregados naturales, se ha detectado una mayor presencia de compuestos de aluminio en los agregados reciclados, a partir de la coloración más tenue, más blanca. Esto indica un posible problema en la resistencia, aumento de porosidad y posible pérdida de adherencia. La cantidad de Oxina puede llegar a ser un resultado muy subjetivo, por lo cual sólo se toma como un indicativo del posible riesgo que podría haber.

La distribución granulométrica representa un parámetro muy relevante debido a su efecto directo sobre las propiedades del concreto, como la trabajabilidad, la porosidad, la permeabilidad, la resistencia y la durabilidad. Se observa que tanto en el agregado natural como en el reciclado (agregado reciclado mixto) este valor se encuentra fuera de los límites que establece la norma (NMX-C-111-ONNCCE, 2004), para tamaños máximos  $\frac{3}{4}$ ". En el caso de agregados con tamaños máximos de  $\frac{1}{2}$ " (agregados de la torre del seguro social) se cumplen los límites. Sin embargo, al utilizar el tamaño máximo de  $\frac{1}{2}$ " aumenta la cantidad de cemento un 5% en las mezclas utilizadas (tamaño máximo de  $\frac{1}{2}$ " en comparación con las otras mezclas (tamaños máximos  $\frac{3}{4}$ " ) , en función al proporcionamiento ACI. La norma (NMX-C-111-ONNCCE, 2004) especifica que de no cumplirse los límites granulométricos, se debe ajustar el



proporcionamiento del concreto para compensar las deficiencias granulométricas. Por lo tanto, debe demostrarse que el concreto elaborado con ellos tiene un comportamiento adecuado.

Los coeficientes de Los Ángeles de las muestras analizadas se establecen, en todos los casos (18.35 para agregado natural y 28.91 en agregado reciclado), valores por debajo del límite máximo actual fijado en la norma (NMX-C-111-ONNCCE, 2004) del 50%, e incluso llegan a estar dentro del límite del 35% que se establece para pavimentos de carreteras debido al desprendimiento de agregados que pueden tener al rodamiento de vehículos.

En el índice de lajas y partículas alargadas de agregados reciclados se han encontrado ciertas diferencias, siendo menor el valor del índice en el caso de agregados reciclados por casi un 50%. Esto puede deberse a que el mortero que queda adherido en las caras planas tiende a aumentar el espesor de las partículas en forma de laja, disminuyendo así el porcentaje de lajas. Se recomienda en la literatura índices de lajas y partículas alargadas en agregados reciclados  $\leq 35\%$ . Los agregados reciclados en estudio cumplen con dichas especificaciones, por lo que no existen problemas de desprendimiento.

### **8.2.1. Comparativa de Agregados Reciclados y Normativas Internacionales.**

A partir del estudio de agregados reciclados se recogen las normativas existentes, de las cuales se tienen diferentes especificaciones y recomendaciones. Se observa que la mayoría de estas normas establecen el control de estos agregados a través de su densidad y absorción, además de la composición y del contenido de impurezas.

Todas ellas establecen límites más tolerantes a la absorción del agregado reciclado, que van desde el 6% que establece la "Guía Australiana para la Utilización de Agregado Reciclado (RCA) para Concreto", hasta el 10% que establece la RILEM y otras recomendaciones que han aceptado sus criterios (Hong Kong). La densidad mínima está limitada también entre 2.000 kg/m<sup>3</sup> (RILEM) y 2.200 kg/m<sup>3</sup> (norma japonesa).

A partir de la normativa existente, la clasificación de los agregados reciclados en estudio (agregado reciclado de la torre médica, agregado reciclado mixto), puede estar dada por:



- Según RILEM: Tipo II, agregados procedentes mayoritariamente de escombros de concreto (contenido de cerámicos <10%).
- Norma Belga: GBSB-II, agregados procedentes mayoritariamente de escombros de concreto.
- Norma Alemana: Tipo 1, agregados procedentes mayoritariamente de escombros de concreto o agregados minerales ( $\geq 90\%$ ) y con un contenido máximo de clínker, cerámica y/o gres calcáreo del 10%.

