

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD MULTIDISCIPLINARIA DE OCCIDENTE  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA**



**TRABAJO DE GRADUACIÓN:  
“INVESTIGACIÓN SOBRE EL USO DE LLANTA TRITURADA COMO  
AGREGADO EN LA FABRICACIÓN DE CONCRETO”.**

**PARA OPTAR AL GRADO DE:  
INGENIERO CIVIL**

**PRESENTADO POR:  
ARANA MARTÍNEZ, CARLOS MAURICIO.  
AVILÉS QUINTANILLA, ARMANDO ERNESTO.  
MORALES RAMOS, MILTON ANTONIO.**

**DOCENTE DIRECTOR:  
ING. RAÚL ERNESTO MARTÍNEZ BERMÚDEZ**

**SEPTIEMBRE 2011  
SANTA ANA, EL SALVADOR, CENTRO AMÉRICA**

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD MULTIDISCIPLINARIA DE OCCIDENTE  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA**

**TRABAJO DE GRADUACIÓN:  
“INVESTIGACIÓN SOBRE EL USO DE LLANTA TRITURADA COMO  
AGREGADO EN LA FABRICACIÓN DE CONCRETO”.**

**PARA OPTAR AL GRADO DE:  
INGENIERO CIVIL**

**PRESENTADO POR:  
ARANA MARTÍNEZ, CARLOS MAURICIO.  
AVILÉS QUINTANILLA, ARMANDO ERNESTO.  
MORALES RAMOS, MILTON ANTONIO.**

**DOCENTE DIRECTOR:  
ING. RAÚL ERNESTO MARTÍNEZ BERMÚDEZ**

**SANTA ANA, 19 DE SEPTIEMBRE 2011**

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR**

**RECTOR:**

**ING. Y MSC. RUFINO QUEZADA SÁNCHEZ**

**VICE-RECTOR ACADÉMICO:**

**ARQ. Y MASTER MIGUEL ANGEL PEREZ RAMOS**

**VICE-RECTOR ADMINISTRATIVO:**

**LICDO. Y MASTER OSCAR NOÉ NAVARRETE**

**SECRETARIO GENERAL:**

**LICDO. DOUGLAS VLADIMIR ALFARO CHÁVEZ**

**FISCAL GENERAL:**

**DR. RENÉ MADECADEL PERLA JIMÉNEZ**

**FACULTAD MULTIDISCIPLINARIA DE OCCIDENTE**

**DECANO:**

**LICDO. JORGE MAURICIO RIVERA**

**VICE-DECANO:**

**LICDO. Y MASTER ELADIO EFRAÍN ZACARÍAS ORTEZ**

**SECRETARIO DE FACULTAD:**

**LICDO. VÍCTOR HUGO MERINO QUEZADA**

**JEFE DEL DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA:**

**ING. RAÚL ERNESTO MARTÍNEZ BERMÚDEZ**

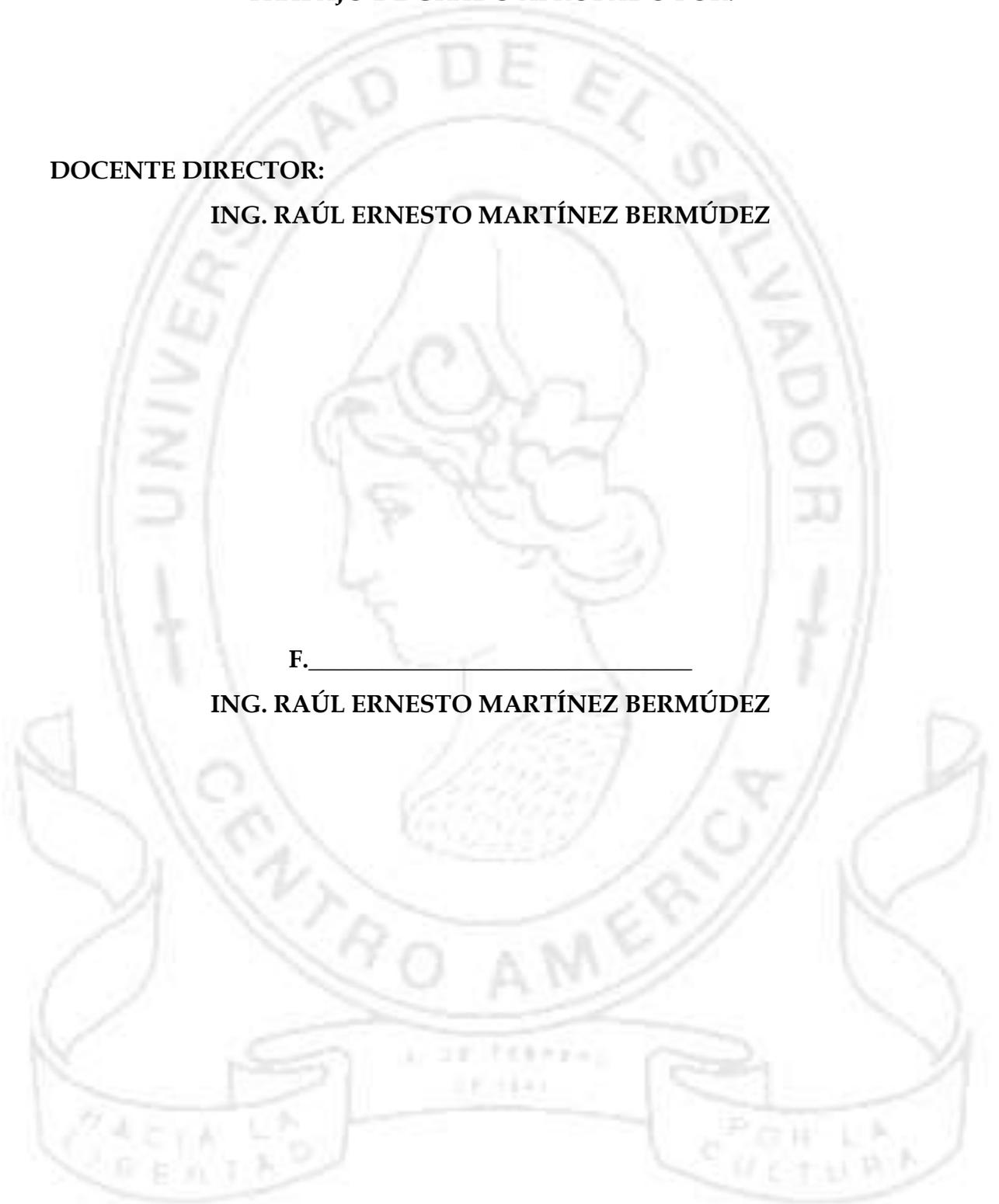
**TRABAJO DE GRADO APROBADO POR:**

**DOCENTE DIRECTOR:**

**ING. RAÚL ERNESTO MARTÍNEZ BERMÚDEZ**

F. \_\_\_\_\_

**ING. RAÚL ERNESTO MARTÍNEZ BERMÚDEZ**





***A mi familia,***

***Mi Padre.***

*Por creer siempre en mí y apoyarme en mis decisiones, por darme todo lo que necesite en la vida y tenerme paciencia en los momentos que mi carácter se complicaba.*

***Mi Hermano.***

*Por confiar en mí y creer que a pesar de las adversidades saldríamos adelante, por apoyarme en los momentos más difíciles y estar siempre junto a mí.*

***Mi Madre.***

*Por darme su apoyo y consejos en los momentos que más la necesite.*

***A mis compañeros de Tesis:***

***Milton Morales y Armando Avilés.***

*Por buscar siempre nuestro objetivo principal, por trabajar incansablemente en el desarrollo de la investigación y nunca darse por vencidos a pesar de las adversidades.*

***A los docentes de la Universidad de El Salvador, especialmente a:***

***Ing. Max Adalberto Hernández.***

*Por generar en nosotros el deseo a investigar e inculcarnos conciencia hacia el medio ambiente.*



***Ing. Joel Paniagua Torres.***

*Por compartir sus conocimientos y brindar su apoyo en momentos difíciles.*

***Al Instituto Salvadoreño del Cemento y del Concreto, especialmente a:***

***Ing. Rafael González.***

*Por creer en nuestro proyecto, por darnos el apoyo y recursos para lograr la investigación.*

***Ing. Ricardo Burgos.***

*Por asesorar la investigación y ayudarnos con sus correcciones para lograr el éxito de la investigación.*

***Tec. Julio Hernández.***

*Por ayudarnos en el desarrollo de los ensayos, por compartir sus conocimientos y aconsejar en los procesos de la investigación.*

**CARLOS MAURICIO ARANA**



### **A DIOS Y A LA SANTISIMA VIRGEN:**

*Por el don de la Vida, estar siempre a mi lado, guiarme en la selección de esta carrera y brindarme la oportunidad de culminar esta investigación con éxitos.*

### **A MIS PADRES:**

*Armando Avilés y Norma de Avilés, por brindarme su confianza y amor, por darme la oportunidad de estudiar y motivarme a seguir siempre hacia adelante, por enseñarme que la vida está llena de oportunidades que solamente con sacrificio y lucha se pueden llegar a alcanzar.*

### **A MIS HERMANOS:**

*José Oswaldo y Carolina Avilés, por el apoyo, el cariño y la confianza que siempre hemos tenido, por ser ambos un ejemplo a seguir.*

*Tatiana, algunas veces la vida resulta ser contradictoria, esperaba compartir contigo este triunfo, pero Dios tenía preparado algo mejor para Ti, no tengo duda que has sido mi angelito desde que te fuiste a inicios de este año y que estuviste pidiéndole mucho a Dios por mí y mis compañeros de tesis para que todo nos saliera bien, te dedico todo mi esfuerzo a Ti y de una manera muy especial a tus hijitos Rodriguito, Fernandita y Sophia.*

### **A MIS COMPAÑEROS DE TESIS:**

*Carlos Arana y Milton Morales, por haber apoyado la idea de trabajar en esta investigación, por ser excelentes compañeros y amigos.*

### **A MIS AMIGOS:**

*Ulises Flores y Evelin Barrientos, por su ayuda, confianza y amistad, por brindarme la oportunidad de ser parte de sus proyectos.*



**AL ING. RAFAEL GONZÁLEZ:**

*Por habernos abierto las puertas del ISCYC, brindarnos el apoyo, la confianza y la oportunidad de desarrollar esta investigación.*

**AL ING. RICARDO BURGOS OVIEDO:**

*Por asesorar, aconsejar, corregir y apoyar nuestras ideas, por ayudarnos a ordenar y convertir el contenido de esta tesis en un excelente trabajo.*

**AL TEC. JULIO HERNÁNDEZ Y SUS ASISTENTES DE LABORATORIO:**

*Por haber compartido su experiencia en el desarrollo de cada una de las pruebas de laboratorio que realizamos, por habernos brindado su amistad y confianza.*

**AL ING. RAÚL BERMÚDEZ:**

*Por ser el Docente Director de esta investigación y haber dedicado parte de su tiempo a la revisión de este documento.*

**A MIS DOCENTES:**

*Ing. y Lic. Rafael Colón, Ing. William Ortiz, Ing. Max Hernández, Ing. Ever Aguilar y Tec. Josué Vázquez, por su amistad y ayuda cada vez que he necesitado de Uds., por todos los conocimientos que compartieron a lo largo de la carrera.*

**ARMANDO E. AVILÉS**



**A los miembros del Instituto Salvadoreño del Cemento y del Concreto ISCYC,** Al Ing. Rafael González, por brindar el apoyo, los recursos y la asesoría dentro de nuestra investigación, al Ing. Ricardo Burgos Oviedo por participar como nuestro asesor externo, por compartir su gran experiencia y sus conocimientos, al Técnico Julio Hernández por dirigirnos y ayudarnos en el desarrollo de las pruebas de laboratorio, a la institución por apoyarnos en la obtención de los materiales, por permitirnos hacer uso de sus laboratorios, y de toda la maquinaria y herramientas que utilizamos para la realización de los métodos de ensayo.

**Especialmente a nuestro docente Director, el Ing. Raúl Ernesto Martínez Bermúdez,** por apoyarnos con su asesoría técnica en el desarrollo de la investigación, por la dedicación en el afán de transmitir los conocimientos que son parte del desarrollo personal y profesional en la carrera de Ingeniería Civil.

**A nuestros docentes:** Ing. Jorge William Ortiz Sánchez, Ing. Max Adalberto Hernández, Ing. Joel Paniagua, Ing., Rafael Colon, Ing. Carlos Obdulio Góchez, Ing. Mauricio García Eguizábal, quienes con su orientación y sabios consejos que a diario nos daban cuando nos impartían sus conocimientos dentro del desarrollo de las clases, definieron el rumbo de éxito que hoy alcanzamos.

**Agradecemos al Técnico Josué Vásquez,** por ayudarnos a la obtención del material sintético, por prestarnos sus herramientas, su casa, su tiempo, por su apoyo incondicional y por brindarnos su amistad.

A todos gracias, por su apoyo hacia con nosotros, y permitir el desarrollo de una nueva técnica de aplicación en la rama de la Ingeniería Civil, y crear una alternativa más como solución, a una problemática medio ambiental de nuestro país.



*Sobre todas las cosas gracias ti señor, padre, Dios todo poderoso, por permitirme declarar este logro grande como una bendición y mi oportunidad y quiero dedicártelo a ti señor para tu gloria.*

*Gracias a mi padre, Salvador Antonio Morales Cadenas, por permitirme heredar de él; y enseñarme que las cosas grandes nunca se obtienen fácilmente y hay que esforzarse siempre por los sueños y nunca perder la fe. Gracias papá porque en medio de la tragedia y el dolor inmenso en mi corazón por perderte un día, pude encontrar el coraje para continuar y seguir adelante; y aunque sólo me quede un marco con tu foto llena de recuerdos y amor, gracias por estar conmigo siempre en cada paso, en cada lagrima, en cada sueño y en cada logro.*

*Y a mi madre, Berta Luz Ramos de Morales, quien desde ese día lucha por mí y mis hermanos, gracias por enseñarme a tener paciencia, ya que la vida no es fácil, hay alegrías y muchas tristezas, pero que hay que tener tolerancia y principalmente fe en Dios.*

*A mis hermanos por tenerme paciencia, por mi carácter, por ayudarme cuando se los pedí y por brindarme su apoyo cuando no se los pedí, cuando más lo necesitaba, gracias por estar conmigo en todo momento.*

*Y sobre todo a ese ser especial por haberme brindado su apoyo incondicional todo este tiempo, por darme la confianza y tener fe en mí, creer en mis palabras y compartir mis sueños.*

*También quiero dar gracias a todos mis hermanos por permitirme acercarme a ellos y conocerlos bien, y darme cuenta que aunque no crecimos juntos somos tan parecidos, gracias a toda mi familia por brindarme amor y confianza, y darle a mi corazón tantos momentos de felicidad y esperanza.*



*Gracias a mi amigo por ayudarme, aconsejarme, y orientarme con su experiencia todo este tiempo, y ahora a esta fecha puedo decir gracias a todos mis amigos, por brindarme su amistad, por ayudarme de una u otra manera a conquistar este sueño, hoy hecho una realidad.*

*Gracias señor por rodear mi vida con personas tan maravillosas, y así con tu obras en mi vida, derrama bendiciones en sus vidas y en sus familias, llena de gozo su corazón y acércalos a ti señor.*

*Grandes palabras, a veces en la vida cuando uno se cae, puede llegar a pensar que no tiene fuerzas para poder levantarse de nuevo, ¿crees que tienes esperanza?*

*Y aunque parezca imposible levantarse, no es así, intentaré levantarme cien veces y si vuelvo a caerme las cien veces, si fracaso y me doy por vencido, ¿crees que así podrás levantarte?, No.*

*Si fracaso, lo volveré a intentar, otra vez y otra...*

*Solo quiero que sepas que no es el fin, lo que importa es como termines, ¿terminaras siendo fuerte?, y así encontrarás la fuerza para levantarte.*

*Mira que te mando que te esfuerces y seas valiente, no temas ni desmayes, porque Jehová tu Dios estará contigo donde quieras que vayas, yo soy tu Dios quien te sostiene, nadie te podrá hacer frente.*

**MILTON ANTONIO MORALES RAMOS**



## INDICE GENERAL

<b>GLOSARIO .....</b>	<b>22</b>
<b>SIGLAS .....</b>	<b>29</b>
<b>INTRODUCCIÓN GENERAL .....</b>	<b>30</b>
<b>RESUMEN EJECUTIVO .....</b>	<b>31</b>
<b>CAPITULO 1. INTRODUCCION A LA INVESTIGACION .....</b>	<b>32</b>
1.1 INTRODUCCIÓN .....	33
1.2 ANTECEDENTES .....	35
1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	38
1.4 OBJETIVOS.....	40
1.5 ALCANCES.....	41
1.6 LIMITACIONES .....	43
1.7 JUSTIFICACIÓN .....	44
<b>CAPITULO 2..LITERATURA GENERAL SOBRE EL RECICLAJE Y APLICACIONES DE LA LLANTA TRITURADA</b>	<b>46</b>
2.1 INTRODUCCIÓN .....	47
2.2 LITERATURA GENERAL SOBRE EL RECICLAJE DE LLANTAS EN EL SALVADOR .....	48
2.3 APLICACIONES DE LA LLANTA DENTRO DE LA INGENIERIA EN EL SALVADOR .....	55
2.4 APLICACIONES DE LA GOMA DE LLANTA TRITURADA DENTRO DE LA INGENIERIA A NIVEL MUNDIAL .....	57
2.4.1 USO DE LA GOMA TRITURADA EN VERTEDEROS .....	57
2.4.2 USO DE LA GOMA TRITURADA PARA ABSORCIÓN DE METALES PESADOS Y SUSTANCIAS CONTAMINANTES.....	59
2.4.3 USO DE LA GOMA TRITURADA EN ASFALTO .....	60
2.4.4 USO DE LA GOMA TRITURADA EN TERRAPLENES.....	62
2.5 ESTUDIOS EXPERIMENTALES SOBRE PROPIEDADES DE LA GOMA DE LLANTA TRITURADA EN EL CONCRETO A NIVEL MUNDIAL .....	62
<b>CAPITULO 3. ENSAYOS DE LABORATORIO .....</b>	<b>64</b>
3.1 INTRODUCCIÓN .....	65
3.2 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LOS ENSAYOS. ....	66
3.2.1 ANÁLISIS GRANULOMETRICO. ....	66
3.2.1.1 TAMIZADO PARA AGREGADO GRUESO NATURAL Y AGREGADO GRUESO SINTETICO, ASTM C-136...67	
3.2.1.2 TAMIZADO PARA AGREGADO FINO NATURAL Y AGREGADO FINO SINTETICO, ASTM C-136. ....	71
3.2.2 GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN.....	77
3.2.2.1 GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN DEL AGREGADO GRUESO NATURAL, ASTM C-127.....	77
3.2.2.2 GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN DEL AGREGADO FINO NATURAL, ASTM C-128. ....	83
3.2.2.3 GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN DEL AGREGADO GRUESO SINTÉTICO, NMX-T-010-SCFI.....	92
3.2.2.4 GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN DEL AGREGADO FINO SINTÉTICO, NMX-T-010-SFFI. ....	94
3.2.3 PESO VOLUMETRICO. ....	94



3.2.3.1 PESO VOLUMÉTRICO DEL AGREGADO GRUESO NATURAL, AGREGADO GRUESO SINTÉTICO Y EL AGREGADO FINO NATURAL Y FINO SINTÉTICO, ASTM C-29.....	95
<b>3.2.4 CONTENIDO DE HUMEDAD. ....</b>	<b>102</b>
3.2.4.1. CONTENIDO DE HUMEDAD DEL AGREGADO GRUESO NATURAL, ASTM C-566.....	103
3.2.4.2 CONTENIDO DE HUMEDAD DEL AGREGADO FINO NATURAL, ASTM C-566. ....	104
3.2.4.3 CONTENIDO DE HUMEDAD DEL AGREGADO GRUESO SINTÉTICO.....	105
3.2.4.4 CONTENIDO DE HUMEDAD DEL AGREGADO FINO SINTÉTICO. ....	106
<b>3.3 PRUEBAS EN EL CONCRETO CONVENCIONAL Y CON PARTICULAS DE LLANTA TRITURADA. ....</b>	<b>106</b>
<b>3.3.1 CONCRETO EN ESTADO FRESCO. ....</b>	<b>106</b>
3.3.1.1 PESO VOLUMETRIC DEL CONCRETO, ASTM C-138.....	107
3.3.1.2 CONTENIDO DE AIRE DEL CONCRETO, METODO DE ENSAYO ASTM C-231. ....	108
3.3.1.3 REVENIMIENTO DEL CONCRETO, ASTM C-143. ....	111
3.3.1.4 TEMPERATURA DEL CONCRETO, ASTM C-1064.....	112
3.3.1.5 FABRICACIÓN DE ESPECIMENES PARA RESISTENCIA. ASTM C-31. ....	112
<b>3.3.2 CONCRETO EN ESTADO ENDURECIDO. ....</b>	<b>114</b>
3.3.2.1 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL CONCRETO, ASTM C-39.....	114
3.3.2.2 RESISTENCIA A LA FLEXIÓN DEL CONCRETO, ASTM C 78.....	117
3.3.2.3 VELOCIDAD DE PULSO EN EL CONCRETO, ASTM C 597. ....	121
3.3.2.4 MODULO DE ELASTICIDAD ESTÁTICO, ASTM C-469. ....	123
<b>CAPITULO 4. MATERIALES .....</b>	<b>127</b>
4.1 INTRODUCCIÓN.....	128
4.2 DESCRIPCION DE LOS MATERIALES .....	129
4.2.1 AGREGADOS MINERALES NATURALES.....	129
4.2.1.1 ARENA .....	129
4.2.1.2 GRAVA.....	131
4.2.1.3 CEMENTO.....	133
4.2.2 AGREGADOS SINTETICOS.....	133
4.2.2.1 GOMA DE LLANTA TRITURADA (FINA).....	133
4.2.2.2 LLANTA TRITURADA (GRUESA).....	136
<b>CAPITULO 5. DISEÑO DE MEZCLAS .....</b>	<b>141</b>
5.1 INTRODUCCIÓN.....	142
5.2 DISEÑO DE MEZCLAS .....	143
5.3 CARACTERÍSTICAS DE LA MEZCLA.....	143
5.3.1 RELACIÓN A/C Y RESISTENCIA $f'_c$ DE LOS DISEÑOS DE MEZCLA .....	144
5.3.2 AGREGADOS. ....	144
5.3.3 REVENIMIENTO.....	145
5.3.4 CONTENIDO DE AGUA. ....	146
5.3.5 CONTENIDO DE AIRE.....	147
5.4 DISEÑOS DE MEZCLA BASADOS EN ACI 211.1.....	148
5.4.1 DISEÑO 1.....	150
5.4.2 DISEÑO 2.....	151
5.4.3 DISEÑO 3.....	152
5.4.4 DISEÑO 4.....	153



5.4.5 DISEÑO 5.....	154
5.4.6 DISEÑO 6.....	155
5.4.7 DISEÑO 7.....	156
5.4.8 DISEÑO 8.....	157
5.4.9 DISEÑO 9.....	158
5.4.10 DISEÑO 10.....	159
5.4.11 DISEÑO 11.....	160
5.4.12 DISEÑO 12.....	161
5.4.13 DISEÑO 13.....	162
5.4.14 DISEÑO 14.....	163
<b>CAPITULO 6. RESUMEN, ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS.....</b>	<b>164</b>
6.1. INTRODUCCIÓN.....	165
6.2 RESULTADOS OBTENIDOS EN LABORATORIO.....	166
6.2.1 CUADRO RESUMEN DE RESULTADOS DE ENSAYOS, DISEÑO 1.....	167
6.2.2 CUADRO RESUMEN DE RESULTADOS DE ENSAYOS, DISEÑO 2.....	168
6.2.3 CUADRO RESUMEN DE RESULTADOS DE ENSAYOS, DISEÑO 3.....	169
6.2.4 CUADRO RESUMEN DE RESULTADOS DE ENSAYOS, DISEÑO 4.....	170
6.2.5 CUADRO RESUMEN DE RESULTADOS DE ENSAYOS, DISEÑO 5.....	171
6.2.6 CUADRO RESUMEN DE RESULTADOS DE ENSAYOS, DISEÑO 6.....	172
6.2.7 CUADRO RESUMEN DE RESULTADOS DE ENSAYOS, DISEÑO 7.....	173
6.2.8 CUADRO RESUMEN DE RESULTADOS DE ENSAYOS, DISEÑO 8.....	174
6.2.9 CUADRO RESUMEN DE RESULTADOS DE ENSAYOS, DISEÑO 9.....	175
6.2.10 CUADRO RESUMEN DE RESULTADOS DE ENSAYOS, DISEÑO 10.....	176
6.2.11 CUADRO RESUMEN DE RESULTADOS DE ENSAYOS, DISEÑO 11.....	177
6.2.12 CUADRO RESUMEN DE RESULTADOS DE ENSAYOS, DISEÑO 12.....	178
6.2.13 CUADRO RESUMEN DE RESULTADOS DE ENSAYOS, DISEÑO 13.....	179
6.2.14 CUADRO RESUMEN DE RESULTADOS DE ENSAYOS, DISEÑO 14.....	180
6.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	181
6.3.1 CONTENIDO DE AIRE.....	181
6.3.2 PESO VOLUMÉTRICO.....	184
6.3.3 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN A 7 Y 28 DÍAS.....	187
6.3.4 RESISTENCIA A LA FLEXIÓN A 14 Y 28 DÍAS.....	189
6.3.5 MÓDULO DE ELASTICIDAD DINAMICO ( $E_d$ ).....	191
6.3.6 MÓDULO DE ELASTICIDAD ESTÁTICO ( $E_c$ ).....	194
6.4 ANÁLISIS COMPARATIVO DE RESULTADOS.....	197
6.4.1 ANÁLISIS COMPARATIVO DE RESISTENCIA A LA FLEXIÓN ENTRE DISEÑO DE CONTROL Y CONCRETO ESPECIAL.....	197
6.4.2 ANÁLISIS COMPARATIVO DE RESISTENCIA A LA FLEXIÓN <i>vs</i> RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN A LOS 28 DIAS.....	203
6.4.3 ANÁLISIS COMPARATIVO DE MODULO DE ELASTICIDAD ESTATICO ( $E_d$ ) <i>vs</i> RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN A LOS 28 DÍAS.....	204
6.4.4 ANÁLISIS COMPARATIVO DE COSTOS PARA 1 m <sup>3</sup> DE CONCRETO.....	206



<b>CAPITULO 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>210</b>
7.1 CONCLUSIONES .....	211
7.2 RECOMENDACIONES .....	213
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	214

### ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 4.01 Características Físicas de la Arena de Holcim Agregados. ....	129
Cuadro 4.02 Características Físicas de la Arena de Holcim Agregados. ....	131
Cuadro 4.03 Características Físicas de la Goma de llanta Triturada Fina.....	134
Cuadro 4.04 Características Físicas de la Llanta Triturada Gruesa. ....	139
Cuadro 5.01 Datos Generales del Diseño, Diseños 1-14. ....	148
Cuadro 5.02 Características de los Materiales, Diseños 1-14. ....	149
Cuadro 5.03 Diseño de Mezcla para 1 m <sup>3</sup> de Concreto, Diseño 1.....	150
Cuadro 5.04 Propiedades de los Agregados, Diseño 1. ....	150
Cuadro 5.05 Materiales para 1 m <sup>3</sup> de Concreto, Diseño 1. ....	150
Cuadro 5.06 Dosificación por Peso, Diseño 1. ....	150
Cuadro 5.07 Diseño de Mezcla para 1 m <sup>3</sup> de Concreto, Diseño 2.....	151
Cuadro 5.08 Propiedades de los Agregados, Diseño 2. ....	151
Cuadro 5.09 Materiales para 1 m <sup>3</sup> de Concreto, Diseño 2. ....	151
Cuadro 5.10 Dosificación por Peso, Diseño 2. ....	151
Cuadro 5.11 Diseño de Mezcla para 1 m <sup>3</sup> de Concreto, Diseño 3.....	152
Cuadro 5.12 Propiedades de los Agregados, Diseño 3. ....	152
Cuadro 5.13 Materiales para 1 m <sup>3</sup> de Concreto, Diseño 3. ....	152
Cuadro 5.14 Dosificación por Peso, Diseño 3. ....	152
Cuadro 5.15 Diseño de Mezcla para 1 m <sup>3</sup> de Concreto, Diseño 4.....	153
Cuadro 5.16 Propiedades de los Agregados, Diseño 4. ....	153
Cuadro 5.17 Materiales para 1 m <sup>3</sup> de Concreto, Diseño 4. ....	153
Cuadro 5.18 Dosificación por Peso, Diseño 4. ....	153
Cuadro 5.19 Diseño de Mezcla para 1 m <sup>3</sup> de Concreto, Diseño 5.....	154
Cuadro 5.20 Propiedades de los Agregados, Diseño 5. ....	154
Cuadro 5.21 Materiales para 1 m <sup>3</sup> de Concreto, Diseño 5. ....	154
Cuadro 5.22 Dosificación por Peso, Diseño 5. ....	154
Cuadro 5.23 Diseño de Mezcla para 1 m <sup>3</sup> de Concreto, Diseño 6.....	155
Cuadro 5.24 Propiedades de los Agregados, Diseño 6. ....	155
Cuadro 5.25 Materiales para 1 m <sup>3</sup> de Concreto, Diseño 6. ....	155
Cuadro 5.26 Dosificación por Peso, Diseño 6. ....	155
Cuadro 5.27 Diseño de Mezcla para 1 m <sup>3</sup> de Concreto, Diseño 7.....	156
Cuadro 5.28 Propiedades de los Agregados, Diseño 7. ....	156
Cuadro 5.29 Materiales para 1 m <sup>3</sup> de Concreto, Diseño 7. ....	156
Cuadro 5.30 Dosificación por Peso, Diseño 7. ....	156
Cuadro 5.31 Diseño de Mezcla para 1 m <sup>3</sup> de Concreto, Diseño 8.....	157
Cuadro 5.32 Propiedades de los Agregados, Diseño 8. ....	157
Cuadro 5.33 Materiales para 1 m <sup>3</sup> de Concreto, Diseño 8. ....	157
Cuadro 5.34 Dosificación por Peso, Diseño 8. ....	157
Cuadro 5.35 Diseño de Mezcla para 1 m <sup>3</sup> de Concreto, Diseño 9.....	158
Cuadro 5.36 Propiedades de los Agregados, Diseño 9. ....	158



Cuadro 5.37 Materiales para 1 m <sup>3</sup> de Concreto, Diseño 9. ....	158
Cuadro 5.38 Dosificación por Peso, Diseño 9. ....	158
Cuadro 5.39 Diseño de Mezcla para 1 m <sup>3</sup> de Concreto, Diseño 10.....	159
Cuadro 5.40 Propiedades de los Agregados, Diseño 10. ....	159
Cuadro 5.41 Materiales para 1 m <sup>3</sup> de Concreto, Diseño 10. ....	159
Cuadro 5.42 Dosificación por Peso, Diseño 10. ....	159
Cuadro 5.43 Diseño de Mezcla para 1 m <sup>3</sup> de Concreto, Diseño 11.....	160
Cuadro 5.44 Propiedades de los Agregados, Diseño 11. ....	160
Cuadro 5.45 Materiales para 1 m <sup>3</sup> de Concreto, Diseño 11. ....	160
Cuadro 5.46 Dosificación por Peso, Diseño 11. ....	160
Cuadro 5.47 Diseño de Mezcla para 1 m <sup>3</sup> de Concreto, Diseño 12.....	161
Cuadro 5.48 Propiedades de los Agregados, Diseño 12. ....	161
Cuadro 5.49 Materiales para 1 m <sup>3</sup> de Concreto, Diseño 12. ....	161
Cuadro 5.50 Dosificación por Peso, Diseño 12. ....	161
Cuadro 5.51 Diseño de Mezcla para 1 m <sup>3</sup> de Concreto, Diseño 13.....	162
Cuadro 5.52 Propiedades de los Agregados, Diseño 13. ....	162
Cuadro 5.53 Materiales para 1 m <sup>3</sup> de Concreto, Diseño 13. ....	162
Cuadro 5.54 Dosificación por Peso, Diseño 13. ....	162
Cuadro 5.55 Diseño de Mezcla para 1 m <sup>3</sup> de Concreto, Diseño 14.....	163
Cuadro 5.56 Propiedades de los Agregados, Diseño 14. ....	163
Cuadro 5.57 Materiales para 1 m <sup>3</sup> de Concreto, Diseño 14. ....	163
Cuadro 5.58 Dosificación por Peso, Diseño 14. ....	163
Cuadro 6.01 Resumen de Resultados de Ensayos, Diseño 1. ....	167
Cuadro 6.02 Resumen de Resultados de Ensayos, Diseño 2. ....	168
Cuadro 6.03 Resumen de Resultados de Ensayos, Diseño 3. ....	169
Cuadro 6.04 Resumen de Resultados de Ensayos, Diseño 4. ....	170
Cuadro 6.05 Resumen de Resultados de Ensayos, Diseño 5. ....	171
Cuadro 6.06 Resumen de Resultados de Ensayos, Diseño 6. ....	172
Cuadro 6.07 Resumen de Resultados de Ensayos, Diseño 7. ....	173
Cuadro 6.08 Resumen de Resultados de Ensayos, Diseño 8. ....	174
Cuadro 6.09 Resumen de Resultados de Ensayos, Diseño 9. ....	175
Cuadro 6.10 Resumen de Resultados de Ensayos, Diseño 10. ....	176
Cuadro 6.11 Resumen de Resultados de Ensayos, Diseño 11. ....	177
Cuadro 6.12 Resumen de Resultados de Ensayos, Diseño 12. ....	178
Cuadro 6.13 Resumen de Resultados de Ensayos, Diseño 13. ....	179
Cuadro 6.15 Análisis de Costo por m <sup>3</sup> de Concreto, Diseño 1.....	207
Cuadro 6.16 Análisis de Costo por m <sup>3</sup> de Concreto, Diseño 5.....	207
Cuadro 6.17 Análisis de Costo por m <sup>3</sup> de Concreto, Diseño 2.....	207
Cuadro 6.18 Análisis de Costo por m <sup>3</sup> de Concreto, Diseño 6.....	208
Cuadro 6.19 Análisis de Costo por m <sup>3</sup> de Concreto, Diseño 9.....	208
Cuadro 6.20 Análisis de Costo por m <sup>3</sup> de Concreto, Diseño 12.....	208
Cuadro 6.21 Resumen de Costos por m <sup>3</sup> de Concreto. ....	209

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 6.01 Contenido de Aire vrs Contenido de Goma de Llanta Triturada Fina como Agregado.....	182
Gráfico 6.02 Contenido de Aire vrs Contenido de Llanta Triturada Gruesa como Agregado.....	182
Gráfico 6.03 Contenido de Aire vrs Contenido de Goma de Llanta Triturada Fina como Agregado.....	183
Gráfico 6.04 Contenido de Aire vrs Contenido de Goma de Llanta Triturada Fina como Aditivo. ....	183
Gráfico 6.05 Peso Volumétrico vrs Contenido de Goma de Llanta Triturada Fina como Agregado. ....	185



Gráfico 6.06 Peso Volumétrico vrs Contenido de Llanta Triturada Gruesa como Agregado. ....	185
Gráfico 6.07 Peso Volumétrico vrs Contenido de Goma de Llanta Triturada Fina como Agregado. ....	186
Gráfico 6.08 Peso Volumétrico vrs Goma de Llanta Triturada Fina como Aditivo. ....	186
Gráfico 6.09 Resistencia a la Compresión a los 7 y 28 días vrs Contenido de Goma de Llanta Triturada Fina como Agregado.....	187
Gráfico 6.10 Resistencia a la Compresión a los 7 y 28 días vrs Contenido de Llanta Triturada Gruesa como Agregado.....	188
Gráfico 6.11 Resistencia a la Compresión a los 7 y 28 días vrs Contenido de Goma de Llanta Triturada Fina como Aditivo.....	188
Gráfico 6.12 Resistencia a la Flexión a los 14 y 28 días vrs Contenido de Goma de Llanta Triturada Fina como Agregado.....	189
Gráfico 6.13 Resistencia a la Flexión a los 14 y 28 días vrs Contenido de Llanta Triturada Gruesa como Agregado.....	190
Gráfico 6.14 Resistencia a la Flexión a los 14 y 28 días vrs Contenido de Goma de Llanta Triturada Fina como Aditivo.....	190
Gráfico 6.15 Módulo de Elasticidad Dinámico vrs Contenido de Goma de Llanta Triturada Fina como Agregado.....	192
Gráfico 6.16 Módulo de Elasticidad Dinámico vrs Contenido de Llanta Triturada Gruesa como Agregado. ....	192
Gráfico 6.17 Módulo de Elasticidad Dinámico vrs Contenido de Goma de Llanta Triturada Fina como Agregado.....	193
Gráfico 6.18 Módulo de elasticidad dinámico vrs Contenido de Goma de Llanta Triturada Fina como Aditivo. ....	193
Gráfico 6.19 Módulo de Elasticidad Estático vrs Contenido de Goma de Llanta Triturada Fina como Agregado.....	195
Gráfico 6.20 Módulo de Elasticidad Estático vrs Contenido de Llanta Triturada Gruesa como Agregado. ....	195
Gráfico 6.21 Módulo de Elasticidad Estático vrs Contenido de Goma de Llanta Triturada Fina como Agregado.....	196
Gráfico 6.22 Módulo de Elasticidad Estático vrs Contenido de Goma de Llanta Triturada Fina como Aditivo. ....	196
Gráfico 6.23 Comparación de la Resistencia a la Flexión del Concreto a los 14 días, utilizando Cemento Portland Tipo I, ASTM C-150 y diferentes % de Goma de Llanta Triturada Fina es sustitución de Arena. ....	197
Gráfico 6.24 Comparación de la Resistencia a la Flexión del Concreto a los 28 días, utilizando Cemento Portland Tipo I, ASTM C-150 y diferentes % de Goma de Llanta Triturada Fina es sustitución de Arena. ....	198
Gráfico 6.25 Comparación de la Resistencia a la Flexión del Concreto a los 14 días, utilizando Cemento Portland Tipo GU, ASTM C-1157 y diferentes % de Goma de Llanta Triturada Fina es sustitución de Arena.....	198
Gráfico 6.26 Comparación de la Resistencia a la Flexión del Concreto a los 28 días, utilizando Cemento Portland Tipo GU, ASTM C-1157 y diferentes % de Goma de Llanta Triturada Fina es sustitución de Arena.....	199
Gráfico 6.27 Comparación de la Resistencia a la Flexión del Concreto a los 14 días, utilizando Cemento Portland Tipo GU, ASTM C-1157 y diferentes % de Llanta Triturada Gruesa es sustitución de Grava. ....	199
Gráfico 6.28 Comparación de la Resistencia a la Flexión del Concreto a los 28 días, utilizando Cemento Portland Tipo GU, ASTM C-1157 y diferentes % de Llanta Triturada Gruesa es sustitución de Grava. ....	200
Gráfico 6.29 Comparación de la Resistencia a la Flexión del Concreto a los 14 días, utilizando Cemento Portland Tipo GU, ASTM C-1157 y diferentes pesos en Kg de Goma de Llanta Triturada Fina como Aditivo en el Concreto. ....	200



Gráfico 6.30 Comparación de la Resistencia a la Flexión del Concreto a los 28 días, utilizando Cemento Portland Tipo GU, ASTM C-1157 y diferentes pesos en Kg de Goma de Llantita Triturada Fina como Aditivo en el Concreto. ....	201
Gráfico 6.31 Resistencia a la Flexión vrs Resistencia a la Compresión a los 28 días. ....	203
Gráfico 6.32 Módulo de Elasticidad Estático vrs Resistencia a la Compresión a los 28 días. ....	204
Gráfico 6.33 Módulo de Elasticidad Estático vrs Resistencia a la Compresión a los 28 días. ....	205
Gráfico 6.34 Módulo de Elasticidad Estático vrs Resistencia a la Compresión a los 28 días. ....	205
Gráfico 6.35 Módulo de Elasticidad Estático vrs Resistencia a la Compresión a los 28 días. ....	206

## ÍNDICE DE IMAGENES

Imagen 1.01 Barreras de Sonido, Empresa ESSAN, Puerto Rico. ....	35
Imagen 1.02 Pruebas realizadas al ..... 36	36
Imagen 1.03 Los Neumáticos fuera de uso en El Salvador y su consecuencia..... 45	45
Imagen 2.01 Parque infantil en Vivero Café ..... 50	50
Imagen 2.02 Parque infantil en Vivero Café ..... 50	50
Imagen 2.03 Área de Recreación en Vivero Café..... 51	51
Imagen 2.04 Muro de Contención hecho de llantas enteras, ubicado sobre la Carretera que de Santa Ana conduce hacia San Salvador..... 56	56
Imagen 2.05 Muro de Retención hecho de llantas enteras, Comunidad ..... 56	56
Imagen 3.01 Maquina cuarteadora para agregado grueso..... 69	69
Imagen 3.02 Procedimiento para pesar la muestra seleccionada en una balanza. .... 70	70
Imagen 3.03 Proceso de Tamizado del agregado grueso. .... 70	70
Imagen 3.04 Material Tamizado y separado..... 71	71
Imagen 3.05 Juego de Mallas para agregado fino..... 73	73
Imagen 3.06 Maquina cuarteadora para agregado fino. .... 74	74
Imagen 3.07 Colocación del juego de mallas en el agitador de mallas motorizado..... 74	74
Imagen 3.08 Juego de mallas para agregado fino, instalado sobre el agitador de mallas motorizado. .... 75	75
Imagen 3.09 Material sintético fino tamizado y separado. .... 76	76
Imagen 3.10 Limpieza de mallas, después del proceso de tamizado. .... 76	76
Imagen 3.11 Proceso de cuarteado del agregado grueso..... 79	79
Imagen 3.12 Obtención de la muestra seleccionada utilizando una balanza al 0.1%. .... 80	80
Imagen 3.13 Agregado grueso sumergido totalmente en agua. .... 80	80
Imagen 3.14 Limpieza del exceso de agua del agregado grueso, utilizando franelas. .... 81	81
Imagen 3.15 Colocación del agregado grueso en bolsas plásticas. .... 81	81
Imagen 3.16 Material grueso colocado en la Cesta de Alambre. .... 82	82
Imagen 3.17 Obtención de la masa aparente en agua, ..... 82	82
Imagen 3.18 Colocación del agregado grueso en el horno para el secado del material..... 83	83
Imagen 3.19 Agregado fino totalmente sumergido en agua. .... 85	85
Imagen 3.20 Decantación del recipiente para eliminar excedente de agua..... 86	86
Imagen 3.21 Agregado fino sobre superficie no absorbente. .... 86	86
Imagen 3.22 Proceso de esparcir el agregado sobre la superficie no absorbente. .... 87	87
Imagen 3.23 Prueba del cono de absorción para determinar la condición saturado superficialmente seco. .... 88	88
Imagen 3.24 Condición saturada superficialmente seco alcanzada. .... 88	88
Imagen 3.25 Determinación de la masa del picnómetro más agua. .... 89	89
Imagen 3.26 Determinación de la masa del picnómetro más agua más agregado fino..... 90	90
Imagen 3.27. Proceso de agitación del picnómetro con agua y agregado fino..... 90	90
Imagen 3.28 Obtención de la masa del picnómetro, más agua, mas agregado, libre de partículas de aire.91	91
Imagen 3.29 Colocación del material en el horno para su secado total..... 91	91



Imagen 3.30	Proceso de cuarteado, del agregado grueso	97
Imagen 3.31	Máquina para el cuarteado del agregado fino	97
Imagen 3.32	Proceso de llenado del recipiente con agregado grueso	98
Imagen 3.33	Llenado del recipiente hasta dos tercios de su altura	99
Imagen 3.34	Proceso de llenado del recipiente con agregado grueso	100
Imagen 3.35	Proceso de varillado de la última capa	100
Imagen 3.36	Proceso de enrase del material	101
Imagen 3.37	Obtención de la masa del recipiente más agregado grueso sintético	102
Imagen 3.38	Proceso de enrase del recipiente utilizando la llana metálica	107
Imagen 3.39	Obtención de la masa del recipiente más concreto	108
Imagen 3.40	Colocación del cilindro en la máquina para pruebas de compresión	115
Imagen 3.41	Almohadilla de neopreno y retenedor para ensayo de cilindros de concretos	116
Imagen 3.42	Especímenes ya ensayados, en donde se aprecia el tipo de ruptura registrado	116
Imagen 3.43	Colocación de vigas para prueba de flexión	118
Imagen 3.44	Ajuste y alineación de la máquina para pruebas de flexión	119
Imagen 3.45	Centrado de la viga en la máquina de pruebas de flexión	119
Imagen 3.46	Punto de Ruptura de vigas, prueba de vigas a flexión	120
Imagen 3.47	Medición de la sección de falla de la viga	121
Imagen 3.48	Proceso de marcaje de los cilindros para la colocación del equipo	124
Imagen 3.49	Cilindro colocado sobre la máquina de pruebas de compresión	125
Imagen 3.50	Cilindro llevado hasta el punto de ruptura después de haber realiza las pruebas	126
Imagen 4.01	Arena proporcionada por Holcim agregados	129
Imagen 4.02	Análisis Granulométrico Agregado Fino ASTM C-33	130
Imagen 4.03	Grava proporcionada por Holcim agregados	131
Imagen 4.04	Análisis Granulométrico Agregado Grueso ASTM C-33	132
Imagen 4.05	Goma de llanta triturada fina	134
Imagen 4.06	Análisis Granulométrico Goma de Llanta Triturada Fina ASTM C-3	135
Imagen 4.07	Herramientas a utilizar	
	lima, cuchilla de electricista y tenaza	137
Imagen 4.08	Producto inicial - material semitriturado por empresa Geocycle	137
Imagen 4.09 a y b	Procedimiento de corte utilizando prensa, tenaza y cuchilla de electricista	137
Imagen 4.10	Material final triturado artesanalmente tamaño máximo nominal 3/4	138
Imagen 4.11	Comparación de los tamaños de partículas de llanta triturada en estado inicial y final	138
Imagen 4.12	Tamaño comparativo de las partículas de llanta triturada en estado inicial y final	139
Imagen 4.13	Análisis Granulométrico Llanta Triturada Gruesa ASTM C-33	140
Imagen 6.01	Diagrama de Análisis del Coeficiente de Correlación (r) entre dos Variables, Erick Lahura, 2003	166

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.01	Tamaño mínimo de la muestra de ensayo en función del TMNA	69
Tabla 3.02	Limites Granulométricos del Agregado Fino, ASTM C 33	72
Tabla 3.03	Masa mínima de la muestra de prueba	79
Tabla 3.04	Clasificación de la goma proveniente de Neumático Reciclado, Sociedad Americana de Ingenieros Civiles, ASCE, 2006	93
Tabla 3.05	Capacidad del Depósito Medidor, ASTM C-29	95
Tabla 3.06	Capacidad del depósito medidor ASTM DESIGNACION C 29	98
Tabla 3.07	Muestra para el Agregado Grueso	104
Tabla 3.08	Clasificación de la calidad del concreto por medio de velocidad onda según Leslie y Cheesman	122



<i>Tabla 3.09 Evaluación de la calidad del concreto mediante la velocidad de pulso según Agraval y otros.</i>	<i>122</i>
<i>Tabla 5.01 Dependencia entre la Relación Agua-Material Cementante y la Resistencia a Compresión del Concreto, ACI 211.1.....</i>	<i>144</i>
<i>Tabla 5.02 Volumen de Agregado Grueso por Volumen Unitario de Concreto, ACI 211.1.....</i>	<i>145</i>
<i>Tabla 5.03 Revenimientos Recomendados para Varios Tipos de Construcción, ACI 211.1. ....</i>	<i>146</i>
<i>Tabla 5.04 Requisitos Aproximados de Agua de Mezclado y Contenido de Aire para diferentes Revenimientos y Tamaños Máximos Nominales del Agregado, ACI 211.1.....</i>	<i>147</i>
<i>Tabla 5.05 Requisitos Aproximados de Agua de Mezclado y Contenido de Aire para diferentes Revenimientos y Tamaños Máximos Nominales del Agregado, ACI 211.1.....</i>	<i>148</i>



## **GLOSARIO**

La intención de este glosario es clarificar la terminología y facilitar el entendimiento de lo escrito en el trabajo de grado “Investigación sobre el uso de Llanta Triturada como Agregado en la Fabricación de Concreto”.

