

# **EVALUACIÓN DE MEZCLAS DE ARENA Y GOMA TRITURADA COMO RELLENO DE MUROS DE CONTENCIÓN**

Por

Hebenly Celis Leguizamo

Tesis sometida en cumplimiento parcial de los requisitos para el grado de

**MAESTRO EN CIENCIAS**

En

Ingeniería Civil

**UNIVERSIDAD DE PUERTO RICO**

**RECINTO UNIVERSITARIO DE MAYAGÜEZ**

**OCTUBRE 2008**

Aprobado por:

\_\_\_\_\_  
Miguel A. Pando López, Ph.D.  
Presidente, Comité Graduado

\_\_\_\_\_  
Fecha

\_\_\_\_\_  
Felipe J. Acosta Costa, Ph.D.  
Miembro, Comité Graduado

\_\_\_\_\_  
Fecha

\_\_\_\_\_  
Ricardo Ramos Cabeza, Ph.D.  
Miembro, Comité Graduado

\_\_\_\_\_  
Fecha

\_\_\_\_\_  
Jeannette Santos, Ph. D.  
Representante de Estudios Graduados

\_\_\_\_\_  
Fecha

\_\_\_\_\_  
Ismael Pagán Trinidad, MSCE.  
Director, Departamento de Ingeniería Civil

\_\_\_\_\_  
Fecha

## RESUMEN

Esta tesis estudió una alternativa de reciclaje de neumáticos viejos en la forma de neumático triturado como material de relleno en muros de contención. Este material reciclado se considera costo efectivo y tiene ventajas como bajo peso unitario, buenas características de drenaje (para ciertas gradaciones) y beneficios ambientales debido a la reutilización de gran cantidad de este material de desecho. Esta tesis involucró un programa experimental diseñado para evaluar propiedades ingenieriles, de goma triturada y mezclas de goma y arena, requeridas para el diseño a corto y largo plazo de muros de contención. Una contribución importante de este trabajo es la evaluación de la compresibilidad a largo plazo de rellenos que contengan distintos porcentajes de goma triturada. Esta tesis también incluyó la evaluación de las presiones laterales generadas por estos tipos de rellenos en un muro prototipo. Los valores de las presiones medidas se compararon con teorías clásicas de empujes de tierras y se encontró que las teorías clásicas no son adecuadas para predecir presiones laterales de muros con rellenos compuestos por goma triturada.

## **ABSTRACT**

This thesis studied an alternative for recycling old tires in the form of shredded tires used as backfill material for retaining walls. This recycling material is considered cost effective and has advantages such as its low unit weight, good drainage characteristics (for certain gradations), and environmental benefits related to the reuse of large quantities of this waste material. This thesis involved an experimental program designed to evaluate the engineering properties, of crumb rubber and mixtures of crumb rubber with sand, required for the short- and long-term design of retaining walls. An important contribution of this study is the assessment of the long-term compressibility of fill materials containing different percentages of shredded crumb rubber. This thesis also included experimentation with a prototype wall designed to measure lateral pressures generated by this type of backfill materials. The measured lateral pressures were compared with classical earth pressure theories and it was found that classical earth pressure theories were not suitable for prediction of lateral pressures generated by shredded tire backfills.

**A mi familia...**

# AGRADECIMIENTOS

Inicialmente quiero agradecer a las dos instituciones que hicieron posible la iniciación y culminación de mis estudios de maestría, la Universidad de Puerto Rico y la Universidad Industrial de Santander, de Colombia. Mis estudios de maestría fueron iniciados como parte de un acuerdo de colaboración entre estas dos instituciones.

A mi supervisor y presidente de mi comité graduado Dr. Miguel A. Pando López, expreso mi gratitud por aceptar ser mi consejero durante estos años, muchas gracias por la orientación, la motivación, y el aporte de sus ideas durante la realización de esta tesis. Ha sido un proceso duro y exigente donde siento haber salido una mejor profesional y docente.