Los agregados reciclados en estudio, de forma general, se pueden clasificar como agregados de buena calidad, ya que son agregados que provienen del 100% de escombros de concreto. Por lo tanto, se podrán dar de resistencias medias (25-35 MPa), según su clasificación.

A partir de los resultados obtenidos en esta investigación y de la clasificación que se hizo de los agregados reciclados, se realiza un análisis de las características que guarda, en comparativa con las normativas existentes (tabla 70):

*Tabla 70 Comparativa de Resultados con Normativa existente.*

Requisitos	RILEM	Japón	Bélgica	Hong Kong	Alemania	Reino Unido	Australia	Brasil	España EHE-08	Holandesa	agregados reciclados de estudio
Tipo de Agregado	I	1	GBSBI		1	RCA					
Densidad seca (kg/m <sup>3</sup> )	$\geq 1500$	$\geq 2200$	$\geq 1600$	$\geq 2200$	$\geq 2200$	-	$\geq 2100$	-	-	$\geq 2100$	2160
Absorción (%)	$\leq 20$	$\leq 3$	$\leq 18$	$\leq 10$	$\leq 10$	-	$\leq 10$	$\leq 12$	$\leq 10$	-	8.39
Índice de lajas	-	-	-	-	-	-	-	-	-	$\leq 40$	10.81
Contenido de metales (%)	$\leq 1$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Nulo
Contenido de materia orgánica (%)	$\leq 1$	-	$\leq 0,5$	-	-	-	-	-	-	$\leq 0,5$	3.68
Contenido de finos (<0,063mm) (%)	$\leq 3$	-	$\leq 5$	$\leq 4$	$\leq 4$	$\leq 5$	-	-	-	$\leq 3$	Nulo
Contenido de asfalto (%)	-	-	-	-	-	$\leq 5$	-	-	$\leq 1$		Nulo
Contenido de material cerámico (%)	$\leq 100$	-	$\leq 100$	-	-	$\leq 100$	-	-	$\leq 5$		Nulo

Los agregados reciclados no cumplen con la densidad que establecen la normativa de RILEM y belga, situándose entre un 44% y 35 % por encima de los límites permisibles. La normativa japonesa es muy restrictiva, ya que indica valores máximos de absorción del 3% para aplicaciones estructurales, los cuales no se



cumplen para los agregados reciclados estudio<sup>6</sup>. Los demás parámetros que se enlistan son menos indicativos de la calidad del agregado reciclado de acuerdo con la caracterización de agregados gruesos, aportando poca o nula afectación en el comportamiento del concreto fresco y endurecido.

La distribución granulométrica requerida en las normas japonesa y belga para agregados reciclados es similar a los requerimientos de las normas mexicanas para agregados gruesos naturales con una tamaño máximo  $\frac{3}{4}$ " (Ilustración 39):