### **A**

**Absorción de agua:** El proceso por el cual un líquido (agua) se absorbe y tiende a llenar los poros permeables en un sólido poroso, además se puede decir que es la cantidad de agua absorbida por un material bajo condiciones especificadas de ensayo, comúnmente expresada como el porcentaje de la masa de la probeta de ensayo.

**Abundamiento:** Aumento del volumen de una cantidad de arena en la condición húmeda, comparativamente a su volumen en la condición seca.

**Aditivo:** Material, que no sea agua, agregado y cemento hidráulico, usado como ingrediente del concreto, del mortero o del grout y

adicionado a la mezcla inmediatamente antes o durante el mezclado.

**Agregado:** Material mineral granular, tal como la arena natural, la arena manufacturada, la grava, la piedra triturada, la escoria granulada de alto horno enfriada al aire, la vermiculita y la perlita.

**Agregado fino:** Agregado que pasa por el tamiz 9.5mm (3/8 pulg.), pasa casi totalmente por el tamiz de 4.75mm (No.4) y se retiene predominantemente en el tamiz de 75 mm (no. 200).

**Agregado grueso:** Grava natural, piedra triturada o escoria de alto horno de hierro, frecuentemente mayor que 5 mm (0.2 pulg.) y cuyo tamaño normalmente varía entre 9.5 mm y 37.5 mm (3/8 y 1 1/2 pulg.).



**Aire atrapado (aire ocluido):** Vacío de aire no intencional, con forma irregular, en el concreto fresco o endurecido, con tamaño igual o superior a 1 mm.

## C

**Cemento:** Se denomina cemento a un conglomerante formado a partir de una mezcla de caliza y arcilla calcinadas y posteriormente molidas, que tiene la propiedad de endurecer al contacto con el agua.

**Cemento Hidráulico:** El cemento que se fragua y se endurece por la reacción química con el agua y es capaz de endurecerse incluso bajo el agua.

**Cemento Portland:** Cemento hidráulico de silicato de calcio que se produce por la pulverización del Clinker de cemento portland y normalmente también contiene sulfato de calcio y otros compuestos.

**Cemento Portland Tipo I:** Cemento Hidráulico sin adiciones, es decir

que está compuesto únicamente de Clinker y yeso.

**Cemento Portland Tipo GU:** Cemento Hidráulico de Uso General, el cual posee la misma composición del Cemento Tipo I, pero con la adición de puzolana y filler en proporciones específicas en la molienda final.

**Cemento Portland Tipo HE:** Cemento Hidráulico que proporciona altas resistencias a edades tempranas, usualmente en menos de una semana.

**Clinker:** Producto final del horno de cemento portland, material cementante bruto antes de la molienda.

**Coefficiente de Correlación:** Instrumento estadístico que permite establecer la fuerza y dirección de una relación lineal estadística entre dos variables a partir de una muestra determinada, bajo el supuesto que esta es representativa.



**Cohesión:** Atracción mutua a través de la cual los elementos de una sustancia se mantienen unidos.

**Compactación:** Proceso de inducción de una disposición más cerca de las partículas sólidas en el concreto, mortero o grout frescos, a través de la reducción de los vacíos, frecuentemente logrado con la vibración, el varillado, los golpes o la combinación de estos métodos. También llamada consolidación.

**Concreto:** Mezcla de material aglomerante (conglomerante) y agregados fino y grueso. En el concreto normal, comúnmente se usan como medio aglomerante, el cemento portland y el agua, pero también pueden contener puzolanas, escoria y/o aditivos químicos.

**Concreto de alta resistencia:** Concreto con una resistencia de diseño de por lo menos, 70 MPa (10,000 lb/pulg<sup>2</sup>).

**Concreto endurecido:** Concreto en el estado sólido que haya desarrollado una cierta resistencia.

**Concreto fresco:** Concreto recién mezclado y aún plástico y trabajable.

**Concreto ligero:** Concreto con una densidad más baja que el concreto de densidad normal.

**Concreto Especial:** Concreto con variantes o adiciones de los componentes tradicionales para satisfacer requisitos muy particulares que motivan a efectuar diseños de mezclas con características que difieren bastante de los concretos de uso corriente.

**Consistencia:** Movilidad relativa o capacidad para fluir del concreto, mortero o grout fresco.

**Contenido de Aire:** Volumen total de vacíos de aire, sea incluido, sea atrapado, en la pasta de cemento, mortero o concreto. El aire incluido aumenta la durabilidad del mortero o concreto endurecidos sometidos a congelación-deshielo y aumenta la



trabajabilidad de las mezclas frescas.

## D

**Dosificación:** Proceso de medición, por peso o por volumen, de los ingredientes y su introducción en la mezcladora para una cantidad de concreto, mortero o grout.

**Durabilidad:** Capacidad del concreto, mortero, grout de cemento portland de resistir a la acción de las intemperies y otras condiciones de servicio, tales como ataque químico, congelación-deshielo y abrasión.

**Densidad relativa:** Una proporción entre la masa y el volumen del material con relación a la densidad del agua, también llamada gravedad específica.

## E

**Ensayo Destructivo:** Son aquellas pruebas que causan daño estructural del concreto, radican en

su precisión y confiabilidad en resultados.

**Ensayo No Destructivo:** Se define como aquellas pruebas que no causan daño estructural significativo en el concreto, radican en su relativa simplicidad, rapidez y en la posibilidad de realizar un gran número de determinaciones sobre la estructura sin alterar su resistencia y funcionalidad.

## F

**Fibras:** Hilo o material en forma de hilo con un diámetro que varía de 0.05 a 4 mm (0.002 a 0.16pulg.) y con longitud entre 10 y 150 mm (0.5 a 6 pulg.) y fabricado con de acero, vidrio, material sintético (plástico), carbono o material natural.

**Fraguado:** Grado en el cual el concreto fresco perdió su plasticidad y se endurece.

## G



### **Goma de Llantita Triturada Fina:**

Material derivado de llantas de desecho u otros materiales de caucho reciclados que son reducidos a gránulos uniformes de tamaños promedio entre 3.5 y 0.05 mm.

**Granulometría:** Distribución del tamaño de las partículas de agregado, que se determina por la separación a través de tamices normalizados.

## **H**

**Hidratación:** Es la reacción entre el cemento hidráulico y el agua, a través de la cual se forman nuevos compuestos que confieren resistencia al concreto, mortero, y grout.

## **I**

**Impacto Ambiental:** efecto que produce una determinada acción humana sobre el Medio Ambiente en sus distintos aspectos.

## **M**

**Masa específica:** Masa por unidad de volumen, peso por unidad de volumen al aire, expresados, por ejemplo, en kg/m<sup>3</sup> (lb/pie<sup>3</sup>).

**Masa unitaria (masa volumétrica):** Masa volumétrica del concreto fresco o del agregado, que normalmente se determina pesándose un volumen conocido de concreto o agregado (la densidad a granel o suelta de los agregados incluye los vacíos entre las partículas).

**Módulo de elasticidad:** Relación entre el esfuerzo normal y la deformación unitaria correspondiente para esfuerzos de tensión o compresión menores que el límite de proporcionalidad del material. También conocido como módulo de Young y módulo Young de elasticidad, designado por el símbolo E.

**Módulo de finura:** Factor que se obtiene por la suma de los



porcentajes acumulados de material de una muestra de agregado en cada uno de los tamices de la serie especificada y dividido por 100.

## P

**Partículas de llanta:** Hace referencia a la goma de llanta triturada fina y llanta triturada gruesa, indiferentemente del tamaño específico de la partícula.

**Puzolana:** Materiales silíceos o silíceos y aluminosos, tales como la ceniza volante o el humo de sílice, que por sí mismos, poseen poco o ningún valor cementante, pero que cuando están finamente molidos y en presencia de agua, reaccionan con el hidróxido de calcio a temperaturas normales, para formar compuestos que poseen propiedades cementantes.

**Plasticidad:** Facilidad de moldeo del Concreto.

## R

**Reciclaje:** Proceso fisicoquímico o mecánico que consiste en someter a una materia o un producto ya utilizado a un ciclo de tratamiento total o parcial para obtener una materia prima o un nuevo producto.

**Relación agua-cemento (a/c):** Relación entre la masa de agua y la masa de cemento en el concreto.

**Resistencia a compresión:** Resistencia máxima que una probeta de concreto, mortero o grout puede resistir cuando es cargada axialmente en compresión en una máquina de ensayo a una velocidad especificada. Normalmente se expresa en fuerza por unidad de área de sección transversal, tal como mega pascal (MPa) o libras por pulgada cuadrada (lb/pulg.<sup>2</sup> o psi).

**Resistencia a flexión:** Capacidad de los sólidos de resistir la flexión.

**Revenimiento (asentamiento de cono de Abrams):** Medida de consistencia del concreto fresco, igual al asentamiento inmediato de



una probeta moldeada con un cono normado.

## S

**Segregación:** Separación de los componentes del concreto fresco (agregados y mortero), resultando en una mezcla sin uniformidad.

## T

**Trabajabilidad:** Es la propiedad del concreto, mortero o grout frescos que determina sus características de trabajo, es decir, la facilidad para su mezclado, colocación, moldeo y acabado.

## V

**Vacíos de aire:** Vacíos de aire atrapado (aire ocluido) o burbujas de aire incluido en el concreto, mortero o grout. Los vacíos atrapados normalmente tienen un diámetro mayor que 1 mm y los vacíos incluidos son menores. La mayoría de los vacíos atrapados se debe remover a través de vibración interna, varillado o plantillas vibratorias.

**Vibración:** Agitación de alta frecuencia del concreto fresco a través de aparatos mecánicos, con propósitos de consolidar la mezcla.



## **SIGLAS**

La intención es indicar el significado de las siglas utilizadas en el trabajo de grado “Investigación sobre el uso de Llanta Triturada como Agregado en la Fabricación de Concreto”.

**ACI:** American Concrete Institute.

**ASCE:** Sociedad Americana de Ingenieros Civiles.

**ASTM:** American Standards for Testing and Materials.

**CEMEX:** Cementos de México.

**CESSA:** Cemento de El Salvador.

**CISALUD:** Comisión Intersectorial para la Salud.

**COMBI:** Comunicación para Impactar la Conducta del Dengue.

**DAC:** Programa de Descontaminación de Áreas Críticas.

**ECOTEC:** Ecología Tecnología.

**INDES:** Instituto Nacional de los Deportes.

**ISCYC:** Instituto Salvadoreño del Cemento y del Concreto.

**ISSS:** Instituto Salvadoreño del Seguro Social.

**MARN:** Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

**MSPAS:** Ministerio de Salud Pública y Asistencia Social.

**NFU:** Neumático Fuera de Uso.

**NMX:** Normas Mexicanas.

**OPS:** Organización Panamericana de la Salud.

**PROARCA/SIGMA:** Programa Ambiental Regional para Centroamérica/  
Sistema de Gestión para el Medio Ambiente.

**TMNA:** Tamaño Máximo Nominal del Agregado.

**VMT:** Vice Ministerio de Transporte.



## **INTRODUCCIÓN GENERAL**

Uno de los principales retos ambientales que enfrentan las ciudades de todo el mundo es la eliminación de neumáticos fuera de uso. Para abordar este problema global, varios estudios se han llevado a cabo para examinar las diversas aplicaciones de neumáticos reciclados. Los ejemplos incluyen técnicas como la reutilización de los neumáticos enteros o triturándolos para la fabricación de una variedad de materiales de caucho y plástico, la incineración térmica de neumáticos de desecho para la producción de electricidad o como combustible para los hornos de cemento, y el uso de caucho reciclado en concreto asfáltico. Desafortunadamente, la generación de neumáticos de desecho es muy superior a estos usos.

Este documento pone de relieve una técnica más, “Incorporar partículas de llanta triturada en la fabricación de concreto utilizando Cemento Portland”, y para ello se realizan catorce diseños de mezcla, con los cuales se puedan realizar comparaciones entre las características físicas y mecánicas de un concreto convencional y un concreto especial.

Las incorporaciones en las mezclas se realizan en porcentajes de 10, 15 y 20% del volumen de los agregados minerales finos y gruesos, y además se utiliza goma de llanta triturada fina como aditivo en cantidades de 31, 46 y 62 kg por cada metro cubico de concreto.

Tras el análisis de los resultados, se examinan con especial énfasis las propiedades de mayor interés dentro de la Ingeniería y se plantean los posibles usos de este concreto en El Salvador.



## RESUMEN EJECUTIVO

**Capítulo 1.** Detalla la introducción, mostrando los antecedentes, objetivos y otros elementos básicos que fueron necesarios considerarse para planificar la investigación.

**Capítulo 2.** Antecedentes generales sobre el uso de la llanta y aplicaciones de la llanta triturada a nivel nacional e internacional.

**Capítulo 3.** Ensayos de laboratorio para agregados naturales, sintéticos y a concreto en estado fresco y endurecido.

**Capítulo 4.** Características generales de los materiales utilizados. Muestra la procedencia de los materiales y las características obtenidas de los ensayos de laboratorio.

**Capítulo 5.** Detalla los diseños de mezcla, sus proporciones y cantidades de materiales utilizados por metro cubico de concreto elaborado.

**Capítulo 6.** Resultados de los ensayos de laboratorio. Muestra en forma gráfica los datos obtenidos de los ensayos al concreto en estado fresco y endurecido, haciendo comparaciones entre gráficos relacionados con la cantidad de llanta triturada agregada.

**Capítulo 7.** Conclusiones y recomendaciones. Obtenidas después de analizar los resultados de los diferentes diseños de mezcla, aplicándolos a la realidad nacional y a futuras investigaciones.



# CAPITULO 1

## INTRODUCCIÓN A LA INVESTIGACIÓN

INVESTIGACION SOBRE EL USO  
DE LLANTA TRITURADA COMO  
AGREGADO EN LA FABRICACIÓN  
DE CONCRETO



## 1.1 INTRODUCCIÓN

En la actualidad las tendencias obedecen a la conciencia ecológica, al reciclaje, sin descuidar en ningún momento la seguridad y la durabilidad, es por ello que países como Japón, Estados Unidos, Canadá, Puerto Rico, México, Perú, entre otros, utilizan los neumáticos fuera de uso (NFU), ya sea enteros rellenándolos con arena para muros de retención, muros perimetrales, reforzamiento en cauces de ríos, o utilizándolos triturados en gránulos de diferentes diámetros como agregado en mezclas de concreto, buscando así sus posibles usos, ya que debido a su peso unitario, lo convierte en material aplicable para propósitos arquitectónicos de fachadas y elementos decorativos, no así para elementos estructurales primarios de edificaciones, debido a que se trata de una mezcla liviana. Para poder hacer uso de la mezcla con partículas de NFU en elementos estructurales primarios se debe realizar un mayor número de investigaciones. Por el momento, gracias a estudios realizados en otros países, se ha determinado ciertas características de la mezcla como la disminución en el peso unitario, el aumento en el contenido de aire, la reducción en el agrietamiento tanto en tamaño como en cantidad, el aumento en la resistencia a impactos y sonidos, un mejor comportamiento ante el alza de temperatura o la exposición al fuego; por todas las características mencionadas y debido al grave impacto que producen los NFU en el medio ambiente, surge como fin de esta investigación, verificar la viabilidad de incorporar partículas de NFU en sustitución de los agregados minerales naturales del concreto tanto gruesos como finos, en porcentajes de 10, 15 y 20% del volumen total de cada agregado. Se crearán cuatro diseños de mezcla, utilizando Cemento Tipo I (ASTM C-150), de los cuales tres serán elaborados utilizando goma de llanta triturada fina en sustitución de los porcentajes mencionados y uno será el diseño de control con el cual se comparan resultados, este será fabricado con una mezcla de concreto convencional de acuerdo al ACI 211.1, para llevar a



cabo las comparaciones habrá necesidad de elaborar especímenes (cilindros y vigas) y realizar ensayos de resistencia a compresión y a flexión; además se realizará una prueba no destructiva del concreto, denominada velocidad de pulso (pulso ultrasónico del concreto) de acuerdo al método de ensayo ASTM 597, la cual servirá para analizar la rigidez, la densidad, la presencia de vacíos bajo la superficie, la calidad general y la uniformidad así como el contenido y la profundidad de grietas en el concreto elaborado. Además se elaboraran diez diseños de mezcla utilizando Cemento Tipo GU (ASTM C-1157), de los cuales uno será el diseño de control, tres serán elaborados utilizando goma de llanta triturada fina en sustitución de los porcentajes mencionados de arena, otros tres serán elaborados utilizando llanta triturada gruesa en sustitución de los porcentajes de grava mencionados y los últimos tres serán elaborados incorporando 31, 46 y 62 kg de goma de llanta triturada fina como aditivo por cada metro cubico de mezcla; con el concreto fabricado se elaboraran especímenes y se realizaran las mismas pruebas que a las mezclas elaboradas con Cemento Tipo I (ASTM C-150), comparándolas con un diseño de control elaborado con una mezcla convencional de acuerdo al ACI 211.1 utilizando Cemento Tipo GU (ASTM C-1157) y con los resultados de las pruebas de concreto elaborado con Cemento Tipo I (ASTM C-150), en el caso de las sustituciones de agregado fino por partículas finas de llanta triturada. Todos los resultados de los ensayos, serán analizados para poder establecer las características encontradas en este tipo de concreto y así ser plasmadas dentro de la conclusión de la investigación.



## 1.2 ANTECEDENTES

A nivel mundial, la investigación acerca de la fabricación de concreto utilizando llantas trituradas como agregado no es algo nuevo, puesto que desde la década de los 90's se ha investigado<sup>1</sup> y realizado pruebas sobre el comportamiento y la resistencia de este tipo de concreto, obteniendo resultados favorables y positivos en su mayoría, ya que el concreto adquiere otras características beneficiosas debido a que se vuelve un concreto aligerado y según algunos estudios también este tipo de concreto se convierte en un aislante acústico. Ver imagen 1.01, el cual es aprovechado en algunos países donde ciertas empresas fabrican barreras de sonido con este material<sup>2</sup>.



**Imagen 1.01** Barreras de Sonido, Empresa ESSAN, Puerto Rico.

En Puerto Rico, también han investigado el uso de llantas trituradas en otros elementos como muros de contención, donde este material se mezcla con arena para conformar un relleno en el muro, pero que al final el relleno hecho

---

<sup>1</sup>Tarun R. Naik. 1991. “Properties of concrete containing scrap tire rubber-an overview.” Department Of Civil Engineering and Mechanics College of Engineering and Applied Science, The University of Wisconsin-Milwaukee.

<sup>2</sup>La empresa ESSAN ha fabricado bloques de cemento y llanta triturada para formar barreras acústicas.



solamente de llanta triturada da mejores resultados, aunque la investigación en general aún se encuentra en desarrollo.

México podría ser el país de latinoamericana donde más avances han obtenido sobre la investigación de este tipo de concreto, puesto que aprovechando las características de este material, lo han utilizado para la fabricación de pavimentos.

La empresa CEMEX ha experimentado con este tipo de concreto y lo ha bautizado como “LLANCRETO”, esta empresa mexicana pretende utilizar este material para pavimentos económicos en zonas residenciales. El objetivo de estos pavimentos es que sean de bajo costo y resuelvan problemas ecológicos al utilizar neumáticos fuera de uso de forma triturados.

La experimentación a escala natural la han realizado en una pista circular del laboratorio de la empresa. Ver imagen 1.02. En el mismo laboratorio se caracterizan los materiales mediante pruebas estáticas y dinámicas repetidas y bajo temperatura controlada, empleando equipo especial para analizar el comportamiento a tracción y compresión del concreto.



**Imagen 1.02** Pruebas realizadas al “Llancreto”, CEMEX, México.



El proyecto supuso tres años de investigación y produjo una mezcla equiparable al concreto en costo y resistencia, aunque se recomienda para el uso en calles y avenidas de tránsito ligero, vías de conjuntos habitacionales, capas de nivelación de pisos y losas, sobre carpetas de estacionamientos, parques, aceras, zonas peatonales e instalaciones deportivas. Según información de CEMEX el “Llancreto” evita las deformaciones de la superficie de rodamiento. Además de ofrecer mejores condiciones de frenado vehicular.

Estudios relevantes sobre el uso de este tipo de concreto para elementos estructurales en edificaciones, aun no se han realizado en Latinoamérica, sino que es en Estados Unidos donde estos estudios se han llevado a cabo desde la década de los 90’s, gracias a la facilidad que tienen de conseguir el material triturado por las diversas empresas estadounidenses que lo utilizan para la fabricación de diferentes productos.

Por lo tanto, es en Estados Unidos donde mayores referencias se pueden retomar para este proyecto en específico, puesto que se han realizado mayores estudios en los cuales han sustituido agregados finos y gruesos por la llanta triturada, obteniendo diferentes resultados según el agregado sustituido.

En El Salvador no se encuentran investigaciones sobre el uso de este material, por lo que resulta importante actualizarse y explorar este tipo de métodos que pueden contribuir a un desarrollo en conjunto para la mitigación de la contaminación ambiental y un desarrollo científico.



### **1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

Por medio de los estudios realizados en Estados Unidos a través de diferentes investigadores, se ha logrado determinar que al sustituir parcial o totalmente la cantidad de un agregado fino o grueso del concreto por llanta triturada, este reducirá su resistencia a la compresión lo que resulta lógico por la importancia de estos agregados en la mezcla. Pero se ha determinado que si se sustituye parcialmente solo el agregado fino por llanta triturada, el concreto tendrá una disminución menor en la resistencia que si se sustituyera el agregado grueso también parcialmente, esto quiere decir que si se sustituye el 10% de arena de la mezcla la reducción en la resistencia es menor que si se sustituye el 10% de grava. Estudios más recientes han logrado desarrollar métodos en los que al sustituir el agregado fino la pérdida de resistencia es casi insignificante y han obtenido mejores resultados como lo realizado por la empresa CEMEX en la fabricación de pavimentos.

Según las investigaciones, para sustituir cualquiera de estos agregados por llanta triturada, solo se puede realizar si “el tamaño de las partículas trituradas de llanta es equivalente al tamaño de las partículas del agregado que se sustituirá”, por ello, para la sustitución de agregado grueso, se utilizará material procedente de la planta de HOLCIM S.A. de C.V., específicamente de GEOCYCLE S.A. de C.V., ya que es la única empresa que posee una planta trituradora de neumáticos fuera de uso (NFU) en El Salvador, debido a que utiliza las partículas de llanta como combustible alterno para los hornos. El inconveniente que surge es que las partículas de llanta que resultan de la trituradora, debido a que es un proceso de corte primario, alcanzan un tamaño mínimo aproximado de 5 cm, por lo que se recurrirá a métodos artesanales para reducir las partículas al tamaño deseado para llevar a cabo la investigación,



estos tamaños debían ser equivalentes a la granulometría del agregado grueso de tamaño máximo nominal de 3/4".

Para la sustitución de agregado fino, se utilizará material importado de Argentina, distribuido en El Salvador a través de la empresa Gambeta Navarra, quienes obtienen el material a través de Forbex, empresa que utiliza las partículas de neumáticos fuera de uso (NFU) para el mantenimiento de canchas de césped artificial.

Teniendo las partículas de neumáticos fuera de uso (NFU) en los tamaños a ser utilizados en la investigación se procederá a la identificación de sus características físicas en laboratorio, para la elaboración de cada uno de los diseños de mezcla.

Cada diseño de mezcla se hará en relación al ACI 211.1, ya que del diseño de control se sustituirá en volumen el 10, 15 y 20% de los agregados naturales por partículas de llanta triturada. Además en los otros tres diseños utilizando Cemento Tipo GU (ASTM C-1157) se incorporará como aditivo cantidades de 31, 46 y 62 kg de goma de llanta triturada fina por cada metro cubico de mezcla.

Finalmente cuando se obtengan los diseños finales de mezcla, se analizaran las características del concreto resultante, comparándolo con un diseño de control (concreto convencional, sin partículas de llanta) con los demás. Las pruebas que se le realizaran al concreto, son: revenimiento, peso unitario, temperatura, resistencia a la compresión, resistencia a la flexión, módulo de elasticidad estático y velocidad de pulso del concreto (Pulso Ultrasónico).



## **1.4 OBJETIVOS**

### **GENERAL**

- Analizar el comportamiento del concreto al incorporar partículas de llanta triturada como aditivo y en sustitución de los agregados minerales naturales que lo conforman.

### **ESPECIFICOS**

- Determinar las características físicas de las partículas de llanta triturada.
- Diseñar y elaborar diferentes mezclas de concreto con incorporación de partículas de llanta triturada, para realizar una comparación con una mezcla de concreto convencional.
- Analizar las características del concreto elaborado con partículas de llanta triturada e identificar sus posibles usos dentro de la ingeniería y la arquitectura.



## 1.5 ALCANCES

Con la ***“Investigación sobre el uso de Llanta Triturada como Agregado en la Fabricación del Concreto”***, se pretende lograr a través de los resultados de ensayos, la posible utilidad del concreto mezclado con llanta triturada lograr establecer su finalidad, ya sea en elementos arquitectónicos o en elementos estructurales, teniendo para ello que realizar lo siguiente:

- Analizar las características físicas de la llanta triturada, realizándole pruebas de granulometría, gravedad específica, absorción y peso volumétrico.
- Analizar las características físicas de los dos agregados naturales (grava y arena), realizándole pruebas comunes de granulometría, gravedad específica, absorción, peso volumétrico y contenido de humedad.
- Realizar dos diseños de mezcla de control de acuerdo al ACI 211.1, uno utilizando Cemento Tipo I (ASTM C-150) y otro utilizando Cemento Tipo GU (ASTM C-1157), que incluyan solamente los agregados naturales comúnmente utilizados, para que sirvan como patrón para la comparación de las propiedades físicas del concreto en estado fresco y endurecido.
- Realizar los diseños de mezcla incluyendo diferentes combinaciones de agregados, para ello se sustituirá ciertos porcentajes del volumen total de grava y de arena para incorporar partículas de llanta triturada.
- Elaborar las diferentes mezclas de concreto, para realizarle pruebas en estado fresco de revenimiento, temperatura y peso unitario, para luego



llevar a cabo la elaboración de cilindros y vigas a ser ensayados a compresión y flexión a los 7 y 28 días, y a los 14 y 28 días respectivamente.

- Comparar los resultados obtenidos de las pruebas realizadas con respecto a la mezcla de control, considerando las variaciones en cuanto a la cantidad de agregado natural sustituido por llanta triturada tanto gruesa como fina.
- Realizar la prueba no destructiva: Velocidad de pulso del concreto (Pulso Ultrasónico), con el fin de evaluar la calidad del concreto y el módulo de elasticidad dinámica.
- Realizar la prueba del Módulo de Elasticidad Estático del concreto a Compresión.
- Comparar los resultados tomando en cuenta la variable del tipo de Cemento y de la cantidad de agregado sustituido por partículas de llanta triturada.
- Elaborar los diseños de mezcla con el Cemento Tipo GU (ASTM C-1157) agregando la llanta triturada fina como aditivo en diferentes porcentajes, realizarle las mismas pruebas que al diseño de mezcla por sustitución, tanto en estado fresco como endurecido a diferentes edades y comparar los resultados con el diseño de control para el cemento especificado.



## **1.6 LIMITACIONES**

- En el país la recolección de llantas aún está en una fase inicial ya que ha sido a principios del 2011 que el estado ha decidido llevar a cabo un programa de recolección, que creara 7 centros de acopio a nivel nacional.
- La trituración de la llanta aún se encuentra en condiciones menos favorables, ya que es la empresa Holcim la única que cuenta con una trituradora en su planta de Metapán de dimensiones considerables para lograr reducir las llantas.
- El tamaño mínimo de las partículas que resultan de la trituradora de Holcim, es de un aproximado de 5 cm, lo cual resulta ser un limitante, puesto que hay que utilizar métodos artesanales para lograr reducir las partículas a un tamaño útil para la investigación.
- Debido al tiempo con el que se cuenta para desarrollar la investigación, resulta necesario reducir el número de pruebas a realizarse, ya que son los análisis a Compresión y Flexión los que absorberán la mayor parte del tiempo.



## **1.7 JUSTIFICACIÓN**

La disposición final de los neumáticos fuera de uso (NFU), es una de las problemáticas medioambientales más complejas por resolver a nivel mundial. El Salvador presenta un crecimiento anual de 100,000 unidades vehiculares, de las cuales se estima que 70,000 unidades son ingresadas al país a través de la importación de automotores usados, los cuales traen consigo neumáticos con cierto periodo de uso, que tendrán una menor vida útil, razón por la cual, en un menor lapso de tiempo, se convertirán en desecho dentro del territorio nacional, siendo éste, según datos estimados y proyectados por el mismo, de 1,204,600 unidades para el año 2010, generándose de acuerdo al volumen de vehículos que ingresan al país un incremento anual de este tipo de desecho de 106,600 unidades, significando un dato bastante crítico debido a la escasa extensión territorial del país<sup>3</sup>.

En el país los NFU, son arrojados a ríos o quebradas, o se realizan acumulaciones a cielo abierto donde son quemados al aire libre, representando esto un grave impacto ambiental, ya que cuando este material es expuesto al agua emite sustancias solubles, provocando una descomposición tanto química como biológica; por otra parte cuando se realizan quemas a cielo abierto las emisiones generan peligros para la salud humana, ya que los gases emitidos contienen partículas nocivas para el entorno provocando daños agudos y crónicos en el ser humano, cabe recalcar que la acumulación de NFU conlleva a la creación de focos infecciosos para la proliferación de insectos y roedores que son los causantes de enfermedades que en el país han ido incrementando con el paso del tiempo hasta llegar al punto de transformarse en epidemias; todos los impactos mencionados, se dan debido a la inexistencia de una política

---

<sup>3</sup> Vice Ministerio de Transporte, Memorias de Labores año 2002.



gubernamental o municipal, donde se especifique la forma de disposición final de los neumáticos en desuso de una manera específica.

La preocupación por buscarle solución a esta grave problemática a nivel mundial, no ha sido desapercibida por el país, ya que dentro del territorio nacional, existe una empresa cementera HOLCIM EL SALVADOR S.A. de C.V., que utiliza una pequeña porción del volumen generado por las llantas en desuso, como combustible alternativo en sus hornos de producción; además existen otras tres empresas industriales de reencauche solo con el fin de incrementar la vida útil de las llantas, ya que tras su nuevo uso, siempre volverá a ser residuo.

Conocidas algunas de las características de la mezcla de concreto con llanta triturada y ante la masiva generación de NFU en El Salvador, se hace necesario continuar con la investigación, aunque cabe recalcar que no existe información a nivel nacional donde se haya planteado la utilización de partículas de NFU como agregado en la fabricación del concreto, convirtiéndose esto, sumado al impacto negativo que provoca la disposición de este residuo en el medio ambiente (Ver imagen 1.03), en la mayor justificación para la búsqueda de una alternativa más, que convierta lo que en la actualidad salvadoreña es un desecho, en un material que pueda ser aprovechado mediante la implementación de adecuados procesos, y así lograr una disminución en un porcentaje del problema medioambiental que se agrava con el paso de los años en El Salvador.



**Imagen 1.03** Los Neumáticos fuera de uso en El Salvador y su consecuencia.



# CAPITULO 2

## LITERATURA GENERAL SOBRE EL RECICLAJE Y APLICACIONES DE LA LLANTA

INVESTIGACION SOBRE EL USO  
DE LLANTA TRITURADA COMO  
AGREGADO EN LA FABRICACIÓN  
DE CONCRETO



## **2.1 INTRODUCCIÓN**

En El Salvador es casi inexistente la literatura relacionada con el re-uso de los neumáticos reciclados ya que no existen políticas sobre el tratamiento de este material de desecho una vez reciclado. Lo que actualmente se hace el país es acopiar los neumáticos en lugares específicos a nivel nacional para que algunas empresas privadas dispongan de ellas, pero sin alguna normativa o regulación.

Aun así en El Salvador se hacen algunos intentos por darle un uso a este material, utilizando principalmente los neumáticos enteros en el área de la recreación adaptándolos como juegos infantiles (columpios) y en la ingeniería como muros de contención.

Es por esto que principalmente se toman antecedentes de países extranjeros que le han dado importancia a la contaminación generada por los neumáticos fuera de uso y han experimentado con ellos usándolos enteros y triturándolos, generando normativas de su uso y posibles aplicaciones en diferentes áreas en la que se incluye la ingeniería.



## **2.2 LITERATURA GENERAL SOBRE EL RECICLAJE DE LLANTAS EN EL SALVADOR**

Ante la problemática medio ambiental que genera la disposición de llantas como residuo, a lo largo del tiempo y ante el masivo crecimiento de la población vehicular en el territorio nacional, existe la prioridad internacional y sin lugar a dudas local, de proteger los recursos naturales que aún quedan y de buscar alternativas o estrategias que permitan mantener de la mejor manera posible las condiciones del medio ambiente, teniendo siempre, una visualización hacia el futuro. Es por ello, que por medio de la influencia tanto de países Europeos como de Estados Unidos, los cuales a través de estudios realizados sobre el uso final de las llantas en desuso, dan la pauta a las municipalidades locales para implementar técnicas que ayuden a la reducción de llantas que se disponen en los botaderos, con un enfoque hacia estrategias científicas que respondan a las exigencias actuales y que le proporcionen al país una perspectiva hacia el desarrollo.

Se estima que desde el año 1998, el país realiza la importación de llantas usadas, las cuales después del re-uso eran desechadas sin control y pasaban a formar parte del paisaje urbano de las principales ciudades; a raíz de la preocupante búsqueda de la solución para la eliminación de este desecho, surgen las primeras formas de eliminación, las cuales eran el utilizarlas enteras en muros de contención en zonas de alto riesgo por derrumbes y también como juegos recreativos; el primer esfuerzo con miras tecnológicas, nace en el año 2004, con la introducción al país de una guía cuyo propósito, era llevar al país hacia el desarrollo y protección del medio ambiente, aplicando el principio de las 3 R's, esta guía fue lanzada a través de PROARCA/SIGMA (Programa Ambiental Regional para Centroamérica/ Sistemas de Gestión para el Medio Ambiente), y llevaba como título “Guía práctica para las municipalidades sobre re-uso de llantas”, en la cual, se daba a conocer con énfasis particular,



opciones para el re-uso de las llantas enteras y otras técnicas donde se aplicara el principio de reducir, reusar y reciclar; ya que las llantas almacenadas representan un problema tanto en la salud como a nivel medio ambiental, y esto además se agrava por la complicación para realizar una disposición final adecuada, debido a la resistencia a la compactación y la baja eficiencia para almacenar y transportar debida a su volumen. Es frente a esta problemática, que se brindó a las municipalidades la técnica de aplicación de las 3 R's, buscando promover el principio de la sostenibilidad, donde se aplica el usar una menor cantidad de un producto, extender su vida útil y reducir la generación de desechos, así como también dar un nuevo uso al desecho o procesar el desecho y convertirlo en una materia prima que sirva para la fabricación de un nuevo producto. Entre las prácticas que presentaba la Guía y que las municipalidades podían tomar para promoverlas, se encontraban varias alternativas, que según estudios realizados por la Universidad Don Bosco, la mejor forma de reusar las llantas desde el punto de vista económico, ambiental y social es en muros de contención o de retención, ya que estos muros evitan la erosión y se integran al suelo, haciendo que crezcan a la vez árboles<sup>4</sup>. Otra de las practicas que se presentaba como alterativa al re-uso de este desecho, es la construcción de parques infantiles, ya que debido a sus características físicas, las llantas enteras, se pueden implementar como columpios, túneles, trepadores, saltadores, etc. Ver Imagen 2.01 y 2.02.

Entre otras alternativas para el re-uso de las llantas que expone la Guía se encuentran, la fabricación de caites, pozos de infiltración, cama de piedra (disipador de energía), muebles (bancos y mesas), reencauchado de llantas, rótulos, delimitación de terrenos o caminos, adornos, etc. Ver Imagen 2.03.

---

<sup>4</sup> Análisis del Desecho Neumáticos Fuera de Uso, Universidad Don Bosco, Departamento de Medio Ambiente.



**Imagen 2.01** Parque infantil en Vivero Café “El Arco”, Antiguo Cuscatlán, El Salvador, donde las llantas se reúsan realizando diferentes juegos: columpios y trepadores.



**Imagen 2.02** Parque infantil en Vivero Café “El Arco”, Antiguo Cuscatlán, El Salvador, donde las llantas se reúsan realizando diferentes juegos: saltadores.

Además del re-uso de llantas, la Guía invita al reciclaje, aunque especifica que este no aplica directamente a las municipalidades locales, sino más bien, expone las alternativas para que puedan promover e incentivar y así buscar la opción de la reutilización de las llantas de forma triturada a través de industrias



recicladoras, que conviertan el material de desecho en materia prima para un nuevo producto, como por ejemplo productos fabricados, como alfombras, tejados, cables de freno, aislantes de vehículos, campos de juego, losetas de goma, suelas de zapato, etc.



**Imagen 2.03** Área de Recreación en Vivero Café “El Arco”, Antiguo Cuscatlán, El Salvador, donde las llantas se reúsan realizando diferentes elementos: adornos, basureros, juego de mesa y sillas.

En el año 2000, se anuncia otra alternativa de eliminación de llantas, la cual promete acabar con una gran cantidad de llantas inservibles, pretendiendo que estas sean utilizadas para generar calor a través de su quema, además de que sus cenizas pasen a ser parte de la materia prima del cemento, tratándose esto de un Co-procesamiento, iniciativa planteada por la empresa Ecología Tecnología (EcoTEc), del Grupo Cemento de El Salvador (CESSA). El proyecto estaría ubicado en la Planta el Ronco, en Metapán, Santa Ana. El método se basa en la incineración total de las llantas, al grado de no dejar partículas de hule y otros materiales expuestos al aire libre; lo que se hace en sí, es una recuperación de energía al quemarla, alcanzando una temperatura superior a los 2,000 grados centígrados, existiendo así la combustión total de las llantas; en otras palabras la técnica permite la obtención de combustible alternativo, debido



a que la ignición es realizada para calentar los hornos donde funden la materia prima del cemento<sup>5</sup>.

Debido al uso que le daba la empresa cementera “CESSA” a las llantas en desuso, surgen campañas de recolección de llantas, realizadas en algunos puntos clave del país, aunque en su mayoría, el almacenamiento se realiza en sitios que a la vez, son utilizados como rastros municipales y no se tiene el debido control de calidad por falta de alguna normativa o política que rija la forma de almacenamiento de este tipo de desechos.

En el año 2006, a través del “Programa Piloto COMBI” (Comunicación para Impactar la Conducta del Dengue), impulsado por la coordinación entre el Ministerio de Salud Pública y Asistencia Social (MSPAS), la Organización Panamericana de la Salud (OPS), la Alcaldía Municipal de municipio de San Martín y otras Instituciones de Salud, inauguran el 14 de junio el Centro de Acopio para la recolección de llantas usadas, con el cual se pretendía combatir la proliferación de criaderos de zancudos, eliminando los focos de infección que pudiesen generar la enfermedad del dengue y además eliminar las llantas recolectadas a través de la incineración adecuada sin afectar al medio ambiente por medio de la industria cementera.

En el año 2008, surge la idea promovida por un grupo de salvadoreños residentes en el exterior, de reciclar las llantas usadas y fabricar con ellas grano de goma y productos acabados. Esta idea combina los beneficios de un negocio que genera productos de alta demanda en el mercado estadounidense y a la vez importantes beneficios ecológicos para El Salvador. En el propósito de este proyecto se engloba al medio ambiente como principal accionista, aunque sin lugar a dudas ocuparían un lugar importante los individuos y sus comunidades, los proveedores de salud, la economía regional, la flora y la fauna. Debido a

---

<sup>5</sup> El Diario de Hoy, publicado el 11 de julio del año 2006.



que las llantas desechadas suponen un grave impacto ambiental si no son tratadas, para evitarlo el proyecto planteaba, emplear tecnología criogénica de última generación, presente en pocos lugares el mundo y que trata estos desechos de forma limpia produciendo trozos de material de diferentes tamaños, para la posterior fabricación de diferentes productos como juguetes y elementos de señalización, cabe mencionar que este proyecto hasta la fecha no se ha llevado a cabo su ejecución aunque vale la pena recalcar que existe documentación acerca de la Auditoria de Evaluación Ambiental del Proyecto “Green Earth Recyclin Sociedad Anónima de Capital Variable”, emitido por el MARN en San Salvador en fecha 2 de septiembre del año 2010<sup>6</sup>.

En el año 2010, ante la preocupación que provoca la disposición final de neumáticos en desuso en el país, el MARN hace un llamado especial a los Jefes Edilicios y lanza el “Plan Nacional de Manejo y Disposición Final Responsable de Llantas en Desuso en El Salvador”, ya que estas constituyen un grave foco de infección y enfermedades, además de formar parte del fondo de las quebradas, barrancos y terminar mezcladas con la basura común, sin ningún tipo de tratamiento especial, convirtiéndolas en uno de los máximos enemigos del medio ambiente, debido a que cada una tarda más de 500 años en degradarse<sup>7</sup>. El Plan, tiene como objetivo reducir el impacto negativo y generar conciencia en la ciudadanía sobre el manejo y disposición final de los neumáticos que ya cumplieron su vida útil, es por ello que además se contempla la construcción de 11 centros de acopio, ubicados en diferentes puntos estratégicos en todo el país, adonde las alcaldías y particulares puedan llevar los neumáticos cuando estas lleguen al final de su vida útil; y así de esa manera evitar en gran medida que acaben a la intemperie o en el peor de los

---

<sup>6</sup> Resolución MARN N° 11653-887-2010

<sup>7</sup> Diario Co Latino, Nacionales, publicado el 8 de noviembre de 2010.



casos, que sean quemados a cielo abierto produciendo emisiones tóxicas que contaminen al medio ambiente<sup>8</sup>.

La primera fase del proyecto contempla la construcción de los tres primeros centros de acopio, con fondos procedentes del “Programa de Descontaminación de Áreas Críticas” (DAC), estos serán construidos en los municipios de Santa Rosa de Lima, en La Unión; La Libertad; y El Paraíso, en Chalatenango. Los cargamentos de neumáticos, serán recolectados por la empresa cementera “CESSA”, pero ahora tras culminar un proceso de doce años de integración, lo realizará bajo el nombre de “HOLCIM El Salvador”<sup>9</sup>, quienes utilizarán las llantas como materia prima en la fabricación de cemento, mecanismo que será controlado por el MARN para evitar la contaminación del aire. Además, el MARN también promoverá el uso de neumáticos en proyectos de ornato, decoración de parques y juegos infantiles; incluso plantean reuniones con organizaciones de profesionales de la Ingeniería y la Arquitectura, para que este material sea utilizado en obras de contención.

Ante la gran cantidad de llantas en desuso hasta el momento en El Salvador, el MARN también promoverá la formulación de una normativa para el manejo de llantas en desuso, a través de la creación de un decreto con el que se pretende erradicar en un 99.99% las quemas de llantas a cielo abierto, para ello el plan incluye el establecimiento de convenios de cooperación con las 262 municipalidades del país, con la empresa fabricante de cemento “HOLCIM El Salvador”, y con “Geocycle”, empresa que a la fecha es la encargada del Coprocesamiento de llantas.

Precisamente el 8 de noviembre de este mismo año, se pone en marcha la primera jornada de recolección de llantas impulsada por la Viceministra de Medio Ambiente Lina Pohl, como parte del compromiso adquirido ante la

---

<sup>8</sup> Sucesos del Medio Ambiente 2010, [www.marn.gob.sv](http://www.marn.gob.sv)

<sup>9</sup> Diario Digital la pagina.com.sv, publicado el 19 de abril del año 2010.



Comisión Intersectorial para la Salud (CISALUD). La primera jordana de recolección, se realizó en Centros Penales, Instituto Salvadoreño del Seguro Social (ISSS), Ministerio de Hacienda, Ministerio de Economía e INDES, esto con el fin de reducir los potenciales criaderos de zancudos transmisores del dengue.

Cabe mencionar que este “Plan Nacional de Manejo y Disposición Final Responsable de Llantas en Desuso en El Salvador”, es parte del “Programa Nacional para el Manejo Integral de los Desechos Sólidos de El Salvador”, presentado por los titulares del MARN al presidente Mauricio Funes en mayo de 2010.

En el año 2011, se ponen en funcionamiento los primeros tres centros de acopio en La Unión, Chalatenango y Puerto de la Libertad; además el Edil del municipio de Comacaran, presenta una iniciativa privada de incineración de llantas para la zona oriental, alternativa que tendrá que ser evaluada por el MARN para obtener su viabilidad.