Agradezco también a los miembros de mi comité graduado los Drs. Felipe J. Acosta Costa y Ricardo Ramos Cabeza, ambos colaboraron grandemente en la revisión y evaluación de este documento.

Expreso mis agradecimientos al profesor Ismael Pagán Trinidad y al Dr. Ricardo López por el apoyo económico brindado durante mis estudios de postgrado. También quiero agradecer el apoyo y licencia que me otorgo mi empleador, la Universidad Industrial de Santander de Colombia.

Muchas gracias a la empresa Rema Inc., la cual suministro el material de goma triturada para la elaboración de esta tesis.

A todo el personal técnico, administrativo, y docente que labora en el departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Puerto Rico, en especial al señor Jaime Ramírez

técnico de laboratorio de geotecnia por sus ideas y su apoyo en múltiples fases experimentales de este trabajo.

Agradezco a todos mis compañeros de postgrado durante mi permanencia en Puerto Rico, en especial a mi compañera de apartamento, Lourdes por su compañía y sus enseñanzas.

También quiero expresar especial reconocimiento para las estudiantes subgraduadas Julieta Gómez y Migdalia Carrión las cuales trabajaron conmigo en algunas fases de esta tesis como becarias dentro del programa PR-LSAMP.

A la representante de Escuela graduada quiero agradecer por aceptar ser parte del comité graduado dentro de esta tesis.

Finalmente agradezco a toda mi familia por el apoyo incondicional que me han brindado, a lo largo de esta etapa de mi vida.

# TABLA DE CONTENIDO

<b>RESUMEN</b> .....	<b>II</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>III</b>
<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	<b>V</b>
<b>TABLA DE CONTENIDO</b> .....	<b>VII</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b> .....	<b>XI</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>XV</b>
<b>CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
1.1 INTRODUCCIÓN .....	1
1.2 JUSTIFICACIÓN .....	2
1.3 OBJETIVOS .....	4
1.4 ORGANIZACIÓN DE LA TESIS .....	5
<b>CAPITULO 2. CONCEPTOS BÁSICOS</b> .....	<b>7</b>
2.1 INTRODUCCIÓN .....	7
2.2 CLASIFICACIÓN DE LA GOMA TRITURADA PROVENIENTE DE NEUMÁTICO RECICLADO .....	7
2.3 TIPOS DE GOMA TRITURADA EN PUERTO RICO .....	8
<b>CAPITULO 3. REVISIÓN DE LITERATURA</b> .....	<b>9</b>
3.1 INTRODUCCIÓN .....	9
3.2 LITERATURA GENERAL SOBRE RECICLAJE DE NEUMÁTICOS CON ÉNFASIS EN APLICACIONES DENTRO DE LA INGENIERÍA CIVIL .....	9
3.3 ESTUDIOS EXPERIMENTALES SOBRE PROPIEDADES MECÁNICAS, HIDRÁULICAS, Y COMPRESIBILIDAD DE LA GOMA TRITURADA Y MEZCLAS CON SUELOS .....	12
3.3.1 <i>Estudios experimentales sobre propiedades mecánicas e hidráulicas</i> .....	13
3.3.2 <i>Estudios experimentales sobre compresibilidad de la goma triturada y mezclas suelo- goma</i> .....	25
3.4 ESTUDIOS EXPERIMENTALES DE CAMPO .....	28
3.4.1 <i>Estudio de Bosscher y otros (1993)</i> .....	30
3.4.2 <i>Estudio de Tweedie y otros (1998)</i> .....	33
3.4.3 <i>Estudio de Humphrey y otros (2000)</i> .....	36