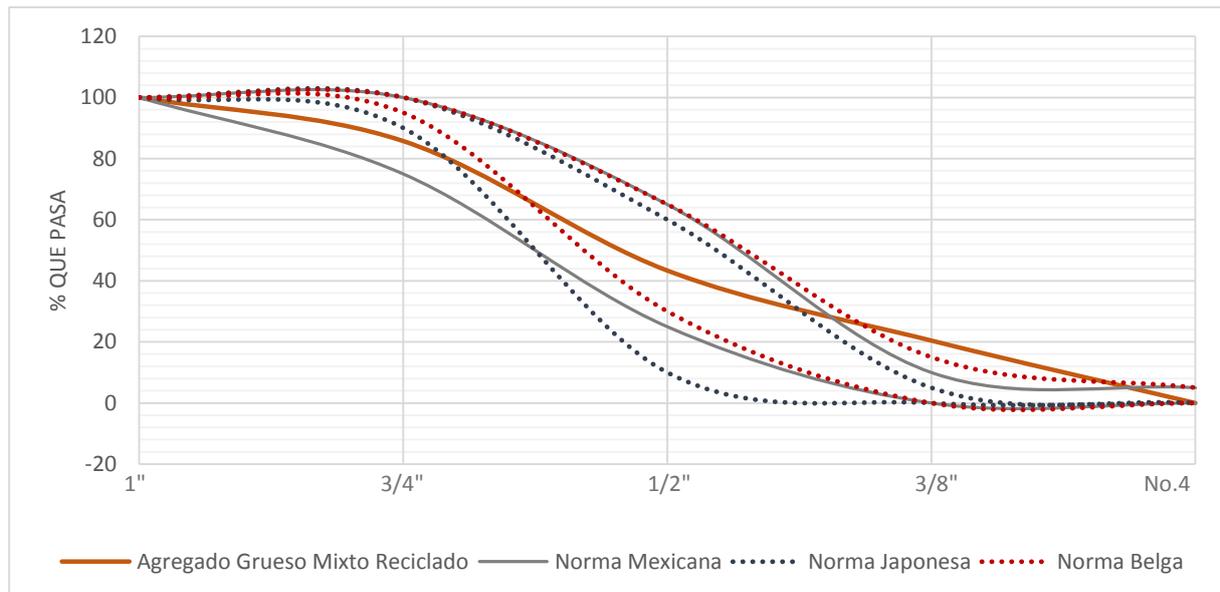


Ilustración 39 Comparativa de requerimientos granulométricos en agregados reciclados, T<sub>máx</sub> 3/4”.

### 8.3. Pruebas realizadas al concreto fresco.

#### 8.3.1. Revenimiento.

El revenimiento de las mezclas elaboradas con agregados naturales se sitúa dentro los límites establecidos en la norma NMX-C-156-1997-ONNCCE, que indica una tolerancia de  $\pm 2.5$  mm para revenimientos de 10 cm. Sin embargo, para las mezclas elaboradas con agregados reciclados no se pudo llegar a la fluidez de proyecto en ninguna de las mezclas, a pesar de las adiciones (fluidificante CRISOTAN R-5 y emulsión al 1%, 4%) y las correcciones por humedad actual en el momento de realizar la mezcla (Ilustración 40). Muchos autores apuntan a que los concretos reciclados necesitan mayor cantidad de agua que sus correspondientes concretos

<sup>6</sup> Recordar que los objetivos planteados en esta investigación están encaminados a aplicaciones en concretos para pavimentos rígidos en donde las especificaciones son inferiores.



convencionales para conseguir una misma trabajabilidad en un orden del 5% al 10%. La trabajabilidad es bastante difícil de controlar en concreto reciclado debido a la cantidad de mortero adherido. Se ha observado en la bibliografía consultada que mantener los agregados reciclados en inmersión 10 minutos antes de la elaboración ayuda a la fluidez y a la buena consistencia del concreto fresco.