### **2.3 APLICACIONES DE LA LLANTA DENTRO DE LA INGENIERIA EN EL SALVADOR**

Poner en práctica el principio de la sostenibilidad, era sin lugar a dudas uno de los objetivos de la “Guía práctica para las municipalidades sobre re-uso de llantas”, impulsada por el PROARCA/SIGMA (Programa Ambiental Regional para Centroamérica/ Sistemas de Gestión para el Medio Ambiente), siendo uno de los principios 3'R, la búsqueda de un nuevo uso al desecho, en este caso los neumáticos fuera de uso, convirtiéndolos en un material que pueda ser aprovechado dentro de la Ingeniería Civil, en la construcción de Muros de Contención, Muros de Retención, Taludes, etc.



Ejemplos de algunos Proyectos llevados a cabo en El Salvador, utilizando neumáticos enteros. Ver Imagen 2.04 y 2.05



**Imagen 2.04** Muro de Contención hecho de llantas enteras, ubicado sobre la Carretera que de Santa Ana conduce hacia San Salvador.



**Imagen 2.05** Muro de Retención hecho de llantas enteras, Comunidad “Tigre I”, Municipio de Apáneca, Departamento de Ahuachapán.



## 2.4 APLICACIONES DE LA GOMA DE LLANTA TRITURADA DENTRO DE LA INGENIERIA A NIVEL MUNDIAL

### 2.4.1 USO DE LA GOMA TRITURADA EN VERTEDEROS

El uso de la goma triturada en vertederos ha sido un tema ampliamente estudiado por especialistas en el tema tales como Cosgrove (1995) y Edil et al. (2004). El uso de este material ha demostrado ser una alternativa importante para reducir el volumen de neumáticos acumulado en depósitos legales e ilegales.

Los manuales utilizados por el *California Integrated Waste Management Board*<sup>10</sup>, describen los variados usos de la goma triturada en los depósitos de basura. Cada manual consta de las siguientes partes: requerimientos de regulación, criterio de desempeño, características del material y la guía para el uso particular del material en el vertedero.

Cosgrove (1995) realizó pruebas para el uso de goma triturada en sistemas de drenaje, enfocándose en estudiar los esfuerzos generados en la interface entre la goma y la geomembrana. Encontró que los esfuerzos que se generan en la interface permiten el uso de la goma para este fin, con ciertas limitaciones de pendientes, dependiendo del tipo de membrana usada.

Edil et al. (2004) estudiaron el comportamiento de la goma triturada en sistemas de recolección de lixiviados. Según el estudio, el material demostró tener buenas cualidades para la absorción de compuestos orgánicos volátiles (*Volatile Organic Compounds, VOC*). Los autores mencionan que para un sistema de recolección de lixiviados en un vertedero de una hectárea, se

---

<sup>10</sup>Geo Syntec Consultants, 1998a, b, c, d, e



pueden emplear unos 300,000 neumáticos para hacer una capa de 0.3 m de espesor.

Por otro lado, Humphrey y Blumenthal (1998) presentaron el caso de un vertedero usado por tres poblaciones en el estado de Maine, Estados Unidos, donde se hizo una expansión del mismo. La capa de drenaje del fondo, hecha con arena derivada de piedra caliza, se había endurecido causando una reducción en la permeabilidad, situación que disminuía la capacidad de drenado del sistema.

Las autoridades se negaron a dar la licencia al nuevo vertedero hasta que este problema no fuera resuelto. La solución fue utilizar 300,000 neumáticos que se encontraban apilados en el vertedero, los cuales fueron triturados hasta alcanzar pedazos de 3 a 12 pulgadas (7.6 a 30.5 cm) y se colocaron como capa suplementaria de drenaje. Finalmente, el problema fue resuelto, la licencia fue otorgada y se eliminó la pila de neumáticos que igualmente representaba otro problema para las comunidades.

Un vertedero de 17 acres ubicado en Rockingham, Vermont, Estados Unidos, fue el primero en usar pedazos de goma triturada de una y dos pulgadas (2.5 y 5.1 cm) para el sistema de drenaje. La mitad del sistema se construyó con arena y la otra mitad con goma triturada. Pruebas de laboratorio encontraron que la goma triturada presentó iguales o mejores propiedades geotécnicas que la arena. Después de su clausura se realizaron tres monitoreos encontrando que la calidad de las descargas era la esperada y que el uso de la goma triturada no había producido daños en la geomembrana (Andrew y Guay, 1996).



## **2.4.2 USO DE LA GOMA TRITURADA PARA ABSORCIÓN DE METALES PESADOS Y SUSTANCIAS CONTAMINANTES**

No son muchas las investigaciones realizadas sobre el potencial de absorción de la goma triturada. Sin embargo, se ha logrado detectar un comportamiento retentivo de varias sustancias nocivas al ambiente. El riesgo de contaminación a cuerpos de agua superficiales y subterráneos impulsa esta iniciativa.

Estudios realizados por Gunasekara et al. (2000), revelaron la capacidad de absorción de la goma triturada.

Concentraciones conocidas de sustancias orgánicas como el naftaleno y el tolueno, e iones de mercurio ( $Hg^{2+}$ , inorgánico) fueron sometidas a goma triturada (220 $\mu$ m a 280 $\mu$ m). El naftaleno y tolueno reflejaron coeficientes de absorción de 1340 y 225 ml/g, respectivamente. Los iones de mercurio revelaron una absorción un poco más lenta, pero con una buena afinidad.

Por otra parte, se determinó que los pedazos de goma triturada absorben los fertilizantes y pesticidas de los campos de golf (Carlson, 2004).

Se trituraron gomas a diámetros de 6 a 9 mm y se colocaron entre estratos de arena y mezclas de arcilla con gravilla. Las concentraciones de nitrato, componente básico de fertilizantes, experimentaron una reducción de un 23% a un 58.6% de su concentración original. En consecuencia, se espera que el exceso de nitrato sea absorbido por la goma, mientras que los microorganismos del suelo ayudarán a consumir parte del mismo. El estrato de goma podría permanecer intacto por mucho tiempo mientras absorbe el nitrato. Un campo de golf puede consumir hasta 1,000 lb (453.5 kg) de pesticidas por año, los cuales penetran el suelo y llegan a aguas subterráneas (Carlson, 2004). Por tal razón es altamente recomendable utilizar goma triturada para absorber estas



sustancias. En síntesis, con goma triturada se puede controlar el exceso de nitratos y fertilizantes que llegan al subsuelo y a los acuíferos.

El uso de gomas trituradas para retener sustancias disolventes como el benceno y o-xileno ha sido estudiado con resultados favorables. Concentraciones de 1.3 y 8.2 mg de benceno y o-xileno respectivamente pueden ser absorbidas por cada gramo de goma triturada (Kerchaw et al., 1997).

#### **2.4.3 USO DE LA GOMA TRITURADA EN ASFALTO**

El estudio del caucho-asfalto ha tenido un desarrollo importante en Europa. Suiza fue el primer país en desarrollar este concepto en la década de los 60 y tuvo la patente de éste conocida como “*rubif*”. En países como Francia se empezaron a mejorar las propiedades del asfalto añadiéndole caucho, carbón y polietileno.

En Estados Unidos el caucho-asfalto es una tecnología que ha demostrado ser económicamente viable en ciertas situaciones. Cuando se trata de una vía rural con poco tráfico el uso de este material puede resultar desventajoso en términos económicos. Por el contrario, en áreas donde se tenga un problema constante de agrietamiento y deterioro del asfalto, causado por tráfico excesivo o por condiciones extremas de temperatura, resulta ser una alternativa económica<sup>11</sup>.

Estados como Arizona, Florida y California siguen usando el caucho-asfalto en donde quiera que se presente agrietamiento, siempre y cuando se necesite un

---

<sup>11</sup>Rubber & Plastic News, 1998a



período de vida grande de la vía. Esto se debe al alto costo del caucho-asfalto, alrededor del doble del costo del asfalto convencional<sup>12</sup>. Otros estados como Tennessee, Tejas y Nuevo Méjico están experimentando con este material.

El caucho-asfalto comúnmente usado en Arizona contiene un 20% en peso de goma triturada. Arizona ha asfaltado 1,100 millas (1,770 km) de carreteras con caucho-asfalto, equivalente a 120,000 toneladas de las cuales, como se mencionó anteriormente, el 20% es caucho. Algunas de las ventajas que trae el uso del caucho-asfalto son: mayor durabilidad de la superficie, menor mantenimiento, buen rodaje y mayor reducción de ruido.

La reducción del ruido fue estudiada inicialmente en Bélgica en 1981 por E. Nakkel (1991). Desde esa época se han llevado a cabo varios estudios que verifican esta cualidad. En su estudio, Nakkel encontró que el caucho-asfalto podía generar una reducción del 75% en el nivel de decibeles medido. Horst Pochhacker comparó el costo de las barreras de protección de ruido que se deben construir usando asfalto convencional y el costo del caucho-asfalto, encontrando que este segundo puede generar un ahorro de hasta diez veces el valor de las barreras.

El único caso, hasta ahora, donde se usó este material y se encontraron algunos agrietamientos leves es en la interestatal 19 al sur de Tucson, Arizona (Way, 1999), para la cual se usó un 10% de goma triturada en la mezcla. Por su parte, Hicks et al. (1998) hicieron un estudio de costos de ciclo de vida de caucho-asfalto usando tres escenarios diferentes y un período de análisis de 40 años. Los resultados determinantes demostraron que para los tres casos tomados, el uso del caucho-asfalto resultó ser económicamente más viable que el asfalto convencional.

---

<sup>12</sup>Rubber &Plastic News, 1998b



#### **2.4.4 USO DE LA GOMA TRITURADA EN TERRAPLENES**

Existen variados estudios para determinar la efectividad de la goma triturada cuando es usada en rellenos y terraplenes, por ejemplo los realizados por Humphrey et al. (1993), Bosscher et al. (1997), Lee et al. (1999), Yang et al. (2002) y Ghazavi (2004). Lee et al. (1999) sugieren que la goma triturada mezclada con arena puede ser efectiva para rellenos livianos. En dicho trabajo se realizaron ensayos de laboratorio para caracterizar las propiedades de resistencia y rigidez y se determinó que estas mezclas son adecuadas para dichas aplicaciones.

Para terraplenes en autopistas, Bosscher et al. (1997) encontraron que la mezcla de goma y suelo es adecuada para este uso, siempre y cuando se haya realizado una buena compactación.

#### **2.5 ESTUDIOS EXPERIMENTALES SOBRE PROPIEDADES DE LA GOMA DE LLANTA TRITURADA EN EL CONCRETO A NIVEL MUNDIAL**

La posibilidad de utilizar gomas trituradas como agregado para las mezclas de concreto ha sido estudiada numerosas veces como, por ejemplo, en los estudios realizados por Biel y Lee (1994), Huynh y Raghavan (1997), Kathib y Bayomy (1999) y Nehdi y Khan (2001). Los primeros resultados revelaban una disminución considerable en las propiedades mecánicas del material, como la resistencia a la compresión y a la tensión. En pruebas hechas por Biel y Lee (1994), donde se sustituyó la totalidad del agregado por goma triturada, la resistencia a compresión se redujo en un 90%<sup>13</sup>.

---

<sup>13</sup>Biel, T. D. y Lee, H. (1994). “Use of Recycled Tire Rubbers in Concrete”, *Infrastructure: New Materials and Methods of Repair*, Third Materials Engineering Conference, San Diego, California.



Estudios más recientes lograron estabilizar el efecto de la goma en la mezcla obteniendo resultados favorables en pruebas de compresión y tensión. Khatib y Bayomy (1999) estudiaron el comportamiento de muestras de concreto con diferentes cantidades de goma triturada. Sus resultados revelan que para obtener resultados similares a los de la mezcla convencional de concreto, el contenido óptimo de material reciclado no debe exceder el 20% del volumen total de agregado.<sup>14</sup>

La posibilidad de una reacción adversa de la goma triturada con la alcalinidad del cemento fue estudiada por Huynh y Raghavan (1997). Estos investigadores expusieron pedazos de goma a ambientes alcalinos extremos por un período de 4 meses. La deformación de las partículas de goma fue mínima, por lo que no atribuyen que el material falle bajo una exposición prolongada a la pasta del cemento.<sup>15</sup>

---

<sup>14</sup>Khatib, Z. K., and Bayomy, F. M. (1999), “Rubberized Portland cement concrete” *Journal of Materials in civil engineering*, ASCE, 11(3), 206-213.

<sup>15</sup>Huynh, H. y Raghavan, D. (1997). “Durability of Simulated Shredded Rubber Tire in Highly Alkaline Environments”, *Advanced Cement Based Materials*, Vol. 6, pp. 138-143.



# CAPITULO 3

## ENSAYOS DE LABORATORIO

INVESTIGACION SOBRE EL USO  
DE LLANTA TRITURADA COMO  
AGREGADO EN LA FABRICACIÓN  
DE CONCRETO



### **3.1 INTRODUCCIÓN**

Los ensayos se realizaron en los laboratorios del Instituto Salvadoreño del Cemento y del Concreto (ISCYC), en colaboración con su personal técnico; fueron programados para ser ejecutados en un periodo de seis meses tomándose en consideración la lógica de ejecución de cada uno de ellos.

Los ensayos consisten en la caracterización de los materiales, necesarios para la obtención de información para la elaboración de los Diseños de Mezcla empleados en la investigación, ensayos de laboratorio realizados al concreto en estado fresco y estado endurecido, entre los cuales podemos mencionar para el estado fresco, revenimiento, temperatura, contenido de aire, peso volumétrico; y para el estado endurecido, resistencia a la compresión, flexión, pulso ultrasónico y módulo de elasticidad estático.

En este capítulo se describe paso a paso el procedimiento de cada uno de los ensayos referenciado a las normativas ASTM correspondientes, haciendo énfasis en tratar a la goma de llanta triturada como uno de los agregados naturales del concreto ya sea fino o grueso, dependiendo del diseño. Para la goma de llanta triturada se hace referencia a la norma mexicana NMX-T-010-SCFI, para encontrar su gravedad específica, puesto que resulta imposible aplicar los métodos de ensayos ASTM C-128 y ASTM C-127, debido a que las características del material no lo permiten; para los demás ensayos realizados a este material, la normativa ASTM aplica perfectamente.



## **3.2 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LOS ENSAYOS.**

### **3.2.1 ANÁLISIS GRANULOMETRICO.**

La granulometría es la distribución del tamaño de las partículas de un agregado, que se determina a través del análisis de los tamices, cedazos o cribas, regido por el método de ensayo ASTM C-136<sup>16</sup>. El tamaño de las partículas del agregado se determina por medio de tamices de malla de alambre con aberturas cuadradas.

Los números de tamaño (tamaño de granulometría) de los agregados gruesos se aplican a las cantidades de agregado (en masa), en porcentaje que pasa a través de un conjunto de tamices. El agregado fino o arena, tiene solamente un rango de tamaño de partículas para la construcción en general y para la construcción de carreteras. La granulometría y los límites granulométricos se expresan generalmente en porcentaje de material que pasa a través de cada tamiz. Hay muchas razones para que se especifiquen los límites granulométricos y el tamaño máximo nominal de los agregados, pues afectan las proporciones relativas de los agregados, así como la demanda de agua y de cemento, trabajabilidad, bombeabilidad, economía, porosidad, contracción (retracción) y durabilidad del concreto. Las variaciones en la granulometría pueden afectar seriamente la uniformidad del concreto de una mezcla a otra.

Las arenas muy finas son normalmente antieconómicas, mientras que arenas y gravas gruesas pueden producir mezclas sin trabajabilidad. En general, los agregados que no tienen una gran deficiencia o exceso de cualquier tamaño y presentan una curva granulométrica suave, producirán los resultados más satisfactorios.

---

<sup>16</sup> Boletín de Ingeniería, Diseño y Control de Mezclas de Concreto, Steven H. Kosmatka, Beatrix Kerkhoff, William C. Panarese, y Jussara Tanesi, Portland Cement Association (PCA), México 2004.



### 3.2.1.1 TAMIZADO PARA AGREGADO GRUESO NATURAL Y AGREGADO GRUESO SINTETICO, ASTM C-136.

El agregado grueso se ensaya con trece tamices estándar, con aberturas que varían de 1.18 mm a 100 mm (0.046” a 4”), regido por la especificación ASTM C-33. Los requisitos ASTM C-136, permiten límites amplios en la granulometría y una gran variedad de tamaños granulométricos. La granulometría del agregado grueso con un determinado tamaño máximo puede variar moderadamente dentro de un rango, sin que afecte apreciablemente las demandas de cemento y agua de la mezcla, si las proporciones de agregado fino, con relación a la cantidad de agregados, producen un concreto con buena trabajabilidad. Las proporciones de la mezcla se deben cambiar para producir un concreto trabajable, si ocurrieran grandes variaciones en la granulometría del agregado grueso. Como estas variaciones son difíciles de predecir, frecuentemente es más económico mantener la uniformidad de la producción y el manejo del agregado grueso, para que se reduzcan las variaciones de la granulometría.

El tamaño máximo del agregado grueso, influye en la economía del concreto ya que normalmente se requiere más agua y cemento en concretos con agregado máximo menor si es comparado con agregados de tamaño máximo mayor, debido al aumento del área superficial total del agregado.

La terminología que se utiliza para especificar el tamaño del agregado se debe elegir cuidadosamente, ya que el tamaño de la partícula se determina por el tamaño de la abertura del tamiz y se aplica al agregado que pasa a través de este y que se queda retenido en el tamiz inmediatamente menor.



El tamaño máximo nominal del agregado grueso se define por la definición ASTM C-125 y por el ACI 116, como el menor tamiz por el cual la mayor parte del agregado grueso debe pasar. El tamiz del tamaño máximo nominal puede retener del 5% al 15% de la masa, dependiendo del número de tamaño.

#### **EQUIPO:**

1. Balanzas: Las balanzas y basculas usadas en el ensayo de agregados gruesos deben de ser legibles y exactas en 0.5 g o 0.1 % de la carga de prueba, la que sea mayor, en cualquier punto dentro del rango de uso.
2. Mallas: El tejido de la malla deberá estar montado en marcos sólidos construidos de tal manera que prevengan la perdida de material durante el tamizado.

#### **PROCEDIMIENTO:**

1. Seleccionamos las mallas con aberturas adecuadas para el ensayo de laboratorio, para la muestra de agregado grueso.
2. Se cuartea la muestra de agregado grueso, utilizando la maquina cuarteadora de agregado grueso y de una de las partes cuarteadas es que se selecciona la muestra a ensayar. Ver Imagen 3.01.



Imagen 3.01 Maquina cuarteadora para agregado grueso.

3. Se selecciona la cantidad de agregado grueso a ensayar, basándose en el tamaño máximo nominal. Ver Tabla 3.01.

Tamaño Máximo Nominal, Aberturas cuadradas, mm (pulg).		Tamaño de la muestra de ensayo, mínimo, kg. (lb)	
9.5	(3/8)	1	(2)
12.5	(1/2)	2	(4)
19.0	(3/4)	5	(11)
25.0	(1)	10	(22)
37.5	(1 ½ )	15	(33)
50	(2)	20	(44)
63	(2 ½ )	35	(77)
75	(3)	60	(130)
90	(3 ½ )	100	(220)
100	(4)	150	(330)
125	(5)	300	(660)

Tabla 3.01 Tamaño mínimo de la muestra de ensayo en función del TMNA.

4. Obtenida la muestra de 5kg mínimo, para un tamaño máximo nominal de 3/4 pulg se procede a pesarlo en una balanza al 0.1 g. Ver Imagen 3.02.



**Imagen 3.02** Procedimiento para pesar la muestra seleccionada en una balanza.

5. La muestra pesada es colocada en el juego de mallas.
6. El procedimiento se realiza manualmente ya que por el tamaño promedio de las partículas del material no se puede colocar de una sola vez todo el material en el juego de mallas. Ver Imagen 3.03.



**Imagen 3.03** Proceso de Tamizado del agregado grueso.

7. Tamizada toda la muestra se procede a separar y pesar por separado las cantidades de material retenidas en cada malla. Ver Imagen 3.04.



**Imagen 3.04** Material Tamizado y separado.

8. Obtenidos los pesos del material retenidos en cada malla se grafica la curva granulométrica y se identifica el número del agregado.

#### 3.2.1.2 TAMIZADO PARA AGREGADO FINO NATURAL Y AGREGADO FINO SINTETICO, ASTM C-136.

El agregado fino, se ensaya con siete tamices normalizados, cuyas aberturas varían de 150  $\mu\text{m}$  a 9.5 mm (Tamiz No.100 a 3/8".), regido por la especificación ASTM C-33. Los requisitos del método de ensayo ASTM C-136, permiten un rango relativamente amplio en la granulometría del agregado fino.

La granulometría más deseable para el agregado fino depende del tipo de obra, si la mezcla es rica y del tamaño máximo del agregado grueso, en mezclas más pobres, o cuando se usan agregados gruesos de pequeñas dimensiones, es conveniente para que se logre una buena trabajabilidad, que la granulometría se aproxime al porcentaje máximo recomendado que pasa por cada tamiz.

En general, si se mantiene constante la relación agua-cemento y se elige correctamente la relación agregado fino-agregado grueso, se puede usar un amplio rango de granulometrías, sin efectos considerables sobre la resistencia. Los límites de esta norma, se señalan en la Tabla 3.02.



TAMIZ	PORCENTAJE QUE PASA (EN MASA)
9.5 mm (3/8")	100
4.75 mm (No. 4)	95-100
2.36 mm (No. 8)	80-100
1.18 mm (No. 16)	50-85
600 µm (No. 30)	25-60
300 µm (No. 50)	5-30
150 µm (No. 100)	0-10

**Tabla 3.02** Límites Granulométricos del Agregado Fino, ASTM C 33.

Entre otros requisitos importantes de la especificación ASTM C-33 podemos mencionar, que el agregado fino no debe contener más del 45% de material retenido entre cualquiera de dos tamices normalizados consecutivos; además, el módulo de finura debe ser mayor que 2.3 y menor que 3.1, y no debe variar más que 0.2 del valor típico de la fuente del agregado. Si se excede este valor, el agregado se debe rechazar, a menos que se hagan ajustes adecuados en la proporción entre los agregados finos y gruesos.

Las cantidades de agregado fino que pasan a través de los tamices No. 50 y No. 100, afectan la trabajabilidad, la textura superficial, el contenido de aire y el sangrado o exudación del concreto.

El módulo de finura (MF), se calcula de acuerdo a la terminología ASTM C-125, sumándose los porcentajes acumulados de la masa retenida en cada uno de los tamices de la serie especificada y dividiéndose esta suma por 100. El módulo de finura (MF), es un índice de finura del agregado, cuanto mayor es el MF, más grueso es el agregado.



## **EQUIPO:**

1. Balanzas: Las balanzas y basculas usadas en el ensayo de agregados gruesos deben de ser legibles y exactas en 0.5 g o 0.1 % de la carga de prueba, la que sea mayor, en cualquier punto dentro del rango de uso.
2. Mallas: El tejido de la malla deberá estar montado en marcos sólidos contruidos de tal manera que prevengan la perdida de material durante el tamizado.
3. Agitador de Mallas Mecánico: Dispositivo tamizador mecánico, si es usado, deberá crear movimiento de las mallas para causar que las partículas salten, voltee, o de otra manera giren, como para presentar diferentes orientaciones a la superficie de la malla.

## **PROCEDIMIENTO:**

1. Seleccionamos las mallas con aberturas adecuadas para el ensayo de laboratorio, para la muestra de agregado fino. Ver Imagen 3.05.



**Imagen 3.05** Juego de Mallas para agregado fino.



2. Se cuartea la muestra de agregado grueso, utilizando la maquina cuarteadora de agregado fino. Ver Imagen 3.06.



**Imagen 3.06** Maquina cuarteadora para agregado fino.

3. Se pesa una cantidad de 300 g mínimo, pesarlo en una balanza al 0.1g.
4. Pesada la muestra, esta es colocada en el juego de mallas. Ver Imagen 3.07.



**Imagen 3.07** Colocación del juego de mallas en el agitador de mallas motorizado.



5. Ordenar el juego de mallas y colocarle la tapadera a la malla con mayor tamaño de abertura de malla, el juego de mallas es colocado sobre el agitador de mallas motorizado. Ver Imagen 3.08.



**Imagen 3.08** Juego de mallas para agregado fino, instalado sobre el agitador de mallas motorizado.

6. Sujetar bien el juego de mallas en el agitador de mallas motorizado colocarse protectores de oídos, encender la maquina vibratoria y dejar de esta manera por un lapso de tiempo de 15min, se recomienda siempre para esta prueba desalojar la habitación o el cuarto de laboratorio debido a que la maquina genera mucho ruido.
7. Pasados los 15 min apagar la máquina y quitar el juego de mallas de la máquina.
8. Se pesa cada una de las cantidades retenidas en el juego de mallas. Ver Imagen 3.09.



**Imagen 3.09** Material sintético fino tamizado y separado.

9. Se tiene cuidado de remover y no perder las partículas de finos retenidos en las mallas con aberturas más pequeñas, esto se realiza manualmente utilizando agujas o alambres finos y también un cepillo de alambre. Ver Imagen 3.10.



**Imagen 3.10** Limpieza de mallas, después del proceso de tamizado.

10. Calculados los pesos del material retenidos en cada malla, se procede mediante fórmulas y cálculos determina la granulometría del agregado y determinar dentro de la gráfica de granulometría el módulo de finura.



### **3.2.2 GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN.**

La masa específica relativa, densidad relativa o gravedad específica de un agregado, es la relación entre su masa y la masa de agua con el mismo volumen absoluto. Se le usa en algunos cálculos de proporcionamiento y del control de la mezcla, tales como el volumen ocupado por el agregado en el método del volumen absoluto del diseño de mezcla.

La mayoría de los agregados naturales tiene masas específicas relativas que varían de 2.4 a 2.9. Los métodos de ensayo para la determinación de la masa específica relativa de los agregados finos y gruesos están regidos en la norma ASTM C-128 y ASTM C-127, respectivamente. La masa específica relativa de un agregado, se puede determinar en la condición seca al horno (SH) o saturada superficialmente seca (SSS). Ambas masas específicas, se pueden utilizar en los cálculos de proporcionamiento del concreto. Los agregados secados al horno (SH), no contienen agua absorbida ni libre. Los agregados saturados superficialmente secos (SSS), son aquellos cuyos poros de cada partícula de agregado están llenos de agua, pero no hay exceso de agua en la superficie de las partículas. La absorción de los agregados finos y gruesos se determina también con base al método de ensayo ASTM C-128 y ASTM C-127.

#### **3.2.2.1 GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN DEL AGREGADO GRUESO NATURAL, ASTM C-127.**

Este método de ensayo regido por la norma ASTM C-127, cubre la determinación de la densidad relativa o gravedad específica, así como la absorción del agregado grueso. La gravedad específica es la característica generalmente usada para el cálculo del volumen ocupado por el agregado en varias mezclas conteniendo agregados incluyendo concreto de cemento portland, concreto bituminoso y otras mezclas que son proporcionadas o



analizadas con base a un volumen absoluto. Los valores de absorción son usados para calcular el cambio en la masa de un agregado debido al agua absorbida en los espacios de poro con las partículas constituyentes, comparado con la condición seca, cuando es considerado que el agregado ha estado en contacto con el agua por un periodo suficiente para poder satisfacer la absorción potencial.

### **EQUIPO:**

1. Balanza: Dispositivo para determinar la masa que sea sensitivo, legible y preciso a 0.05% de la masa de la muestra en algún punto del rango usado para este ensayo, 0.5 g, la balanza estará equipada con aparatos adecuados para suspender la muestra contenida en agua desde el centro de la plataforma o pan de la balanza.
2. Contenedor de muestra: Cesta de alambre de 3.35 mm (No. 6) o malla fina, o una cesta de abertura y altura iguales, con una capacidad de 4 a 7 litros para alojar un tamaño nominal máximo de agregado de 37.5 mm (1 ½ pulg) o menor y una canastilla más grande según sea necesario para ensayar agregados de tamaños máximo mayores.
3. Tanque de agua: Tanque de agua en donde la canastilla es colocada suspendida debajo de la balanza.

### **PROCEDIMIENTO:**

1. Se recolecta la muestra de agregado grueso, esto realiza mediante el cuarteo del material, la muestra es separada en dos porciones



relativamente iguales utilizando la maquina cuarteadora de agregado grueso. Ver Imagen 3.11.



Imagen 3.11 Proceso de cuarteado del agregado grueso.

2. La muestra de agregado grueso cuarteada, se procede a seleccionar la masa mínima de la muestra de ensayo basándonos en el tamaño máximo nominal, y seleccionando la cantidad. Ver Tabla 3.03.

Tamaño Máximo Nominal, pulg.	Masa Mínima de la Muestra de Prueba, kg.
½ o menos	2
¾	3
1	4
1 ½	5
2	8
2 ½	12
3	18
3 ½	25
4	40

Tabla 3.03 Masa mínima de la muestra de prueba.

3. Se pesan 3 kg mínimo de material grueso utilizando una balanza al 0.1 g. Ver Imagen 3.12.



**Imagen 3.12** Obtención de la muestra seleccionada utilizando una balanza al 0.1%.

4. Después la muestra es colocada en una charola de aluminio y secada al horno a una temperatura de  $100 \pm 5^\circ\text{C}$ , en un tiempo de aproximadamente tres horas.
5. Se agrega agua hasta sumergir el material totalmente y se deja a la temperatura del cuarto aproximadamente por 24 h. Ver Imagen 3.13.



**Imagen 3.13** Agregado grueso sumergido totalmente en agua.

6. Pasadas las 24h, se retira el material y se coloca sobre una franela absorbente que permita remover la película de agua externa. Ver Imagen 3.14.



**Imagen 3.14** Limpieza del exceso de agua del agregado grueso, utilizando franelas.

7. Para evitar la evaporación del agua absorbida por el material, esta es colocada en una bolsa plástica. Ver Imagen 3.15.



**Imagen 3.15** Colocación del agregado grueso en bolsas plásticas.

8. Se determina la masa de la muestra en la condición saturada superficialmente seco.
9. Después se determinara la masa al aire.



10. Se coloca la muestra en el Contenedor o Cesta de Alambre y se sumerge en agua a una temperatura de  $23\pm 2.0^{\circ}\text{C}$ . Ver Imagen 3.16.



**Imagen 3.16** Material grueso colocado en la Cesta de Alambre.

11. Se elimina el contenido de aire agitando el recipiente sumergido.
12. Se obtiene la masa aparente en agua. Ver Imagen 3.17.



**Imagen 3.17** Obtención de la masa aparente en agua.



13. Después el material es colocado sobre una charola de aluminio y se seca al horno por  $24 \pm 4$  h. Ver Imagen 3.18.



**Imagen 3.18** Colocación del agregado grueso en el horno para el secado del material.

14. La muestra es retirada del horno y enfriada hasta que pueda ser manejada o manipulada.
15. Finalmente se obtiene la masa de la muestra.

#### 3.2.2.2 GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN DEL AGREGADO FINO NATURAL, ASTM C-128.

Este método de ensayo regido por la norma ASTM C-128, cubre la determinación de la gravedad específica bulk y absorción del agregado fino después de 24 horas sumergido en agua. La gravedad específica es la característica generalmente usada para el cálculo del volumen ocupado por el agregado en varias mezclas conteniendo agregados incluyendo concreto de cemento portland, concreto bituminoso y otras mezclas que son proporcionadas o analizadas con base a un volumen absoluto. Los valores de absorción son usados para calcular el cambio en la masa de un agregado debido al agua



absorbida en los espacios de poro con las partículas constituyentes, comparado con la condición seca, cuando es considerado que el agregado ha estado en contacto con el agua por un periodo suficiente para poder satisfacer la absorción potencial.

#### **EQUIPO:**

1. Balanza: Balanza o bascula que tenga una capacidad de 1 kg. o más, sensibilidad a 0.1 g o menos y precisión de 0.1% de la carga de ensayo en algún punto con el rango de uso para este método de ensayo. Con un rango de 100g de la carga de ensayo, una diferencia de lecturas será precisa con 0.1g.
2. Picnómetro: un frasco en el cual el agregado fino pueda ser introducido y en el cual el volumen contenido puede ser reproducido con  $\pm 0.1 \text{ cm}^3$ . un frasco volumétrico de  $500 \text{ cm}^3$  de capacidad, para una muestra de 500 g de agregado fino.
3. Frasco: un frasco Chatelier, satisfactorio para una muestra de ensayo de aproximadamente 55 g.
4. Molde y Pisón para Ensayo de Humedad Superficial: el molde metálico será de la forma de un cono truncado con las dimensiones  $40 \pm 3 \text{ mm}$  en el borde superior  $90 \pm 3 \text{ mm}$  de diámetro interno en la base y  $75 \pm 3 \text{ mm}$  de altura, con el metal teniendo un espesor mínimo de 0.8mm. El pisón metálico tendrá una masa de  $400 \pm 15 \text{ g}$  y una cara golpeadora circular y plana de  $25 \pm 3 \text{ mm}$  de diámetro.



### **PROCEDIMIENTO:**

1. Se recolecta la muestra de agregado fino, esto realiza mediante el cuarteo de aproximadamente 2 kg de material, para luego ser separadas en dos porciones relativamente iguales utilizando la maquina cuarteadora de agregado fino.
2. Una vez obtenida la muestra de agregado fino de aproximadamente 1kg, se coloca en una bandeja de aluminio limpia y seca.
3. Se agrega agua hasta cubrir la muestra totalmente y se deja reposar por  $24 \pm 4$  h. Ver Imagen 3.19.



**Imagen 3.19** Agregado fino totalmente sumergido en agua.

4. Pasado el tiempo de inmersión del agregado fino en agua se procede a eliminar el exceso de agua con cuidado y evitar la pérdida de finos, esto se realiza mediante la decantación del recipiente. Ver Imagen 3.20.



**Imagen 3.20** Decantación del recipiente para eliminar excedente de agua.

5. Se esparce el material sobre una superficie plana no absorbente, para el caso una bandeja de aluminio de aproximadamente 50 cm en cada lado. Ver Imagen 3.21.



**Imagen 3.21** Agregado fino sobre superficie no absorbente.

6. Se coloca la muestra a la exposición de aire y se esparce frecuentemente para lograr un secado homogéneo, es decir varias veces hasta que el material alcanza una condición saturado superficialmente seco o condición de flujo libre. Ver Imagen 3.22.



**Imagen 3.22** Proceso de esparcir el agregado sobre la superficie no absorbente.

7. Para determinar que el material ha alcanzado la condición saturado superficialmente se realiza el ensayo para Humedad Superficial.
8. Se calcula la Humedad Superficial colocando el molde sobre la bandeja con el diámetro mayor hacia abajo en contacto con la bandeja de aluminio, llenarlo hasta desbordar el material, luego sujetar firmemente con los dedos en el recipiente o cono truncado y apisonar el material ligeramente con una serie de 25 golpes, los golpes se realizan unos 5 mm arriba del borde del material y se permite al pisón caer libremente bajo la tracción de la gravedad, los golpes del pisón se distribuyen uniformemente en toda el área de contacto de la arena. Ver Imagen 3.23.



**Imagen 3.23** Prueba del cono de absorción para determinar la condición saturado superficialmente seco.

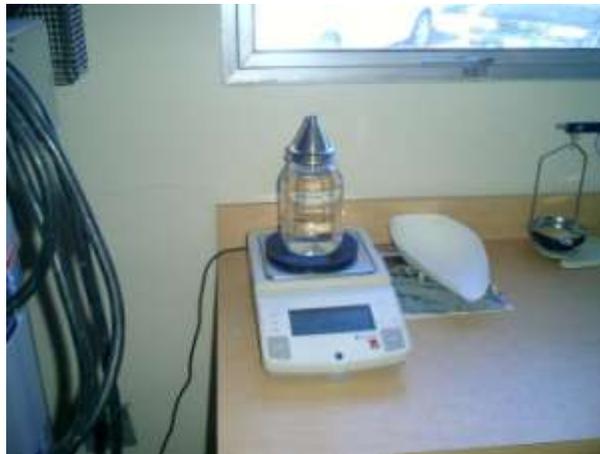
9. Se procede a retirar el molde cuidadosamente, si el material mantiene la forma del recipiente es que todavía hay presencia de humedad superficial, de ser así habría que seguir secando el material a la exposición del aire, de lo contrario si sufre un desplome ligero el material se encuentra en la condición pretendida que es saturado superficialmente seco. Ver Imagen 3.24.



**Imagen 3.24** Condición saturada superficialmente seco alcanzada.



10. Si el material sufre un desplome abrupto, esto indica que el material se ha secado demasiado, al presentarse esta situación adicionar agua uniforme en toda la muestra y repetir todo el ensayo nuevamente hasta alcanzar la condición esperada.
11. Luego se procede a realizar el ensayo por el procedimiento Gravimétrico (Picnómetro).
12. Se llena parcialmente el picnómetro con agua. Ver Imagen 3.25.



**Imagen 3.25** Determinación de la masa del picnómetro más agua.

13. Se introduce  $500 \pm 10$  g, del agregado fino en condición saturado superficialmente seco. Ver Imagen 3.26.



**Imagen 3.26** Determinación de la masa del picnómetro más agua más agregado fino.

14. Se agrega agua adicional hasta aproximadamente el 90% de la capacidad del picnómetro.

15. Se realiza a la agitación del picnómetro con el objetivo de eliminar todos los contenidos de burbujas de aire existentes, este procedimiento se realiza rodando, invirtiendo en ambos sentidos y agitando el picnómetro hasta alcanzar la condición esperada, libre de partículas de aire. Ver Imagen 3.27.



**Imagen 3.27.** Proceso de agitación del picnómetro con agua y agregado fino.



16. Se determina la masa del material al 0.1 g. Ver Imagen 3.28.



**Imagen 3.28** Obtención de la masa del picnómetro, más agua, mas agregado, libre de partículas de aire.

17. Después el material es colocado sobre una charola de aluminio y se seca al horno por  $24 \pm 4$  h. Ver Imagen 3.29.



**Imagen 3.29** Colocación del material en el horno para su secado total.

18. Con el material completamente seco se determina nuevamente su masa.

19. Con los datos obtenidos de masas se determinan propiedades físicas tales como: densidad, densidad relativa o gravedad específica y



absorción, de las cuales tiene trascendencia la gravedad específica para el cálculo de volumen ocupado en mezclas de concreto.

### 3.2.2.3 GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN DEL AGREGADO GRUESO SINTÉTICO, NMX-T-010-SCFI.

Este método de ensayo regido por la norma mexicana NMX-T-010-SCFI, cubre la determinación de la gravedad específica por medio de las masas hidrostáticas, en el cual, se determina la masa del espécimen de masa especificada, posteriormente se sumerge en alcohol y luego en agua anotando su masa nuevamente.

#### **EQUIPO:**

1. Balanza analítica con precisión de 0.1 g.
2. Alambre delgado.
3. Vaso de precipitado.

#### **PROCEDIMIENTO: METODO DE LAS PESADAS HIDROSTATICAS.**

1. Soportar un espécimen no mayor de 30 g con un alambre delgado y determinar su masa en el aire con aproximación de 0.1 mg.
2. Sumergir el espécimen en alcohol (ss) y sacudirlo con el objeto de eliminar burbujas de aire.
3. Llenar el vaso de precipitado con agua, sumergir el alambre dentro del agua y determinar su masa con aproximación de 0.1 mg.
4. Soportar el espécimen con el alambre y sumergirlo en el agua, anotando la masa con aproximación de 0.1 mg.



La Sociedad Americana de Ingenieros Civiles (ASCE), para evitar confusiones a la hora de realizar este tipo de prueba en laboratorio, ya que la goma triturada proveniente de neumático reciclado abarca un sin número de tipos de material que varía según su tamaño, forma y empleo, propone la terminología especificada en la Tabla 3.04.

TERMINO	DESCRIPCION DEL MATERIAL
<b>Neumático Entero (Whole Tires)</b>	Neumático entero
<b>Neumático Triturado (Shredded Tires)</b>	Este material es producido en el proceso de corte primario. Los pedazos suelen estar dentro del rango entre 101 mm (4 in) y 202 mm (8 in), pero pueden llegar hasta los 460 mm (18 in). Los pedazos de neumático tienen forma plana y suelen ser algo irregulares. Normalmente los pedazos no reciben un tratamiento para remover metales por lo que puede contener correas de acero expuestas o puntas de metal. La densidad de este material compactado es variable, para materiales sueltos puede estar aproximadamente entre 390 kg/m <sup>3</sup> (24 lb/ft <sup>3</sup> ) hasta 535 kg/m <sup>3</sup> (33 lb/ft <sup>3</sup> ), y para un estado más denso oscila entre 650 kg/m <sup>3</sup> (40 lb/ft <sup>3</sup> ) hasta 840 kg/m <sup>3</sup> (52 lb/ft <sup>3</sup> ).
<b>Viruta de Neumático (Tire Chips)</b>	Es un material uniforme en cuanto a tamaño, este se encuentra en un rango entre 25 mm (1 in) y 50 mm (2 in), su producción se realiza por corte primario y secundario. Son más equidimensionales. La densidad suelta varía y puede estar entre 320 kg/m <sup>3</sup> (20 lb/ft <sup>3</sup> ) hasta 490 kg/m <sup>3</sup> (30 lb/ft <sup>3</sup> ), la densidad compactada se encuentra en el rango entre 570 kg/m <sup>3</sup> (35 lb/ft <sup>3</sup> ) hasta 730 kg/m <sup>3</sup> (45 lb/ft <sup>3</sup> ). La gravedad específica oscila entre 1.1 y 1.3.
<b>Caucho Molido Triturado (Ground Rubber)</b>	Son partículas entre 19 mm (3/4 in) hasta aproximadamente 0.15 mm (Tamiz No 100). La molienda se realiza con granuladores, molinos de martillo y máquinas de corte fino, las correas de acero son removidas con separadores magnéticos, también se remueven algunas partículas de fibra de vidrio. La gravedad específica de este material es de 1.20.
<b>Miga de Goma (Crumb Rubber)</b>	Contiene partículas que van desde 0.075 mm hasta 4.75 mm. Una aplicación muy común es como parte de asfalto modificado. La trituración se realiza en varias etapas e incluye el uso de tambores rotadores de acero corrugado, platos de acero, micro-molinos. Las correas de acero son también removidas. La gravedad específica de este material se encuentra alrededor de 1.15.

**Tabla 3.04** Clasificación de la goma proveniente de Neumático Reciclado, Sociedad Americana de Ingenieros Civiles, ASCE, 2006.



#### **3.2.2.4 GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN DEL AGREGADO FINO SINTÉTICO, NMX-T-010-SFFI.**

El agregado fino sintético (Goma de llanta triturada), se ensaya de igual manera que el agregado grueso sintético (Llantita triturada), a través de la norma mexicana NMX-T-010-SCFI, basándose en el mismo procedimiento y en la misma terminología propuesta por la Sociedad Americana de Ingenieros Civiles (ASCE) (Ver sección 3.2.2.3).

#### **3.2.3 PESO VOLUMETRICO.**

El peso volumétrico o masa volumétrica (masa unitaria), de un agregado es la masa o el peso del agregado necesario para llenar un recipiente con un volumen unitario especificado. El volumen al que se refiere, es aquel ocupado por los agregados y por los vacíos entre las partículas de agregado. La masa volumétrica aproximada del agregado comúnmente usado en el concreto de peso normal varía de 1,200 a 1,750 kg/m<sup>3</sup>. La cantidad de vacíos entre partículas afecta la demanda de pasta en el diseño de la mezcla. La cantidad de vacíos varía entre el 30% y el 45% para el agregado grueso, y del 40% al 50% para el agregado fino. La angularidad aumenta la cantidad de vacíos, mientras que los tamaños mayores de un agregado bien graduado y la mejoría de la granulometría disminuyen el contenido de vacíos. El método para la determinación de la masa volumétrica se encuentra en la norma ASTM C-29. En esta normativa, se describen tres métodos para la consolidación del agregado en el recipiente, dependiendo del tamaño del agregado: varillado, acomodamiento por sacudida y vaciado con pala o paleo.

Las capacidades del depósito medidor, según el tamaño máximo nominal del agregado se especifican en la Tabla 3.05.



TAMAÑO MÁXIMO NOMINAL DEL AGREGADO		CAPACIDAD DEL DEPÓSITO	
PULGADAS	Mm	Pie <sup>3</sup>	L (m <sup>3</sup> )
½	12.5	1/10	2.8 (0.0028)
1	25.0	1/3	9.3 (0.0093)
1 ½	37.5	½	14 (0.014)
3	75	1	28 (0.028)
4	100	2 ½	70 (0.070)
5	125	3 ½	100 (0.100)

Tabla 3.05 Capacidad del Depósito Medidor, ASTM C-29.

### 3.2.3.1 PESO VOLUMÉTRICO DEL AGREGADO GRUESO NATURAL, AGREGADO GRUESO SINTÉTICO Y EL AGREGADO FINO NATURAL Y FINO SINTÉTICO, ASTM C-29.

Este método de ensayo regido por la norma ASTM C-29, cubre la determinación de la densidad bulk “Peso Unitario” del agregado en una condición compactada o suelta, la cual es necesaria para su uso en diferentes métodos para la selección del proporcionamiento de la mezcla de concreto, además puede ser usada para la determinación de la relación masa/volumen para conversiones en la adquisición de conformidades. Este método de ensayo es aplicable a agregados que no excedan las 5” (125 mm) de tamaño máximo nominal.

#### EQUIPO:

1. Balanza: Una balanza o bascula con una precisión de 0.1% de la carga de ensayo y para cualquier punto dentro del rango de uso, con una graduación de al menos 0.1 lb (0.05 kg). el rango de uso deberá ser considerado para extenderlo de la masa del medidor, vaciarlo a la masa del medidor plus, sus contenidos en 120 lb/ pie<sup>3</sup> (1920 kg/m<sup>3</sup>).



2. Varilla Compactadora: Una varilla compactadora redonda, acero de 5/8 pulg. (16 m) de diámetro y de aproximadamente de 24 pulg. (600 mm) de longitud teniendo un extremo o ambos redondeados a una punta hemisférica, el diámetro del cual es 5/8 pulg. (16 mm).
  
3. Recipiente Volumétrico: Un recipiente cilíndrico metálico, preferiblemente provisto con asas. deberá ser impermeable con la parte superior y la inferior planos y nivelados, y suficientemente rígido para mantener su forma bajo uso pesado. el recipiente deberá tener una altura igual al diámetro, pero en ningún caso la altura será menor al 80% ni mayor al 150% del diámetro. El borde superior será liso y plano con 0.01 pulg (0.25 mm) y será paralelo al fondo dentro de 0.5°, la pared interior del depósito será una superficie continua y lisa.