3.4.4	<i>Estudio de Dickson y otros (2001)</i> .....	39
3.4.5	<i>Estudio de Shalaby y Khan (2002)</i> .....	42
3.4.6	<i>Estudio de Baker y otros (2003)</i> .....	43
3.4.7	<i>Estudio de Salgado y otros (2003)</i> .....	44
3.4.8	<i>Estudio Hoppe y Mullen (2004)</i> .....	46
3.4.9	<i>Estudio de Zornberg y otros (2004)</i> .....	48
3.5	ESTUDIOS EXPERIMENTALES Y ANALÍTICOS SOBRE MUROS DE CONTENCIÓN Y RELLENOS ...	51
3.6	ESTUDIOS DE COMBUSTIÓN ESPONTÁNEA .....	55
3.7	RESUMEN .....	55
<b>CAPITULO 4. MATERIALES.....</b>		<b>57</b>
4.1	INTRODUCCIÓN .....	57
4.2	DESCRIPCIÓN DE LOS MATERIALES.....	57
4.2.1	<i>Goma triturada</i> .....	57
4.2.2	<i>Arena No. 1</i> .....	59
4.2.3	<i>Arena No. 2</i> .....	61
4.2.4	<i>Resumen de propiedades índice</i> .....	62
4.3	MEZCLAS DE MATERIALES .....	64
4.3.1	<i>Propiedades índice de mezclas con Arena No. 1</i> .....	67
4.4	ENSAYOS DE PERMEABILIDAD DE MEZCLAS GOMA Y ARENA NO.1 .....	67
4.5	RESISTENCIA AL CORTE DE LOS MATERIALES .....	69
4.6	RESUMEN .....	71
<b>CAPITULO 5. ENSAYOS DE COMPRESIBILIDAD.....</b>		<b>73</b>
5.1	INTRODUCCIÓN .....	73
5.2	PLAN EXPERIMENTAL.....	73
5.2.1	<i>Matriz de ensayos</i> .....	73
5.2.2	<i>Procedimiento de los experimentos</i> .....	77
5.3	RESULTADOS.....	78
5.3.1	<i>Resultados de compresibilidad unidimensional corto plazo</i> .....	78
5.3.2	<i>Resultados de compresibilidad unidimensional a largo plazo</i> .....	83
5.4	ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	96
5.4.1	<i>Descripción del modelo de Norton</i> .....	97
5.4.2	<i>Regresiones usando el modelo de Norton</i> .....	98
5.4.3	<i>Resumen de regresiones usando el modelo de Norton</i> .....	99
5.5	RESUMEN Y CONCLUSIONES .....	100

<b>CAPITULO 6. EXPERIMENTOS USANDO UN MURO PROTOTIPO .....</b>	<b>103</b>
6.1 INTRODUCCIÓN .....	103
6.2 EVALUACIÓN PRELIMINAR DEL PROBLEMA .....	103
6.3 TEORÍAS CLÁSICAS DE EMPUJES DE TIERRA.....	105
6.4 DESCRIPCIÓN DEL MURO PROTOTIPO.....	109
6.5 DESCRIPCIÓN DE LOS MATERIALES.....	111
6.6 EVALUACIÓN FRICCIÓN EN LAS PAREDES DEL PROTOTIPO.....	111
6.7 RESULTADOS DE ENSAYOS DE PROTOTIPO.....	117
6.7.1 <i>Pruebas de validación con Arena No. 2</i> .....	118
6.7.2 <i>Pruebas en Goma triturada</i> .....	123
6.7.3 <i>Pruebas en mezclas</i> .....	127
6.8 DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	130
6.9 RESUMEN Y CONCLUSIONES .....	131
<b>CAPITULO 7. EVALUACIÓN TÉCNICA Y ECONÓMICA DE UN MURO HIPOTÉTICO PARA UN RELLENO DE GOMA TRITURADA.....</b>	<b>135</b>
7.1 INTRODUCCIÓN .....	135
7.2 MATERIALES ESTRUCTURALES Y ESPECIFICACIONES .....	135
7.3 ESQUEMA DEL DISEÑO DE MURO PARA EL MATERIAL GRANULAR CONVENCIONAL.....	136
7.4 ESQUEMA DE DISEÑO DE MURO PARA LA GOMA TRITURADA .....	138
7.5 ESQUEMA DE DISEÑO DE MURO PARA LA MEZCLA 50% GOMA TRITURADA-50% ARENA No. 2. 140	
7.6 DISEÑO GEOTÉCNICO .....	141
7.7 CANTIDADES DE MATERIAL.....	143
7.8 CONCLUSIONES .....	145
<b>CAPITULO 8. RESUMEN, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS .....</b>	<b>147</b>
8.1 RESUMEN.....	147
8.2 CONCLUSIONES .....	148
8.3 RECOMENDACIONES PARA FUTUROS TRABAJOS .....	151
<b>CAPITULO 9. REFERENCIAS.....</b>	<b>152</b>
<b>APÉNDICE A. ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES.....</b>	<b>159</b>
<b>APÉNDICE B. ENSAYOS DE COMPRESIBILIDAD.....</b>	<b>179</b>
<b>APÉNDICE C. MODELAMIENTO DEL MURO DE CONTENCIÓN .....</b>	<b>194</b>