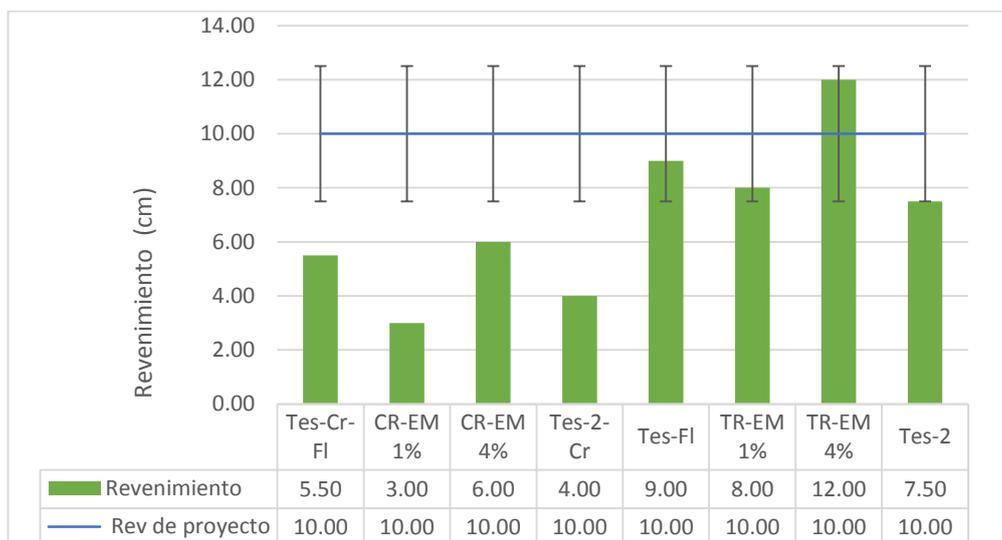


Ilustración 40 Revenimientos para las diferentes mezclas.

#### 8.4. Pruebas no destructivas.

##### 8.4.1. Velocidad de pulso ultrasónico.

Los resultados obtenidos a partir de la prueba de velocidad de pulso indican una velocidad superior en concretos convencionales que en concretos reciclados. Sin embargo, todas las mezclas se consideran de buena calidad según el rango que establece Malhotra ( $3660 < V < 4755$  m/s), como también según la normativa mexicana (NMX-C-275-ONNCCE-2004, 2004) para velocidades superiores a 23500 m/s. Esto quiere decir que existen pocos vacíos o agrietamientos bajos o nulos, lo que garantiza la uniformidad en los concretos reciclados. Por lo tanto hay poca afectación por el agrietamiento que tiene el mortero adherido en agregados reciclados.

##### 8.4.2. Resistividad Eléctrica.

Las resistividades eléctricas aumentan con el tiempo en todas las mezclas analizadas. Para las edades de 7, 28 y 45 días ambas mezclas (mezclas con agregados naturales y mezclas con agregados reciclados) tienen un alto riesgo a la corrosión; sin embargo, ese riesgo desciende al pasar las edades de prueba (90,300, 450, 500 días), hasta posicionarse en un riesgo moderado. La resistividad eléctrica de



los concretos reciclados es entre un 18% a 40% inferior, debido a que esta propiedad está íntimamente relacionada con la microestructura de la matriz cementicia y distribución de los poros, y los concretos reciclados contienen una mayor cantidad de mortero (10% aproximadamente) negativamente en el resto de las propiedades del concreto endurecido.

### 8.4.3. Porosidad efectiva.

Se concluye que la implementación de agregados reciclados aumenta la porosidad en todas las mezclas (Ilustración 39), el concreto reciclado es más permeable debido a la mayor porosidad de los agregados reciclados, provocada por la presencia de la pasta de cemento.

Se observa que las mezclas con agregados naturales se pueden clasificar como calidad moderada y las mezclas con agregados reciclados tienen una durabilidad inadecuada. Esto nos lleva a pensar que se tiene la posibilidad de que los agregados reciclados pueden funcionar como un foco de propagación de la carbonatación, ya que no impide el paso del CO<sub>2</sub> como un agregado natural, generando problemas de carbonatación (Ilustración 41).