### **PROCEDIMIENTO:**

1. Se recolecta la muestra de agregado, esto se realiza mediante el cuarteo del material, la muestra es separada en dos porciones relativamente iguales utilizando la maquina cuarteadora de agregado.
  
2. La máquina cuarteadora a utilizar dependerá del tipo de agregado, para agregado grueso la maquina mostrada en la Imagen 3.30, y para el agregado fino la Imagen 3.31.



**Imagen 3.30** Proceso de cuarteado, del agregado grueso.



**Imagen 3.31** Máquina para el cuarteado del agregado fino.

3. Obtenida la muestra de agregado cuarteada, se selecciona la masa mínima de la muestra de ensayo basándonos en el tamaño máximo nominal, y seleccionando el molde específico para este tamaño de agregado, se calcula la cantidad de material que genere un volumen mayor al del recipiente Volumétrico.



- El tipo de Recipiente Volumétrico se selecciona a partir de la Tabla 3.06. y este lo utilizamos tanto para el agregado natural como sintético.

Tamaño Máximo Nominal de Agregado		Capacidad del Deposito	
Pulgadas	Mn	Pie <sup>3</sup>	L (m <sup>3</sup> )
½	12.5	1/10	2.8 (0.0028)
1	25.0	1/3	9.3 (0.0093)
1 ½	37.5	½	14 (0.014)
3	75	1	28 (0.028)
4	100	2 ½	70 (0.070)
5	125	3 ½	100 (0.100)

Tabla 3.06. Capacidad del depósito medidor ASTM DESIGNACION C 29.

- Realizamos como siguiente paso el procedimiento de varillado.
- Se llena el depósito o Recipiente Volumétrico hasta un tercio de su altura, luego se nivela la superficie con las manos. Ver Imagen 3.32.



Imagen 3.32 Proceso de llenado del recipiente con agregado grueso.



7. Aplicamos a la capa de agregado 25 golpes con la varilla, los cuales son distribuidos uniformemente sobre la superficie, se debe procurar que los golpes no toquen el fondo del recipiente.
8. Se llena el depósito hasta dos tercios de su altura, se procura realizar el llenado de la segunda capa de la misma forma que se llenó la primera capa de agregado, por lo que es necesario que sea la misma persona la que llene el Recipiente Volumétrico, luego se nivela la superficie con las manos. Ver Imagen 3.33.



**Imagen 3.33** Llenado del recipiente hasta dos tercios de su altura.

9. Nuevamente 25 golpes con la varilla son aplicados, los cuales son distribuidos uniformemente sobre la superficie y aplicados con la misma intensidad que los aplicados a la primera capa, por lo que es necesario que sea la misma persona la que aplique los golpes a las tres capas.
10. Se llena el recipiente con material hasta rebalsarlo. Ver Imagen 3.34.



**Imagen 3.34** Proceso de llenado del recipiente con agregado grueso.

9. Esta capa es varillada con la misma cantidad de golpes que se le aplico a las capas inferiores. Ver Imagen 3.35.



**Imagen 3.35** Proceso de varillado de la última capa.

10. Se nivela la superficie con la regla enrasadora o utilizando la varilla, es necesario que al momento de enrasar, tener cuidado de no compactar el agregado con algún tipo de fuerza adicional aplicada a través de la varilla. Ver Imagen 3.36.



**Imagen 3.36** Proceso de enrase del material.

11. Para el caso del agregado procurar que los porcentajes de cada partícula de agregado que sobresalga del recipiente sea equivalente a la cantidad de huecos por debajo del borde del recipiente.
12. Se obtiene la masa del material más la masa del recipiente. Ver Imagen 3.37.



**Imagen 3.37** Obtención de la masa del recipiente más agregado grueso sintético.

14. Después se obtiene el peso del recipiente.

### **3.2.4 CONTENIDO DE HUMEDAD.**

El contenido de humedad de los agregados naturales (Grava y Arena), está regido por el método de ensayo ASTM C-566, que cubre la determinación del porcentaje de humedad evaporable en una muestra de agregado por secado, la humedad superficial y la humedad en los poros del agregado. Este método de ensayo es suficientemente exacto para propósitos usuales, tales como ajuste en peso de las cantidades de materiales en una revoltura de concreto.



### 3.2.4.1. CONTENIDO DE HUMEDAD DEL AGREGADO GRUESO NATURAL, ASTM C-566.

El procedimiento para la determinación del contenido de humedad del agregado grueso natural se describe a continuación:

#### **EQUIPO:**

1. Balanza: Legible y sensitiva con 0.1% de la carga de ensayo en cualquier punto con el rango de uso. Dentro de un intervalo igual al 10% de la capacidad del dispositivo pesado, la identificación de carga deberá tener una exactitud con 0.1% de la diferencia de peso.
2. Fuente de Calor: Un horno ventilado capaz de mantener la temperatura de la muestra  $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ , donde el control cerrado de la temperatura no sea requerido.
3. Recipiente para la Muestra: Un recipiente que no sea afectado por el calor y de suficiente volumen para contener la muestra sin peligro de derrame y de tal forma que la altura de la muestra no exceda la quinta parte de la menor dimensión lateral.

#### **PROCEDIMIENTO:**

1. Primeramente seleccionamos la cantidad de la muestra utilizando la Tabla 3.07.



Tamaño Máximo Nominal del Agregado mm (pulg).	Masa de Peso Normal Muestra de Agregado, mín. kg.
4.75 (0.187)	0.5
9.5 (3/8)	1.5
12.5 (1/2)	2.0
19.0 (3/4)	3.0
25.0 (1)	4.0
37.5 (1 ½ )	6.0
50 (2)	8.0

Tabla 3.07 Muestra para el Agregado Grueso.

2. Determinamos la masa de 3 kg mínimo para un tamaño máximo nominal de  $\frac{3}{4}$  pulg.
3. Se pesa la muestra con una aproximación de 0.1%
4. Se seca la muestra en el horno a temperatura constante, hasta que la muestra está completamente seca.
5. Se obtiene la masa de la muestra con una precisión del 0.1%, esto se realiza después de haberse enfriado la muestra para evitar no dañar la balanza.

#### 3.2.4.2 CONTENIDO DE HUMEDAD DEL AGREGADO FINO NATURAL, ASTM C-566.

##### EQUIPO:

1. Balanza: Legible y sensitiva con 0.1% de la carga de ensayo en cualquier punto con el rango de uso. Dentro de un intervalo igual al 10% de la



capacidad del dispositivo pesado, la identificación de carga deberá tener una exactitud con 0.1% de la diferencia de peso.

2. Fuente de Calor: Un horno ventilado capaz de mantener la temperatura de la muestra  $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ , donde el control cerrado de la temperatura no sea requerido.
3. Recipiente para la Muestra: Un recipiente que no sea afectado por el calor y de suficiente volumen para contener la muestra sin peligro de derrame y de tal forma que la altura de la muestra no exceda la quinta parte de la menor dimensión lateral.

El procedimiento para la determinación del contenido de humedad del agregado fino natural se describe a continuación:

#### **PROCEDIMIENTO:**

El procedimiento para la determinación del contenido de humedad del agregado fino natural se basa en el procedimiento descrito para la obtención del “CONTENIDO DE HUMEDAD DEL AGREGADO GRUESO NATURAL, ASTM C-566”. (Ver sección 3.2.4.1)

#### **3.2.4.3 CONTENIDO DE HUMEDAD DEL AGREGADO GRUESO SINTÉTICO.**

El caucho sintético con el cual son fabricadas las llantas, es el resultado de la mezcla de varios materiales y caucho natural, en donde cada uno de ellos cumple una función específica para adicionar propiedades físicas y químicas en la fabricación de llantas, entre las principales características que podemos relacionar para la investigación es la impermeabilidad que poseen los cauchos sintéticos.



Por lo tanto el contenido de humedad que podría adicionar la goma de llanta triturada o caucho a la mezcla de concreto, es cero por ciento, basado en las propiedades físicas de este tipo de material, resultaría redundante la posibilidad de calcular el contenido de humedad del agregado grueso sintético, si ya se cuenta con el conocimiento general de las características de este material. Además se cuenta con la referencia de estudios internacionales realizados, en donde hacen gran énfasis en esta característica física de la goma de llanta triturada.

#### 3.2.4.4 CONTENIDO DE HUMEDAD DEL AGREGADO FINO SINTÉTICO.

El procedimiento para la determinación del contenido de humedad del agregado fino sintético se basa en el procedimiento descrito para la obtención del “CONTENIDO DE HUMEDAD DEL AGREGADO GRUESO SINTÉTICO (ver sección 3.2.4.4.)”.

### **3.3 PRUEBAS EN EL CONCRETO CONVENCIONAL Y CON PARTICULAS DE LLANTA TRITURADA.**

#### **3.3.1 CONCRETO EN ESTADO FRESCO.**

Se debe enfatizar la importancia de la obtención de muestras realmente representativas del concreto fresco para los ensayos de control, a menos que la muestra sea representativa, los resultados de las pruebas serán engañosos. Las muestras se deben obtener y manejar de acuerdo a la norma ASTM C-172. A excepción de las pruebas de rutina, tales como revenimiento y contenido de aire, realizadas para el control del proceso, la ASTM C-172, requiere que el tamaño de la muestra para el propósito de aceptación debe ser, por lo menos de 28 litros y se debe obtener durante los 15 minutos entre la primera y la última porción de la bachada. La muestra compuesta, producida con dos o más



porciones, no se debe tomar de la porción inicial de la descarga, ni tampoco a la porción final. La muestra se debe proteger del sol, viento y otras fuentes de evaporación rápida durante el muestreo y el ensayo.

### 3.3.1.1 PESO VOLUMETRICO DEL CONCRETO, ASTM C-138

La masa volumétrica (masa unitaria) o peso volumétrico del concreto, se determina de acuerdo al método de ensayo ASTM C-138. El tamaño del recipiente empleado en la determinación del peso volumétrico varía respecto al tamaño del agregado grueso. Se debe tener especial cuidado a la hora de consolidar el concreto adecuadamente, ya sea a través de golpes o a través de vibración interna. Se debe utilizar una llana o placa plana para enrasar la superficie superior del concreto, a fin que el recipiente este lleno y con acabado plano y liso. Ver Imagen 3.38.



**Imagen 3.38** Proceso de enrase del recipiente utilizando la llana metálica.

El peso volumétrico se expresa en kilogramos por metro cubico.  
Ver Imagen 3.39.



**Imagen 3.39** Obtención de la masa del recipiente más concreto.

### 3.3.1.2 CONTENIDO DE AIRE DEL CONCRETO, METODO DE ENSAYO ASTM C-231.

Se pueden utilizar varios métodos para medir el contenido de aire del concreto fresco. Existe un método por presión regido por la norma ASTM C-231, este se basa en la Ley de Boyle, la cual relaciona presión y volumen. La presión aplicada comprime el aire dentro de la muestra de concreto, incluyendo el aire en los poros de los agregados. Los factores de corrección del agregado, el cual compensa al aire atrapado (aire incluido), en los agregados de peso normal son relativamente constantes y a pesar de ser pequeños, se les debe substraer de la lectura en el medidor de presión para obtener el contenido de aire correcto. Los medidores de presión son ampliamente usados porque no hay necesidad de conocer las proporciones de la mezcla ni la gravedad específica de los ingredientes del concreto. Además, esta prueba se puede realizar en un menor tiempo de lo requerido por otros métodos.



## **EQUIPO:**

1. Medidor de Aire: Medidor que iguala el volumen de aire y la presión conocida en una acamara con el volumen desconocido de aire de la muestra de concreto.
2. Mazo con cabeza de goma: de peso aproximadamente  $1.25 \pm 0.50$  lb ( $600 \pm 200$  g.) para usarse con recipientes de  $0.5$  ft<sup>3</sup> (14 L) o menores. Para recipientes más grandes que  $0,5$  ft<sup>3</sup> un mazo que pese aproximadamente  $2.25 \pm 0.50$  lb ( $1000 \pm 200$  g).
3. Varilla Compactadora: Una varilla compactadora redonda, acero de  $5/8$  pulg. (16 m) de diámetro y de aproximadamente de 24 pulg. (600 mm) de longitud teniendo un extremo o ambos redondeados a una punta hemisférica, el diámetro del cual es  $5/8$  pulg. (16 mm).
4. Recipiente Volumétrico: Un recipiente cilíndrico metálico, preferiblemente provisto con asas. deberá ser impermeable con la parte superior y la inferior planos y nivelados, y suficientemente rígido para mantener su forma bajo uso pesado. el recipiente deberá tener una altura igual al diámetro, pero en ningún caso la altura será menor al 80% ni mayor al 150% del diámetro. El borde superior será liso y plano con 0.01 pulg (0.25 mm) y será paralelo al fondo dentro de  $0.5^\circ$ , la pared interior del depósito será una superficie continua y lisa.



## **PROCEDIMIENTO:**

1. Como primer paso se llena el recipiente volumétrico utilizando el procedimiento descrito en el ensayo de laboratorio “PESO VOLUMETRICO DEL CONCRETO, ASTM C-138 (ver sección 3.3.1.1)”, esto se realizó debido a la factibilidad que se tenía en el laboratorio para elaborar las pruebas conjuntamente.
2. Se coloca el medidor de aire sobre el recipiente, ajustando los cuatro seguros del medidor.
3. Para obtener un resultado idóneo se procura limpiar completamente el borde superior del recipiente volumétrico.
4. Una vez colocado el medidor sobre el recipiente, se procede a verter agua sobre el embudo ubicado en la parte superior del medidor, esto para liberar y sacar todo el mayor número de partículas de aire, además se mueve en forma circular y se golpea suavemente con las manos el recipiente.
5. Luego se comienza a dar presión al embolo ubicado en la parte superior del medidor, esto se realiza hasta obtener presión en el embolo, el cual se siente en las manos de quien realiza la prueba.
6. Luego se libera una pequeña válvula, la cual al ser accionada libera presión y de esta forma se genera la lectura del contenido de aire de la mezcla de concreto en el medidor.
7. Por último se toma la lectura de contenido de aire del medidor.



### 3.3.1.3 REVENIMIENTO DEL CONCRETO, ASTM C-143.

El ensayo de asentamiento del cono de Abrams, ASTM C-143, es el método más ampliamente aceptado y utilizado para medir la consistencia del concreto, aplica para TMNA  $< 1 \frac{1}{2}$ ". El revenimiento o asentamiento es la distancia vertical que el concreto se ha asentado, medida con una precisión de 5 mm (1/4"). Un valor elevado de revenimiento es indicativo de un concreto más fluido. Todo el ensayo hasta la remoción del cono se debe completar en  $2 \frac{1}{2}$  min, pues el concreto pierde revenimiento con el tiempo. Si hay desmoronamiento de una parte del concreto, se debe realizar otra prueba con otra porción de la muestra.

#### **EQUIPO:**

1. Un cono de revenimiento (molde cónico de metal) con dimensiones 12" de altura, 8" de diámetro de base y 4" de diámetro de la parte superior.
2. Una varilla de metal con diámetro 5/8" y 24" de longitud con una punta de forma hemisférica.

#### **PROCEDIMIENTO:**

1. Humedecer el cono y colocarlo de forma vertical sobre una superficie plana, rígida y no absorbente.
2. Llenar el cono en tres capas de volúmenes aproximadamente iguales. Por lo tanto, se debe llenar el cono a una altura de  $2 \frac{5}{8}$ " (6.7 cm) en la primera capa, una profundidad de  $6 \frac{1}{8}$ " (15.6 cm) en la segunda capa y sobrellenar el cono en la tercera capa. Se debe aplicar 25 golpes con la varilla en cada capa.



3. Después de los golpes de la tercera capa se enrasa la última capa y se levanta el cono lentamente aproximadamente 12” en  $5 \pm 2$  segundos.
4. A medida que el concreto se hunde o se asienta en una altura, se invierte el cono vacío y se coloca a la par del concreto asentado.
5. Se mide el revenimiento con cinta, desde la parte superior del molde cónico hasta el centro original desplazado del concreto asentado.

#### 3.3.1.4 TEMPERATURA DEL CONCRETO, ASTM C-1064.

Como la temperatura del concreto tiene una gran influencia sobre las propiedades tanto del concreto fresco como del endurecido, muchas especificaciones limitan la temperatura del concreto fresco. El termómetro a utilizar debe tener un rango de 0°C a 60°C y una precisión de  $\pm 0.5$  °C. Debe permanecer en una muestra representativa de concreto por lo menos 2 minutos o hasta que la lectura se estabilice. Un mínimo de 75 mm de concreto debe rodear la porción sensitiva del termómetro. La medición de temperatura según la norma ASTM C-1064, se debe terminar en un periodo de 5 minutos después de tomada la muestra.

#### 3.3.1.5 FABRICACIÓN DE ESPECIMENES PARA RESISTENCIA. ASTM C-31.

Los especímenes moldeados para los ensayos de resistencia, se preparan de acuerdo a la norma ASTM C-31. La preparación de los especímenes debe comenzar, como máximo, 15 minutos después de la obtención de la mezcla de concreto. La probeta estándar para la resistencia a compresión del concreto con agregado de dimensión máxima de 2” (50 mm) o menor es un cilindro de 6”



(150 mm) de diámetro por 12” (300 mm) de altura. Los especímenes se deben de fabricar sobre una superficie lisa, nivelada y rígida; y deben ser llenados cuidadosamente para evitar distorsiones en su forma. Las vigas para el ensayo de resistencia a flexión tienen normalmente 6” x 6” (150 x 150 mm) de sección transversal para concretos con agregados de hasta dos pulgadas. Los cilindros de prueba que se compactan con golpes (revenimiento de 1” o más), se deben llenar en tres capas aproximadamente iguales y cada capa debe recibir 25 golpes en los cilindros de 6” de diámetro, mientras que las vigas con hasta 8” de profundidad se deben llenar en dos capas, golpeándolas con una varilla de 5/8” de diámetro una vez por capa para cada 1290 mm<sup>2</sup> (2 plg<sup>2</sup>) de área de superficie expuesta. Si la varilla deja agujeros, los lados de los moldes se deben golpear ligeramente con un mazo de hule. Los cilindros que son vibrados, se deben llenar en dos capas con una inserción por capa en los cilindros de 100 mm (4”) de diámetro y dos inserciones en los cilindros de 150 mm (6”) de diámetro. Las vigas con más de 200 mm (8”) de profundidad que se deban vibrar (revenimiento menor o igual a 3”), se deben llenar en dos capas. La resistencia de los especímenes de prueba se puede afectar considerablemente con golpes, cambios de temperatura y exposición al secado, principalmente en las primeras 24 horas después de su colado, por lo tanto, los especímenes de prueba se deben colar en sitios donde no sean necesarios movimientos y donde sea posible su protección.

Los procedimientos normalizados de prueba requieren que los especímenes se curen bajo condiciones controladas. El curado controlado en el laboratorio, en el cuarto húmedo o en un tanque de almacenamiento, deberá contener agua saturada de cal hidratada, no cal agrícola, de acuerdo a la ASTM C-511, para prevenir la lixiviación de la cal del espécimen de concreto.



### **3.3.2 CONCRETO EN ESTADO ENDURECIDO.**

#### **3.3.2.1 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL CONCRETO, ASTM C-39.**

Los resultados de este método de ensayo son usados como una base para el control de calidad de las operaciones de proporcionamiento, mezclado y colocación del concreto; determinación de concordancia con las especificaciones y el control para la evaluación de la efectividad de los aditivos y usos similares.

#### **EQUIPO:**

1. Máquina de Ensayo: la máquina de ensayo será de un tipo que tenga suficiente capacidad y capaz de proporcionar la razón de carga necesaria para romper los especímenes.

La máquina será operada con energía y aplicará la carga continuamente, más bien que intermitentemente y sin choque, si esta tiene una sola razón de carga, puede estar provista de medios suplementarios para cargar a una razón apropiada para verificación.

El espacio provisto para el ensayo de especímenes será grande, suficiente para acomodar en la posición requerida.

#### **PROCEDIMIENTO:**

1. Los ensayos de compresión realizados a los especímenes serán a los 7, 14 y 28 días de edades del concreto.



2. Los especímenes serán ensayados húmedos, por lo tanto serán ensayados inmediatamente después de ser sacados de la pila de curado, y para el caso de los especímenes que se les realicen las pruebas de pulso Ultrasónico y Modulo de Elasticidad Estático, serán mantenidos húmedos durante estas pruebas, por algún método, como ejemplo envolviéndolos con franelas húmedas.
3. Todos los especímenes serán ensayados bajo los límites de tolerancias permisibles referentes a tiempos de edades.
4. Se prepara la maquina colocándole los accesorios necesarios para el rompimiento de especímenes a compresión.
5. Se coloca el espécimen en la máquina de ensayo. Ver Imagen 3.40.



**Imagen 3.40** Colocación del cilindro en la máquina para pruebas de compresión.

6. Se tiene cuidado de colocar bien las almohadillas de neopreno y retenedor, y de colocarlos limpios y alineados después de realizar el primer ensayo. Ver Imagen 3.41.



**Imagen 3.41** Almohadilla de neopreno y retenedor para ensayo de cilindros de concretos.

7. La carga al espécimen es aplicada a razón constante continuamente y sin impacto. velocidad de aplicación de carga  $35 \pm 7$  psi/s.
8. Durante la aplicación de la primera mitad de la carga prevista, será permitida una razón de carga mayor.
9. Se aplica la carga hasta que el espécimen falla y se anota el tipo de falla registrado en la hoja de formato para este ensayo. Ver Imagen 3.42.



**Imagen 3.42** Especímenes ya ensayados, en donde se aprecia el tipo de ruptura registrado.



10. Anotar la lectura de carga máxima registrada.

### 3.3.2.2 RESISTENCIA A LA FLEXIÓN DEL CONCRETO, ASTM C 78.

Los resultados de este método de ensayo pueden ser usados para determinar confianza con las especificaciones o como una base para el proporcionamiento, mezclado y operaciones de colocación. Es usado en ensayos de concreto para la construcción de losas y pavimentos.

#### **EQUIPO:**

1. Máquina de ensayo con bomba motorizada o manual con desplazamiento positivo, teniendo suficiente volumen en una operación continua para completar un ensayo sin requerir recargarla, además deberá ser capaz de aplicar cargas a una razón uniforme sin golpe o interrupción.
2. Bloques de soporte, los cuales aseguren que las fuerzas aplicadas a la viga sean perpendiculares a la cara del espécimen y que sea aplicada sin excentricidad

#### **PROCEDIMIENTO:**

1. Este método será aplicado a vigas en curado constante y serán ensayados a las edades de 14 y 28 días.
2. Las vigas serán ensayadas inmediatamente después de ser sacadas de la pila de curado. Ver Imagen 3.43.



**Imagen 3.43.** Colocación de vigas para prueba de flexión.

3. Primeramente se prepara la máquina para pruebas de compresión y flexión.
4. Una vez armada la maquina con los accesorios que especifica el método de ensayo ASTM C78, se sacan los especímenes en este caso las vigas.
5. La viga es colocada con las caras laterales en contacto con los accesorios de la máquina, es decir giradas 90° a la posición de la cual fueron coladas en los moldes, o dicho de otra manera colocar la cara del colado hacia un lado. Ver Imagen 3.44.



**Imagen 3.44** Ajuste y alineación de la máquina para pruebas de flexión.

6. Las vigas son colocadas en la máquina y es centrado el sistema de carga con respecto a la fuerza aplicada. Ver Imagen 3.45.



**Imagen 3.45** Centrado de la viga en la máquina de pruebas de flexión.

7. Colocar en contacto directo los bordes superiores de la maquina con el espécimen y aplicar una carga preliminar de entre el 3% al 6% de la carga ultima estimada.



8. Es recomendable que antes de aplicar cualquier tipo de carga al espécimen, colocar empaques de cuero en los puntos de contacto con el espécimen.
9. Estos empaques tienen que ser de por lo menos  $\frac{1}{4}$  pulg de espesor uniforme, con un ancho entre 1 a 2 pulg, deberán extenderse en toda la sección, que para el caso sería todo el ancho de la viga.
10. Cargar el espécimen continuamente y sin golpe. La carga deberá ser aplicada a una razón constante hasta el punto de ruptura. aplique la carga en una razón que continuamente incremente los esfuerzos en la fibra extrema entre 125 y 175 psi/min, esto se realiza hasta que ocurra la fractura. Ver Imagen 3.46.



**Imagen 3.46** Punto de Ruptura de vigas, prueba de vigas a flexión.

11. Se le toma medida a los especímenes después del ensayo. Ver Imagen 3.47.



**Imagen 3.47** Medición de la sección de falla de la viga.

12. Se toma medida de la sección transversal a través de una de las caras fracturadas, se toman tres lecturas de ancho y alto.

13. Se procede a los cálculos.

### 3.3.2.3 VELOCIDAD DE PULSO EN EL CONCRETO, ASTM C 597.

Los ensayos no destructivos, son una herramienta útil para determinar la calidad del concreto endurecido, pero en ningún caso reemplazan a los ensayos destructivos<sup>17</sup>.

La velocidad de pulso ultrasónico, regida por la norma ASTM C-597, permite determinar el grado de homogeneidad del concreto, entre otras características, logrando esto, a través de mediciones de la velocidad ultrasónica sobre el material a ensayar.

---

<sup>17</sup> Equipo Ultrasonido, Ensayos no Destructivos del Hormigón, Tecnología del Hormigón, Grupo de Hormigón, Ingeniería en Construcción-UCV.



Con el dato de velocidad de pulso obtenido en el ensayo, se puede determinar la calidad del elemento probado, consultando algunos de los criterios de clasificación de calidad que se muestran en el Tabla 3.08. y Tabla 3.09.

<b>CLASIFICACIÓN DE LA CALIDAD DEL CONCRETO POR MEDIO DE LA VELOCIDAD DE ONDA SEGÚN LESLIE Y CHEESMAN</b>	
<b>Velocidad de la onda longitudinal m/s</b>	<b>Condición del Concreto</b>
Más de 4570	Excelente
De 3650 a 4570	Buena
De 3050 a 3650	Regular a dudosa
De 2130 a 3050	Pobre
Menos de 2130	Muy pobre

**Tabla 3.08** Clasificación de la calidad del concreto por medio de velocidad onda según Leslie y Cheesman.

<b>EVALUACION DE LA CALIDAD DEL CONCRETO MEDIANTE LA VELOCIDAD DE PULSO SEGÚN AGRAVAL Y OTROS</b>	
<b>Velocidad de pulso m/s</b>	<b>Condición del Concreto</b>
Más de 3000	Buena
De 2500 a 3000	Regular
Menos de 2130	Pobre

**Tabla 3.09** Evaluación de la calidad del concreto mediante la velocidad de pulso según Agraval y otros.



#### 3.3.2.4 MODULO DE ELASTICIDAD ESTÁTICO, ASTM C-469.

El módulo de elasticidad estático es una constante elástica comúnmente utilizada para medir la deformabilidad estática instantánea de un material bajo compresión o tracción uniaxial<sup>18</sup>.

La importancia de conocer el módulo de elasticidad del concreto, radica en que este es una medida de su rigidez. Para el diseño de muchas edificaciones o construcciones no se necesita conocer con exactitud dicho modulo, por lo que es usual descansar en aproximaciones que proporcionan las formulas expuestas por los diversos códigos, dichos códigos proporcionan un dato aproximado del módulo de elasticidad estático del concreto tales como la ACI 318.

Sin embargo para la investigación por ser un concreto diferente al convencional se optó por realizar la prueba de laboratorio basándose en la norma ASTM C-469, cuyo equipo y procedimiento se describe a continuación.

#### **EQUIPO:**

1. Compresometro extensómetro.
2. Máquina de Ensayo: la máquina de ensayo será de un tipo que tenga suficiente capacidad y capaz de proporcionar la razón de carga necesaria para romper los especímenes.

La máquina será operada con energía y aplicará la carga continuamente, más bien que intermitentemente y sin choque, si esta tiene una sola

---

<sup>18</sup> Determinación del Módulo de Elasticidad Estático de los Concretos Premezclados de Mayor Uso, en el Área Metropolitana de la Ciudad de Guatemala, Leonel de Jesús Pineda Samayoa, Guatemala 2009.



razón de carga, puede estar provista de medios suplementarios para cargar a una razón apropiada para verificación.

El espacio provisto para el ensayo de especímenes será grande, suficiente para acomodar en la posición requerida.

### **PROCEDIMIENTO:**

1. Se usa la pareja del espécimen para determinar la resistencia a compresión en el primer cilindro de acuerdo a (ASTM C39) antes de proceder al ensayo de módulo de elasticidad.
2. Se mide una distancia de 3 pulg de ambos extremos de del espécimen hacia adentro, tal como lo muestra en la Imagen 3.48.



**Imagen 3.48** Proceso de marcaje de los cilindros para la colocación del equipo.

3. Se coloca el espécimen en el compresometro extensómetro. Se alinea el eje del espécimen con el centro de la rótula del cabezal superior. Se



toma nota de la lectura del deformímetro. El cabezal superior de apoyo se lleva lentamente a asentarse sobre el espécimen. Ver imagen 3.49.



**Imagen 3.49** Cilindro colocado sobre la máquina de pruebas de compresión.

4. Se aplica carga al espécimen por lo menos dos veces. No se registran datos durante el primer ciclo de carga. Se calcula utilizando el promedio de los resultados de los siguientes ciclos de carga.
5. Aplicamos carga continuamente y sin impactos. Cuando la deformación longitudinal es de 50 millonésimas y lecturas de deformación cuando la carga aplicada sea igual al 40% de la carga última obtenida en el cilindro Ensayado a compresión. La deformación unitaria total longitudinal está definida como el total de la deformación longitudinal dividida por la longitud de base del deformímetro.
6. Alcanzada la carga del 40%, es leída y anotada la lectura del deformímetro.
7. Se retira el aditamento y el espécimen es sometido a carga constante hasta que falla, se toma la lectura de carga aplicada. Ver Imagen 3.50.



**Imagen 3.50** Cilindro llevado hasta el punto de ruptura después de haber realiza las pruebas.



# CAPITULO 4

## MATERIALES

INVESTIGACION SOBRE EL USO  
DE LLANTA TRITURADA COMO  
AGREGADO EN LA FABRICACIÓN  
DE CONCRETO



## **4.1 INTRODUCCIÓN**

Los materiales utilizados para la investigación se han dividido en dos grupos, los naturales, compuestos por los agregados minerales normales para la fabricación de concreto como son grava, arena, cemento. Los sintéticos, compuestos por las partículas de goma de llanta triturada fina y la llanta triturada gruesa.

Para los agregados naturales se optó por utilizar la grava y la arena de una misma cantera y el cemento de un mismo fabricante pero en dos diferentes especificaciones, que son la ASTM C-150 y ASTM C-1157 correspondiente al portland tipo I y uso general respectivamente.

Los agregados sintéticos se obtuvieron de dos proveedores diferentes, cada uno especializado a utilizar el material según su tamaño.

El material sintético fino, se obtuvo de la empresa FORBEX quien distribuye el material en el país, para ser utilizado como relleno para césped artificial.

El material sintético grueso, se obtuvo de la empresa HOLCIM, quien tritura las llantas para utilizarlas como combustible alternativo en el horno de su planta de fabricación.



## 4.2 DESCRIPCION DE LOS MATERIALES

### 4.2.1 AGREGADOS MINERALES NATURALES

#### 4.2.1.1 ARENA

Material proporcionado por Holcim Agregados, proveniente de la cantera ubicada en Comalapa, a las orillas del río Jiboa. Ver Imagen 4.01.

Es una mezcla de arena de río y arena triturada en una proporción controlada y libre de impurezas, con una graduación granulométrica que cumple con las especificaciones de la norma ASTM C-33 para la elaboración de concretos.



Imagen 4.01 Arena proporcionada por Holcim agregados.

### CARACTERISTICAS FISICAS

Módulo de Finura	2.35
Peso Volumétrico Compactado	1,553 kg/m <sup>3</sup>
Gravedad específica	2.56
Contenido de Humedad Promedio	5.43 %
Porcentaje de Absorción	3.21 %

Cuadro 4.01 Características Físicas de la Arena de Holcim Agregados.



## GRANULOMETRIA

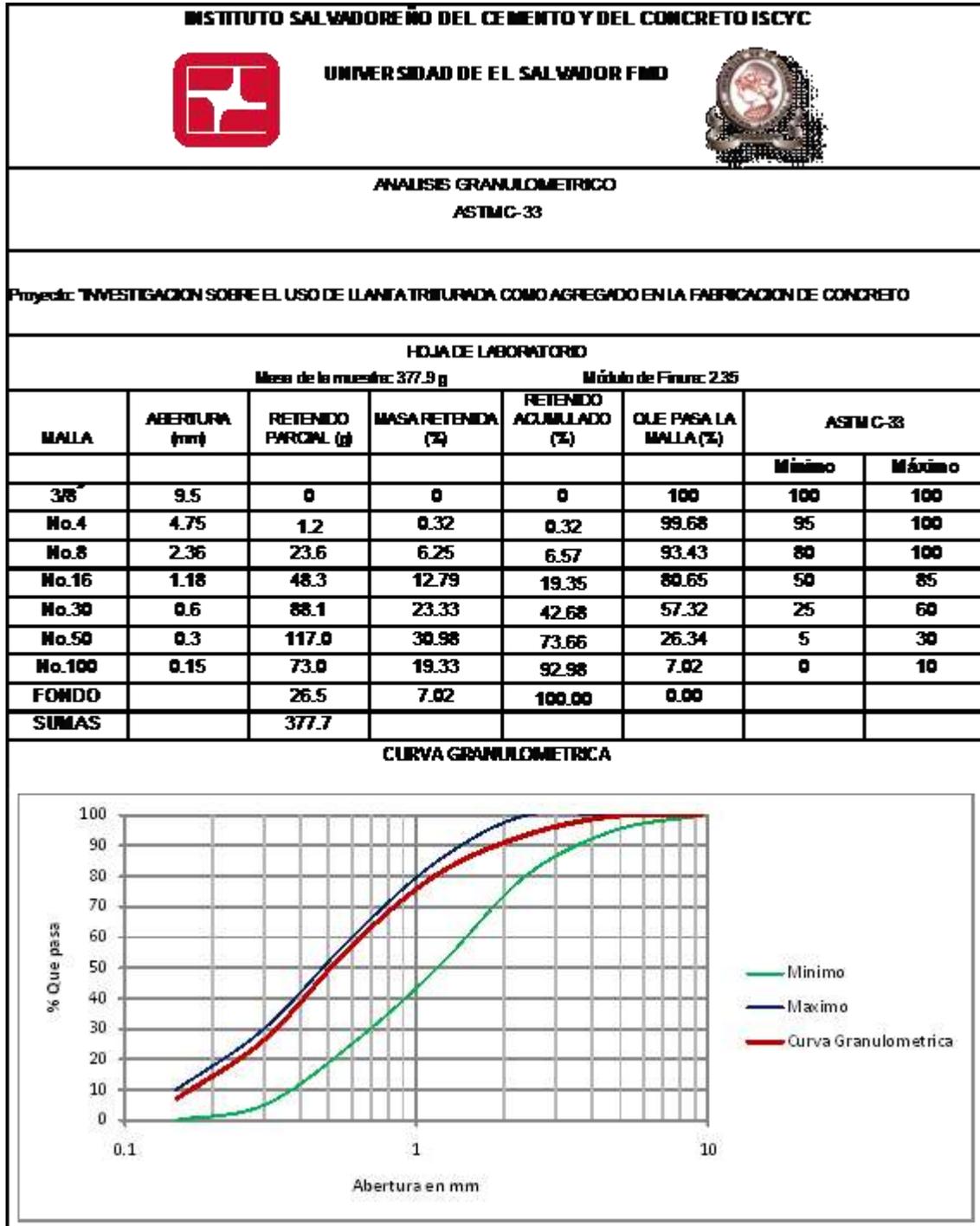


Imagen 4.02 Análisis Granulométrico Agregado Fino ASTM C-33.



#### 4.2.1.2 GRAVA

Material proporcionado por Holcim Agregados, proveniente de la cantera ubicada en Comalapa, a las orillas del río Jiboa. Ver Imagen 4.03.

Es una mezcla de material acarreado y triturado en una proporción controlada y libre de impurezas, con una graduación que cumple con el número granulométrico 56 de las especificaciones de la norma ASTM C-33 para la elaboración de concretos.



Imagen 4.03 Grava proporcionada por Holcim agregados.

#### CARACTERISTICAS FISICAS

Tamaño máximo nominal	3/4"
Numero	56
Peso Volumétrico Compactado	1,491 kg/m <sup>3</sup>
Gravedad específica	2.66
Contenido de Humedad Promedio	1.09 %
Porcentaje de Absorción	2.08 %

Cuadro 4.02 Características Físicas de la Arena de Holcim Agregados.



## GRANULOMETRIA

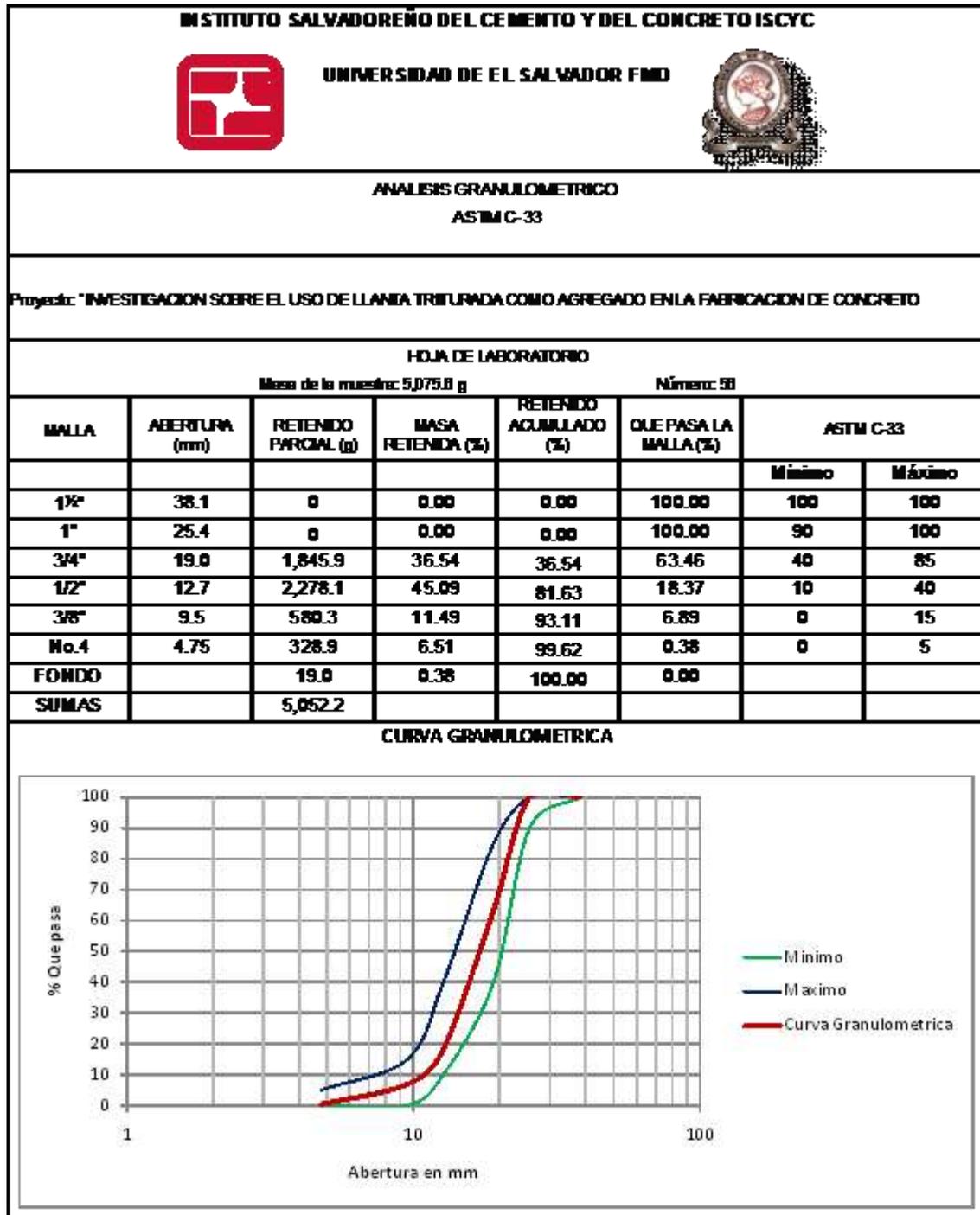


Imagen 4.04 Análisis Granulométrico Agregado Grueso ASTM C-33.



#### 4.2.1.3 CEMENTO

##### CEMENTO TIPO I (ASTM C-150)

Material proporcionado por Cementos HOLCIM El Salvador.

Densidad Relativa: 3.14.

Es un cemento considerado de alta resistencia en el país, el cual cumple la norma internacional ASTM C-150 Tipo I para cementos portland.

En El Salvador es usado principalmente para la elaboración de elementos estructurales, puentes, pasos a desnivel, edificios, elementos de concreto pre y post tensados y otros elementos prefabricados como bloques y adoquines.

##### CEMENTO TIPO GU (ASTM C-1157)

Material proporcionado por Cementos HOLCIM El Salvador.

Densidad Relativa: 2.91.

Este cemento cumple la norma internacional ASTM C-1157 tipo GU para cementos portland. Puede ser utilizado en la construcción en general, sobre todo en aquellas que no requieren alta resistencia a edades tempranas. Puede ser utilizado para fabricación de concretos estructurales, morteros y suelo cemento.

#### **4.2.2 AGREGADOS SINTETICOS**

##### 4.2.2.1 GOMA DE LLANTA TRITURADA (FINA)



Material procedente de Argentina, producido por la empresa REGOMAX e importado a El Salvador por la empresa FORBEX. Ver imagen 4.05.

Es un material derivado de llantas de desecho u otros materiales de caucho reciclados que son reducidos a gránulos uniformes de tamaños promedio entre 3.5 y 0.05 mm, a los cuales se les ha retirado los materiales de refuerzo inherentes como el acero y la fibra junto con cualquier otro tipo de contaminantes inertes como el polvo, cristales o piedras.



Imagen 4.05 Goma de llanta triturada fina.

#### CARACTERISTICAS FISICAS

Módulo de Finura	3.06
Peso Volumétrico Compactado	469.0 kg/m <sup>3</sup>
Densidad Relativa	1.15
Contenido de Humedad Promedio	0 %
Porcentaje de Absorción	0 %

Cuadro 4.03 Características Físicas de la Goma de llanta Triturada Fina



## GRANULOMETRIA

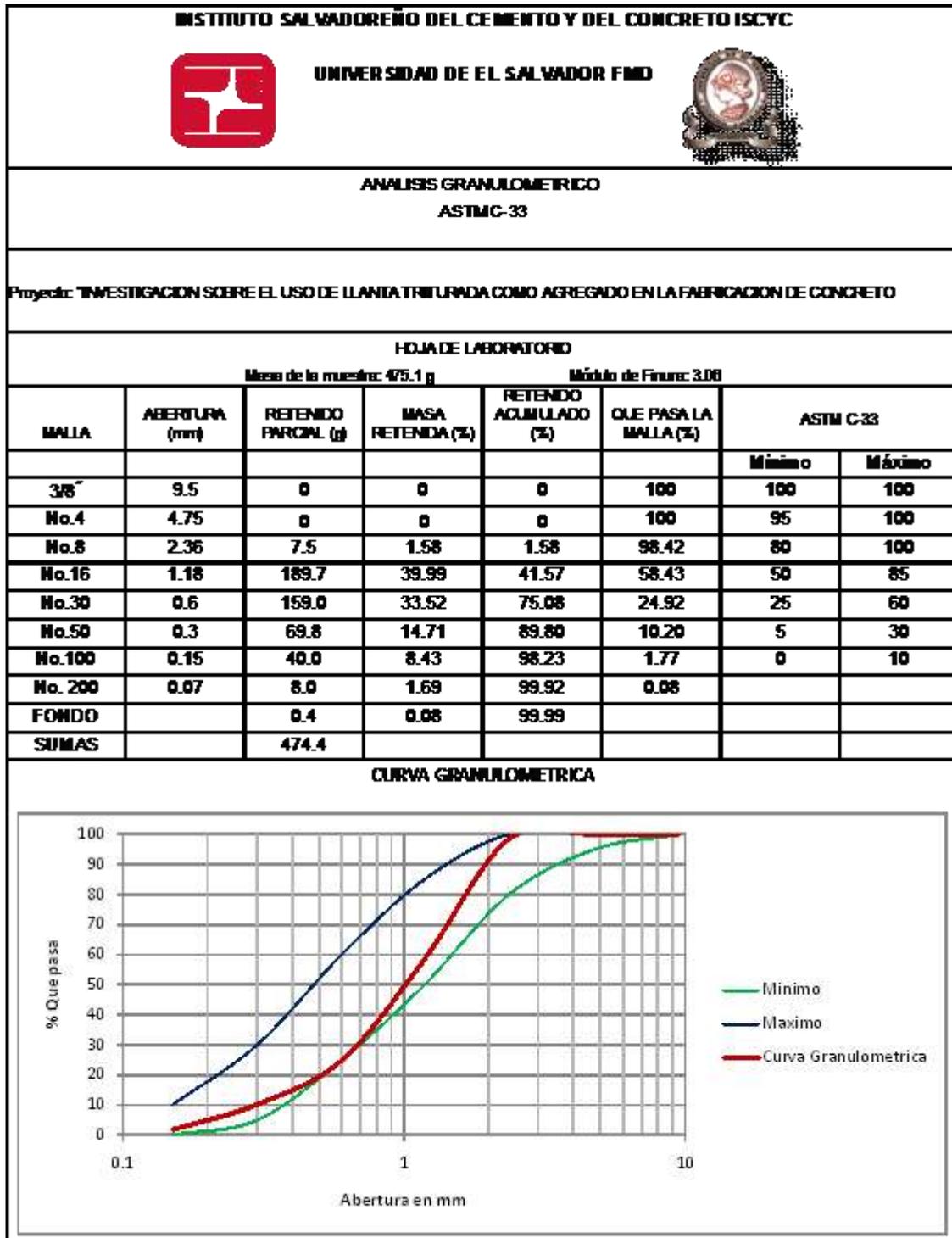


Imagen 4.06 Análisis Granulométrico Goma de Llanta Triturada Fina ASTM C-33.



#### 4.2.2.2 LLANTA TRITURADA (GRUESA)

Material procedente de la empresa Geocycle que es una sub empresa de Holcim, Producido en el plantel de Metapán a partir de la trituración de NFU que son utilizadas para la alimentación de su horno.