<b>APÉNDICE D. INFORMACIÓN SUPLEMENTARIA SOBRE EL MODELAMIENTO DEL MURO DE CONTENCIÓN .....</b>	<b>219</b>
<b>APÉNDICE E. DISEÑO ESTRUCTURAL MURO DE CONTENCIÓN.....</b>	<b>222</b>

# ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 2- 1 CLASIFICACIÓN DE LA GOMA TRITURADA SEGÚN (ASCE, 2006).....	7
TABLA 2- 2 SUBPRODUCTOS DE NEUMÁTICO TRITURADO PRODUCIDOS POR REMA, INC. ....	8
TABLA 3- 1 EJEMPLOS DE APLICACIONES IDENTIFICADAS POR HUMPHREY (1999) .....	10
TABLA 3- 2 APLICACIONES IDENTIFICADAS POR HYLANDS Y SHULMAN (2003) .....	11
TABLA 3- 3 RESUMEN PROPIEDADES DE RESISTENCIA AL CORTE (BOTERO Y OTROS., 2005).....	12
TABLA 3- 4 ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DEL MURO POR (CECICH Y OTROS, 1996).....	15
TABLA 3- 5 COMPARACIÓN DE COSTOS ENTRE GOMA TRITURADA Y ARENA (CECICH Y OTROS, 1996).....	15
TABLA 3- 6 RESULTADOS ENSAYOS DE COMPRESIÓN EN UNA DIMENSIÓN POR (COLLINS, 1997).....	16
TABLA 3- 7 RESULTADOS ENSAYOS DE COMPRESIÓN TRIAXIAL (COLLINS, 1997).....	16
TABLA 3- 8 REPRESENTACIÓN ESTADÍSTICA DE PROPIEDADES DE GOMA TRITURADA (REDDY Y MARELLA, 2001).....	17
TABLA 3- 9 RESUMEN DE RESULTADOS (ZORNBERG Y OTROS, 2004).....	21
TABLA 3- 10 RESUMEN PARÁMETROS DE RESISTENCIA AL CORTE.....	24
TABLA 3- 11 RESUMEN PARÁMETROS DE PERMEABILIDAD .....	24
TABLA 3- 12 RESUMEN PARÁMETROS MÓDULO TANGENTE INICIAL .....	25
TABLA 3- 13 RESUMEN DE ESTUDIOS EXPERIMENTALES SOBRE COMPRESIBILIDAD DE LA GOMA TRITURADA Y MEZCLAS SUELO-GOMA .....	25
TABLA 3- 14 RESUMEN DE ESTUDIOS EXPERIMENTALES DE CAMPO INVOLUCRANDO GOMA TRITURADA .....	29
TABLA 3- 15 RESUMEN DE ESTUDIOS EXPERIMENTALES Y ANALÍTICOS SOBRE MUROS DE CONTENCIÓN Y RELLENOS.....	52
TABLA 4- 1 RESUMEN PROPIEDADES ÍNDICE DE MATERIALES UTILIZADOS.....	63
TABLA 4- 2 TIPOS DE MEZCLAS DE ARENA-GOMA TRITURADA. ....	65
TABLA 4- 3 RESUMEN PROPIEDADES ÍNDICE DE MEZCLAS DE GOMA Y ARENA No. 1 .....	67
TABLA 4- 4 PERMEABILIDAD DE MEZCLAS DE GOMA Y ARENA No 1.....	68
TABLA 4- 5 RESUMEN PROPIEDADES DE MEZCLAS DE GOMA TRITURADA Y ARENA DE RÍO (No. 1).....	72
TABLA 4- 6 RESUMEN PROPIEDADES DE MEZCLAS DE GOMA TRITURADA Y ARENA UNIFORME (No. 2).....	72
TABLA 5- 1 MATRIZ DE ENSAYOS DE COMPRESIBILIDAD UNIDIMENSIONAL A CORTO PLAZO CON ARENA No.1 .....	74
TABLA 5- 2 MATRIZ ENSAYOS DE COMPRESIBILIDAD UNIDIMENSIONAL A LARGO PLAZO PARA GOMA TRITURADA.....	74