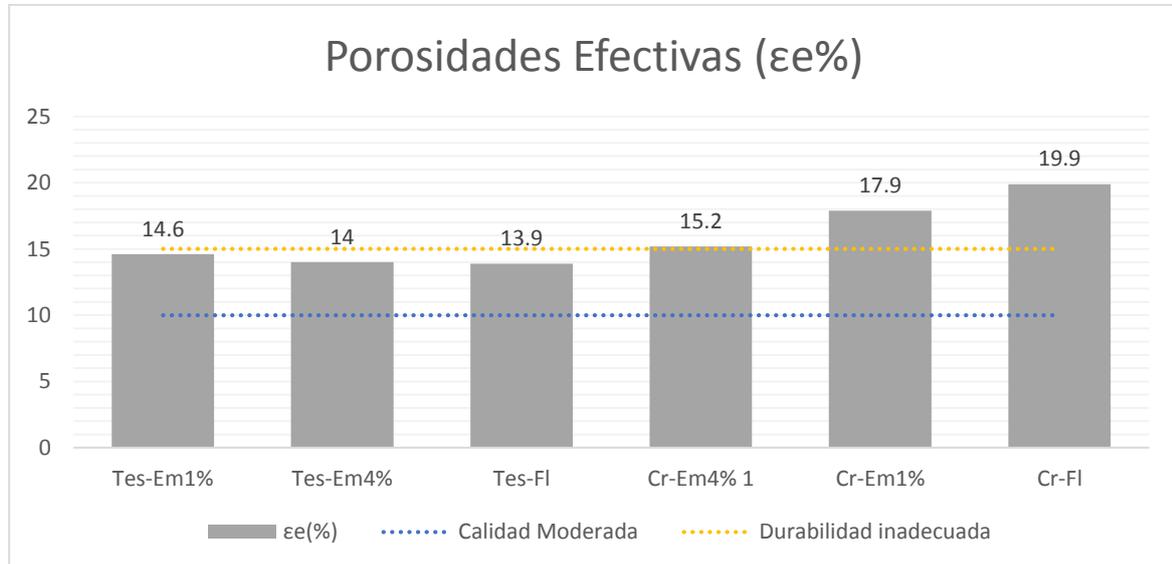


Ilustración 41 % de Porosidad Efectiva de las Diferentes Mezclas.

## 8.5. Pruebas destructivas.

### 8.5.1. Resistencia a la compresión.

Al comparar globalmente todos los resultados de la resistencia a la compresión que han tenido todas las muestras en las diferentes edades (7, 28, 45, 450 y 500 días),



el uso de agregados reciclados ha provocado un descenso de la resistencia en todos los casos, tal y como se esperaba (Ilustración 42).

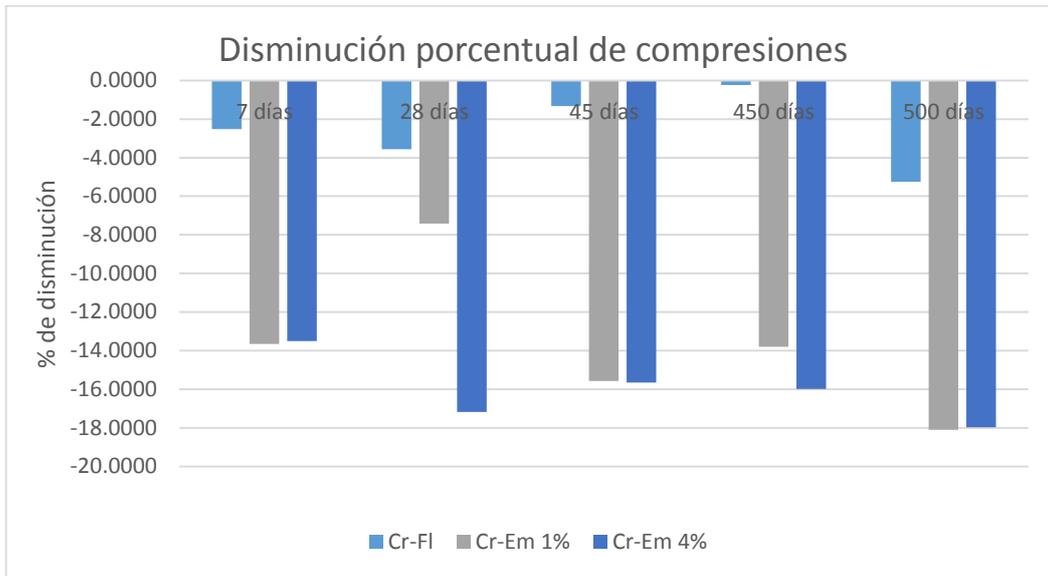


Ilustración 42 Disminución porcentual de compresiones en las diferentes edades (7, 28, 45, 450 y 500 días).

La ilustración muestra que el rango de disminución va del 2.5% al 16%, cumpliéndose el orden que la normativa española (GERD, 2012) considera, en una sustitución del 100% del agregado grueso reciclado, con pérdidas alrededor del 20%.