Originalmente obtenida en partículas de tamaños de entre 5 y 10cm, los cuales se han tenido que reducir de forma artesanal para lograr una granulométrica adecuada para ser utilizada en la investigación. Se logró reducir a tamaños aproximados nominales de  $\frac{3}{4}$ " y se logró entrar a la especificación ASTM C-33 con Tamaño 56.

#### DISMINUCION DE LOS TAMAÑOS DE PARTICULAS DE LLANTA TRITURADA (Método Artesanal).

Para lograr la disminución de las partículas de llanta proporcionadas por Geocycle S.A. de C.V., se llevó a cabo un método artesanal, el cual consta de la utilización de una prensa mecánica, tenazas, cuchilla de electricista, lima y tijera de aviador, a fin de lograr que los tamaños de las partículas de llanta a incorporar en la mezcla, sean equivalentes a los tamaños tanto de la grava como de la chispa a sustituir. El método se detalla a continuación con la ayuda de imágenes:



**Imagen 4.07** Herramientas a utilizar: lima, cuchilla de electricista y tenaza.



**Imagen 4.08** Producto inicial - material semitriturado por empresa Geocycle.



**(a) (b)**

**Imagen 4.09 a y b** Procedimiento de corte utilizando prensa, tenaza y cuchilla de electricista.



**Imagen 4.10** Material final triturado artesanalmente tamaño máximo nominal 3/4 “.



**Imagen 4.11** Comparación de los tamaños de partículas de llanta triturada en estado inicial y final.



**Imagen 4.12** Tamaño comparativo de las partículas de llanta triturada en estado inicial y final.

Cabe mencionar que el método artesanal utilizado, aunque resulta tardado, es el método más factible para realizar el corte del material debido a las características que presenta, como lo es el contenido de acero y fibras de nylon.

#### CARACTERISTICAS FISICAS

Tamaño	56
Peso Volumétrico Compactado	568.0kg/m <sup>3</sup>
Densidad Relativa	1.2
Contenido de Humedad Promedio	0 %
Porcentaje de Absorción	0 %

**Cuadro 4.04** Características Físicas de la Llanta Triturada Guesa.



## GRANULOMETRIA

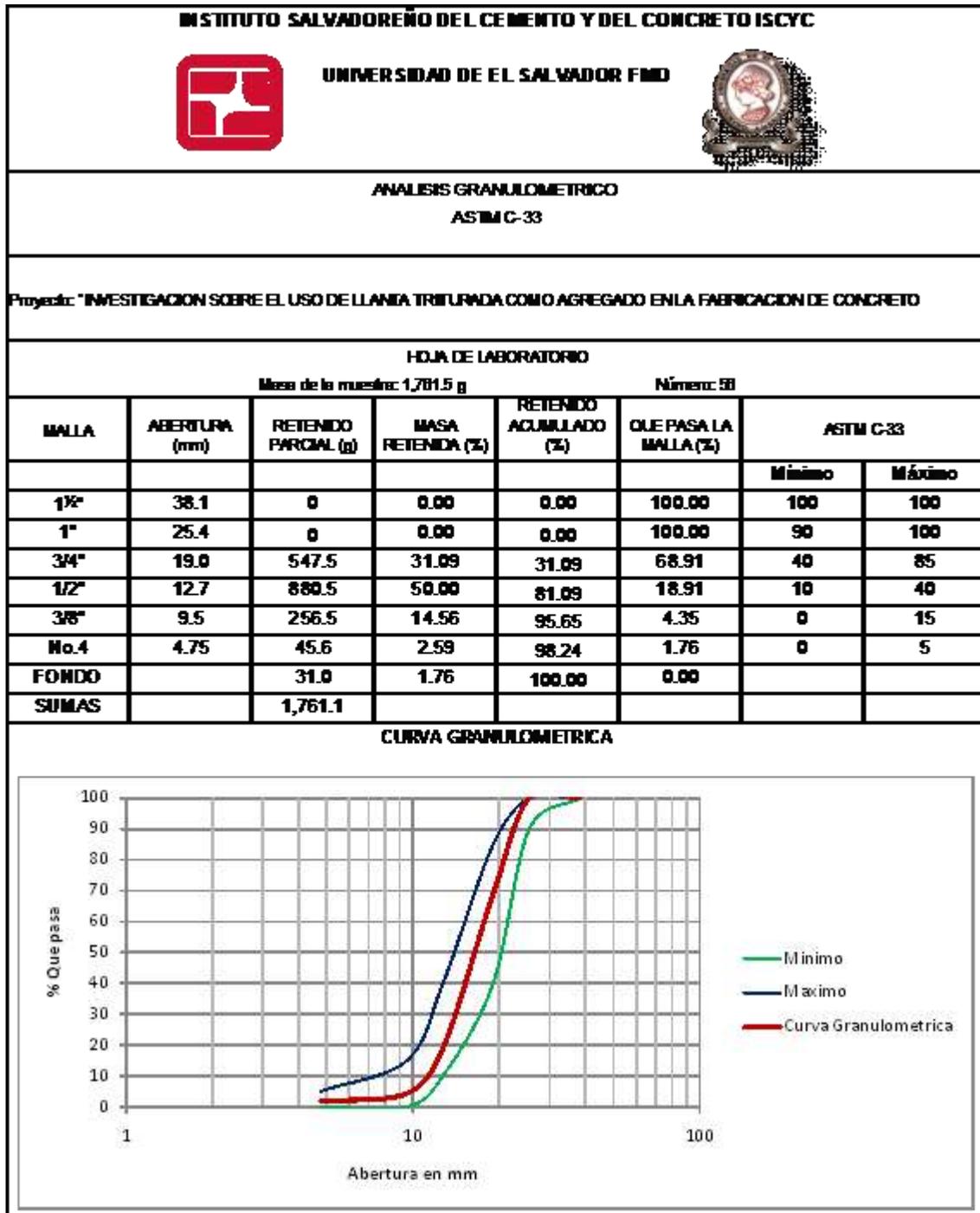


Imagen 4.13 Análisis Granulométrico Llanta Triturada Gruesa ASTM C-33.



# CAPITULO 5

## DISEÑO DE MEZCLAS

INVESTIGACION SOBRE EL USO  
DE LLANTA TRITURADA COMO  
AGREGADO EN LA FABRICACIÓN  
DE CONCRETO



## **5.1 INTRODUCCIÓN**

Se diseñaron un total de catorce mezclas de concreto utilizando el método de la norma ACI 211.1, en nueve de ellas fue modificada la dosificación del diseño de control en dependencia de los porcentajes de incorporación de goma de llanta triturada fina y llanta triturada gruesa en sustitución de los agregados minerales naturales del concreto.

Como variable en los diseños, se han considerado dos tipos de cemento, el Cemento Tipo I (ASTM C-150) y el Cemento Tipo GU (ASTM C-1157), por lo que se ha elaborado un diseño de control por cada tipo de cemento, los cuales contienen solo los agregados minerales naturales del concreto. Como otras variables se optó por sustituir el agregado fino (arena) por goma de llanta triturada en porcentajes de 10, 15 y 20% y sustituir el agregado grueso (grava) por llanta triturada en los mismos porcentajes, además de incluir otros tres diseños con los mismos porcentaje pero agregando la goma de llanta triturada como aditivo, es decir, manteniendo todas las cantidades de materiales del diseño de control y agregando la goma de llanta triturada fina en los porcentaje de 10, 15 y 20% correspondiente al volumen de arena del diseño de control.

En este capítulo se muestra el procedimiento y las dosificaciones empleadas en cada diseño tanto para los diseños de control como para los de sustitución y el de incorporación como aditivo según la metodología de la norma ACI 211.1.



## **5.2 DISEÑO DE MEZCLAS**

Se le llama Diseño de Mezcla al proceso de determinación de las características requeridas y que pueden ser especificadas del concreto; estas características pueden incluir propiedades del concreto fresco y propiedades mecánicas del concreto endurecido<sup>19</sup>.

El diseño de la mezcla lleva al desarrollo de la especificación del concreto.

La dosificación o proporcionamiento de la mezcla, se refiere al proceso de determinación de las cantidades de los ingredientes que conforman el concreto, utilizando materiales locales, para lograr características especificadas.

Un concreto adecuadamente proporcionado, presenta las siguientes cualidades:

- ✓ Trabajabilidad aceptable del concreto en estado fresco.
- ✓ Durabilidad, resistencia y apariencia uniforme del concreto en estado endurecido.
- ✓ Economía.

## **5.3 CARACTERÍSTICAS DE LA MEZCLA**

Antes de determinar la proporción de la mezcla, se necesita seleccionar sus características de diseño.

Como la mayoría de las propiedades deseadas en el concreto endurecido dependen principalmente de la calidad de la pasta cementante, la primera etapa para el proporcionamiento del concreto, es la elección de la relación agua-cemento, es por ello que para el caso de esta investigación, se basa en antecedentes internacionales que especifican una relación A/C no mayor a 0.50.

---

<sup>19</sup> Boletín de Ingeniería, Diseño y Control de Mezclas de Concreto, Steven H. Kosmatka, Beatrix Kerkhoff, William C. Panarese, y Jussara Tanesi, Portland Cement Association (PCA), México 2004.



### 5.3.1 RELACIÓN A/C Y RESISTENCIA $f'_c$ DE LOS DISEÑOS DE MEZCLA

La relación agua-cemento (A/C), elegida para utilizar en los diseños de mezcla de la investigación fué de 0.49.

Basándose en la relación aproximada entre resistencia a compresión y relación agua-cemento para el concreto con agregado grueso de tamaño máximo nominal de 19 mm a 25 mm (3/4"-1"), de la Tabla: Dependencia entre la Relación Agua-Material Cementante y la Resistencia a Compresión del Concreto del ACI 211.1, la resistencia  $f'_c$  adaptada que se utilizó en los diseños de mezcla de la investigación fue:  $f'_c=280 \text{ kg/cm}^2$ . Ver Tabla 5.01

Resistencia a Compresión a los 28 días $\text{kg/cm}^2$ (Mpa)	Relación Agua-material cementante en masa	
	Concreto sin aire incluido	Concreto con aire incluido
450 (45)	0.38	0.31
400 (40)	0.43	0.34
350 (35)	0.48	0.40
300 (30)	0.55	0.46
250 (25)	0.62	0.53
200 (20)	0.70	0.61
150 (15)	0.80	0.72

**Tabla 5.01** Dependencia entre la Relación Agua-Material Cementante y la Resistencia a Compresión del Concreto, ACI 211.1

### 5.3.2 AGREGADOS.

Las características de los agregados tienen gran influencia en el proporcionamiento de la mezcla de concreto, debido a que son estos quienes afectan la trabajabilidad del concreto fresco. La grava que se utilizó en la investigación fué de número granulométrico 56 y tamaño máximo nominal 19 mm (3/4"). El módulo de finura de la arena fué de 2.35. La cantidad de agua de mezcla necesaria para producir un volumen unitario de concreto, para un dato revenimiento, depende de la forma, del tamaño máximo nominal del agregado grueso y de la cantidad de agregado grueso, es decir, que el tamaño máximo



del agregado grueso que producirá el concreto con la mayor resistencia para un contenido determinado de cemento, depende de la fuente del agregado, así como de su forma y granulometría. El volumen de agregado grueso se determinó a través de la Tabla: Volumen de Agregado Grueso por Volumen Unitario de Concreto, la cual está basada en agregados varillados (compactados) en seco, según el método de ensayo ASTM C-29 y especificada en el ACI 211.1.

Tomando en cuenta el módulo de finura de la arena, así como el tamaño máximo nominal del agregado grueso, el volumen de grava que se utilizó en la investigación fue: 0.66 m<sup>3</sup>. Ver Tabla 5.02.

Tamaño máximo nominal del agregado mm (pulg)	Volumen del agregado grueso varillado (compactado) en seco por volumen unitario de concreto para diferentes módulos de finura del agregado fino.			
	2.40	2.60	2.80	3.00
9.50 (3/8)	0.50	0.48	0.46	0.44
12.50 (1/2)	0.59	0.57	0.55	0.53
19.00 (3/4)	0.66	0.64	0.62	0.60
25.00 (1)	0.71	0.69	0.67	0.65
37.50 (1 ½)	0.75	0.73	0.71	0.69
50.00 (2)	0.78	0.76	0.74	0.72
75.00 (3)	0.82	0.80	0.78	0.76
150 (6)	0.87	0.85	0.83	0.81

Tabla 5.02 Volumen de Agregado Grueso por Volumen Unitario de Concreto, ACI 211.1.

### 5.3.3 REVENIMIENTO.

Siempre se debe producir un concreto con trabajabilidad, consistencia y plasticidad adecuadas. La trabajabilidad es la medida de la facilidad de moldeo del concreto. La consistencia es la capacidad del concreto para fluir y la plasticidad es la facilidad del moldeo del concreto. Si se utiliza más agregado en el concreto o si se adiciona menos agua, la mezcla se vuelve más rígida (menos plástica y menos trabajable) y difícil de moldearse. Para la selección del revenimiento del concreto a utilizar en la investigación, se escogió un valor



aproximado de la Tabla: Revenimientos Recomendados para Varios Tipos de Construcción, ACI 211.1. El revenimiento que se utilizó en la investigación fué el especificado para Pavimentos y Losas, teniendo como revenimiento máx. 75 mm (3”) y mín. 25 mm (1”). Ver Tabla 5.03

Construcción de Concreto	Revenimiento mm (pulg)	
	Máximo	Mínimo
Zapatas y muros de cimentación reforzado	75 (3)	25 (1)
Zapatas, cajones y muros de subestructuras sin refuerzo	75 (3)	25 (1)
Vigas y muros reforzados	100 (4)	25 (1)
Columnas de edificios	100 (4)	25 (1)
Pavimentos y Losas	75 (3)	25 (1)
Concreto masivo	75 (3)	25 (1)

Tabla 5.03 Revenimientos Recomendados para Varios Tipos de Construcción, ACI 211.1.

#### 5.3.4 CONTENIDO DE AGUA.

El contenido de agua se influencia por un gran número de factores, entre estos podemos mencionar:

- ✓ El tamaño, forma y textura del agregado.
- ✓ El revenimiento.
- ✓ La relación A/C.
- ✓ El tipo y contenido de cemento.
- ✓ Las condiciones ambientales que tienen influencia en los agregados.

Para el cálculo de la cantidad de agua del diseño, se utilizó la Tabla: Requisitos Aproximados de Agua de Mezclado y Contenido de Aire para Diferentes Revenimientos y Tamaños Máximos Nominales del Agregado, ACI 211.1.

La cantidad de Agua de Mezclado que se utilizó en la investigación fue: 200 L/m<sup>3</sup> de Concreto. Ver Tabla 5.04.



REQUISITOS APROXIMADOS DE AGUA DE MEZCLADO Y CONTENIDO DE AIRE PARA DIFERENTES REVENIMIENTOS Y TAMAÑOS MAXIMOS NOMINALES DEL AGREGADO								
TMNA (pulg) REV. (pulg)	3/8	1/2	3/4	1	1 1/2	2	3	6
2.50	207	199	190	179	166	154	130	113
3.00	207	199	190	179	166	154	130	113
4.00	207	199	190	179	166	154	130	113
5.00	207	199	190	179	166	154	130	113
7.50	228	216	200	193	181	169	145	124
8.00	228	216	200	193	181	169	145	124
9.00	228	216	200	193	181	169	145	124
10.00	228	216	200	193	181	169	145	124
15.00	243	228	216	202	190	178	169	-
16.00	243	228	216	202	190	178	169	-
17.00	243	228	216	202	190	178	169	-
17.50	243	228	216	202	190	178	169	-

**Tabla 5.04** Requisitos Aproximados de Agua de Mezclado y Contenido de Aire para diferentes Revenimientos y Tamaños Máximos Nominales del Agregado, ACI 211.1.

### 5.3.5 CONTENIDO DE AIRE.

La cantidad aproximada de aire atrapado en un concreto sin aire incluido, depende del tamaño máximo nominal del agregado grueso.

El contenido de aire de la mezcla de concreto se especifica en la Tabla: Requisitos Aproximados de Agua de Mezcla y Contenido de Aire para Diferentes Revenimientos y Tamaños Máximos Nominales del Agregado, ACI 211.1.

La cantidad de aire atrapado en el concreto que se utilizó en la investigación fue: 2.00%. Ver Tabla 5.05.



REQUISITOS APROXIMADOS DE AGUA DE MEZCLADO Y CONTENIDO DE AIRE PARA DIFERENTES REVENIMIENTOS Y TAMAÑOS MÁXIMOS NOMINALES DEL AGREGADO									
TAMAÑO MÁXIMO NOMINAL DEL AGREGADO	3/8"	1/2"	3/4"	1"	1 1/2"	2"	3"	6"	
CANTIDAD APROXIMADA DE AIRE ATRAPADO EN CONCRETO SIN INCLUSIÓN DE AIRE, EXPRESADO COMO PORCENTAJE	CONCRETO SIN AIRE INCLUIDO								
PORCENTAJE	3.00	2.50	2.00	1.50	1.00	0.50	0.30	0.20	
PROMEDIO RECOMENDADO DEL CONTENIDO TOTAL DE AIRE, PORCENTAJE DE ACUERDO CON EL NIVEL DE EXPOSICIÓN:	CONCRETO CON AIRE INCLUIDO								
EXPOSICIÓN LIGERA	4.50	4.00	3.50	3.00	2.50	2.00	1.50	1.00	
EXPOSICIÓN MODERADA	6.00	5.50	5.00	4.50	4.50	4.00	3.50	3.00	
EXPOSICIÓN SEVERA	7.50	7.00	6.00	6.00	5.50	5.00	4.50	4.00	

Tabla 5.05 Requisitos Aproximados de Agua de Mezclado y Contenido de Aire para diferentes Revenimientos y Tamaños Máximos Nominales del Agregado, ACI 211.1.

#### 5.4 DISEÑOS DE MEZCLA BASADOS EN ACI 211.1

Conocidos los datos generales del diseño (Ver Cuadro 5.01) y las características de los materiales (Ver Cuadro 5.02), se presenta el procedimiento de cálculo y la descripción de los catorce diseños de mezcla que fueron utilizados en la investigación, todos estos basados en el ACI 211.1.

DATOS GENERALES DEL DISEÑO	
$f'c$ (kg/cm <sup>2</sup> )	280
$f'cr$ (kg/cm <sup>2</sup> )	345
RELACIÓN A/C	0.49
REVENIMIENTO (pulg)	3
ELEMENTO ESTRUCTURAL	Pavimentos y Losas
TAMAÑO MÁXIMO DEL AGREGADO (pulg)	1
TAMAÑO MÁXIMO NOMINAL DEL AGREGADO (pulg)	3/4
CONTENIDO DE AIRE (%)	2

Cuadro 5.01 Datos Generales del Diseño, Diseños 1-14.



CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES			
MATERIAL	MÓDULO DE FINURA	PESO VOLUMETRICO (Kg/m <sup>3</sup> )	DENSIDAD
CEMENTO TIPO I (ASTM C-150)	-	-	3.14
CEMENTO TIPO GU (ASTM C-1157)	-	-	2.91
ARENA	2.40	1,553.00	2.75
GRAVA	-	1,491.00	2.66
GOMA DE LLANTA TRITURADA	-	469.00	1.15
LLANTA TRITURADA	-	568.00	1.20

Cuadro 5.02 Características de los Materiales, Diseños 1-14.

**DOSIFICACION:** La dosificación de cada uno de los diseños se presenta como “dosificación por peso” y es expresada para cada diseño de control tomando en consideración el siguiente orden:

<b>DOSIFICACIÓN POR PESO</b>
<b>CEMENTO: ARENA :GRAVA</b>

Para cada diseño con incorporación de goma de llanta triturada fina el orden de dosificación es el siguiente:

<b>DOSIFICACIÓN POR PESO</b>
<b>CEMENTO: ARENA :GOMA DE LLANTA TRITURADA : GRAVA</b>

Y para cada diseño con incorporación de llanta triturada gruesa el orden de la dosificación es el siguiente:

<b>DOSIFICACIÓN POR PESO</b>
<b>CEMENTO:ARENA : GRAVA : LLANTA TRITURADA</b>



### 5.4.1 DISEÑO 1.

Diseño de Control basado en el ACI 211.1, utilizando Cemento Tipo I (ASTM C-150), conteniendo además agregados convencionales arena y grava provenientes de Holcim Agregados. Ver Cuadros 5.01-5.06.

DISEÑO DE MEZCLA PARA 1 m <sup>3</sup> DE CONCRETO (DISEÑO 1)		
MATERIALES	SIN CORECCIÓN DE AGUA	CORREGIDO
CEMENTO C-150 TIPO I (kg)	412.00	412.00
ARENA (kg)	717.00	755.00
GRAVA (kg)	984.00	995.00
AGUA (L)	200.00	193.84

Cuadro 5.03 Diseño de Mezcla para 1 m<sup>3</sup> de Concreto, Diseño 1.

PROPIEDADES DE LOS AGREGADOS		
PROPIEDAD	ARENA	GRAVA
HUMEDAD (%)	5.43	1.09
ABSORCIÓN (%)	3.21	2.08
PESO HUMEDO (kg)	755.00	995.00
PESO SATURADO (kg)	740.00	1,005.00
DIFERENCIA (L)	-15.91	9.74
AGUA A AGREGAR (L)	-6.16	

Cuadro 5.04 Propiedades de los Agregados, Diseño 1.

MATERIALES PARA 1 m <sup>3</sup> DE CONCRETO	
CEMENTO TIPO I (ASTM C-150) (Bolsas)	9.70
ARENA (m <sup>3</sup> )	0.49
GRAVA (m <sup>3</sup> )	0.67
AGUA (L)	193.84

Cuadro 5.05 Materiales para 1 m<sup>3</sup> de Concreto, Diseño 1.

DOSIFICACIÓN POR PESO
<b>1:1.7:2.4</b>

Cuadro 5.06 Dosificación por Peso, Diseño 1.



### 5.4.2 DISEÑO 2.

Diseño con sustitución del 10% del volumen de arena por goma de llanta triturada, utilizando Cemento Tipo I (ASTM C-150). Ver Cuadros 5.01-5.02, 5.07-5.10.

DISEÑO DE MEZCLA PARA 1 m <sup>3</sup> DE CONCRETO (DISEÑO 2)		
MATERIALES	SIN CORECCIÓN DE AGUA	CORREGIDO
CEMENTO TIPO I (ASTM C-150) (kg)	412.00	412.00
ARENA (kg)	645.00	680.00
GOMA DE LLANTA TRITURADA (kg)	32.00	32.00
GRAVA (kg)	984.00	995.00
AGUA (L)	200.00	195.43

Cuadro 5.07 Diseño de Mezcla para 1 m<sup>3</sup> de Concreto, Diseño 2.

PROPIEDADES DE LOS AGREGADOS		
PROPIEDAD	ARENA	GRAVA
HUMEDAD (%)	5.43	1.09
ABSORCIÓN (%)	3.21	2.08
PESO HUMEDO (kg)	680.00	995.00
PESO SATURADO (kg)	666.00	1,005.00
DIFERENCIA (L)	-14.32	9.74
AGUA A AGREGAR (L)	-4.57	

Cuadro 5.08 Propiedades de los Agregados, Diseño 2.

MATERIALES PARA 1 m <sup>3</sup> DE CONCRETO	
CEMENTO TIPO I (ASTM C-150) (Bolsas)	9.70
ARENA (m <sup>3</sup> )	0.44
GRAVA (m <sup>3</sup> )	0.67
GOMA DE LLANTA TRITURADA (m <sup>3</sup> )	0.07
AGUA (L)	195.43

Cuadro 5.09 Materiales para 1 m<sup>3</sup> de Concreto, Diseño 2.

**DOSIFICACIÓN POR PESO**

**1:1.6:0.08:2.4**

Cuadro 5.10 Dosificación por Peso, Diseño 2.



### 5.4.3 DISEÑO 3.

Diseño con sustitución del 15% del volumen de arena por goma de llanta triturada, utilizando Cemento Tipo I (ASTM C-150). Ver Cuadros 5.01-5.02, 5.11-5.14.

DISEÑO DE MEZCLA PARA 1 m <sup>3</sup> DE CONCRETO (DISEÑO 3)		
MATERIALES	SIN CORECCIÓN DE AGUA	CORREGIDO
CEMENTO TIPO I (ASTM C-150) (kg)	412.00	412.00
ARENA (kg)	609.00	642.00
GOMA DE LLANTA TRITURADA (kg)	48.00	48.00
GRAVA (kg)	984.00	995.00
AGUA (L)	200.00	196.22

Cuadro 5.11 Diseño de Mezcla para 1 m<sup>3</sup> de Concreto, Diseño 3.

PROPIEDADES DE LOS AGREGADOS		
PROPIEDAD	ARENA	GRAVA
HUMEDAD (%)	5.43	1.09
ABSORCIÓN (%)	3.21	2.08
PESO HUMEDO (kg)	642.00	995.00
PESO SATURADO (kg)	629.00	1,005.00
DIFERENCIA (L)	-13.52	9.74
AGUA A AGREGAR (L)	-3.78	

Cuadro 5.12 Propiedades de los Agregados, Diseño 3.

MATERIALES PARA 1 m <sup>3</sup> DE CONCRETO	
CEMENTO TIPO I (ASTM C-150) (Bolsas)	9.70
ARENA (m <sup>3</sup> )	0.41
GRAVA (m <sup>3</sup> )	0.67
GOMA DE LLANTA TRITURADA FINA (m <sup>3</sup> )	0.10
AGUA (L)	196.22

Cuadro 5.13 Materiales para 1 m<sup>3</sup> de Concreto, Diseño 3.

DOSIFICACIÓN POR PESO
<b>1:1.5:0.12:2.4</b>

Cuadro 5.14 Dosificación por Peso, Diseño 3.



#### 5.4.4 DISEÑO 4.

Diseño con sustitución del 20% del volumen de arena por goma de llanta triturada, utilizando Cemento Tipo I (ASTM C-150). Ver Cuadros 5.01-5.02, 5.15-5.18.

DISEÑO DE MEZCLA PARA 1 m <sup>3</sup> DE CONCRETO (DISEÑO 4)		
MATERIALES	SIN CORECCIÓN DE AGUA	CORREGIDO
CEMENTO TIPO I (ASTM C-150) (kg)	412.00	412.00
ARENA (kg)	573.00	604.00
GOMA DE LLANTA TRITURADA (kg)	64.00	64.00
GRAVA (kg)	984.00	995.00
AGUA (L)	200.00	197.02

Cuadro 5.15 Diseño de Mezcla para 1 m<sup>3</sup> de Concreto, Diseño 4.

PROPIEDADES DE LOS AGREGADOS		
PROPIEDAD	ARENA	GRAVA
HUMEDAD (%)	5.43	1.09
ABSORCIÓN (%)	3.21	2.08
PESO HUMEDO (kg)	604.00	995.00
PESO SATURADO (kg)	592.00	1,005.00
DIFERENCIA (L)	-12.73	9.74
AGUA A AGREGAR (L)	-2.98	

Cuadro 5.16 Propiedades de los Agregados, Diseño 4.

MATERIALES PARA 1 m <sup>3</sup> DE CONCRETO	
CEMENTO TIPO I (ASTM C-150) (Bolsas)	9.70
ARENA (m <sup>3</sup> )	0.39
GRAVA (m <sup>3</sup> )	0.67
GOMA DE LLANTA TRITURADA FINA (m <sup>3</sup> )	0.14
AGUA (L)	197.02

Cuadro 5.17 Materiales para 1 m<sup>3</sup> de Concreto, Diseño 4.

DOSIFICACIÓN POR PESO
<b>1:1.4:0.16:2.4</b>

Cuadro 5.18 Dosificación por Peso, Diseño 4.



### 5.4.5 DISEÑO 5

Diseño de Control basado en el ACI 211.1, utilizando Cemento Tipo GU (ASTM C-1157), conteniendo además agregados convencionales arena y grava provenientes de Holcim Agregados. Ver de Cuadros 5.01-5.02, 5.19-5.22.

DISEÑO DE MEZCLA PARA 1 m <sup>3</sup> DE CONCRETO (DISEÑO 5)		
MATERIALES	SIN CORECCIÓN DE AGUA	CORREGIDO
CEMENTO TIPO GU (ASTM C-1157) (kg)	412.00	412.00
ARENA (kg)	690.00	727.00
GRAVA (kg)	984.00	995.00
AGUA (L)	200.00	194.43

Cuadro 5.19 Diseño de Mezcla para 1 m<sup>3</sup> de Concreto, Diseño 5.

PROPIEDADES DE LOS AGREGADOS		
PROPIEDAD	ARENA	GRAVA
HUMEDAD (%)	5.43	1.09
ABSORCIÓN (%)	3.21	2.08
PESO HUMEDO (kg)	727.00	995.00
PESO SATURADO (kg)	712.00	1,005.00
DIFERENCIA (L)	-15.32	9.74
AGUA A AGREGAR (L)	-5.57	

Cuadro 5.20 Propiedades de los Agregados, Diseño 5.

MATERIALES PARA 1 m <sup>3</sup> DE CONCRETO	
CEMENTO TIPO GU (ASTM C-1157) (Bolsas)	9.70
ARENA (m <sup>3</sup> )	0.47
GRAVA (m <sup>3</sup> )	0.67
AGUA (L)	194.43

Cuadro 5.21 Materiales para 1 m<sup>3</sup> de Concreto, Diseño 5.

DOSIFICACIÓN POR PESO
<b>1:1.7:2.4</b>

Cuadro 5.22 Dosificación por Peso, Diseño 5.



### 5.4.6 DISEÑO 6

Diseño con sustitución del 10% del volumen de arena por goma de llanta triturada, utilizando Cemento Tipo GU (ASTM C-1157). Ver Cuadros 5.01-5.02, 5.23-5.26.

DISEÑO DE MEZCLA PARA 1 m <sup>3</sup> DE CONCRETO (DISEÑO 6)		
MATERIALES	SIN CORECCIÓN DE AGUA	CORREGIDO
CEMENTO TIPO GU (ASTM C-1157) (kg)	412.00	412.00
ARENA (kg)	621.00	655.00
GOMA DE LLANTA TRITURADA (kg)	31.00	31.00
GRAVA (kg)	984.00	995.00
AGUA (L)	200.00	195.96

Cuadro 5.23 Diseño de Mezcla para 1 m<sup>3</sup> de Concreto, Diseño 6.

PROPIEDADES DE LOS AGREGADOS		
PROPIEDAD	ARENA	GRAVA
HUMEDAD (%)	5.43	1.09
ABSORCIÓN (%)	3.21	2.08
PESO HUMEDO (kg)	655.00	995.00
PESO SATURADO (kg)	641.00	1,005.00
DIFERENCIA (L)	-13.78	9.74
AGUA A AGREGAR (L)	-4.04	

Cuadro 5.24 Propiedades de los Agregados, Diseño 6.

MATERIALES PARA 1 m <sup>3</sup> DE CONCRETO	
CEMENTO TIPO GU (ASTM C-1157) (Bolsas)	9.70
ARENA (m <sup>3</sup> )	0.42
GRAVA (m <sup>3</sup> )	0.67
GOMA DE LLANTA TRITURADA (m <sup>3</sup> )	0.07
AGUA (L)	195.96

Cuadro 5.25 Materiales para 1 m<sup>3</sup> de Concreto, Diseño 6.

**DOSIFICACIÓN POR PESO**

**1:1.5:0.07:2.4**

Cuadro 5.26 Dosificación por Peso, Diseño 6.



### 5.4.7 DISEÑO 7

Diseño con sustitución del 15% del volumen de arena por goma de llanta triturada fina, utilizando Cemento Tipo GU (ASTM C-1157). Ver Cuadros 5.01-5.02, 5.27-5-30.

DISEÑO DE MEZCLA PARA 1 m <sup>3</sup> DE CONCRETO (DISEÑO 7)		
MATERIALES	SIN CORECCIÓN DE AGUA	CORREGIDO
CEMENTO TIPO GU (ASTM C-1157) (kg)	412.00	412.00
ARENA (kg)	586.00	618.00
GOMA DE LLANTA TRITURADA (kg)	46.00	46.00
GRAVA (kg)	984.00	995.00
AGUA (L)	200.00	196.72

Cuadro 5.27 Diseño de Mezcla para 1 m<sup>3</sup> de Concreto, Diseño 7.

PROPIEDADES DE LOS AGREGADOS		
PROPIEDAD	ARENA	GRAVA
HUMEDAD (%)	5.43	1.09
ABSORCIÓN (%)	3.21	2.08
PESO HUMEDO (kg)	618.00	995.00
PESO SATURADO (kg)	605.00	1,005.00
DIFERENCIA (L)	-13.02	9.74
AGUA A AGREGAR (L)	-3.28	

Cuadro 5.28 Propiedades de los Agregados, Diseño 7.

MATERIALES PARA 1 m <sup>3</sup> DE CONCRETO	
CEMENTO TIPO GU (ASTM C-1157) (Bolsas)	9.70
ARENA (m <sup>3</sup> )	0.40
GRAVA (m <sup>3</sup> )	0.67
GOMA DE LLANTA TRITURADA FINA (m <sup>3</sup> )	0.10
AGUA (L)	196.72

Cuadro 5.29 Materiales para 1 m<sup>3</sup> de Concreto, Diseño 7.

### DOSIFICACIÓN POR PESO

**1:1.4:0.11:2.4**

Cuadro 5.30 Dosificación por Peso, Diseño 7.



### 5.4.8 DISEÑO 8

Diseño con sustitución del 20% del volumen de arena por goma de llanta triturada fina, utilizando Cemento Tipo GU (ASTM C-1157). Ver Cuadros 5.01-5.02, 5.31-5.34.

DISEÑO DE MEZCLA PARA 1 m <sup>3</sup> DE CONCRETO (DISEÑO 8)		
MATERIALES	SIN CORECCIÓN DE AGUA	CORREGIDO
CEMENTO TIPO GU (ASTM C-1157) (kg)	412.00	412.00
ARENA (kg)	552.00	582.00
GOMA DE LLANTA TRITURADA (kg)	62.00	62.00
GRAVA (kg)	984.00	995.00
AGUA (L)	200.00	197.49

Cuadro 5.31 Diseño de Mezcla para 1 m<sup>3</sup> de Concreto, Diseño 8.

PROPIEDADES DE LOS AGREGADOS		
PROPIEDAD	ARENA	GRAVA
HUMEDAD (%)	5.43	1.09
ABSORCIÓN (%)	3.21	2.08
PESO HUMEDO (kg)	582.00	995.00
PESO SATURADO (kg)	570.00	1,005.00
DIFERENCIA (L)	-12.25	9.74
AGUA A AGREGAR (L)	-2.51	

Cuadro 5.32 Propiedades de los Agregados, Diseño 8.

MATERIALES PARA 1 m <sup>3</sup> DE CONCRETO	
CEMENTO TIPO GU (ASTM C-1157) (Bolsas)	9.70
ARENA (m <sup>3</sup> )	0.37
GRAVA (m <sup>3</sup> )	0.67
GOMA DE LLANTA TRITURADA (m <sup>3</sup> )	0.14
AGUA (L)	197.49

Cuadro 5.33 Materiales para 1 m<sup>3</sup> de Concreto, Diseño 8.

DOSIFICACIÓN POR PESO
<b>1:1.3:0.15:2.4</b>

Cuadro 5.34 Dosificación por Peso, Diseño 8.



### 5.4.9 DISEÑO 9

Diseño con sustitución del 10% del volumen de grava por llanta triturada gruesa, utilizando Cemento Tipo GU (ASTM C-1157). Ver Cuadros 5.01-5.02, 5.35-5.38.

DISEÑO DE MEZCLA PARA 1 m <sup>3</sup> DE CONCRETO (DISEÑO 9)		
MATERIALES	SIN CORECCIÓN DE AGUA	CORREGIDO
CEMENTO TIPO GU (ASTM C-1157) (kg)	412.00	412.00
ARENA (kg)	690.00	727.00
LLANTA TRITURADA GRUESA (kg)	44.00	44.00
GRAVA (kg)	886.00	895.00
AGUA (L)	200.00	193.45

Cuadro 5.35 Diseño de Mezcla para 1 m<sup>3</sup> de Concreto, Diseño 9.

PROPIEDADES DE LOS AGREGADOS		
PROPIEDAD	ARENA	GRAVA
HUMEDAD (%)	5.43	1.09
ABSORCIÓN (%)	3.21	2.08
PESO HUMEDO (kg)	727.00	895.00
PESO SATURADO (kg)	712.00	904.00
DIFERENCIA (L)	-15.32	8.77
AGUA A AGREGAR (L)	-6.55	

Cuadro 5.36 Propiedades de los Agregados, Diseño 9.

MATERIALES PARA 1 m <sup>3</sup> DE CONCRETO	
CEMENTO TIPO GU (ASTM C-1157) (Bolsas)	9.70
ARENA (m <sup>3</sup> )	0.47
GRAVA (m <sup>3</sup> )	0.60
LLANTA TRITURADA GRUESA (m <sup>3</sup> )	0.08
AGUA (L)	193.45

Cuadro 5.37 Materiales para 1 m<sup>3</sup> de Concreto, Diseño 9.

DOSIFICACIÓN POR PESO
<b>1:1.7:2.2:0.11</b>

Cuadro 5.38 Dosificación por Peso, Diseño 9.



### 5.4.10 DISEÑO 10

Diseño con sustitución del 15% del volumen de grava por llanta triturada gruesa, utilizando Cemento Tipo GU (ASTM C-1157). Ver Cuadros 5.01-5.02, 5.39-5.42.

DISEÑO DE MEZCLA PARA 1 m <sup>3</sup> DE CONCRETO (DISEÑO 10)		
MATERIALES	SIN CORECCIÓN DE AGUA	CORREGIDO
CEMENTO TIPO GU (ASTM C-1157) (kg)	412.00	412.00
ARENA (kg)	690.00	727.00
LLANTA TRITURADA GRUESA (kg)	67.00	67.00
GRAVA (kg)	836.00	846.00
AGUA (L)	200.00	192.97

Cuadro 5.39 Diseño de Mezcla para 1 m<sup>3</sup> de Concreto, Diseño 10.

PROPIEDADES DE LOS AGREGADOS		
PROPIEDAD	ARENA	GRAVA
HUMEDAD (%)	5.43	1.09
ABSORCIÓN (%)	3.21	2.08
PESO HUMEDO (kg)	727.00	846.00
PESO SATURADO (kg)	712.00	854.00
DIFERENCIA (L)	-15.32	8.28
AGUA A AGREGAR (L)	-7.03	

Cuadro 5.40 Propiedades de los Agregados, Diseño 10.

MATERIALES PARA 1 m <sup>3</sup> DE CONCRETO	
CEMENTO TIPO GU (ASTM C-1157) (Bolsas)	9.70
ARENA (m <sup>3</sup> )	0.47
GRAVA (m <sup>3</sup> )	0.57
LLANTA TRITURADA GRUESA (m <sup>3</sup> )	0.12
AGUA (L)	192.97

Cuadro 5.41 Materiales para 1 m<sup>3</sup> de Concreto, Diseño 10.

DOSIFICACIÓN POR PESO
<b>1:1.7:2.0:0.16</b>

Cuadro 5.42 Dosificación por Peso, Diseño 10.



### 5.4.11 DISEÑO 11

Diseño con sustitución del 20% del volumen de grava por llanta triturada gruesa, utilizando Cemento Tipo GU (ASTM C-1157). Ver Cuadros 5.01-5.02, 5.43-5.46.

DISEÑO DE MEZCLA PARA 1 m <sup>3</sup> DE CONCRETO (DISEÑO 11)		
MATERIALES	SIN CORECCIÓN DE AGUA	CORREGIDO
CEMENTO TIPO GU (ASTM C-1157) (kg)	412.00	412.00
ARENA (kg)	690.00	727.00
LLANTA TRITURADA GRUESA (kg)	89.00	89.00
GRAVA (kg)	787.00	796.00
AGUA (L)	200.00	192.48

Cuadro 5.43 Diseño de Mezcla para 1 m<sup>3</sup> de Concreto, Diseño 11.

PROPIEDADES DE LOS AGREGADOS		
PROPIEDAD	ARENA	GRAVA
HUMEDAD (%)	5.43	1.09
ABSORCION (%)	3.21	2.08
PESO HUMEDO (kg)	727.00	796.00
PESO SATURADO (kg)	712.00	804.00
DIFERENCIA (L)	-15.32	7.79
AGUA A AGREGAR (L)	-7.52	

Cuadro 5.44 Propiedades de los Agregados, Diseño 11.

MATERIALES PARA 1 m <sup>3</sup> DE CONCRETO	
CEMENTO TIPO GU (ASTM C-1157) (Bolsas)	9.70
ARENA (m <sup>3</sup> )	0.47
GRAVA (m <sup>3</sup> )	0.53
LLANTA TRITURADA GRUESA (m <sup>3</sup> )	0.16
AGUA (L)	192.48

Cuadro 5.45 Materiales para 1 m<sup>3</sup> de Concreto, Diseño 11.

### DOSIFICACIÓN POR PESO

**1:1.7:1.9:0.22**

Cuadro 5.46 Dosificación por Peso, Diseño 11.



### 5.4.12 DISEÑO 12

Diseño utilizando 31 kg/m<sup>3</sup> de goma de llanta triturada fina como aditivo en el concreto y Cemento Tipo GU (ASTM C-1157). Ver Cuadros 5.01-5.02, 5.47-5.50.

DISEÑO DE MEZCLA PARA 1 m <sup>3</sup> DE CONCRETO (DISEÑO 12)		
MATERIALES	SIN CORECCIÓN DE AGUA	CORREGIDO
CEMENTO TIPO GU (ASTM C-1157) (kg)	412.00	412.00
ARENA (kg)	690.00	727.00
GOMA DE LLANTA TRITURADA (kg)	31.00	31.00
GRAVA (kg)	984.00	995.00
AGUA (L)	200.00	194.43

Cuadro 5.47 Diseño de Mezcla para 1 m<sup>3</sup> de Concreto, Diseño 12.

PROPIEDADES DE LOS AGREGADOS		
PROPIEDAD	ARENA	GRAVA
HUMEDAD (%)	5.43	1.09
ABSORCIÓN (%)	3.21	2.08
PESO HUMEDO (kg)	727.00	995.00
PESO SATURADO (kg)	712.00	1,005.00
DIFERENCIA (L)	-15.32	9.74
AGUA A AGREGAR (L)	-5.57	

Cuadro 5.48 Propiedades de los Agregados, Diseño 12.

MATERIALES PARA 1 m <sup>3</sup> DE CONCRETO	
CEMENTO TIPO GU (ASTM C-1157) (Bolsas)	9.70
ARENA (m <sup>3</sup> )	0.47
GRAVA (m <sup>3</sup> )	0.67
GOMA DE LLANTA TRITURADA (ADITIVO) (kg)	31.00
AGUA (L)	194.43

Cuadro 5.49 Materiales para 1 m<sup>3</sup> de Concreto, Diseño 12.

DOSIFICACIÓN POR PESO
<b>1:1.7:2.4</b>

Cuadro 5.50 Dosificación por Peso, Diseño 12.



### 5.4.13 DISEÑO 13

Diseño utilizando 46 kg/m<sup>3</sup> de goma de llanta triturada fina como aditivo en el concreto y Cemento Portland Tipo GU (ASTM C-1157). Ver Cuadros 5.01-5.02, 5.51-5.54.

DISEÑO DE MEZCLA PARA 1 m <sup>3</sup> DE CONCRETO (DISEÑO 13)		
MATERIALES	SIN CORECCIÓN DE AGUA	CORREGIDO
CEMENTO TIPO GU (ASTM C-1157) (kg)	412.00	412.00
ARENA (kg)	690.00	727.00
GOMA DE LLANTA TRITURADA (kg)	46.00	46.00
GRAVA (kg)	984.00	995.00
AGUA (L)	200.00	194.43

Cuadro 5.51 Diseño de Mezcla para 1 m<sup>3</sup> de Concreto, Diseño 13.

PROPIEDADES DE LOS AGREGADOS		
PROPIEDAD	ARENA	GRAVA
HUMEDAD (%)	5.43	1.09
ABSORCIÓN (%)	3.21	2.08
PESO HUMEDO (kg)	727.00	995.00
PESO SATURADO (kg)	712.00	1,005.00
DIFERENCIA (L)	-15.32	9.74
AGUA A AGREGAR (L)	-5.57	

Cuadro 5.52 Propiedades de los Agregados, Diseño 13.

MATERIALES PARA 1 m <sup>3</sup> DE CONCRETO	
CEMENTO TIPO GU (ASTM C-1157) (Bolsas)	9.70
ARENA (m <sup>3</sup> )	0.47
GRAVA (m <sup>3</sup> )	0.67
GOMA DE LLANTA TRITURADA (ADITIVO) (kg)	46.00
AGUA (L)	194.43

Cuadro 5.53 Materiales para 1 m<sup>3</sup> de Concreto, Diseño 13.

DOSIFICACIÓN POR PESO
<b>1:1.7:2.4</b>

Cuadro 5.54 Dosificación por Peso, Diseño 13.



#### 5.4.14 DISEÑO 14

**DESCRIPCIÓN:** Diseño utilizando 62 kg/m<sup>3</sup> de goma de llanta triturada fina como aditivo en el concreto y Cemento Portland Tipo GU (ASTM C-1157). Ver Cuadros 5.01-5.02, 5.55-5.58.

DISEÑO DE MEZCLA PARA 1 m <sup>3</sup> DE CONCRETO (DISEÑO 14)		
MATERIALES	SIN CORECCIÓN DE AGUA	CORREGIDO
CEMENTO TIPO GU (ASTM C-1157) (kg)	412.00	412.00
ARENA (kg)	690.00	727.00
GOMA DE LLANTA TRITURADA (kg)	62.00	62.00
GRAVA (kg)	984.00	995.00
AGUA (L)	200.00	194.43

Cuadro 5.55 Diseño de Mezcla para 1 m<sup>3</sup> de Concreto, Diseño 14.

PROPIEDADES DE LOS AGREGADOS		
PROPIEDAD	ARENA	GRAVA
HUMEDAD (%)	5.43	1.09
ABSORCIÓN (%)	3.21	2.08
PESO HUMEDO (kg)	727.00	995.00
PESO SATURADO (kg)	712.00	1,005.00
DIFERENCIA (L)	-15.32	9.74
AGUA A AGREGAR (L)	-5.57	

Cuadro 5.56 Propiedades de los Agregados, Diseño 14.