TABLA 5- 3 MATRIZ ENSAYOS DE COMPRESIBILIDAD UNIDIMENSIONAL A LARGO PLAZO PARA MEZCLAS CON ARENA NO. 1 .....	75
TABLA 5- 4 MATRIZ ENSAYOS DE COMPRESIBILIDAD UNIDIMENSIONAL A LARGO PLAZO PARA MEZCLAS CON ARENA NO.2.....	76
TABLA 5- 5 DENSIDADES Y MÓDULOS INICIALES DE LOS ENSAYOS DE COMPRESIÓN UNIDIMENSIONAL A VELOCIDAD LENTA .....	79
TABLA 5- 6 DENSIDAD DE LOS ENSAYOS DE COMPRESIÓN CONFINADA, VELOCIDAD 2 (MM/MIN).....	81
TABLA 5- 7 MÓDULO DE CONFINAMIENTO DE LAS MEZCLAS DE ARENA Y GOMA TRITURADA .....	82
TABLA 5- 8 RESUMEN DEL ENSAYO DE COMPRESIBILIDAD A LARGO PLAZO PARA MEZCLAS DE GOMA-ARENA NO 1 Y ESFUERZO AXIAL APLICADO DE 25 kPA.....	84
TABLA 5- 9 RESUMEN DEL ENSAYO DE COMPRESIBILIDAD A LARGO PLAZO PARA MEZCLAS DE GOMA-ARENA NO 1 Y ESFUERZO AXIAL APLICADO DE 50 kPA.....	85
TABLA 5- 10 RESUMEN DEL ENSAYO DE COMPRESIBILIDAD A LARGO PLAZO PARA MEZCLAS DE GOMA-ARENA NO 1 Y ESFUERZO AXIAL APLICADO DE 100 kPA.....	86
TABLA 5- 11 RESUMEN DEL ENSAYO DE COMPRESIBILIDAD A LARGO PLAZO PARA MEZCLAS DE GOMA-ARENA NO 1 Y ESFUERZO AXIAL APLICADO DE 200 kPA.....	87
TABLA 5- 12 RESUMEN DEL ENSAYO DE COMPRESIBILIDAD A LARGO PLAZO PARA MEZCLAS DE GOMA-ARENA NO 2 Y ESFUERZO AXIAL APLICADO DE 25 kPA.....	90
TABLA 5- 13 RESUMEN DEL ENSAYO DE COMPRESIBILIDAD A LARGO PLAZO PARA MEZCLAS DE GOMA-ARENA NO 2 Y ESFUERZO AXIAL APLICADO DE 50 kPA.....	91
TABLA 5- 14 RESUMEN DEL ENSAYO DE COMPRESIBILIDAD A LARGO PLAZO PARA MEZCLAS DE GOMA-ARENA NO 2 Y ESFUERZO AXIAL APLICADO DE 100 kPA.....	92
TABLA 5- 15 RESUMEN DEL ENSAYO DE COMPRESIBILIDAD A LARGO PLAZO PARA MEZCLAS DE GOMA-ARENA NO 2 Y ESFUERZO AXIAL APLICADO DE 200 kPA.....	93
TABLA 5- 16 RESUMEN DEL ENSAYO DE COMPRESIBILIDAD A LARGO PLAZO CON CONTROL DE TEMPERATURA PARA GOMA TRITURADA Y UN ESFUERZO AXIAL APLICADO DE 50 kPA.....	95
TABLA 5- 17 RESUMEN ANÁLISIS DE NORTON ARENA NO. 1 .....	99
TABLA 5- 18 RESUMEN ANÁLISIS DE NORTON ARENA NO. 2 .....	100
TABLA 6- 1 EMPUJE DE PRESIONES LATERALES SEGÚN RANKINE PARA LOS MATERIALES INVESTIGADOS..	107
TABLA 6- 2 RESUMEN RESULTADOS DE ENSAYOS DE ÁNGULO DE INTERFASE .....	115
TABLA 6- 3 MATRIZ DE ENSAYOS MURO PROTOTIPO .....	117
TABLA 6- 4 RESUMEN DE RESULTADOS DEFINITIVOS DE PRUEBAS CON ARENA NO 2 .....	132
TABLA 6- 5 RESUMEN DE RESULTADOS DEFINITIVOS DE PRUEBAS CON GOMA TRITURADA.....	132
TABLA 6- 6 RESUMEN DE RESULTADOS DEFINITIVOS DE PRUEBAS CON MEZCLA 50% ARENA-50% GOMA TRITURADA.....	132
TABLA 6- 7 COMPARACIÓN DE RESULTADOS CON TEORÍA CLÁSICAS, ARENA NO 2, $\Phi^{\circ}= 32$ .....	133
TABLA 6- 8 COMPARACIÓN DE RESULTADOS CON TEORÍA DE CLÁSICAS, GOMA TRITURADA, $\Phi^{\circ}= 19$ .....	133