A partir de los resultados de la resistencias a compresión, se observa que la adición del 0.66% de fluidificante en peso del cemento ayudó al buen comportamiento del concreto reciclado fresco, por ende, resistencias similares a las testigos. Los porcentajes de emulsión (1%, 4%) a pesar de que ayudaron al comportamiento del concreto fresco, no ayudaron a reducir la diferencia entre los resultados a compresión entre las mezclas con agregados naturales y agregados reciclados

### 8.5.2. Flexión.

Komastka (2004), propone rangos de 37 kg/cm<sup>2</sup> a 50 kg/cm<sup>2</sup> para un  $f'c = 350$  kg/cm<sup>2</sup> a los 28 días de edad. Los valores resultantes a las diferentes edades (28, 45 y 90 días) de esta investigación se presentan dentro de los rangos establecidos. En conclusión, para esta prueba que es determinante para concretos de pavimentos rígidos, no se consideran relevantes las diferencias mostradas (del 2% al 6%). Puede afirmarse que no existen diferencias significativas entre los valores de flexión entre concretos con agregados reciclados y agregados naturales. Por ejemplo, la disminución media de las muestras a los 28 días fue de tan solo el 2.02%.



Esta afirmación es de particular interés, ya que pone de manifiesto que la implementación de agregados reciclados para concretos en pavimentos rígidos no tiene afectaciones relevantes. En primer lugar, revela que el concreto reciclado tiene un comportamiento igual (o al menos muy semejante) al concreto convencional en lo referente a la flexión. Por otro lado, demuestra que la implementación de agregados reciclados no ejerce ningún tipo de efecto negativo relevante.



## 9. CONCLUSIONES.

De acuerdo con los resultados obtenidos durante la experimentación, se puede concluir que los agregados gruesos reciclados provenientes de la demolición de edificios, pavimentos de concreto hidráulico y especímenes de laboratorio, pueden considerarse como agregados gruesos en la fabricación de nuevos concretos para pavimentos rígidos. Por lo tanto, representan una solución factible para contribuir parcialmente ante los problemas de contaminación ambiental. Sin embargo, es necesario tomar en cuenta algunas consideraciones, ya que cambian en función del tipo de agregado reciclado.

Se recomienda utilizar agregados que sean provenientes del 100% de la demolición de concretos, ya que cumplen con especificaciones altas de agregados reciclados, produciendo así un concreto que satisface los requerimientos en agregados para pavimentos rígidos. A partir de la trituración, se recomienda utilizar agregados reciclados con tamaños máximos superiores a 3/4” para no aumentar la cantidad de cemento y de esta manera poder fabricar concretos competitivos con los concretos convencionales.

Este estudio ratifica experiencias similares en otras investigaciones, comprobándose que es posible aprovechar los residuos de la construcción para concretos no estructurales.

La buena caracterización de agregados reciclados genera los ajustes necesarios para tener comportamientos del concreto fresco y endurecido adecuados. Sin embargo, es necesario tomar en cuenta las altas absorciones que toman los agregados reciclados y optar por adiciones que contrarresten la pérdida de agua en el momento de la elaboración de las mezclas, o en su defecto hacer una inmersión anticipada de los agregados para producir relaciones agua/cemento efectivas iguales a las de proyecto.

A partir de la prueba de flexión realizada, este estudio demuestra que la implementación de agregados reciclados para concretos en pavimentos rígidos no tiene afectaciones relevantes. Como ejemplo, la disminución media de las muestras a los 28 días fue de tan solo el 2.02% con respecto a la mezcla testigo.

La actividad de reciclar provoca una serie de impactos ambientales. A pesar de no contar en esta investigación con datos cuantitativos que muestren los impactos



positivos que genera el reciclaje de los residuos de la construcción, podemos describirlos en base a la información bibliográfica y a las observaciones realizadas. Estas acciones genera un impacto positivo en relación a preservar un recurso natural no renovable (material pétreo), evita las disposiciones finales en rellenos sanitarios o vertederos no controlados, y promueve el ahorro energético significativo, evitando la explotación de bancos y transportes a largas distancias.