MATERIALES PARA 1 m <sup>3</sup> DE CONCRETO	
CEMENTO TIPO GU (ASTM C-1157) (Bolsas)	9.70
ARENA (m <sup>3</sup> )	0.47
GRAVA (m <sup>3</sup> )	0.67
GOMA DE LLANTA TRITURADA (ADITIVO) (kg)	62.00
AGUA (L)	194.43

Cuadro 5.57 Materiales para 1 m<sup>3</sup> de Concreto, Diseño 14.

#### DOSIFICACIÓN POR PESO

**1:1.7:2.4**

Cuadro 5.58 Dosificación por Peso, Diseño 14.



# CAPÍTULO 6

## RESUMEN, ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS

INVESTIGACION SOBRE EL USO  
DE LLANTA TRITURADA COMO  
AGREGADO EN LA FABRICACIÓN  
DE CONCRETO



## **6.1. INTRODUCCIÓN.**

Con el fin de lograr los objetivos planteados al inicio de esta tesis, se obtuvo la información mediante la realización de los ensayos de laboratorio para cada uno de los diseños planteados, los ensayos de laboratorio fueron realizados en el orden cronológico y de acuerdo al procedimiento específico de cada uno de ellos, partiendo por los ensayos al concreto en estado fresco como revenimiento, temperatura, contenido de aire, peso volumétrico; así como también los ensayos realizados al concreto en estado endurecido a diferentes edades, tales como resistencia a la compresión y flexión, módulo de elasticidad estático, pulso ultrasónico.

Luego de haber realizado los ensayos correspondientes a cada uno de los diseños planteados en capítulos anteriores se obtuvieron resultados específicos de cada uno de ellos, los cuales pueden ser determinados en datos numéricos concisos, una vez determinados los resultados obtenidos se procede al ordenamiento y procesamiento de la información.

El presente capítulo muestra de manera gráfica los resultados obtenidos en todas las pruebas de laboratorios realizados, se presentan gráficos comparativos entre cada uno de los diseños de sustitución tanto para agregado grueso y agregado fino de goma de llanta triturada y así como también la incorporación de goma de llanta tritura como aditivo, todo comparado con los diseños de control, además se presenta cuadros resumen de los resultados obtenidos y las ecuaciones de tendencia calculadas a través de diagramas de dispersión.



## 6.2 RESULTADOS OBTENIDOS EN LABORATORIO.

A partir de los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio se genera un cuadro resumen por cada diseño de mezcla elaborado; cada cuadro contiene:

- ✓ Descripción de Diseño de Mezcla.
- ✓ Datos Generales de Diseño.
- ✓ Materiales.
- ✓ Ensayos al Concreto en Estado Fresco.
- ✓ Ensayos al Concreto en Estado Endurecido.
  - Ensayos Destructivos.
  - Ensayos No Destructivos.

Los cuadros resumen se tomaron como base para la generación de cada gráfico de comparación entre variables del diseño, estos sirvieron para calcular la ecuación de la tendencia de los valores, posteriormente se realizó el análisis del coeficiente de correlación ( $r$ ) obtenido y se comparó con el “Diagrama de Análisis del Coeficiente de Correlación ( $r$ ) entre dos Variables”. Ver Imagen 6.1.

El coeficiente de correlación es un instrumento estadístico que permite establecer la fuerza y dirección de una relación lineal estadística entre dos variables a partir de una muestra determinada, bajo el supuesto que esta es representativa<sup>20</sup>.

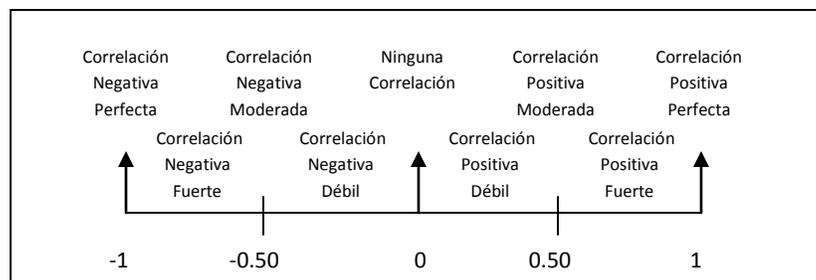


Imagen 6.01 Diagrama de Análisis del Coeficiente de Correlación ( $r$ ) entre dos Variables, Erick Lahura, 2003.

<sup>20</sup> Documento de Trabajo 218, El Coeficiente de Correlación y Correlaciones Espúreas, Erick Lahura, Enero 2003.



## 6.2.1 CUADRO RESUMEN DE RESULTADOS DE ENSAYOS, DISEÑO 1.

 <b>DISEÑO 1</b> 	
Diseño de Control, basado en el ACI 211.1, utilizando Cemento Tipo I (ASTM C-150)	
DATOS GENERALES DE DISEÑO	
f'c (kg/cm <sup>2</sup> )	280
f'cr (kg/cm <sup>2</sup> )	345
REVENIMIENTO (pulg)	3
RELACION A/C	0.49
Método de compactación de especímenes	Varillado
MATERIALES	
AGUA (L/m <sup>3</sup> )	193.84
GRAVA (kg/m <sup>3</sup> )	995.00
ARENA (kg/m <sup>3</sup> )	755.00
CEMENTO TIPO I (ASTM C-150) (kg/m <sup>3</sup> )	412.00
ENSAYOS CONCRETO EN ESTADO FRESCO	
PESO VOLUMETRICO (kg/m <sup>3</sup> )	2,349.15
TEMPERATURA (°C)	27
REVENIMIENTO (pulg)	3
CONTENIDO DE AIRE (%)	1.6
ENSAYOS CONCRETO ENDURECIDO	
ENSAYOS DESTRUCTIVOS	
RESISTENCIA A LA COMPRESION A LOS 7 DIAS (kg/cm <sup>2</sup> )	384
RESISTENCIA A LA COMPRESION A LOS 28 DIAS (kg/cm <sup>2</sup> )	505
RESISTENCIA A LA FLEXION A LOS 14 DIAS (kg/cm <sup>2</sup> )	50
RESISTENCIA A LA FLEXION A LOS 28 DIAS (kg/cm <sup>2</sup> )	57
% de f'c a los 7 días	137
% de f'cr a los 7 días	111
% de f'c a los 28 días	180
% de f'cr a los 28 días	146
ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS	
VELOCIDAD DE PULSO ULTRASONICO	
TIEMPO (Micro seg)	68.8
VELOCIDAD (ft/s)	14,535
CALIDAD DEL CONCRETO SEGÚN LESLIE Y CHEESMAN	BUENA
CALIDAD DEL CONCRETO SEGÚN AGRAVAL Y OTROS	BUENA
MODULO DE ELASTICIDAD DINAMICO [Ed] (psi)	6.87E+06
MODULO DE ELASTICIDAD ESTATICO	
MODULO ESTATICO [Ec] (psi)	4.70E+06

Cuadro 6.01 Resumen de Resultados de Ensayos, Diseño 1.



## 6.2.2 CUADRO RESUMEN DE RESULTADOS DE ENSAYOS, DISEÑO 2.

 <b>DISEÑO 2</b> 	
Diseño con sustitución del 10% del volumen de arena por goma de llanta triturada fina, basado en el ACI 211.1, utilizando Cemento Tipo I (ASTM C-150)	
DATOS GENERALES DE DISEÑO	
f'c (kg/cm <sup>2</sup> )	280
f'cr (kg/cm <sup>2</sup> )	345
REVENIMIENTO (pulg)	3
RELACION A/C	0.49
Método de compactación de especímenes	Varillado
MATERIALES	
AGUA (L/m <sup>3</sup> )	195.43
GRAVA (kg/m <sup>3</sup> )	995.00
ARENA (kg/m <sup>3</sup> )	680.00
GOMA DE LLANTA TRITURADA FINA (kg/m <sup>3</sup> )	32.00
CEMENTO TIPO I (ASTM C-150) (kg/m <sup>3</sup> )	412.00
ENSAYOS CONCRETO EN ESTADO FRESCO	
PESO VOLUMETRICO (kg/m <sup>3</sup> )	2,307.24
TEMPERATURA (°C)	26
REVENIMIENTO (pulg)	2 3/4
CONTENIDO DE AIRE (%)	2.3
ENSAYOS CONCRETO ENDURECIDO	
ENSAYOS DESTRUCTIVOS	
RESISTENCIA A LA COMPRESION A LOS 7 DIAS (kg/cm <sup>2</sup> )	289
RESISTENCIA A LA COMPRESION A LOS 28 DIAS (kg/cm <sup>2</sup> )	381
RESISTENCIA A LA FLEXION A LOS 14 DIAS (kg/cm <sup>2</sup> )	51
RESISTENCIA A LA FLEXION A LOS 28 DIAS (kg/cm <sup>2</sup> )	54
% de f'c a los 7 dias	103
% de f'cr a los 7 dias	84
% de f'c a los 28 dias	136
% de f'cr a los 28 dias	110
ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS	
VELOCIDAD DE PULSO ULTRASONICO	
TIEMPO (Micro seg)	69.3
VELOCIDAD (ft/s)	14,423
CALIDAD DEL CONCRETO SEGÚN LESLIE Y CHEESMAN	BUENA
CALIDAD DEL CONCRETO SEGÚN AGRAVAL Y OTROS	BUENA
MODULO DE ELASTICIDAD DINAMICO [Ed] (psi)	6.57E+06
MODULO DE ELASTICIDAD ESTATICO	
MODULO ESTATICO [Ec] (psi)	4.30E+06

Cuadro 6.02 Resumen de Resultados de Ensayos, Diseño 2.



### 6.2.3 CUADRO RESUMEN DE RESULTADOS DE ENSAYOS, DISEÑO 3.

 <span style="margin-left: 100px;"><b>DISEÑO 3</b></span> 	
Diseño con sustitucion del 15% del volumen de arena por goma de llanta triturada fina, basado en el ACI 211.1, utilizando Cemento Tipo I (ASTM C-150)	
DATOS GENERALES DE DISEÑO	
f'c (kg/cm <sup>2</sup> )	280
f'cr (kg/cm <sup>2</sup> )	345
REVENIMIENTO (pulg)	3
RELACION A/C	0.49
Método de compactación de especímenes	Varillado
MATERIALES	
AGUA (L/m <sup>3</sup> )	196.22
GRAVA (kg/m <sup>3</sup> )	995.00
ARENA (kg/m <sup>3</sup> )	642.00
GOMA DE LLANTA TRITURADA FINA (kg/m <sup>3</sup> )	48.00
CEMENTO TIPO I (ASTM C-150) (kg/m <sup>3</sup> )	412.00
ENSAYOS CONCRETO EN ESTADO FRESCO	
PESO VOLUMETRICO (kg/m <sup>3</sup> )	2,252.13
TEMPERATURA (°C)	27
REVENIMIENTO (pulg)	2 3/4
CONTENIDO DE AIRE (%)	2.9
ENSAYOS CONCRETO ENDURECIDO	
ENSAYOS DESTRUCTIVOS	
RESISTENCIA A LA COMPRESION A LOS 7 DIAS (kg/cm <sup>2</sup> )	220
RESISTENCIA A LA COMPRESION A LOS 28 DIAS (kg/cm <sup>2</sup> )	306
RESISTENCIA A LA FLEXION A LOS 14 DIAS (kg/cm <sup>2</sup> )	41
RESISTENCIA A LA FLEXION A LOS 28 DIAS (kg/cm <sup>2</sup> )	46
% de f'c a los 7 dias	79
% de f'cr a los 7 dias	64
% de f'c a los 28 dias	109
% de f'cr a los 28 dias	89
ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS	
VELOCIDAD DE PULSO ULTRASONICO	
TIEMPO (Micro seg)	73.1
VELOCIDAD (ft/s)	13,680
CALIDAD DEL CONCRETO SEGÚN LESLIE Y CHEESMAN	BUENA
CALIDAD DEL CONCRETO SEGÚN AGRAVAL Y OTROS	BUENA
MODULO DE ELASTICIDAD DINAMICO [Ed] (psi)	5.82E+06
MODULO DE ELASTICIDAD ESTATICO	
MODULO ESTATICO [Ec] (psi)	4.30E+06

Cuadro 6.03 Resumen de Resultados de Ensayos, Diseño 3.



### 6.2.4 CUADRO RESUMEN DE RESULTADOS DE ENSAYOS, DISEÑO 4.

 <b>DISEÑO 4</b> 	
Diseño con sustitución del 20% del volumen de arena por goma de llanta triturada fina, basado en el ACI 211.1, utilizando Cemento Tipo I (ASTM C-150)	
DATOS GENERALES DE DISEÑO	
f'c (kg/cm <sup>2</sup> )	280
f'cr (kg/cm <sup>2</sup> )	345
REVENIMIENTO (pulg)	3
RELACION A/C	0.49
Método de compactación de especímenes	Varillado
MATERIALES	
AGUA (L/m <sup>3</sup> )	197.02
GRAVA (kg/m <sup>3</sup> )	995.00
ARENA (kg/m <sup>3</sup> )	604.00
GOMA DE LLANTA TRITURADA FINA (kg/m <sup>3</sup> )	64.00
CEMENTO TIPO I (ASTM C-150) (kg/m <sup>3</sup> )	412.00
ENSAYOS CONCRETO EN ESTADO FRESCO	
PESO VOLUMETRICO (kg/m <sup>3</sup> )	2,236.08
TEMPERATURA (°C)	26
REVENIMIENTO (pulg)	2 1/2
CONTENIDO DE AIRE (%)	3.5
ENSAYOS CONCRETO ENDURECIDO	
ENSAYOS DESTRUCTIVOS	
RESISTENCIA A LA COMPRESION A LOS 7 DIAS (kg/cm <sup>2</sup> )	180
RESISTENCIA A LA COMPRESION A LOS 28 DIAS (kg/cm <sup>2</sup> )	247
RESISTENCIA A LA FLEXION A LOS 14 DIAS (kg/cm <sup>2</sup> )	37
RESISTENCIA A LA FLEXION A LOS 28 DIAS (kg/cm <sup>2</sup> )	44
% de f'c a los 7 dias	64
% de f'cr a los 7 dias	52
% de f'c a los 28 dias	88
% de f'cr a los 28 dias	72
ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS	
VELOCIDAD DE PULSO ULTRASONICO	
TIEMPO (Micro seg)	75.53
VELOCIDAD (ft/s)	13,240
CALIDAD DEL CONCRETO SEGÚN LESLIE Y CHEESMAN	BUENA
CALIDAD DEL CONCRETO SEGÚN AGRAVAL Y OTROS	BUENA
MODULO DE ELASTICIDAD DINAMICO [Ed] (psi)	5.30E+06
MODULO DE ELASTICIDAD ESTATICO	
MODULO ESTATICO [Ec] (psi)	4.00E+06

Cuadro 6.04 Resumen de Resultados de Ensayos, Diseño 4.



## 6.2.5 CUADRO RESUMEN DE RESULTADOS DE ENSAYOS, DISEÑO 5.

 <b>DISEÑO 5</b> 	
Diseño de Control, basado en el ACI 211.1, utilizando Cemento Tipo GU (ASTM C-1157)	
DATOS GENERALES DE DISEÑO	
f'c (kg/cm <sup>2</sup> )	280
f'cr (kg/cm <sup>2</sup> )	345
REVENIMIENTO (pulg)	3
RELACION A/C	0.49
Método de compactación de especímenes	Varillado
MATERIALES	
AGUA (L/m <sup>3</sup> )	194.43
GRAVA (kg/m <sup>3</sup> )	995.00
ARENA (kg/m <sup>3</sup> )	727.00
CEMENTO TIPO GU (ASTM C-1157) (kg/m <sup>3</sup> )	412.00
ENSAYOS CONCRETO EN ESTADO FRESCO	
PESO VOLUMETRICO (kg/m <sup>3</sup> )	2,345.17
TEMPERATURA (°C)	28
REVENIMIENTO (pulg)	2
CONTENIDO DE AIRE (%)	1.5
ENSAYOS CONCRETO ENDURECIDO	
ENSAYOS DESTRUCTIVOS	
RESISTENCIA A LA COMPRESION A LOS 7 DIAS (kg/cm <sup>2</sup> )	211
RESISTENCIA A LA COMPRESION A LOS 28 DIAS (kg/cm <sup>2</sup> )	343
RESISTENCIA A LA FLEXION A LOS 14 DIAS (kg/cm <sup>2</sup> )	41
RESISTENCIA A LA FLEXION A LOS 28 DIAS (kg/cm <sup>2</sup> )	48
% de f'c a los 7 días	75
% de f'cr a los 7 días	61
% de f'c a los 28 días	123
% de f'cr a los 28 días	99
ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS	
VELOCIDAD DE PULSO ULTRASONICO	
TIEMPO (Micro seg)	73
VELOCIDAD (ft/s)	13,741
CALIDAD DEL CONCRETO SEGÚN LESLIE Y CHEESMAN	BUENA
CALIDAD DEL CONCRETO SEGÚN AGRAVAL Y OTROS	BUENA
MODULO DE ELASTICIDAD DINAMICO [Ed] (psi)	6.04E+06
MODULO DE ELASTICIDAD ESTATICO	
MODULO ESTATICO [Ec] (psi)	4.60E+06

Cuadro 6.05 Resumen de Resultados de Ensayos, Diseño 5.



## 6.2.6 CUADRO RESUMEN DE RESULTADOS DE ENSAYOS, DISEÑO 6.

 <b>DISEÑO 6</b> 	
Diseño con sustitución del 10% del volumen de arena por goma de llanta triturada fina, basado en el ACI 211.1, utilizando Cemento Tipo GU (ASTM C-1157)	
DATOS GENERALES DE DISEÑO	
f'c (kg/cm <sup>2</sup> )	280
f'cr (kg/cm <sup>2</sup> )	345
REVENIMIENTO (pulg)	3
RELACION A/C	0.49
Método de compactación de especímenes	Varillado
MATERIALES	
AGUA (L/m <sup>3</sup> )	195.96
GRAVA (kg/m <sup>3</sup> )	995.00
ARENA (kg/m <sup>3</sup> )	655.00
GOMA DE LLANTA TRITURADA FINA (kg/m <sup>3</sup> )	31.00
CEMENTO TIPO GU (ASTM C-1157) (kg/m <sup>3</sup> )	412.00
ENSAYOS CONCRETO EN ESTADO FRESCO	
PESO VOLUMETRICO (kg/m <sup>3</sup> )	2,288.35
TEMPERATURA (°C)	28
REVENIMIENTO (pulg)	2 1/2
CONTENIDO DE AIRE (%)	2.1
ENSAYOS CONCRETO ENDURECIDO	
ENSAYOS DESTRUCTIVOS	
RESISTENCIA A LA COMPRESION A LOS 7 DIAS (kg/cm <sup>2</sup> )	148
RESISTENCIA A LA COMPRESION A LOS 28 DIAS (kg/cm <sup>2</sup> )	237
RESISTENCIA A LA FLEXION A LOS 14 DIAS (kg/cm <sup>2</sup> )	37
RESISTENCIA A LA FLEXION A LOS 28 DIAS (kg/cm <sup>2</sup> )	38
% de f'c a los 7 dias	53
% de f'cr a los 7 dias	43
% de f'c a los 28 dias	85
% de f'cr a los 28 dias	69
ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS	
VELOCIDAD DE PULSO ULTRASONICO	
TIEMPO (Micro seg)	71.15
VELOCIDAD (ft/s)	14,059
CALIDAD DEL CONCRETO SEGÚN LESLIE Y CHEESMAN	BUENA
CALIDAD DEL CONCRETO SEGÚN AGRAVAL Y OTROS	BUENA
MODULO DE ELASTICIDAD DINAMICO [Ed] (psi)	6.18E+06
MODULO DE ELASTICIDAD ESTATICO	
MODULO ESTATICO [Ec] (psi)	4.30E+06

Cuadro 6.06 Resumen de Resultados de Ensayos, Diseño 6.



### 6.2.7 CUADRO RESUMEN DE RESULTADOS DE ENSAYOS, DISEÑO 7.

 <b>DISEÑO 7</b> 	
Diseño con sustitución del 15% del volumen de arena por goma de llanta triturada fina, basado en el ACI 211.1, utilizando Cemento Tipo GU (ASTM C-1157)	
DATOS GENERALES DE DISEÑO	
f'c (kg/cm <sup>2</sup> )	280
f'cr (kg/cm <sup>2</sup> )	345
REVENIMIENTO (pulg)	3
RELACION A/C	0.49
Método de compactación de especímenes	Varillado
MATERIALES	
AGUA (L/m <sup>3</sup> )	196.72
GRAVA (kg/m <sup>3</sup> )	995.00
ARENA (kg/m <sup>3</sup> )	618.00
GOMA DE LLANTA TRITURADA FINA (kg/m <sup>3</sup> )	46.00
CEMENTO TIPO GU (ASTM C-1157) (kg/m <sup>3</sup> )	412.00
ENSAYOS CONCRETO EN ESTADO FRESCO	
PESO VOLUMETRICO (kg/m <sup>3</sup> )	2,256.39
TEMPERATURA (°C)	28
REVENIMIENTO (pulg)	2 1/2
CONTENIDO DE AIRE (%)	2.5
ENSAYOS CONCRETO ENDURECIDO	
ENSAYOS DESTRUCTIVOS	
RESISTENCIA A LA COMPRESION A LOS 7 DIAS (kg/cm <sup>2</sup> )	124
RESISTENCIA A LA COMPRESION A LOS 28 DIAS (kg/cm <sup>2</sup> )	195
RESISTENCIA A LA FLEXION A LOS 14 DIAS (kg/cm <sup>2</sup> )	36
RESISTENCIA A LA FLEXION A LOS 28 DIAS (kg/cm <sup>2</sup> )	36
% de f'c a los 7 días	44
% de f'cr a los 7 días	36
% de f'c a los 28 días	70
% de f'cr a los 28 días	57
ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS	
VELOCIDAD DE PULSO ULTRASONICO	
TIEMPO (Micro seg)	77.73
VELOCIDAD (ft/s)	12,865
CALIDAD DEL CONCRETO SEGÚN LESLIE Y CHEESMAN	BUENA
CALIDAD DEL CONCRETO SEGÚN AGRAVAL Y OTROS	BUENA
MODULO DE ELASTICIDAD DINAMICO [Ed] (psi)	5.06E+06
MODULO DE ELASTICIDAD ESTATICO	
MODULO ESTATICO [Ec] (psi)	3.90E+06

Cuadro 6.07 Resumen de Resultados de Ensayos, Diseño 7.



## 6.2.8 CUADRO RESUMEN DE RESULTADOS DE ENSAYOS, DISEÑO 8.

 <b>DISEÑO 8</b> 	
Diseño con sustitución del 20% del volumen de arena por goma de llanta triturada fina, basado en el ACI 211.1, utilizando Cemento Tipo GU (ASTM C-1157)	
DATOS GENERALES DE DISEÑO	
f'c (kg/cm <sup>2</sup> )	280
f'cr (kg/cm <sup>2</sup> )	345
REVENIMIENTO (pulg)	3
RELACION A/C	0.49
Método de compactación de especímenes	Varillado
MATERIALES	
AGUA (L/m <sup>3</sup> )	197.49
GRAVA (kg/m <sup>3</sup> )	995.00
ARENA (kg/m <sup>3</sup> )	582.00
GOMA DE LLANTA TRITURADA FINA (kg/m <sup>3</sup> )	64.00
CEMENTO TIPO GU (ASTM C-1157) (kg/m <sup>3</sup> )	412.00
ENSAYOS CONCRETO EN ESTADO FRESCO	
PESO VOLUMETRICO (kg/m <sup>3</sup> )	2,232.24
TEMPERATURA (°C)	28
REVENIMIENTO (pulg)	2 1/2
CONTENIDO DE AIRE (%)	2.7
ENSAYOS CONCRETO ENDURECIDO	
ENSAYOS DESTRUCTIVOS	
RESISTENCIA A LA COMPRESION A LOS 7 DIAS (kg/cm <sup>2</sup> )	110
RESISTENCIA A LA COMPRESION A LOS 28 DIAS (kg/cm <sup>2</sup> )	177
RESISTENCIA A LA FLEXION A LOS 14 DIAS (kg/cm <sup>2</sup> )	30
RESISTENCIA A LA FLEXION A LOS 28 DIAS (kg/cm <sup>2</sup> )	35
% de f'c a los 7 dias	39
% de f'cr a los 7 dias	32
% de f'c a los 28 dias	63
% de f'cr a los 28 dias	51
ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS	
VELOCIDAD DE PULSO ULTRASONICO	
TIEMPO (Micro seg)	77.07
VELOCIDAD (ft/s)	12,976
CALIDAD DEL CONCRETO SEGÚN LESLIE Y CHEESMAN	BUENA
CALIDAD DEL CONCRETO SEGÚN AGRAVAL Y OTROS	BUENA
MODULO DE ELASTICIDAD DINAMICO [Ed] (psi)	5.12E+06
MODULO DE ELASTICIDAD ESTATICO	
MODULO ESTATICO [Ec] (psi)	3.80E+06

Cuadro 6.08 Resumen de Resultados de Ensayos, Diseño 8.



### 6.2.9 CUADRO RESUMEN DE RESULTADOS DE ENSAYOS, DISEÑO 9.

 <span style="margin-left: 100px;"><b>DISEÑO 9</b></span> 	
Diseño con sustitucion del 10% del volumen de grava por llanta triturada gruesa, basado en el ACI 211.1, utilizando Cemento Tipo GU (ASTM C-1157)	
DATOS GENERALES DE DISEÑO	
f'c (kg/cm <sup>2</sup> )	280
f'cr (kg/cm <sup>2</sup> )	345
REVENIMIENTO (pulg)	3
RELACION A/C	0.49
Método de compactación de especímenes	Varillado
MATERIALES	
AGUA (L/m <sup>3</sup> )	193.45
GRAVA (kg/m <sup>3</sup> )	895.00
ARENA (kg/m <sup>3</sup> )	727.00
LLANTA TRITURADA GRUESA (kg/m <sup>3</sup> )	44.00
CEMENTO TIPO GU (ASTM C-1157) (kg/m <sup>3</sup> )	412.00
ENSAYOS CONCRETO EN ESTADO FRESCO	
PESO VOLUMETRICO (kg/m <sup>3</sup> )	2,289.06
TEMPERATURA (°C)	26
REVENIMIENTO (pulg)	2 3/4
CONTENIDO DE AIRE (%)	1.8
ENSAYOS CONCRETO ENDURECIDO	
ENSAYOS DESTRUCTIVOS	
RESISTENCIA A LA COMPRESION A LOS 7 DIAS (kg/cm <sup>2</sup> )	149
RESISTENCIA A LA COMPRESION A LOS 28 DIAS (kg/cm <sup>2</sup> )	218
RESISTENCIA A LA FLEXION A LOS 14 DIAS (kg/cm <sup>2</sup> )	32
RESISTENCIA A LA FLEXION A LOS 28 DIAS (kg/cm <sup>2</sup> )	38
% de f'c a los 7 dias	53
% de f'cr a los 7 dias	43
% de f'c a los 28 dias	78
% de f'cr a los 28 dias	63
ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS	
VELOCIDAD DE PULSO ULTRASONICO	
TIEMPO (Micro seg)	72.9
VELOCIDAD (ft/s)	13,727
CALIDAD DEL CONCRETO SEGÚN LESLIE Y CHEESMAN	BUENA
CALIDAD DEL CONCRETO SEGÚN AGRAVAL Y OTROS	BUENA
MODULO DE ELASTICIDAD DINAMICO [Ed] (psi)	5.89E+06
MODULO DE ELASTICIDAD ESTATICO	
MODULO ESTATICO [Ec] (psi)	3.60E+06

Cuadro 6.09 Resumen de Resultados de Ensayos, Diseño 9.



### 6.2.10 CUADRO RESUMEN DE RESULTADOS DE ENSAYOS, DISEÑO 10.

 <span style="margin-left: 100px;"><b>DISEÑO 10</b></span> 	
Diseño con sustitucion del 15% del volumen de grava por llanta triturada gruesa, basado en el ACI 211.1, utilizando Cemento Tipo GU (ASTM C-1157)	
DATOS GENERALES DE DISEÑO	
f'c (kg/cm <sup>2</sup> )	280
f'cr (kg/cm <sup>2</sup> )	345
REVENIMIENTO (pulg)	3
RELACION A/C	0.49
Método de compactación de especímenes	Varillado
MATERIALES	
AGUA (L/m <sup>3</sup> )	192.97
GRAVA (kg/m <sup>3</sup> )	846.00
ARENA (kg/m <sup>3</sup> )	727.00
LLANTA TRITURADA GRUESA (kg/m <sup>3</sup> )	67.00
CEMENTO TIPO GU (ASTM C-1157) (kg/m <sup>3</sup> )	412.00
ENSAYOS CONCRETO EN ESTADO FRESCO	
PESO VOLUMETRICO (kg/m <sup>3</sup> )	2,253.25
TEMPERATURA (°C)	26
REVENIMIENTO (pulg)	2 1/2
CONTENIDO DE AIRE (%)	2.1
ENSAYOS CONCRETO ENDURECIDO	
ENSAYOS DESTRUCTIVOS	
RESISTENCIA A LA COMPRESION A LOS 7 DIAS (kg/cm <sup>2</sup> )	119
RESISTENCIA A LA COMPRESION A LOS 28 DIAS (kg/cm <sup>2</sup> )	171
RESISTENCIA A LA FLEXION A LOS 14 DIAS (kg/cm <sup>2</sup> )	30
RESISTENCIA A LA FLEXION A LOS 28 DIAS (kg/cm <sup>2</sup> )	35
% de f'c a los 7 dias	43
% de f'cr a los 7 dias	34
% de f'c a los 28 dias	61
% de f'cr a los 28 dias	50
ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS	
VELOCIDAD DE PULSO ULTRASONICO	
TIEMPO (Micro seg)	76.4
VELOCIDAD (ft/s)	13,089
CALIDAD DEL CONCRETO SEGÚN LESLIE Y CHEESMAN	BUENA
CALIDAD DEL CONCRETO SEGÚN AGRAVAL Y OTROS	BUENA
MODULO DE ELASTICIDAD DINAMICO [Ed] (psi)	5.64E+06
MODULO DE ELASTICIDAD ESTATICO	
MODULO ESTATICO [Ec] (psi)	3.20E+06

Cuadro 6.10 Resumen de Resultados de Ensayos, Diseño 10.



### 6.2.11 CUADRO RESUMEN DE RESULTADOS DE ENSAYOS, DISEÑO 11.

 <b>DISEÑO 11</b> 	
Diseño con sustitucion del 20% del volumen de grava por llanta triturada gruesa, basado en el ACI 211.1, utilizando Cemento Tipo GU (ASTM C-1157)	
DATOS GENERALES DE DISEÑO	
f'c (kg/cm <sup>2</sup> )	280
f'cr (kg/cm <sup>2</sup> )	345
REVENIMIENTO (pulg)	3
RELACION A/C	0.49
Método de compactación de especímenes	Varillado
MATERIALES	
AGUA (L/m <sup>3</sup> )	192.48
GRAVA (kg/m <sup>3</sup> )	796.00
ARENA (kg/m <sup>3</sup> )	727.00
LLANTA TRITURADA GRUESA (kg/m <sup>3</sup> )	89.00
CEMENTO TIPO GU (ASTM C-1157) (kg/m <sup>3</sup> )	412.00
ENSAYOS CONCRETO EN ESTADO FRESCO	
PESO VOLUMETRICO (kg/m <sup>3</sup> )	2,227.34
TEMPERATURA (°C)	27
REVENIMIENTO (pulg)	2 1/2
CONTENIDO DE AIRE (%)	2.9
ENSAYOS CONCRETO ENDURECIDO	
ENSAYOS DESTRUCTIVOS	
RESISTENCIA A LA COMPRESION A LOS 7 DIAS (kg/cm <sup>2</sup> )	112
RESISTENCIA A LA COMPRESION A LOS 28 DIAS (kg/cm <sup>2</sup> )	159
RESISTENCIA A LA FLEXION A LOS 14 DIAS (kg/cm <sup>2</sup> )	26
RESISTENCIA A LA FLEXION A LOS 28 DIAS (kg/cm <sup>2</sup> )	31
% de f'c a los 7 dias	40
% de f'cr a los 7 dias	32
% de f'c a los 28 dias	57
% de f'cr a los 28 dias	46
ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS	
VELOCIDAD DE PULSO ULTRASONICO	
TIEMPO (Micro seg)	76
VELOCIDAD (ft/s)	13,157
CALIDAD DEL CONCRETO SEGÚN LESLIE Y CHEESMAN	BUENA
CALIDAD DEL CONCRETO SEGÚN AGRAVAL Y OTROS	BUENA
MODULO DE ELASTICIDAD DINAMICO [Ed] (psi)	5.21E+06
MODULO DE ELASTICIDAD ESTATICO	
MODULO ESTATICO [Ec] (psi)	2.90E+06

Cuadro 6.11 Resumen de Resultados de Ensayos, Diseño 11.



### 6.2.12 CUADRO RESUMEN DE RESULTADOS DE ENSAYOS, DISEÑO 12.

 <span style="margin-left: 100px;"><b>DISEÑO 12</b></span> 	
Diseño con aditivo de goma de llanta triturada fina (10% volumen de arena), basado en el ACI 211.1, utilizando Cemento Tipo GU (ASTM C-1157)	
DATOS GENERALES DE DISEÑO	
f'c (kg/cm <sup>2</sup> )	280
f'cr (kg/cm <sup>2</sup> )	345
REVENIMIENTO (pulg)	3
RELACION A/C	0.49
Método de compactación de especímenes	Varillado y Vibrado
MATERIALES	
AGUA (L/m <sup>3</sup> )	194.43
GRAVA (kg/m <sup>3</sup> )	995.00
ARENA (kg/m <sup>3</sup> )	727.00
GOMA DE LLANTA TRITURADA FINA (kg/m <sup>3</sup> )	31.00
CEMENTO TIPO GU (ASTM C-1157) (kg/m <sup>3</sup> )	412.00
ENSAYOS CONCRETO EN ESTADO FRESCO	
PESO VOLUMETRICO (kg/m <sup>3</sup> )	2,292.61
TEMPERATURA (°C)	26
REVENIMIENTO (pulg)	2 1/4
CONTENIDO DE AIRE (%)	1.9
ENSAYOS CONCRETO ENDURECIDO	
ENSAYOS DESTRUCTIVOS	
RESISTENCIA A LA COMPRESION A LOS 7 DIAS (kg/cm <sup>2</sup> )	182
RESISTENCIA A LA COMPRESION A LOS 28 DIAS (kg/cm <sup>2</sup> )	263
RESISTENCIA A LA FLEXION A LOS 14 DIAS (kg/cm <sup>2</sup> )	31
RESISTENCIA A LA FLEXION A LOS 28 DIAS (kg/cm <sup>2</sup> )	39
% de f'c a los 7 dias	65
% de f'cr a los 7 dias	53
% de f'c a los 28 dias	94
% de f'cr a los 28 dias	76
ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS	
VELOCIDAD DE PULSO ULTRASONICO	
TIEMPO (Micro seg)	74.2
VELOCIDAD (ft/s)	13,478
CALIDAD DEL CONCRETO SEGÚN LESLIE Y CHEESMAN	BUENA
CALIDAD DEL CONCRETO SEGÚN AGRAVAL Y OTROS	BUENA
MODULO DE ELASTICIDAD DINAMICO [Ed] (psi)	5.67E+06
MODULO DE ELASTICIDAD ESTATICO	
MODULO ESTATICO [Ec] (psi)	3.70E+06

Cuadro 6.12 Resumen de Resultados de Ensayos, Diseño 12.



### 6.2.13 CUADRO RESUMEN DE RESULTADOS DE ENSAYOS, DISEÑO 13.

 <span style="margin-left: 100px;"><b>DISEÑO 13</b></span> 	
Diseño con aditivo de goma de llanta triturada fina (15% volumen de arena), basado en el ACI 211.1, utilizando Cemento Tipo GU (ASTM C-1157)	
DATOS GENERALES DE DISEÑO	
f'c (kg/cm <sup>2</sup> )	280
f'cr (kg/cm <sup>2</sup> )	345
REVENIMIENTO (pulg)	3
RELACION A/C	0.49
Método de compactación de especímenes	Varillado
MATERIALES	
AGUA (L/m <sup>3</sup> )	194.43
GRAVA (kg/m <sup>3</sup> )	995.00
ARENA (kg/m <sup>3</sup> )	727.00
GOMA DE LLANTA TRITURADA FINA (kg/m <sup>3</sup> )	46.00
CEMENTO TIPO GU (ASTM C-1157) (kg/m <sup>3</sup> )	412.00
ENSAYOS CONCRETO EN ESTADO FRESCO	
PESO VOLUMETRICO (kg/m <sup>3</sup> )	2,263.09
TEMPERATURA (°C)	26
REVENIMIENTO (pulg)	2 1/4
CONTENIDO DE AIRE (%)	2.4
ENSAYOS CONCRETO ENDURECIDO	
ENSAYOS DESTRUCTIVOS	
RESISTENCIA A LA COMPRESION A LOS 7 DIAS (kg/cm <sup>2</sup> )	112
RESISTENCIA A LA COMPRESION A LOS 28 DIAS (kg/cm <sup>2</sup> )	180
RESISTENCIA A LA FLEXION A LOS 14 DIAS (kg/cm <sup>2</sup> )	28
RESISTENCIA A LA FLEXION A LOS 28 DIAS (kg/cm <sup>2</sup> )	35
% de f'c a los 7 dias	40
% de f'cr a los 7 dias	32
% de f'c a los 28 dias	64
% de f'cr a los 28 dias	52
ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS	
VELOCIDAD DE PULSO ULTRASONICO	
TIEMPO (Micro seg)	75.3
VELOCIDAD (ft/s)	13,280
CALIDAD DEL CONCRETO SEGÚN LESLIE Y CHEESMAN	BUENA
CALIDAD DEL CONCRETO SEGÚN AGRAVAL Y OTROS	BUENA
MODULO DE ELASTICIDAD DINAMICO [Ed] (psi)	5.35E+06
MODULO DE ELASTICIDAD ESTATICO	
MODULO ESTATICO [Ec] (psi)	3.60E+06

Cuadro 6.13 Resumen de Resultados de Ensayos, Diseño 13.



### 6.2.14 CUADRO RESUMEN DE RESULTADOS DE ENSAYOS, DISEÑO 14.

 <span style="margin-left: 100px;"><b>DISEÑO 14</b></span> 	
Diseño con aditivo de goma de llanta triturada fina (20% volumen de arena), basado en el ACI 211.1, utilizando Cemento Tipo GU (ASTM C-1157)	
DATOS GENERALES DE DISEÑO	
F'c (kg/cm <sup>2</sup> )	280
F'cr (kg/cm <sup>2</sup> )	345
REVENIMIENTO (pulg)	3
RELACION A/C	0.49
Método de compactación de especímenes	Varillado
MATERIALES	
AGUA (L/m <sup>3</sup> )	194.43
GRAVA (kg/m <sup>3</sup> )	995.00
ARENA (kg/m <sup>3</sup> )	727.00
GOMA DE LLANTA TRITURADA FINA (kg/m <sup>3</sup> )	62.00
CEMENTO TIPO GU (ASTM C-1157) (kg/m <sup>3</sup> )	412.00
ENSAYOS CONCRETO EN ESTADO FRESCO	
PESO VOLUMETRICO (kg/m <sup>3</sup> )	2,228.69
TEMPERATURA (°C)	26
REVENIMIENTO (pulg)	2
CONTENIDO DE AIRE (%)	3
ENSAYOS CONCRETO ENDURECIDO	
ENSAYOS DESTRUCTIVOS	
RESISTENCIA A LA COMPRESION A LOS 7 DIAS (kg/cm <sup>2</sup> )	76
RESISTENCIA A LA COMPRESION A LOS 28 DIAS (kg/cm <sup>2</sup> )	142
RESISTENCIA A LA FLEXION A LOS 14 DIAS (kg/cm <sup>2</sup> )	26
RESISTENCIA A LA FLEXION A LOS 28 DIAS (kg/cm <sup>2</sup> )	32
% de f'c a los 7 dias	27
% de f'cr a los 7 dias	22
% de f'c a los 28 dias	51
% de f'cr a los 28 dias	41
ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS	
VELOCIDAD DE PULSO ULTRASONICO	
TIEMPO (Micro seg)	77.73
VELOCIDAD (ft/s)	12,865
CALIDAD DEL CONCRETO SEGÚN LESLIE Y CHEESMAN	BUENA
CALIDAD DEL CONCRETO SEGÚN AGRAVAL Y OTROS	BUENA
MODULO DE ELASTICIDAD DINAMICO [Ed] (psi)	5.03E+06
MODULO DE ELASTICIDAD ESTATICO	
MODULO ESTATICO [Ec] (psi)	3.40E+06

Cuadro 6.14 Resumen de Resultados de Ensayos, Diseño 14.



## **6.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS.**

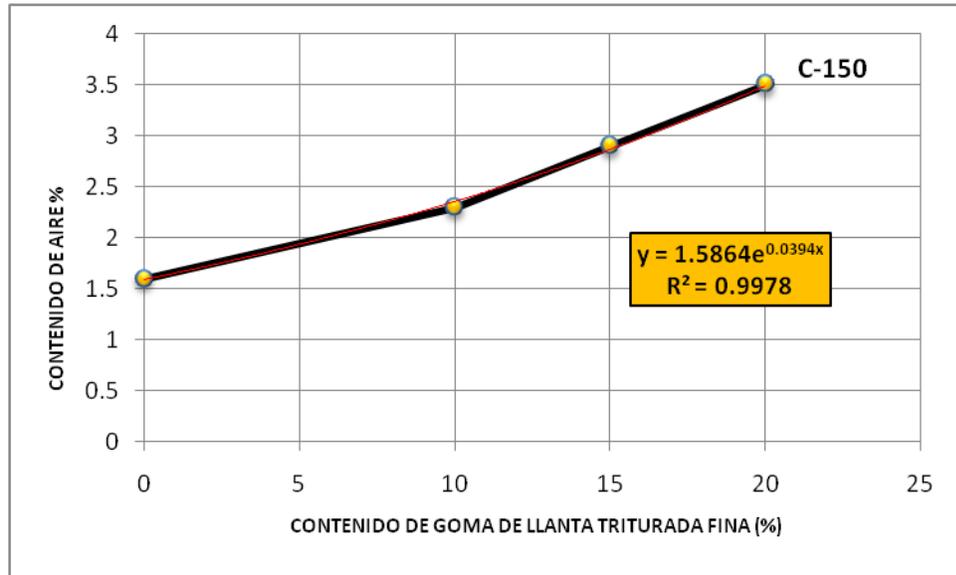
Todas las pruebas realizadas en el laboratorio a los diseños de mezcla en estado fresco y endurecido, son graficadas para ver su tendencia a medida se incrementa la cantidad de goma de llanta y llanta triturada en los diseños, en sustitución y por aditivo.

### **6.3.1 CONTENIDO DE AIRE.**

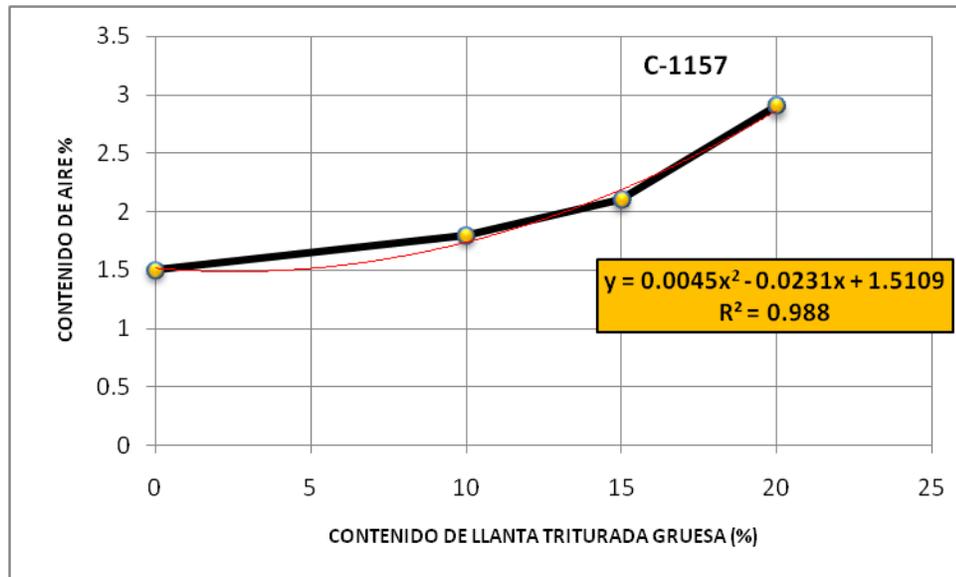
El contenido de aire se obtuvo en cada uno de los diseños de mezcla en estado fresco, y se relaciona con el porcentaje o cantidad de llanta triturada agregada a un diseño, ya sea fina, gruesa o como aditivo. Cabe mencionar que el valor de “cero” porciento de llanta, hace referencia al valor del contenido de aire del diseño de control.

Se puede observar en todos los diseños que el contenido de aire tiende a incrementarse a medida se incorpore mayor cantidad de llanta triturada. En la mayoría de los casos la tendencia es exponencial, y es la goma de llanta triturada fina la que más aire incorpora a la mezcla en comparación con la llanta triturada gruesa, y dentro de estos diseños, es el Cemento Tipo I (ASTM C-150), el que permite la mayor incorporación de aire con la goma de llanta triturada fina. Para el caso de agregar la goma de llanta triturada fina como aditivo, se observa la misma tendencia, a medida que se incorpora más kg de llanta, el contenido de aire se incrementa.

Lo anterior se aprecia claramente en los gráficos de dispersión resultantes de contenido de aire vrs contenido de llanta triturada o goma de llanta triturada que se muestran a continuación. El coeficiente de correlación ( $r$ ) obtenido en las ecuaciones se encuentra en el rango de 0.50-1.00, por lo cual, las tendencias presentan una correlación positiva fuerte. Ver Imagen 6.01.