TABLA 6- 9 COMPARACIÓN DE RESULTADOS CON TEORÍA DE CLÁSICAS, MEZCLA GOMA-ARENA No. 2, $\Phi=$ 25 .....	134
TABLA 7- 1 ANÁLISIS DE ESTABILIDAD .....	142
TABLA 7- 2 CANTIDADES DE MATERIAL PARA EL MURO CON RELLENO GRANULAR .....	143
TABLA 7- 3 CANTIDADES DE MATERIAL PARA EL MURO CON RELLENO CON GOMA TRITURADA.....	144
TABLA 7- 4 CANTIDADES DE MATERIAL PARA EL MURO CON RELLENO CON 50% GOMA TRITURADA-50% ARENA No 2 .....	144
TABLA A- 1 GRANULOMETRÍA DE LOS MATERIALES ASTM D 422-63 .....	160
TABLA A- 2 ÍNDICE DE DENSIDAD MÍNIMO Y PESO UNITARIO DE LOS SUELOS ASTM D 4254-00, ENSAYO 1 .....	161
TABLA A- 3 ÍNDICE DE DENSIDAD MÍNIMO Y PESO UNITARIO DE LOS SUELOS ASTM D 4254-00, ENSAYO 2 .....	162
TABLA A- 4 ÍNDICE DE DENSIDAD MÍNIMO Y PESO UNITARIO DE LOS SUELOS ASTM D 4254-00, ENSAYO 3 .....	163
TABLA A- 5 ÍNDICE DE DENSIDAD MÍNIMO Y PESO UNITARIO DE LOS SUELOS ASTM D 4254-00, ENSAYO 4 .....	164
TABLA A- 6 ÍNDICE DE DENSIDAD MÍNIMO Y PESO UNITARIO DE LOS SUELOS ASTM D 4254-00, ENSAYO 5 .....	165
TABLA A- 7 ÍNDICE DE DENSIDAD MÁXIMA Y PESO UNITARIO DE LOS SUELOS USANDO UNA TABLA VIBRATORIA ASTM D 4253-00, ENSAYO 1 .....	166
TABLA A- 8 ÍNDICE DE DENSIDAD MÁXIMA Y PESO UNITARIO DE LOS SUELOS USANDO UNA TABLA VIBRATORIA ASTM D 4253-00, ENSAYO 2 .....	167
TABLA A- 9 ÍNDICE DE DENSIDAD MÁXIMA Y PESO UNITARIO DE LOS SUELOS USANDO UNA TABLA VIBRATORIA ASTM D 4253-00, ENSAYO 3 .....	168
TABLA A- 10 ÍNDICE DE DENSIDAD MÁXIMA Y PESO UNITARIO DE LOS SUELOS USANDO UNA TABLA VIBRATORIA ASTM D 4253-00, ENSAYO 4 .....	169
TABLA A- 11 ÍNDICE DE DENSIDAD MÁXIMA Y PESO UNITARIO DE LOS SUELOS USANDO UNA TABLA VIBRATORIA ASTM D 4253-00, ENSAYO 5 .....	170
TABLA A- 12 MÉTODO PARA DETERMINAR LA GRAVEDAD ESPECIFICA DE LOS SÓLIDOS ASTM D 854-02	171
TABLA A- 13 MÉTODO PARA DETERMINAR LA GRAVEDAD ESPECIFICA DE LOS SÓLIDOS ASTM D 854-02, CONTINUACIÓN .....	172
TABLA A- 14 ENSAYO DE PERMEABILIDAD MÉTODO DE LA CABEZA CONSTANTE ASTM D 2434 .....	173
TABLA C- 1 MEDICIÓN DEL ÁNGULO DE INTERFASE ( $\Delta$ ) ENTRE LA ARENA Y EL PLEXIGLÁS, MÉTODO DE FANG, ET AL (2003).....	197