En este trabajo no se han contemplado aspectos vinculados a la durabilidad, en los que podría ser de gran afectación la cantidad de mortero adherido. A partir de las pruebas no destructivas en concretos reciclados, se aprecia un aumento considerable al paso de agentes externos en las pruebas de porosidad efectiva y resistividad. De esta manera, se propone para investigaciones futuras un conjunto de análisis relacionados con aspectos de durabilidad y concreto reforzado.



## BIBLIOGRAFÍA

- ACHE grupo de trabajo Hormigón. (septiembre 2006). *Monografía "utilización de árido reciclado para la fabricación de hormigón estructural"*. Sevilla: ACHE.
- Alaejos Gutierrez, P. (2002). *recomodaciones para la utilización de árido reciclado en Hormigón estructural*. CEDEX.
- Alaejos Gutiérrez, P. (2008). Tipos y Propiedades de áridos Reciclados. (CEDEX, Ed.) *Catálogo de Residuos Utilizables en Construcción*, 3-10.
- Anne chauveinc, J. (2011). *Estudio Experimental de propiedades mecánicas de hormigones con árido reciclado mediante la modificación del método de mezclado del hormigón*. Santiago de Chile: Universidad de Chile.
- CEDEX. (2010). *Residuos de Construcción y Demolición*. Madrid: Ficha técnica 4.1.
- CEDEX. (2011). *Reciclado de Pavimentos de Hormigón*. Madrid: ficha Técnica 5.2.
- CEDEX. (2011). *Uso de áridos reciclados mixtos procedentes de Residuos de Construcción y Demolición*. País Vasco, España: Ihobe.
- Chávez García, H. (2012). *Análisis comparativo entre técnicas no destructivas y destructivas aplicadas a la caracterización del concreto hidráulico elaborado con agregados volcánicos y cemento CPC 30R RS*. Morelia: Centro de Investigaciones y desarrollo del estado de Michoacán, Morelia.
- Cmd Domingo y Lazaro ingenieros. (17 de Enero de 2016). *Divisare.com*. Obtenido de <http://divisare.com/projects/212878-cmd-domingo-y-lazaro-ingenieros-puente-sobre-el-rio-turia-valencia>
- Concreto, Estructura, Propiedades de los materiales*. (1998). D.F, México: Instituto Mexicano del Cemento.
- de Guzmán Báez, A. (2010). *Estudio de las propiedades fundamentales de elementos prefabricados de hormigón no estructurales, con incorporación de árido reciclado en su fracción gruesa y fina*. Madrid, España: Universidad Politécnica de Madrid.
- (2004). *Diseño y Control de Mezclas de Concreto*. Imt. México: Portland Cement Association.
- Geraldes, V. L. (2013). *Estudio de hormigones reciclados no estructurales fabricados con áridos reciclado mixto: Propiedades mecánicas y expansión debida al contenido de sulfatos*. Madrid: Universidad politécnica de Madrid.