**Gráfico 6.01** Contenido de Aire vrs Contenido de Goma de Llanta Triturada Fina como Agregado.



**Gráfico 6.02** Contenido de Aire vrs Contenido de Llanta Triturada Gruesa como Agregado.

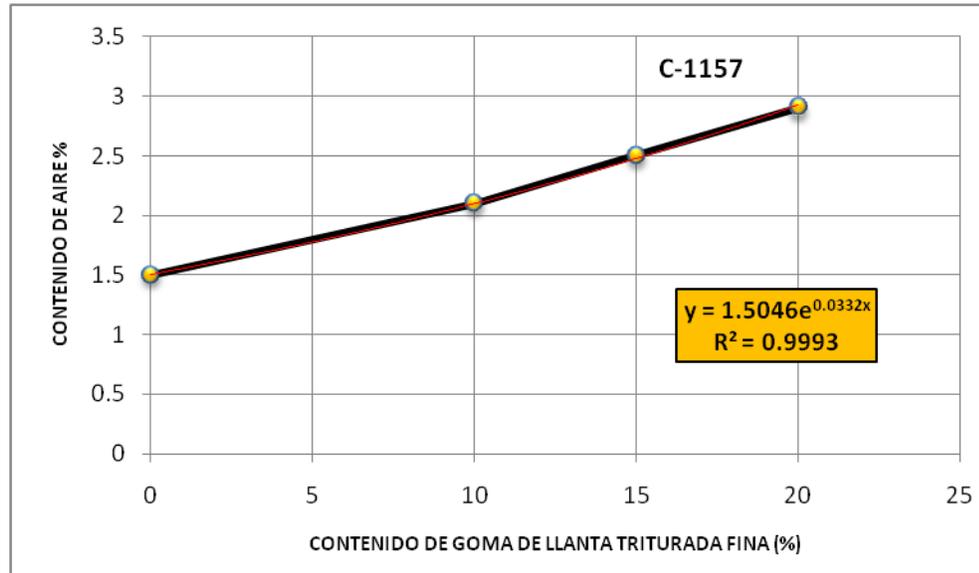


Gráfico 6.03 Contenido de Aire vrs Contenido de Goma de Llantita Triturada Fina como Agregado.

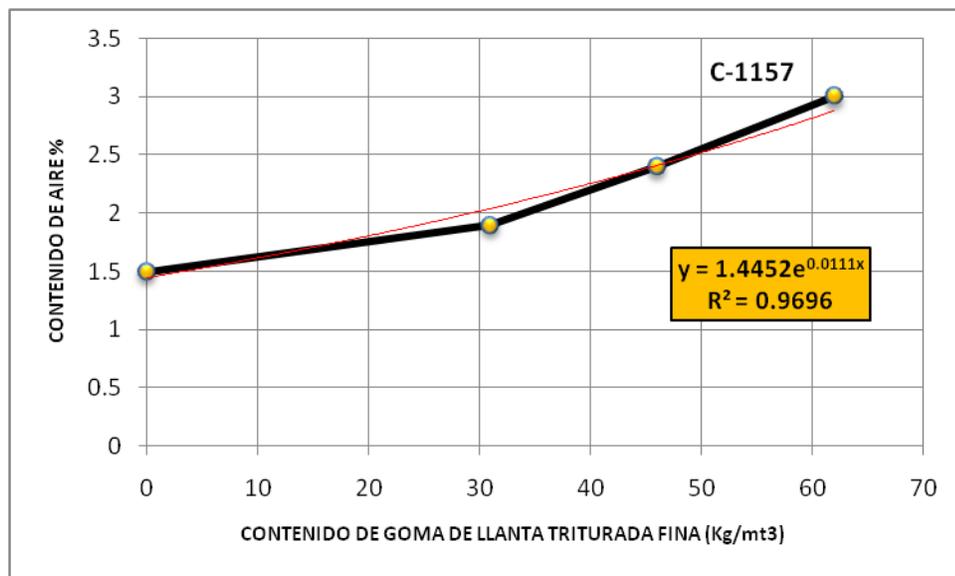


Gráfico 6.04 Contenido de Aire vrs Contenido de Goma de Llantita Triturada Fina como Aditivo.



### **6.3.2 PESO VOLUMÉTRICO.**

El peso volumétrico se obtuvo en cada uno de los diseños de mezcla en estado fresco, y se relaciona con el porcentaje o cantidad de llanta triturada agregada a un diseño, ya sea fina, gruesa o como aditivo. Cabe mencionar que el valor de “cero” porciento de llanta, hace referencia al valor del peso volumétrico del diseño de control.

Se puede observar en todos los diseños que el peso volumétrico tiende a disminuir a medida se incorpora mayor cantidad de llanta triturada. En la mayoría de los casos la tendencia es lineal, y tanto la goma de llanta triturada fina como la llanta triturada gruesa reducen el peso volumétrico de una forma similar, ya que al sustituir los volúmenes de fino y grueso en los mismos porcentajes, se han obtenido valores de peso volumétrico bastante cercanos, y dentro de estos diseños, es el Cemento Tipo I (ASTM C-150), el que da una mejor tendencia en la reducción del peso volumétrico con la goma de llanta triturada fina y la llanta triturada gruesa.

Para el caso de agregar la goma de llanta triturada fina como aditivo, se observa la misma tendencia, a medida que se incorpora más kg de llanta, el peso volumétrico se disminuye casi en los mismos valores que en los diseños por sustitución.

Lo anterior se aprecia claramente en los gráficos de dispersión resultantes de peso volumétrico vrs contenido de llanta triturada o goma de llanta triturada que se muestran a continuación. El coeficiente de correlación ( $r$ ) obtenido en las ecuaciones se encuentra en el rango de 0.50-1.00, por lo cual, las tendencias presentan una correlación positiva fuerte. Ver Imagen 6.01

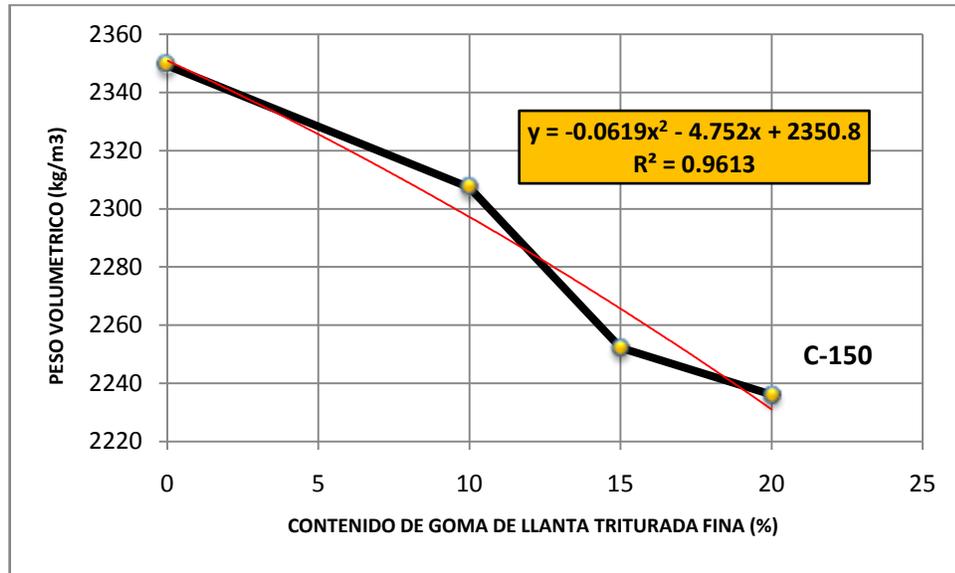


Gráfico 6.05 Peso Volumétrico vrs Contenido de Goma de Llanta Triturada Fina como Agregado.

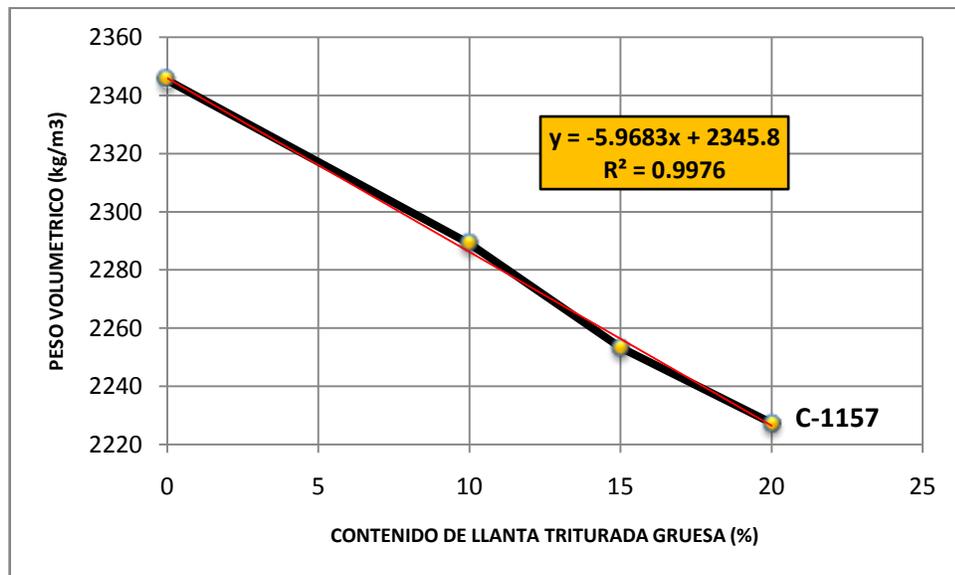


Gráfico 6.06 Peso Volumétrico vrs Contenido de Llanta Triturada Gruesa como Agregado.

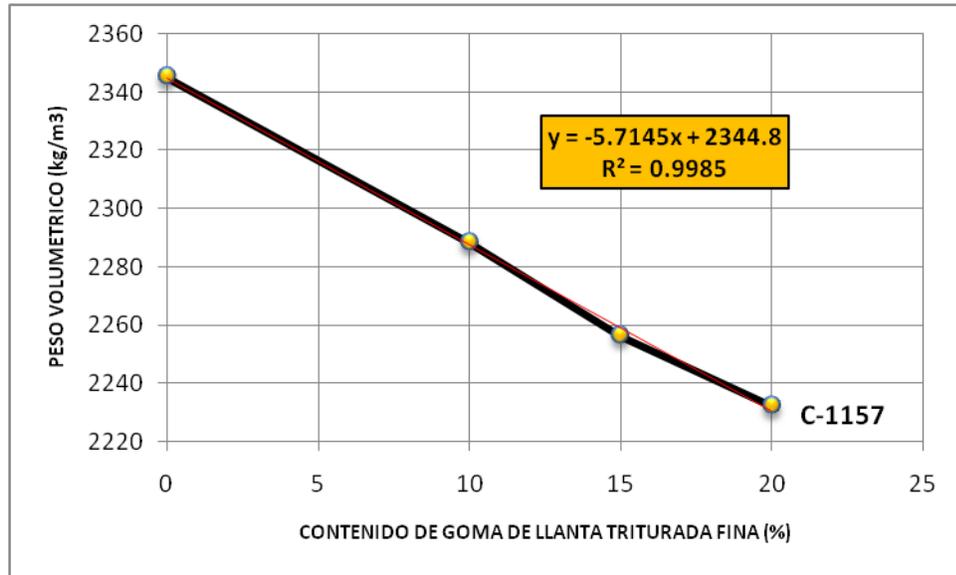


Gráfico 6.07 Peso Volumétrico vs Contenido de Goma de Llanta Triturada Fina como Agregado.

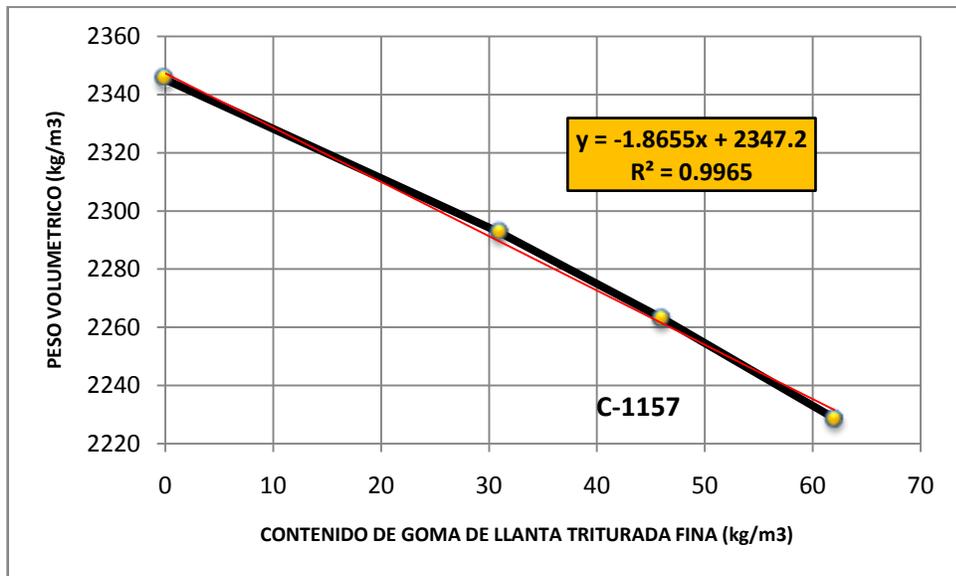
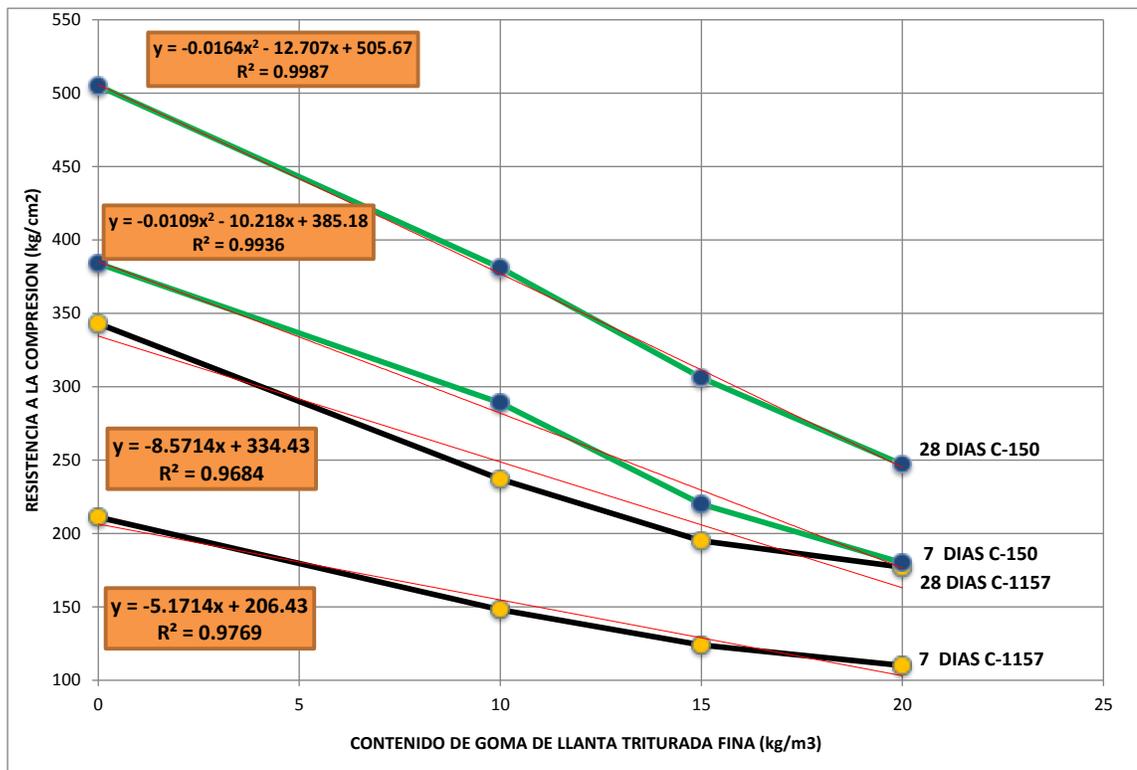


Gráfico 6.08 Peso Volumétrico vs Goma de Llanta Triturada Fina como Aditivo.

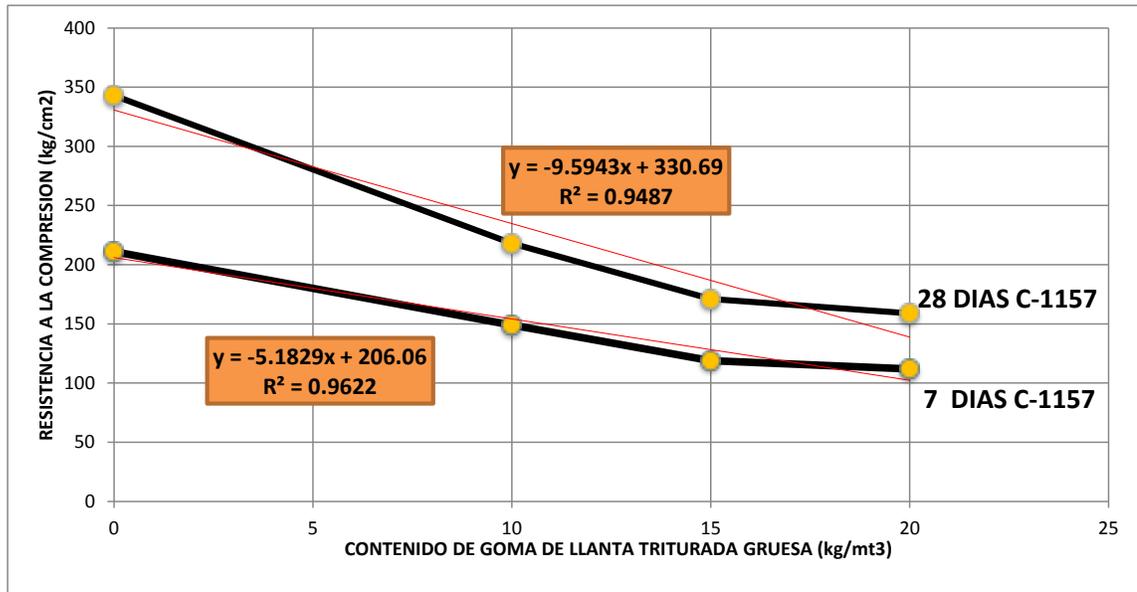


### 6.3.3 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN A 7 Y 28 DÍAS.

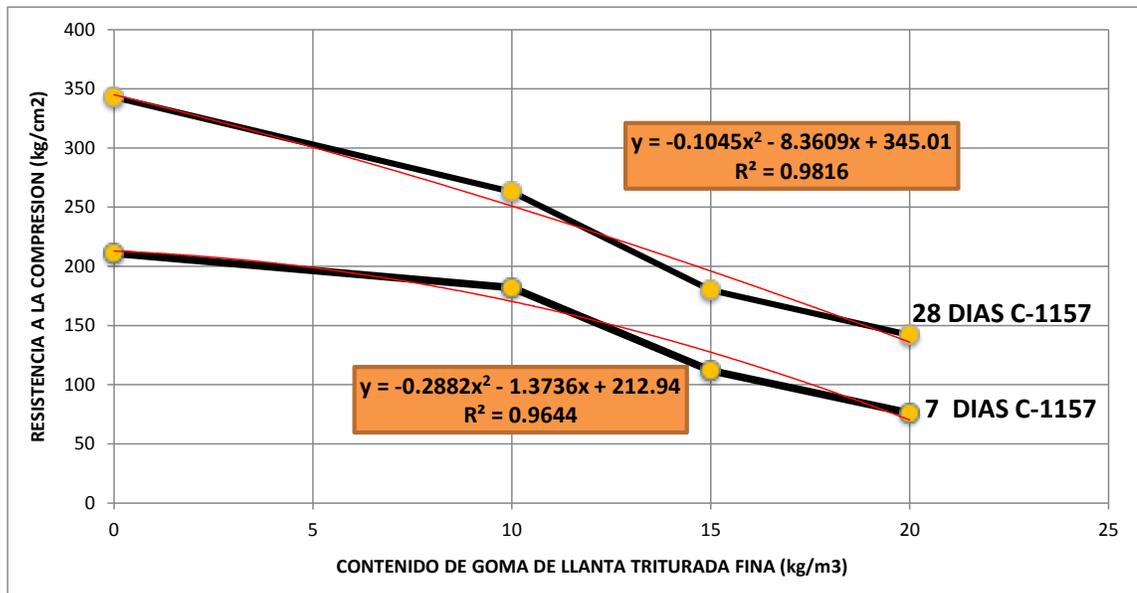
Los ensayos de resistencia a la compresión se realizaron a los especímenes a las edades de 7 y 28 días. Los resultados obtenidos muestran que la resistencia a la compresión disminuye con el aumento del porcentaje de contenido de goma de llanta triturada fina y llanta triturada gruesa en la modalidad de agregado y también en los diseños con incorporación como aditivo. Ver Gráficos 6.9-6.11. El coeficiente de correlación ( $r$ ) obtenido en las ecuaciones se encuentra en el rango de 0.50-1.00, por lo cual, las tendencias presentan una correlación positiva fuerte. Ver Imagen 6.01



**Gráfico 6.09** Resistencia a la Compresión a los 7 y 28 días vs Contenido de Goma de Llantita Triturada Fina como Agregado



**Gráfico 6.10** Resistencia a la Compresión a los 7 y 28 días vs Contenido de Llanta Triturada Guesa como Agregado

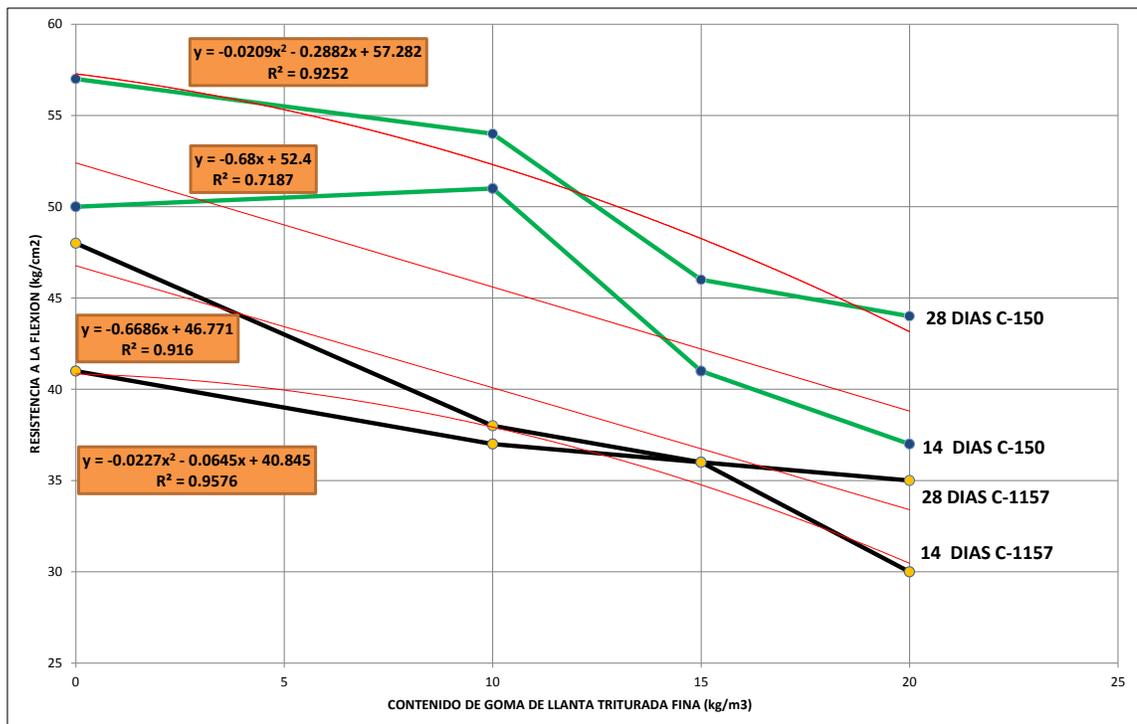


**Gráfico 6.11** Resistencia a la Compresión a los 7 y 28 días vs Contenido de Goma de Llanta Triturada Fina como Aditivo.



### 6.3.4 RESISTENCIA A LA FLEXIÓN A 14 Y 28 DÍAS.

Los ensayos de resistencia a la flexión se realizaron a los especímenes a las edades de 14 y 28 días. Los resultados obtenidos muestran que la resistencia a la flexión presenta leve disminución con el aumento del porcentaje de contenido de goma de llanta triturada fina y llantita triturada gruesa en la modalidad de agregado y también en los diseños con incorporación como aditivo. Ver Gráficos 6.12-6.14. El coeficiente de correlación (r) obtenido en las ecuaciones se encuentra en el rango de 0.50-1.00, por lo cual, las tendencias presentan una correlación positiva fuerte. Ver Imagen 6.01.



**Gráfico 6.12** Resistencia a la Flexión a los 14 y 28 días vs Contenido de Goma de Llantita Triturada Fina como Agregado.

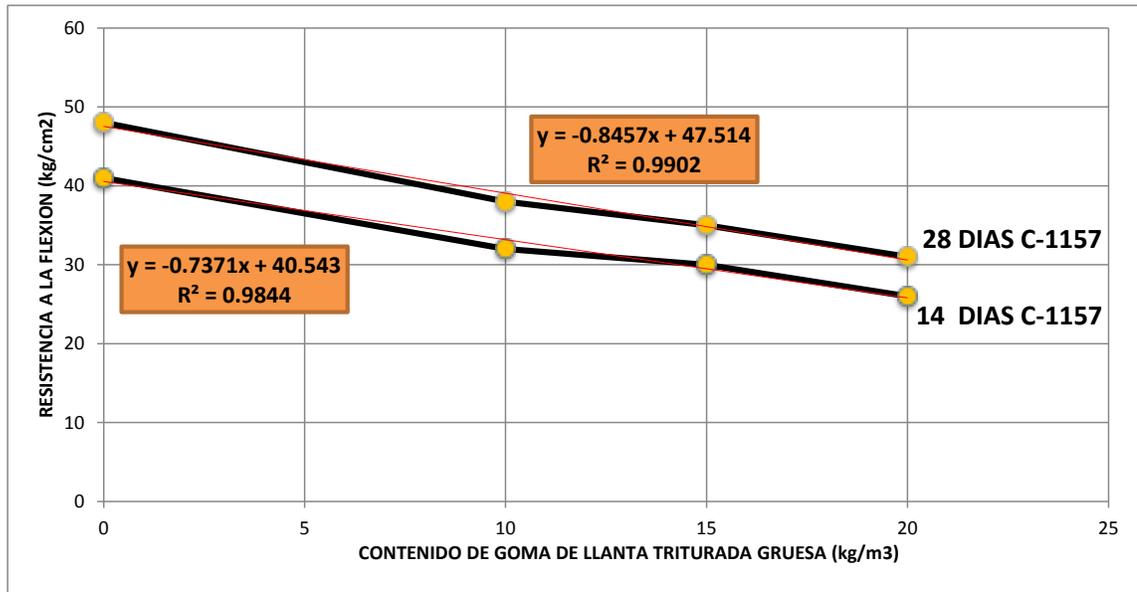


Gráfico 6.13 Resistencia a la Flexión a los 14 y 28 días vs Contenido de Llanta Triturada Gruesa como Agregado.

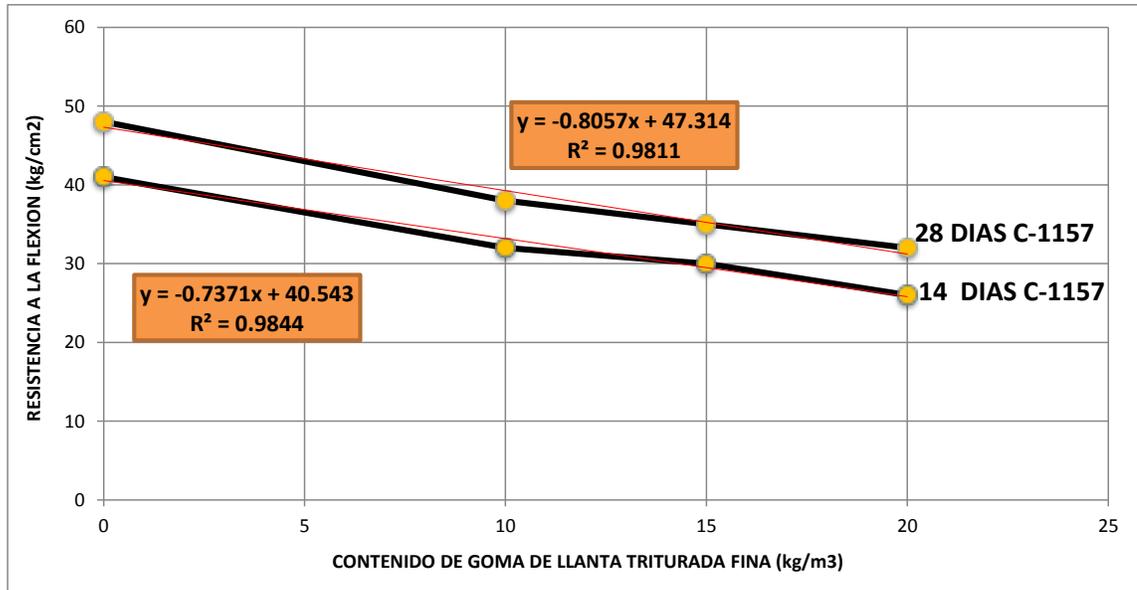


Gráfico 6.14 Resistencia a la Flexión a los 14 y 28 días vs Contenido de Goma de Llanta Triturada Fina como Aditivo.



### **6.3.5 MÓDULO DE ELASTICIDAD DINAMICO ( $E_d$ ).**

El  $E_d$  se obtuvo en cada uno de los diseños de mezcla en estado endurecido a los 28 días, y se relaciona con el porcentaje o cantidad de llanta triturada agregada a un diseño, ya sea fina, gruesa o como aditivo. Cabe mencionar que el valor de “cero” por ciento de llanta, hace referencia al valor del módulo de elasticidad dinámico del diseño de control.

Se puede observar en todos los diseños que el módulo de elasticidad dinámico tiende a disminuir a medida se incorpora mayor cantidad de llanta triturada. En la mayoría de los casos la tendencia es polinómica, y tanto la goma de llanta triturada fina como la llanta triturada gruesa se comportan de una forma similar con el Cemento Tipo GU (ASTM C-1157), no obstante con el Cemento Tipo I (ASTM C-150) la reducción en el módulo de elasticidad dinámico es mayor.

Para el caso de agregar la goma de llanta triturada fina como aditivo, se observa la misma tendencia, a medida que se incorpora más kg de llanta, el  $E_d$  se disminuye casi en la misma proporción que en los diseños por sustitución.

Lo anterior se aprecia claramente en los gráficos de dispersión resultantes de módulo de elasticidad dinámico vrs contenido de llanta triturada o goma de llanta triturada que se muestran a continuación.

El coeficiente de correlación ( $r$ ) obtenido en las ecuaciones se encuentra en el rango de 0.50-1.00, por lo cual, las tendencias presentan una correlación positiva fuerte. Ver Imagen 6.01.

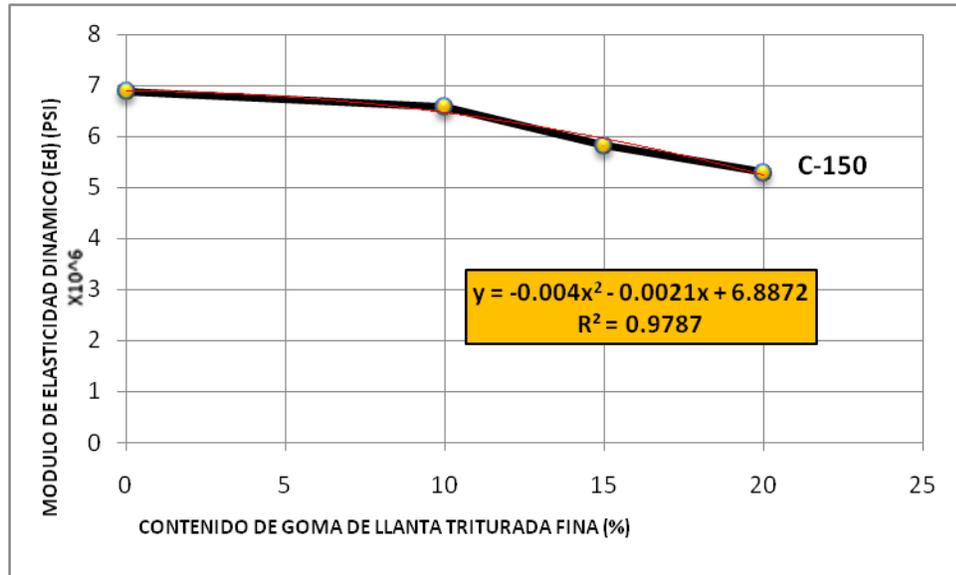


Gráfico 6.15 Módulo de Elasticidad Dinámico vrs Contenido de Goma de Llantita Triturada Fina como Agregado.

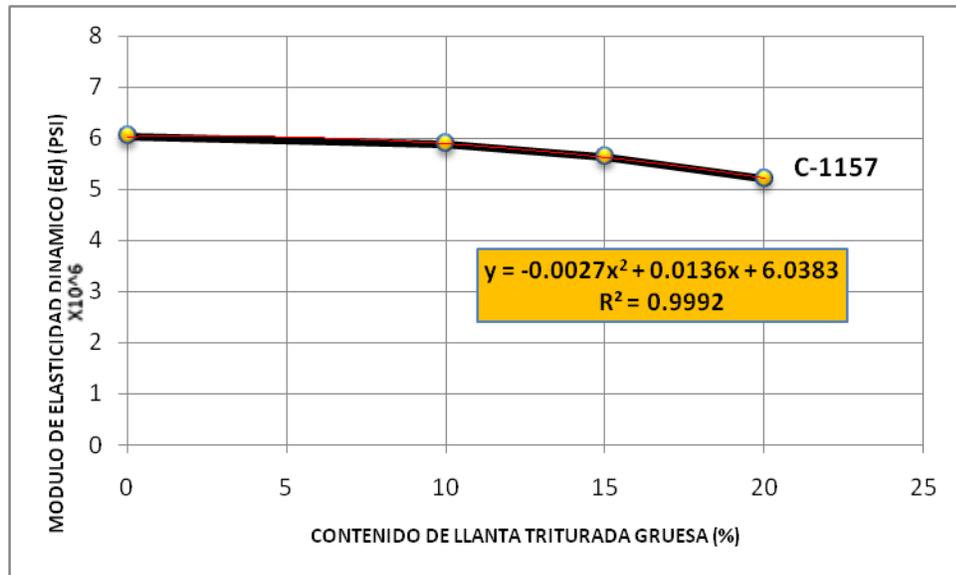


Gráfico 6.16 Módulo de Elasticidad Dinámico vrs Contenido de Llantita Triturada Gruesa como Agregado.

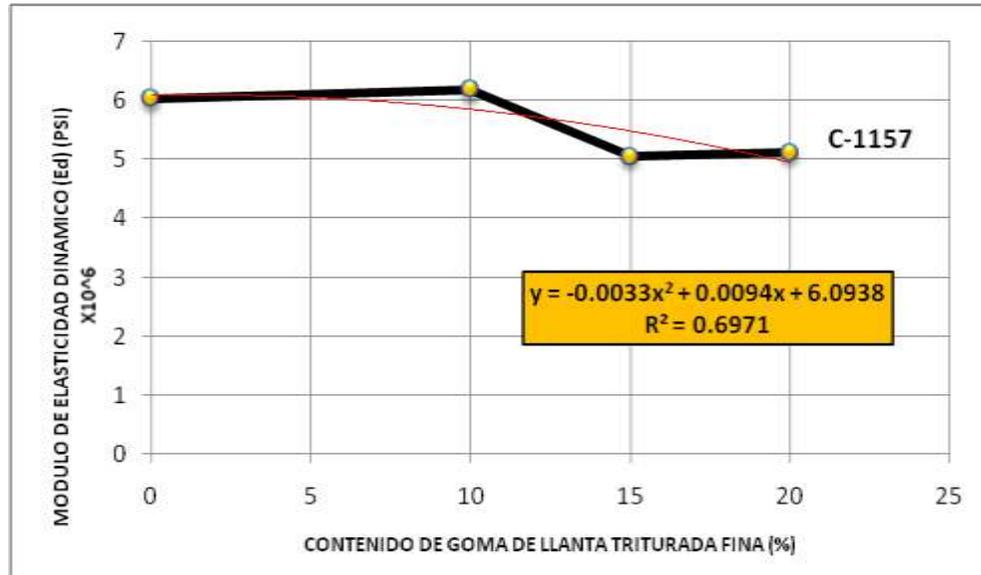


Gráfico 6.17 Módulo de Elasticidad Dinámico vrs Contenido de Goma de Llantita Triturada Fina como Agregado.

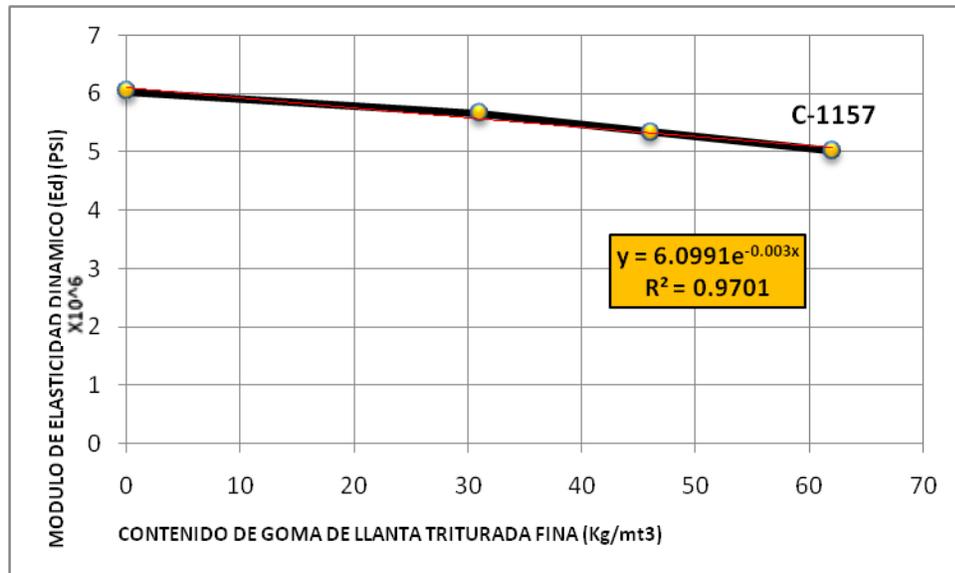


Gráfico 6.18 Módulo de elasticidad dinámico vrs Contenido de Goma de Llantita Triturada Fina como Aditivo.



### **6.3.6 MÓDULO DE ELASTICIDAD ESTÁTICO ( $E_c$ ).**

El  $E_c$  se obtuvo en cada uno de los diseños de mezcla en estado endurecido a los 28 días, y se relaciona con el porcentaje o cantidad de llanta triturada agregada a un diseño, ya sea fina, gruesa o como aditivo. Cabe mencionar que el valor de “cero” porciento de llanta, hace referencia al valor del módulo de elasticidad estático del diseño de control.

Se puede observar en todos los diseños que el módulo de elasticidad estático tiende a disminuir a medida se incorpora mayor cantidad de llanta triturada. En la mayoría de los casos la tendencia es exponencial. Los mejores resultados se obtuvieron con el Cemento Tipo I (ASTM C-150), puesto que el módulo de elasticidad estático no disminuyó considerablemente con la goma de llanta triturada fina, caso contrario sucedió con la llanta triturada gruesa y el Cemento Tipo GU (ASTM C-1157), el cual si tuvo una considerable disminución del módulo de elasticidad estático en comparación con los demás.

Para el caso de agregar la goma de llanta triturada fina como aditivo, se observa la misma tendencia, a medida que se incorpora más kg de llanta, el módulo de elasticidad estático se disminuye un poco más que en los diseños por sustitución.

Lo anterior se aprecia claramente en los gráficos de dispersión resultantes de módulo de elasticidad estático vrs contenido de llanta triturada o goma de llanta triturada que se muestran a continuación.

El coeficiente de correlación ( $r$ ) obtenido en las ecuaciones se encuentra en el rango de 0.50-1.00, por lo cual, las tendencias presentan una correlación positiva fuerte. Ver Imagen 6.01.

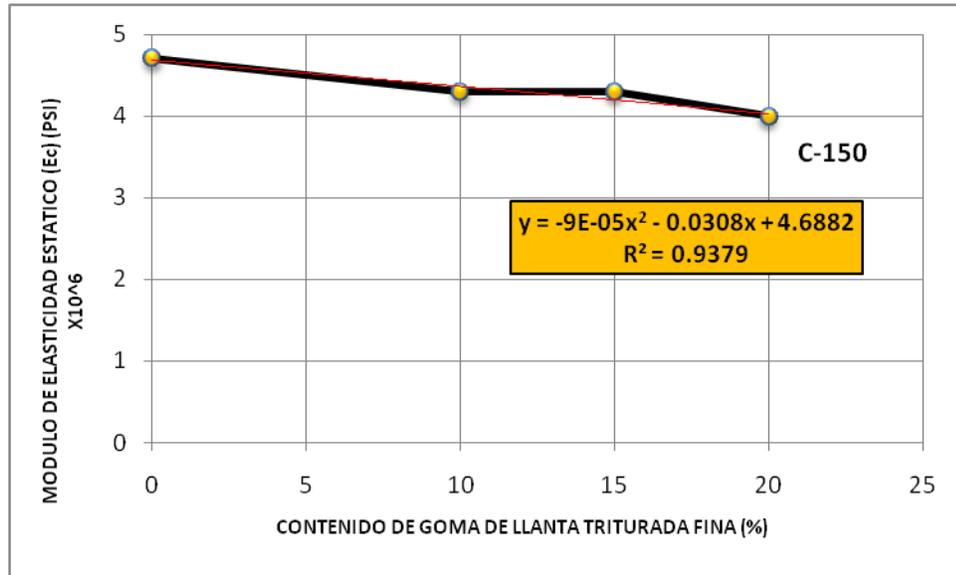


Gráfico 6.19 Módulo de Elasticidad Estático vrs Contenido de Goma de Llantita Triturada Fina como Agregado.

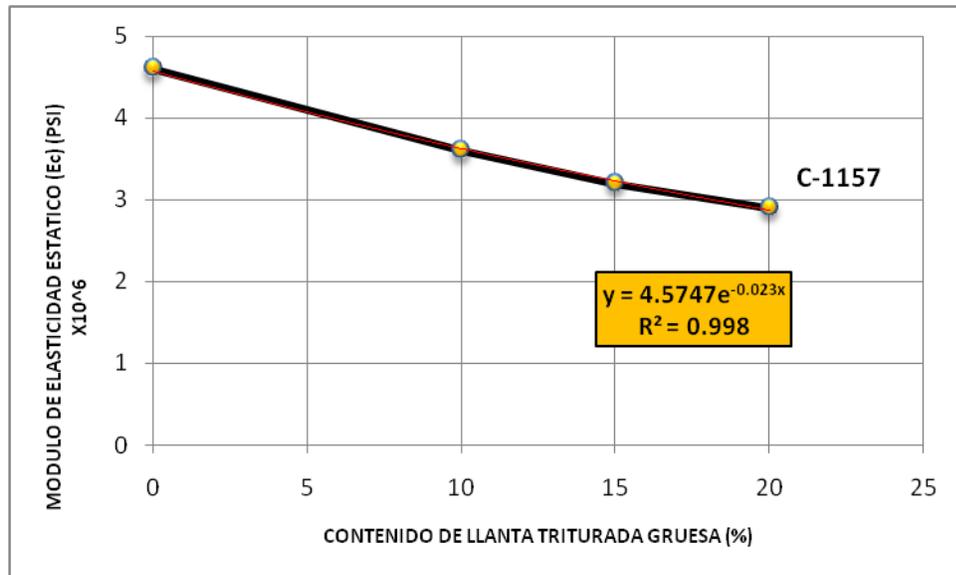


Gráfico 6.20 Módulo de Elasticidad Estático vrs Contenido de Llantita Triturada Gruesa como Agregado.

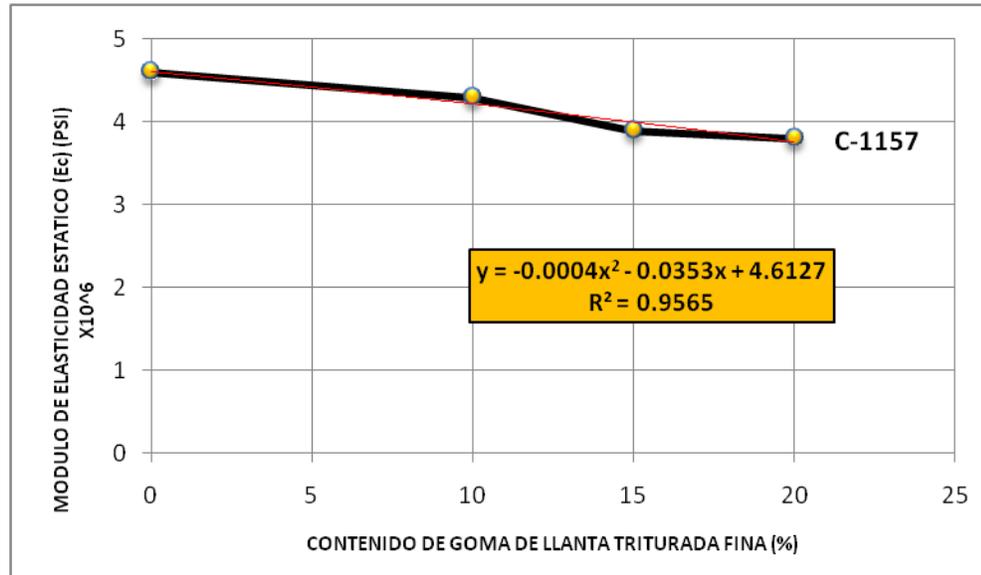


Gráfico 6.21 Módulo de Elasticidad Estático vs Contenido de Goma de Llanta Triturada Fina como Agregado.

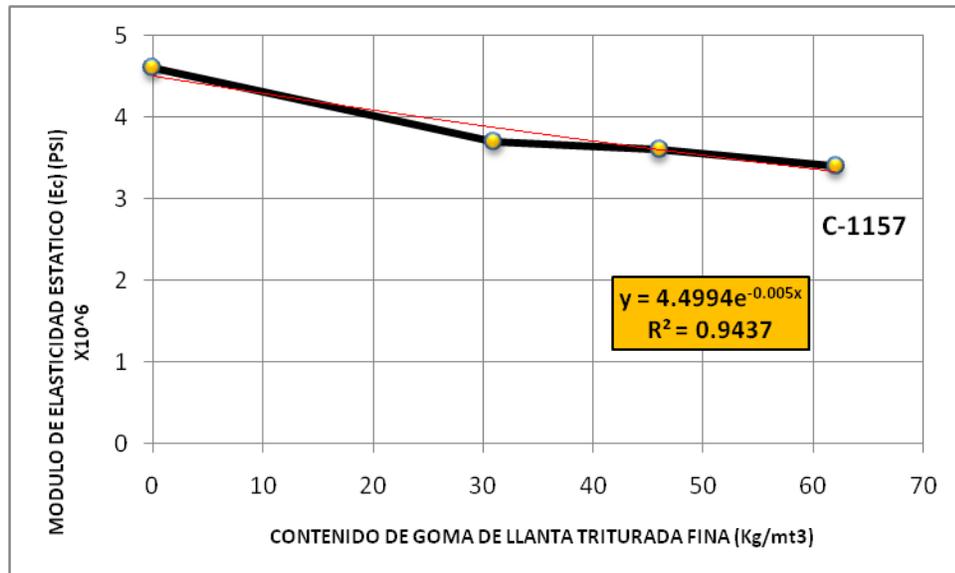


Gráfico 6.22 Módulo de Elasticidad Estático vs Contenido de Goma de Llanta Triturada Fina como Aditivo.