- GERD. (2012). *Guía Española de Áridos Reciclados Procedentes de RCD*. Madrid, España.
- Gonzalo A. Valdés, e. a. (2007). Propiedades Físicas y Mécanicas de bloques de Hormigón Compuesto con Áridos Reciclados. *Departamento de ingeniería de obras Civiles, Universidad de la Frontera*, 18(3), 81-88.
- Gutiérrez Avedoy, V. (sdds de sdsd de 2006). *Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de Residuos*. (R. M. Lalli, Ed.) México, df, México: Instituto Nacional de Ecología.
- Hernández Michaca, J., Sánchez Granados, V., Castillo Chaires, I., Damián Hernández, S. A., & Téllez Gutiérrez, R. (2001). Impacto Ambiental de Proyectos Carreteros. Efectos por la Construcción y Conservación de Superficies de Rodamiento: II Pavimentos Rígidos. (IMT, Ed.) *Publicación Técnica No. 173*, 6-36.
- IMCYC. (2002). *Pavimientos de Concreto para Carreteras* (Vol. I). D.F. , México: Instituto Mexicano del Cemento Y del Concreto.
- IMCYC. (2007). Reciclar es lo de hoy. *Construcción y Teconología*, 45.
- IMT. (2001). Impacto Ambiental de proyectos Carreteros. Efectos por la Construcción y Consevacion de Superficies: II pavimentos Rígidos. *Publicación Técnica No. 173*, 6-36.
- Instituto Mexicano del Transporte. (2014). *Estado del arte sobre el uso de residuos y sub-productos industriales en la construcción de carreteras*. División de Laboratorios de la Coordinación de Infraestructura. Queretaro: Instituto Mexicano del Transporte.
- Kosmatka Steven H., B. K. (2004). *Diseño y Conctrol de Mezclas de Concreto*. Illinois, EEUU: Skokie.
- ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos. (2015). D.F. México: Secretaria de Servicios Parlamentarios.
- Métodos de evaluación de las reacciones álcali-sílice en hormigones con áridos reciclados. (Agosto de 2009). *Revista de Construcción*, 24, 143.
- Molina, W. M. (Septiembre de 2015). Concreto reciclado: una revisión. *Revista Alconpat*, 9.
- Neville, A. M. (1999). *Tecnología del concreto*. México, D.F: Miembro Nacional de la Industria.



- NMX-C-030-ONNCCE. (2004). *Industria de la Construcción-Agregados-Muestreo*. ONNCCE.
- NMX-C-059-ONNCCE. (2010). *Industria de la Construcción-Cementantes Hidráulicos-Determinación del Tiempo de Fraguado de Cementantes Hidráulicos (Método de vicat)*. ONNCCE.
- NMX-C-111-ONNCCE. (2004). *Industria de la Construcción-Agregados para Concreto Hidráulico-Especificaciones y Métodos de Prueba*. ONNCCE.
- NMX-C-156-ONNCCE. (2010). *Industria de la Construcción-Concreto Hidráulico-Determinación del Revenimiento en el Concreto Fresco*. ONNCCE.
- NMX-C-164-ONNCCE. (2004). *Industria de la Construcción-Agregados-Determinación de la Masa Específica y Absorción del Agregado Grueso-Método de Prueba*. ONNCCE.
- NMX-C-165-ONNCCE. (s.f.). *Industria de la Construcción-Agregados-Determinación de la Masa Específica y Absorción del Agregado Fino-Método de Prueba*. ONNCCE.
- NMX-C-255-ONNCCE. (2013). *Industria de la Construcción-Aditivos Químicos para Concreto-Especificaciones y Métodos de Ensayo*. ONNCCE.
- NMX-C-275-ONNCCE-2004. (2004). *Industria de la Construcción-Concreto-Determinación de la velocidad de pulso a través del concreto*. Mexico.
- Olivera Bustamante, F. (2009). *Estructuras en Vías Terrestres* (Décima ed.). D.F., México.
- Páramo, A. R. (2011). *Tipología de áridos reciclados en Cataluña y su aplicabilidad*. barcelona: Universidad Politecnica de Cataluña.
- Red Durar. (1998). *Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado*. (segunda ed.). Río de Janeiro, Brazil.
- Red Durar. (2000). *Manual de Inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado*. Río de Janeiro, Brazil: CYTED.
- Sánchez Rodríguez, A. (2011). *Análisis de la aplicabilidad de los áridos reciclados mixtos en hormigones*. Barcelona: Universidad Politénica de Cataluya.
- Sánchez, S. d. (2004). *Estudio sobre la Utilizacion de árido reciclado par ala fabricación de Hormigon Estructural*. Madrid, España: politécnica de Madrid.
- SCT N-CMT-2-02-005-04. (2004). *Calidad del concreto hidráulico*. México: Secretaría de comunicaciones y Trasnportes.



Subsecretaría de Normatividad. (2008). *Programa Nacional para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos 2009-2012*. Fomento Ambiental, Urbano y Turístico. D.F. México: Servicios y Publicaciones Grande, S.A de C.V.