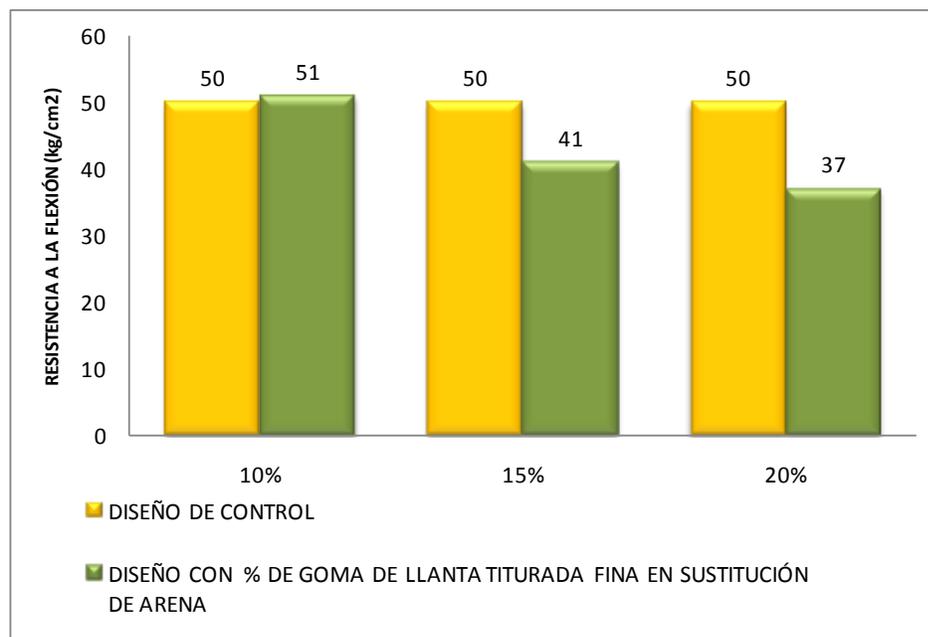


## 6.4 ANÁLISIS COMPARATIVO DE RESULTADOS.

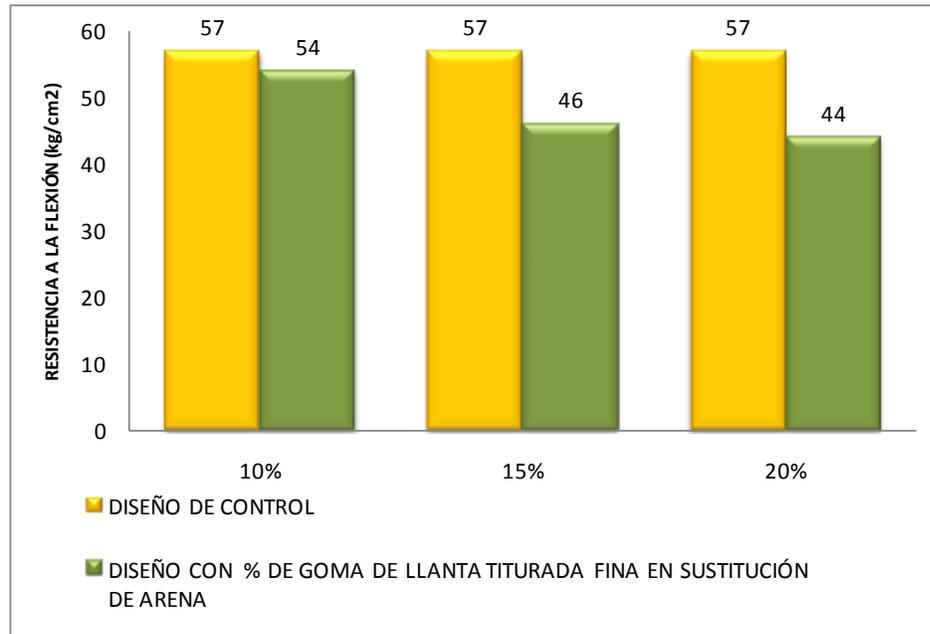
Mediante ensayos de laboratorio, se llevó a cabo una caracterización mecánica de los diferentes concretos fabricados en esta investigación, haciendo un análisis comparativo del comportamiento de este tipo de mezclas a las edades de 7 y 28 días para resistencia a la compresión y 14 y 28 días para resistencia a la flexión.

### 6.4.1 ANÁLISIS COMPARATIVO DE RESISTENCIA A LA FLEXIÓN ENTRE DISEÑO DE CONTROL Y CONCRETO ESPECIAL.

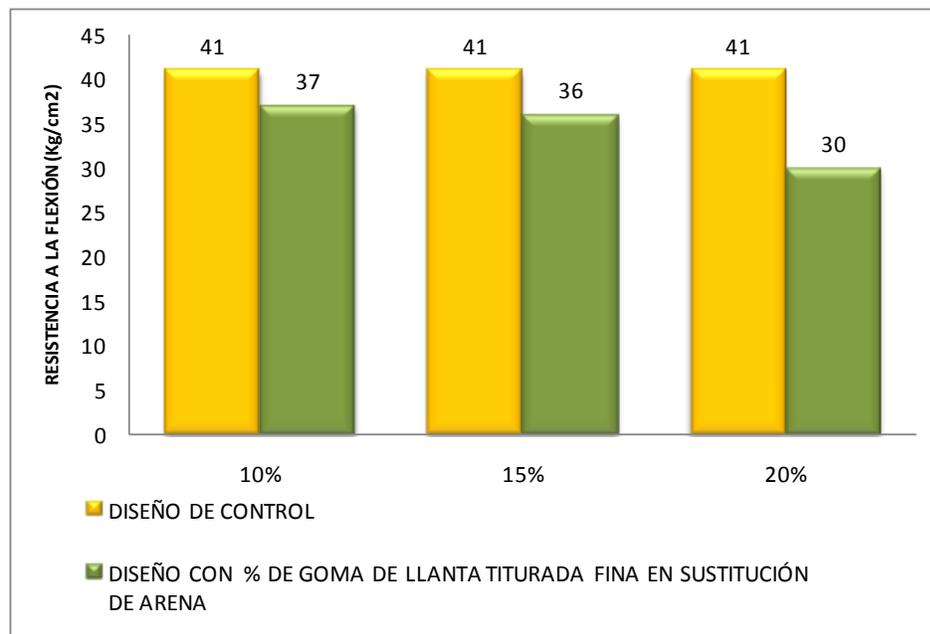
A continuación se contrastan en gráficos de comparación, las resistencias obtenidas en los diseños especiales con contenido de goma llanta triturada fina y llanta triturada gruesa y el diseño de control para cada tipo de cemento.



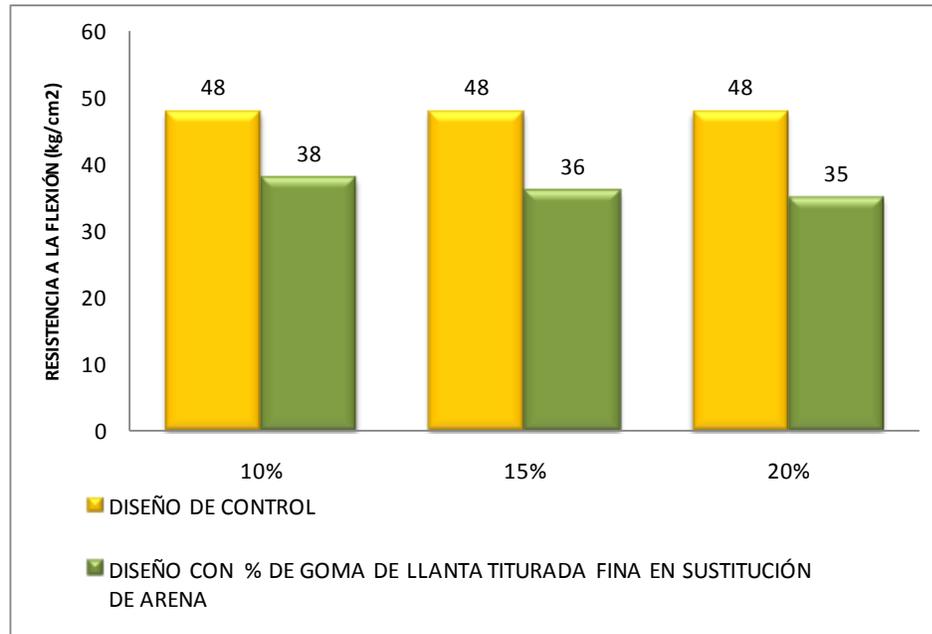
**Gráfico 6.23** Comparación de la Resistencia a la Flexión del Concreto a los 14 días, utilizando Cemento Portland Tipo I, ASTM C-150 y diferentes % de Goma de Llanta Triturada Fina es sustitución de Arena.



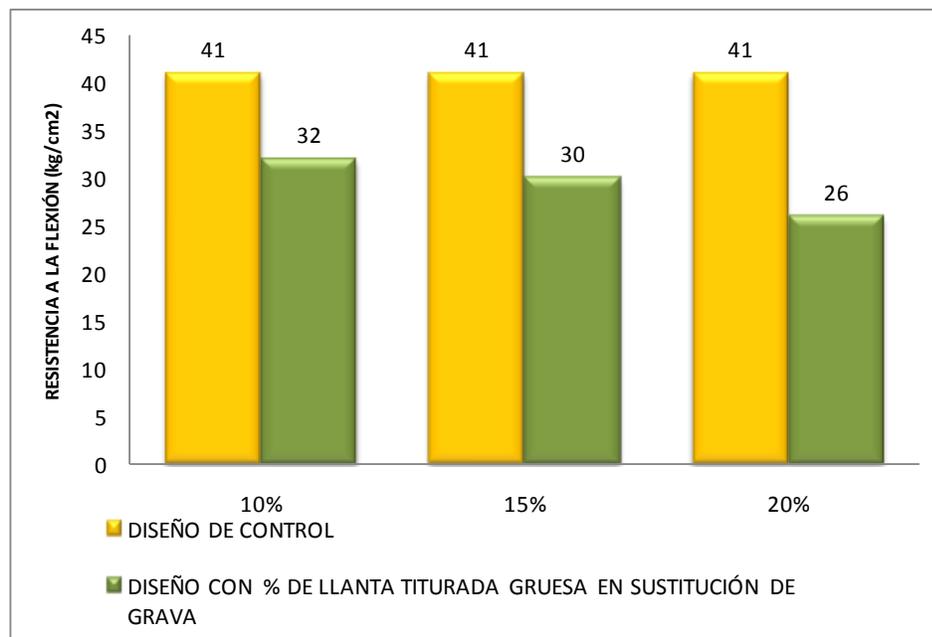
**Gráfico 6.24** Comparación de la Resistencia a la Flexión del Concreto a los 28 días, utilizando Cemento Portland Tipo I, ASTM C-150 y diferentes % de Goma de Llanta Triturada Fina es sustitución de Arena.



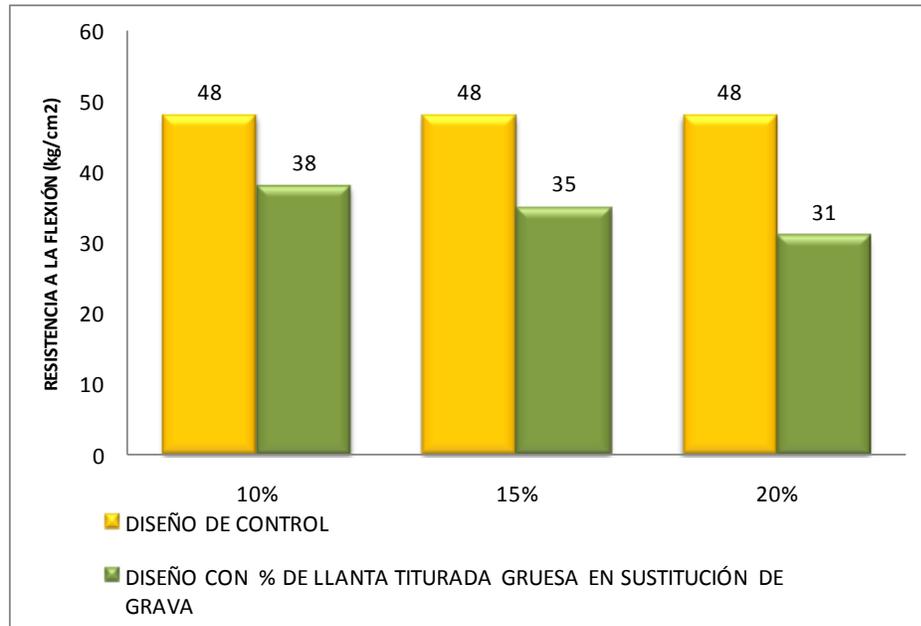
**Gráfico 6.25** Comparación de la Resistencia a la Flexión del Concreto a los 14 días, utilizando Cemento Portland Tipo GU, ASTM C-1157 y diferentes % de Goma de Llanta Triturada Fina es sustitución de Arena.



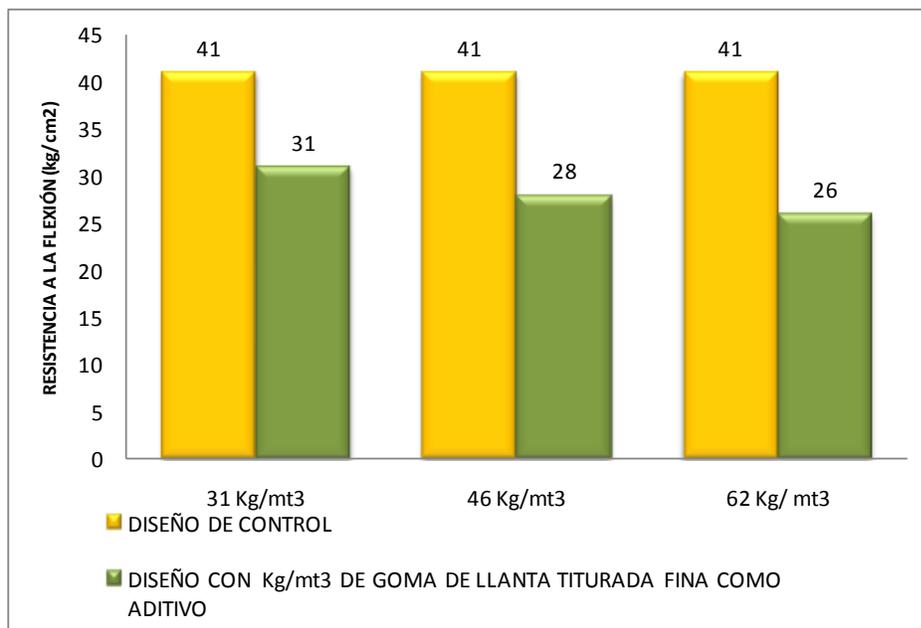
**Gráfico 6.26** Comparación de la Resistencia a la Flexión del Concreto a los 28 días, utilizando Cemento Portland Tipo GU, ASTM C-1157 y diferentes % de Goma de Llantita Triturada Fina es sustitución de Arena.



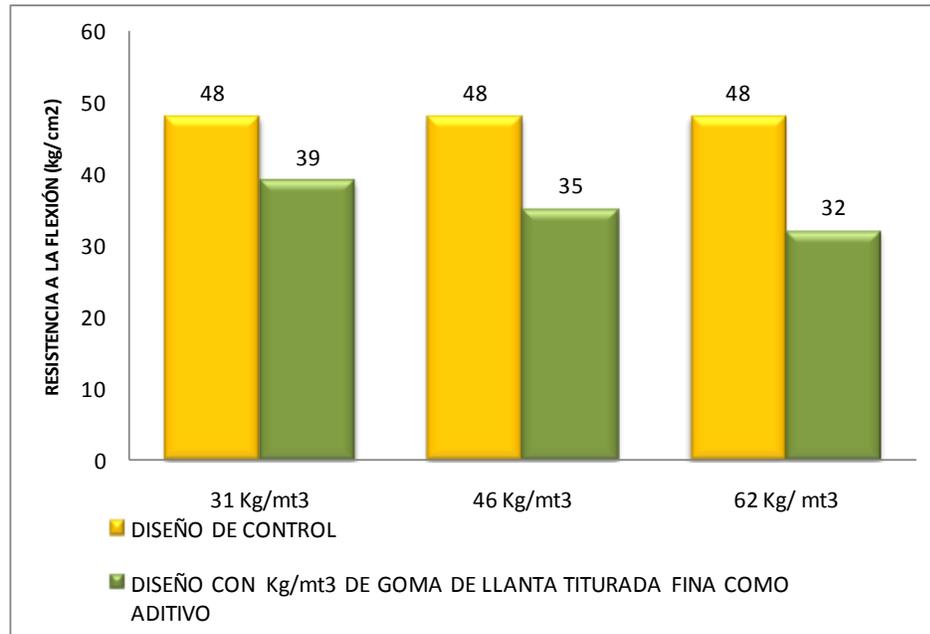
**Gráfico 6.27** Comparación de la Resistencia a la Flexión del Concreto a los 14 días, utilizando Cemento Portland Tipo GU, ASTM C-1157 y diferentes % de Llantita Triturada Gruesa es sustitución de Grava.



**Gráfico 6.28** Comparación de la Resistencia a la Flexión del Concreto a los 28 días, utilizando Cemento Portland Tipo GU, ASTM C-1157 y diferentes % de Llanta Triturada Gruesa es sustitución de Grava.



**Gráfico 6.29** Comparación de la Resistencia a la Flexión del Concreto a los 14 días, utilizando Cemento Portland Tipo GU, ASTM C-1157 y diferentes pesos en Kg de Goma de Llanta Triturada Fina como Aditivo en el Concreto.



**Gráfico 6.30** Comparación de la Resistencia a la Flexión del Concreto a los 28 días, utilizando Cemento Portland Tipo GU, ASTM C-1157 y diferentes pesos en Kg de Goma de Llanta Triturada Fina como Aditivo en el Concreto.

En los Gráficos 6.23 y 6.24 donde se muestra la comparación de la resistencia a la flexión a los 14 y 28 días entre el Diseño de Control y los Diseños con incorporación de porcentajes de goma de llanta triturada fina en sustitución de arena y haciendo uso de Cemento Tipo I (ASTM C-150), se observó que a los 14 días el diseño con 10% de llanta alcanza una mayor resistencia a la flexión que el diseño de control, pero que con el transcurso del tiempo se debilita el crecimiento de resistencia ya que a los 28 días la resistencia de este es menor que la del diseño de control, aunque cabe mencionar que las pérdidas a flexión no son tan considerables como las pérdidas a compresión lo que hace que este tipo de concreto sea recomendable para elementos que soporten cargas a flexión como pavimentos y aceras. La resistencia a la flexión se reduce a mayor incorporación de goma de llanta triturada. Las pérdidas en resistencia oscilan en el rango de 5-22% de la resistencia a flexión obtenida con el diseño de control. Siendo el diseño con 10% de llanta el más aceptable en cuanto a su



comportamiento mecánico, se puede decir que a los 14 días alcanza el 94% de su resistencia a la flexión final, mientras que el concreto convencional alcanza a esa misma cantidad de días el 88% de la resistencia a la flexión final.

En los Gráficos 6.25y 6.26 donde se muestra la comparación de la resistencia a la flexión a los 14 y 28 días entre el Diseño de Control y los Diseños con incorporación de porcentajes de goma de llanta triturada fina en sustitución de arena y haciendo uso de Cemento Tipo GU (ASTM C-1157), se observó que a los 14 días todos los diseños con incorporación de porcentajes de llanta en sustitución de arena presentan una resistencia a la flexión inferior al diseño de control, comportamiento que se mantiene con el pasar del tiempo, mostrando un leve crecimiento de resistencia en algunos diseños, aunque en otros se presente un estancamiento de resistencia, como lo es el caso del concreto con incorporación de 15% de llanta, cabe mencionar que el diseño más aceptable es el con incorporación del 10% de llanta ya que la pérdida de resistencia en cuanto al diseño de control no sobrepasa de 10 kg/cm<sup>2</sup>.

En los Gráficos 6.27y 6.28 donde se muestra la comparación de la resistencia a la flexión a los 14 y 28 días entre el Diseño de Control y los Diseños con incorporación de porcentajes de llanta triturada gruesa en sustitución de grava y haciendo uso de Cemento Tipo GU (ASTM C-1157), se observó que a los 14 días todos los diseños con incorporación de porcentajes de llanta en sustitución de grava presentan una resistencia a la flexión inferior al diseño de control, este comportamiento se mantiene con el pasar del tiempo, pero aun así la pérdida de resistencia a la flexión en el caso del concreto con incorporación del 10% de llanta no es tan significativa, pues alcanza la misma resistencia a la flexión que el concreto con incorporación de 10% de llanta en sustitución de arena, significando esto que este concreto con 10% de llanta gruesa sea más factible económicamente debido al proceso de corte de la llanta.



En los Gráficos 6.29 y 6.30 donde se muestra la comparación de la resistencia a la flexión a los 14 y 28 días entre el Diseño de Control y los diseños con incorporación de 31, 46 y 62 kg de goma de llanta triturada fina como aditivo en el concreto y haciendo uso de Cemento Tipo GU (ASTM C-1157), se observó que la resistencia en los concretos con incorporación de llanta siempre tienden a disminuir con respecto al diseño de control, pero que la tendencia en la resistencia en comparación con el concreto con porcentajes en sustitución tanto de arena como de grava se mantiene y se logran casi los mismos resultados a los 14 y 28 días.

#### 6.4.2 ANÁLISIS COMPARATIVO DE RESISTENCIA A LA FLEXIÓN vs RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN A LOS 28 DIAS.

Se realizó una comparación entre la resistencia a la flexión y la resistencia a la compresión con el propósito de encontrar la ecuación que permita determinar un valor aproximado del MR partiendo de la resistencia  $f'c$  de diseño.

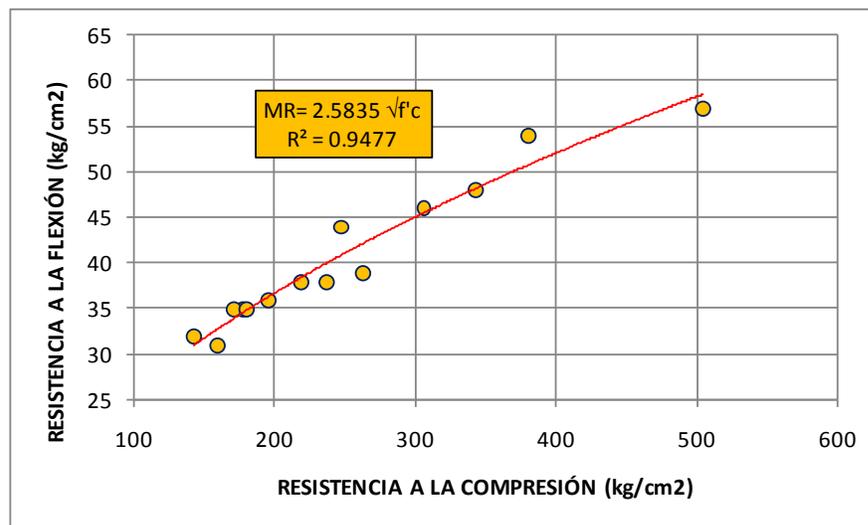


Gráfico 6.31 Resistencia a la Flexión vs Resistencia a la Compresión a los 28 días.



### 6.4.3 ANÁLISIS COMPARATIVO DE MODULO DE ELASTICIDAD ESTÁTICO ( $E_c$ ) vrs RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN A LOS 28 DÍAS.

Se realizó una comparación entre  $E_c$  y  $f'_c$  con el propósito de encontrar la ecuación que permita determinar un valor aproximado de  $E_c$  partiendo de la resistencia  $f'_c$ , ya que a menudo no es conveniente para agencias carreteras desarrollar pruebas de  $E_c$  en probetas de concreto, debido a que este tipo de pruebas resultan ser incómodas, consumidoras de tiempo y caras. En comparación, una prueba de resistencia a la compresión es rápida, conveniente y una medida fácil de la resistencia del concreto hidráulico.

El Gráfico 6.32, muestra el análisis comparativo del módulo de elasticidad estático vrs resistencia a la compresión a los 28 días, utilizando Cemento Tipo I (ASTM C-150) e incorporaciones de goma de llanta triturada fina como agregado en sustitución de arena en porcentajes de 10, 15 y 20% de su volumen.

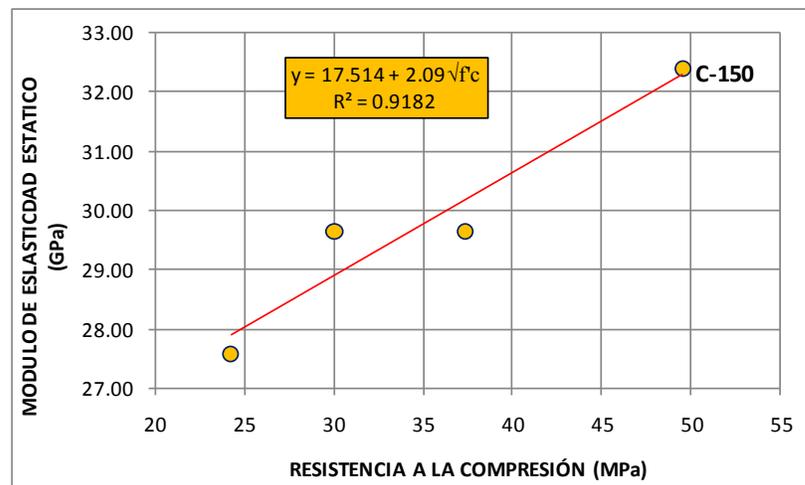


Gráfico 6.32 Módulo de Elasticidad Estático vrs Resistencia a la Compresión a los 28 días.

El Gráfico 6.33, muestra el análisis comparativo del módulo de elasticidad estático vrs resistencia a la compresión a los 28 días, utilizando Cemento Tipo



GU (ASTM C-1157) e incorporaciones de goma de llanta triturada fina como agregado en sustitución de arena en porcentajes de 10, 15 y 20% de su volumen.

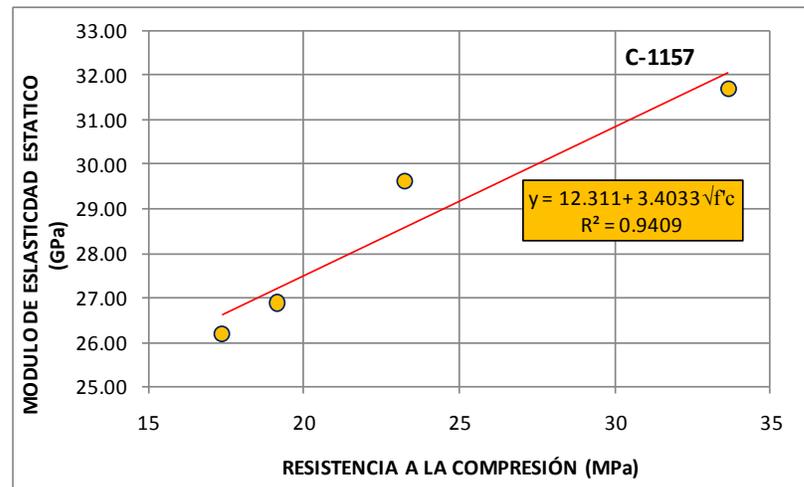


Gráfico 6.33 Módulo de Elasticidad Estático vrs Resistencia a la Compresión a los 28 días.

El Gráfico 6.34 muestra el análisis comparativo del módulo de elasticidad estático vrs resistencia a la compresión a los 28 días, utilizando Cemento Tipo GU (ASTM C-1157) e incorporaciones de llanta triturada gruesa como agregado en sustitución de grava en porcentajes de 10, 15 y 20% de su volumen.

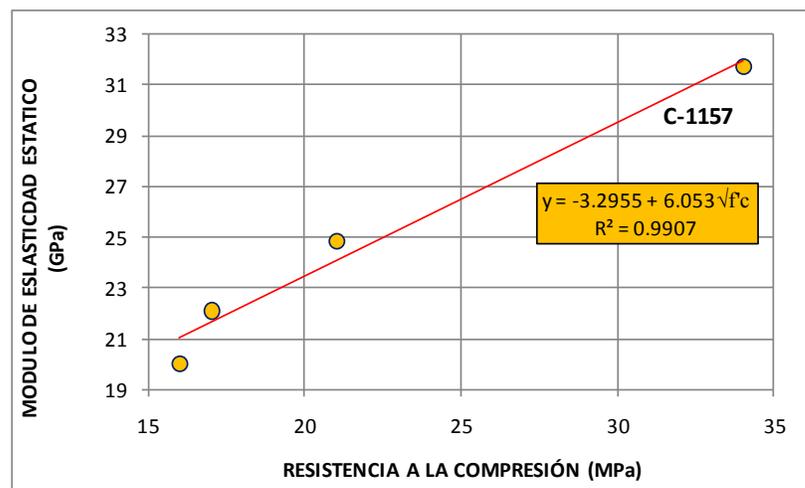


Gráfico 6.34 Módulo de Elasticidad Estático vrs Resistencia a la Compresión a los 28 días.



El Gráfico 6.35, muestra el análisis comparativo del módulo de elasticidad estático vrs resistencia a la compresión a los 28 días, utilizando Cemento Tipo GU (ASTM C-1157) e incorporaciones de goma de llanta triturada fina como aditivo en cantidades de 31, 46 y 62 kg/m<sup>3</sup> de concreto.

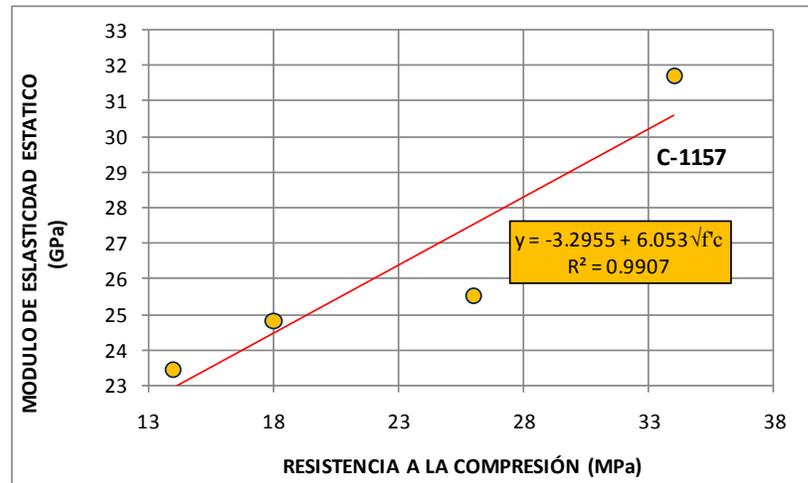


Gráfico 6.35 Módulo de Elasticidad Estático vrs Resistencia a la Compresión a los 28 días.

#### 6.4.4 ANÁLISIS COMPARATIVO DE COSTOS PARA 1 m<sup>3</sup> DE CONCRETO.

Se realizó un análisis de los costos por metro cubico de concreto para los diseños de control utilizando Cemento Tipo I (ASTM C-150) y Cemento Tipo GU (ASTM C-1157) [Diseño 1 y 5] y para los concretos especiales con 10% de contenido de goma de llanta triturada fina en sustitución de arena utilizando Cemento Tipo I (ASTM C-150) y Cemento Tipo GU (ASTM C-1157) [Diseño 2 y 6], 10% de llanta triturada gruesa en sustitución de grava utilizando Cemento Tipo GU (ASTM C-1157) [Diseño 9] y 31 kg/m<sup>3</sup> de goma de llanta triturada fina como aditivo utilizando Cemento Tipo GU (ASTM C-1157) [Diseño 12]. Estos concretos especiales fueron seleccionados para analizar su costo, ya que fueron los que mejor resistencia mecánica presentaron en los resultados de los ensayos. Ver Cuadros 6.15-6.21.



ANÁLISIS DE COSTO PARA 1 m3 DE CONCRETO				
DISEÑO EN ANÁLISIS: DISEÑO 1				
DESCRIPCIÓN: DISEÑO DE CONTROL, CONCRETO CONVENCIONAL				
MATERIALES	UNIDAD	CANTIDAD	C.U (SIN IVA)	SUB TOTAL
CEMENTO TIPO I (ASTM C-150)	Bolsas	9.70	\$6.76	\$65.57
ARENA	m3	0.49	\$16.00	\$7.84
GRAVA	m3	0.67	\$28.00	\$18.76
AGUA	gal	51.20	\$0.01	\$0.51
<b>COSTO TOTAL:</b>				<b>\$92.68</b>

Cuadro 6.15 Análisis de Costo por m3 de Concreto, Diseño 1.

ANÁLISIS DE COSTO PARA 1 m3 DE CONCRETO				
DISEÑO EN ANÁLISIS: DISEÑO 5				
DESCRIPCIÓN: DISEÑO DE CONTROL, CONCRETO CONVENCIONAL				
MATERIALES	UNIDAD	CANTIDAD	C.U (SIN IVA)	SUB TOTAL
CEMENTO TIPO GU (ASTM C-1157)	Bolsas	9.70	\$5.86	\$56.84
ARENA	m3	0.47	\$16.00	\$7.52
GRAVA	m3	0.67	\$28.00	\$18.76
AGUA	gal	51.35	\$0.01	\$0.51
<b>COSTO TOTAL:</b>				<b>\$83.64</b>

Cuadro 6.16 Análisis de Costo por m3 de Concreto, Diseño 5.

ANÁLISIS DE COSTO PARA 1 m3 DE CONCRETO				
DISEÑO EN ANÁLISIS: DISEÑO 2				
DESCRIPCIÓN: CONCRETO CON INCORPORACIÓN DE 10% DE GOMA DE LLANTA TRITURADA FINA COMO AGREGADO EN SUSTITUCIÓN DE ARENA				
MATERIALES	UNIDAD	CANTIDAD	C.U (SIN IVA)	SUB TOTAL
CEMENTO TIPO I (ASTM C-150)	Bolsas	9.70	\$6.76	\$65.57
ARENA	m3	0.44	\$16.00	\$7.04
GOMA DE LLANTA TRITURADA	m3	0.07	\$163.85	\$11.47
GRAVA	m3	0.67	\$28.00	\$18.76
AGUA	gal	51.60	\$0.01	\$0.52
<b>COSTO TOTAL:</b>				<b>\$103.36</b>

Cuadro 6.17 Análisis de Costo por m3 de Concreto, Diseño 2.



ANÁLISIS DE COSTO PARA 1 m <sup>3</sup> DE CONCRETO				
DISEÑO EN ANÁLISIS: DISEÑO 6				
DESCRIPCIÓN: CONCRETO CON INCORPORACIÓN DE 10% DE GOMA DE LLANTA TRITURADA FINA COMO AGREGADO EN SUSTITUCIÓN DE ARENA				
MATERIALES	UNIDAD	CANTIDAD	C.U (SIN IVA)	SUB TOTAL
CEMENTO TIPO GU (ASTM C-1157)	Bolsas	9.70	\$5.86	\$56.84
ARENA	m <sup>3</sup>	0.42	\$16.00	\$6.72
GOMA DE LLANTA TRITURADA	m <sup>3</sup>	0.07	\$163.85	\$11.47
GRAVA	m <sup>3</sup>	0.67	\$28.00	\$18.76
AGUA	gal	51.75	\$0.01	\$0.52
<b>COSTO TOTAL:</b>				<b>\$94.31</b>

Cuadro 6.18 Análisis de Costo por m<sup>3</sup> de Concreto, Diseño 6.

ANÁLISIS DE COSTO PARA 1 m <sup>3</sup> DE CONCRETO				
DISEÑO EN ANÁLISIS: DISEÑO 9				
DESCRIPCIÓN: CONCRETO CON INCORPORACIÓN DE 10% DE LLANTA TRITURADA GRUESA COMO AGREGADO EN SUSTITUCIÓN DE GRAVA				
MATERIALES	UNIDAD	CANTIDAD	C.U (SIN IVA)	SUB TOTAL
CEMENTO TIPO GU (ASTM C-1157)	Bolsas	9.70	\$5.86	\$56.84
ARENA	m <sup>3</sup>	0.47	\$16.00	\$7.52
LLANTA TRITURADA	m <sup>3</sup>	0.08	\$110.00	\$8.80
GRAVA	m <sup>3</sup>	0.60	\$28.00	\$16.80
AGUA	gal	51.10	\$0.01	\$0.51
<b>COSTO TOTAL:</b>				<b>\$90.47</b>

Cuadro 6.19 Análisis de Costo por m<sup>3</sup> de Concreto, Diseño 9.

ANÁLISIS DE COSTO PARA 1 m <sup>3</sup> DE CONCRETO				
DISEÑO EN ANÁLISIS: DISEÑO 12				
DESCRIPCIÓN: CONCRETO CON INCORPORACIÓN DE 31 kg/m <sup>3</sup> DE GOMA DE LLANTA TRITURADA FINA COMO ADITIVO				
MATERIALES	UNIDAD	CANTIDAD	C.U (SIN IVA)	SUB TOTAL
CEMENTO TIPO GU (ASTM C-1157)	Bolsas	9.70	\$5.86	\$56.84
ARENA	m <sup>3</sup>	0.47	\$16.00	\$7.52
GOMA DE LLANTA TRITURADA	kg	31.00	\$0.37	\$11.47
GRAVA	m <sup>3</sup>	0.67	\$28.00	\$18.76
AGUA	gal	51.35	\$0.01	\$0.51
<b>COSTO TOTAL:</b>				<b>\$95.11</b>

Cuadro 6.20 Análisis de Costo por m<sup>3</sup> de Concreto, Diseño 12.



RESUMEN DE COSTOS					
DISEÑO 1	DISEÑO 2	DISEÑO 5	DISEÑO 6	DISEÑO 9	DISEÑO 12
\$92.68	\$103.36	\$83.64	\$94.31	\$90.47	\$95.11

**Cuadro 6.21** Resumen de Costos por m3 de Concreto.

En el Cuadro 6.21 presenta el costo por metro cubico de cada uno de los diseños de mezcla analizados, se observó que el precio de los concretos especiales resulta ser más elevado que el precio del concreto convencional, esta alza en el precio podría verse reducida si en el país existieran plantas trituradoras de llanta.

Basados en la experiencia con este tipo de concretos especiales en laboratorio, se analizó que estos concretos mejoran la trabajabilidad y la plasticidad, además de convertirse en un concreto aligerado, estas características beneficiarían con el aumento de rendimiento a la hora de fabricar, colocar y dar acabado final al concreto en una obra, todo esto, podría significar una disminución en el precio de la mano de obra y de esta forma llegar a compensar el precio entre un concreto convencional y un concreto especial, además de estar eliminando del medio ambiente de 4 a 5 neumáticos fuera de uso por metro cubico de concreto elaborado.



# CAPITULO 7

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

INVESTIGACION SOBRE EL USO  
DE LLANTA TRITURADA COMO  
AGREGADO EN LA FABRICACIÓN  
DE CONCRETO



## **7.1 CONCLUSIONES**

En cuanto a las características físicas de revenimiento y temperatura del concreto con incorporaciones de partículas de llanta, no se observó ningún tipo de alteración o cambio respecto al concreto convencional.

A través de las características resultado obtenidas en los concretos elaborados con Cemento Tipo I (ASTM C-150) y Cemento Tipo GU (ASTM C-1157) e incorporaciones de goma de llanta triturada fina y llanta triturada gruesa en sustitución de arena y grava, se concluye que son los concretos con sustitución del 10% de arena y 10% de grava por partículas de llanta los que menores pérdidas de resistencia mecánica proveen respecto al diseño de control, haciendo factible su uso en la construcción salvadoreña.

Realizando una comparación entre las características resultado de los concretos elaborados con Cemento Tipo GU (ASTM C-1157) e incorporación de goma de llanta triturada como agregado y como aditivo, se observó que es el concreto con partículas de llanta como agregado el que mejor resultado proporciona en cuanto a pérdidas en las características mecánicas respecto al diseño de control.

Entre las características especiales obtenidas en el concreto con incorporación de goma de llanta triturada fina y llanta triturada gruesa en sustitución de arena y grava se encuentra la reducción del peso volumétrico del concreto, el cual es inferior a los  $2,300 \text{ kg/m}^3$ , razón que lo convierte en un concreto aligerado; esto se debe principalmente al aumento en el contenido de aire en la mezcla provocado por la incorporación de las partículas de goma, que además conlleva a la mejoría de la trabajabilidad y la plasticidad de la mezcla que vendrían a beneficiar el rendimiento a la hora de la fabricación, colocación y acabado final del concreto.



Teniendo como principal accionista al Medio Ambiente en esta investigación, al fabricar concreto con incorporaciones de partículas de llanta, se estarían eliminando de cuatro a cinco neumáticos fuera de uso por cada metro cubico de concreto elaborado, factor que en grandes proporciones de fabricación de este tipo de concreto, sería una técnica altamente viable en la eliminación del grave impacto ambiental que provocan estos desechos en nuestro medio.

A través del análisis de costos, se observó que el precio por metro cubico de los diseños de mezcla con incorporación de goma son más elevados que el precio del concreto convencional; este precio podría verse reducido si en el país existiera una planta trituradora de llantas, con ello se beneficiaría el costo por metro cubico de partículas de llanta, el cual estaría libre de tasas de impuestos producto de la importación; esto sumado al aumento en el rendimiento de fabricación, colocación y acabado de este concreto especial, podría llegar a compensar y nivelar o incluso reducir el precio entre el concreto con partículas de llanta y el concreto convencional.



## **7.2 RECOMENDACIONES**

Producto de las características obtenidas de este tipo de concreto especial, resulta evidente utilizarlo en elementos estructurales que principalmente exijan resistencia a la flexión, puesto que es la propiedad mecánica que menos se ve afectada con la incorporación de agregado sintético.

Para la construcción de pavimentos se debe mantener una sustitución máxima del 10% de agregado sintético, ya que según el análisis de los resultados de laboratorio, es a este valor donde menores pérdidas considerables se obtienen respecto a la comparación con la resistencia de un concreto convencional.

Comprobado el funcionamiento de partículas de llanta en el concreto, resulta conveniente utilizarlo en elementos arquitectónicos, debido a que estos no son sometidos a cargas considerables.

Para futuras investigaciones con este tipo de material sintético, es importante adaptar los estudios a elementos de concreto fabricados con Cemento Tipo HE (ASTM C-1157), y así poder enfocar este tipo de concreto especial a pavimentos hidráulicos, ya que es este tipo de cemento el más utilizado en el país para este tipo de construcción.

Debido a los resultados obtenidos en esta investigación, los cuales garantizan la viabilidad técnica de este tipo de concreto, se recomienda a la empresa privada y al Gobierno enfocar sus planes de inversión a programas que conlleven al tratamiento de los neumáticos fuera de uso, mediante la aplicación de técnicas de trituración, que permitan el uso de este material resultante en proyectos de ingeniería e industriales que garanticen la disminución de la contaminación que actualmente genera este tipo de desecho en El Salvador.



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- “Use of Recycled Tire Rubbers in Concrete” Biel, T. D. y Lee, H. (1994), *Infrastructure: New Materials and Methods of Repair*, Third Materials Engineering Conference, San Diego, California.
- “Properties of Crumb Rubber Concrete” Kamil E. Kaloush, George B. Way, Han Zhu. Arizona State University. 2005 Annual Meeting of the Transportation Research Board.
- “Promoting the use of crumb rubber concrete in developing countries” Malek K. Batayneh, Iqbal Marie, Ibrahim Asi. North Carolina State University, 2007.
- “Evaluación de mezclas de arena y goma triturada como relleno de muros de contención”, Hebenly Celis Leguizamo. Universidad de Puerto Rico, 2008.
- Vice Ministerio de transporte, memoria de labores del año 2002.
- “Estudio para la evaluación mercadológica de los desechos industriales en El Salvador”, universidad don Bosco, departamento de medio ambiente.
- “Guía práctica para municipalidades sobre el re-uso de llantas”, Jaime Domingo Carranza y Doreem B. Salazar. 2004.
- “Properties of concrete containing scrap tire rubber-an overview.” Tarun R. Naik. 1991.



- Department Of Civil Engineering and Mechanics College of Engineering and Applied Science, The University of Wisconsin-Milwaukee.
- “Análisis del Desecho Neumáticos Fuera de Uso”, Universidad Don Bosco, Departamento de Medio Ambiente.
- El Diario de Hoy, publicado el 11 de julio del año 2006.
- Resolución MARN N° 11653-887-2010.
- Diario Co Latino, Nacionales, publicado el 8 de noviembre de 2010.
- Sucesos del Medio Ambiente 2010, [www.marn.gob.sv](http://www.marn.gob.sv)
- Diario Digital la pagina.com.sv, publicado el 19 de abril del año 2010.
- Geo Syntec Consultants, 1998a, b, c, d, e.
- Rubber & Plastic News, 1998a, b.
- “Rubberized Portland cement concrete” Journal of Materials in civil engineering, Khatib, Z. K., and Bayomy, F. M. (1999). ASCE, 11(3), 206-213.



- “Durability of Simulated Shredded Rubber Tire in Highly Alkaline Environments”, Huynh, H. y Raghavan, D. (1997). *Advanced Cement Based Materials*, Vol. 6, pp. 138-143.
- Boletín de Ingeniería, Diseño y Control de Mezclas de Concreto, Steven H. Kosmatka, Beatrix Kerkhoff, William C. Panarese, y Jussara Tanesi, Portland Cement Association (PCA), México 2004.
- Equipo Ultrasonido, Ensayos no Destructivos del Hormigón, Tecnología del Hormigón, Grupo de Hormigón, Ingeniería en Construcción-UCV.
- Determinación del Módulo de Elasticidad Estático de los Concretos Premezclados de Mayor Uso, en el Área Metropolitana de la Ciudad de Guatemala, Leonel de Jesús Pineda Samayoa, Guatemala 2009.
- Documento de Trabajo 218, El Coeficiente de Correlación y Correlaciones Espúreas, Erick Lahura, Enero 2003.