TABLA C- 2 MEDICIÓN DEL ÁNGULO DE INTERFASE ( $\Delta$ ) ENTRE LA ARENA Y EL PLÁSTICO, MÉTODO DE FANG, ET AL (2003).....	200
TABLA C- 3 MEDICIÓN DEL ÁNGULO DE INTERFASE ( $\Delta$ ) ENTRE LA GOMA TRITURADA Y EL PLEXIGLÁS, MÉTODO DE FANG, ET AL (2003) .....	203
TABLA C- 4 MEDICIÓN DEL ÁNGULO DE INTERFASE ( $\Delta$ ) ENTRE LA GOMA TRITURADA Y EL PLÁSTICO, MÉTODO DE FANG, ET AL (2003) .....	206
TABLA C- 5 CÁLCULO DE LA FUERZA DE FRICCIÓN GENERADA ENTRE LA ARENA DE OTTAWA Y LAS PAREDES DEL PLEXIGLÁS CUBIERTAS CON PLÁSTICO, EN EL ENSAYO ACTIVO.....	210
TABLA C- 6 CORRECCIÓN POR FRICCIÓN PARA LA ARENA NO 2, ENSAYO ACTIVO .....	211
TABLA C- 7 CÁLCULO DE LA FUERZA DE FRICCIÓN GENERADA ENTRE LA ARENA DE OTTAWA Y LAS PAREDES DEL PLEXIGLÁS CUBIERTAS CON PLÁSTICO, EN EL ENSAYO PASIVO. ....	212
TABLA C- 8 CORRECCIÓN POR FRICCIÓN PARA LA ARENA NO 2, ENSAYO PASIVO .....	213
TABLA C- 9 CÁLCULO DE LA FUERZA DE FRICCIÓN GENERADA ENTRE LA GOMA TRITURADA Y LAS PAREDES DEL PLEXIGLÁS CUBIERTAS CON PLÁSTICO, EN EL ENSAYO ACTIVO.....	214
TABLA C- 10 CORRECCIÓN POR FRICCIÓN PARA LA GOMA TRITURADA, ENSAYO ACTIVO .....	215
TABLA C- 11 CÁLCULO DE LA FUERZA DE FRICCIÓN GENERADA ENTRE LA GOMA TRITURADA Y LAS PAREDES DEL PLEXIGLÁS CUBIERTAS CON PLÁSTICO, EN EL ENSAYO PASIVO. ....	216
TABLA C- 12 CORRECCIÓN POR FRICCIÓN PARA LA GOMA TRITURADA, ENSAYO PASIVO.....	217
TABLA C- 13 CORRECCIÓN POR FRICCIÓN PARA LA MEZCLA 50% GOMA TRITURADA -50% ARENA NO 2, ENSAYO ACTIVO .....	218
TABLA C- 14 CORRECCIÓN POR FRICCIÓN PARA LA MEZCLA 50% GOMA TRITURADA -50% ARENA NO 2, ENSAYO PASIVO .....	218

# ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 3- 1 DISEÑO ESTRUCTURAL DEL MURO DE ALTURA 3 METROS (10 PIES) (CECICH Y OTROS, 1996) ..	14
FIGURA 3- 2 RELACIÓN ENTRE MÓDULO TANGENTE Y PRESIÓN DE CONFINAMIENTO DE GOMA TRITURADA DEL ENSAYO COMPRESIÓN TRIAXIAL (YANG, LOHNES Y KJARTANSON, 2002) .....	19
FIGURA 3- 3 RELACIÓN ENTRE ESFUERZO PRINCIPAL MAYOR Y ESFUERZO PRINCIPAL MENOR PARA GOMA TRITURADA DEL ENSAYO COMPRESIÓN TRIAXIAL (YOUWAI Y BERGADO, 2003) .....	20
FIGURA 3- 4 VARIACIÓN DEL ÁNGULO DE FRICCIÓN INTERNO CON EL CONTENIDO DE GOMA PARA $\gamma=16.8$ kN/M <sup>3</sup> (GHAZAVI Y SAKI, 2005).....	22
FIGURA 3- 5 VARIACIÓN DEL ÁNGULO DE FRICCIÓN INTERNO CON LA RELACIÓN DE FORMA PARA UN ANCHO DE 2 CM DE GOMA Y $\gamma=16.8$ kN/M <sup>3</sup> (GHAZAVI Y SAKI, 2005). .....	23
FIGURA 3- 6 GEOMETRÍA DEL TERRAPLÉN DE ENSAYO (BOSSCHER Y OTROS, 1993) .....	30
FIGURA 3- 7 LOCALIZACIÓN DE LOS PUNTOS SUPERFICIALES DONDE SE MIDIERON ASENTAMIENTOS.....	31
FIGURA 3- 8 ASENTAMIENTOS DE CADA SECCIÓN (BOSSCHER Y OTROS, 1993).....	31
FIGURA 3- 9 SECCIONES ESTUDIADAS DEL TERRAPLÉN (BOSSCHER Y OTROS, 1993).....	32
FIGURA 3- 10 PANEL CENTRAL DEL MURO: (A) PERFIL (B) SECCIÓN TRANSVERSAL (TWEEDIE Y OTROS, 1998) .....	34
FIGURA 3- 11 DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS HORIZONTALES EN CONDICIONES ACTIVAS DE LA GOMA EN EL MURO (TWEEDIE Y OTROS, 1998) .....	35
FIGURA 3- 12 SECCIÓN TRANSVERSAL DEL RELLENO CON TIRE SHRED EN NORTH ABUTMENT. ....	37
FIGURA 3- 13 ASENTAMIENTOS DESPUÉS DE CONSTRUCCIÓN EN RELLENO CON TIRE SHRED EN NORTH ABUTMENT (HUMPHREY Y OTROS, 2000).....	38
FIGURA 3- 14 SECCIÓN TRANSVERSAL DEL TERRAPLÉN PARA PÓRTLAND JETPORT INTERCHANGE.....	39
FIGURA 3- 15 SECCIÓN TRANSVERSAL DEL TERRAPLÉN (DICKSON Y OTROS 2001).....	40
FIGURA 3- 16 DEFORMACIÓN UNITARIA EN EL RELLENO (DICKSON Y OTROS 2001).....	41
FIGURA 3- 17 ASENTAMIENTOS DESPUÉS DE LA CONSTRUCCIÓN (DICKSON Y OTROS 2001) .....	41
FIGURA 3- 18 CONSTRUCCIÓN DE RELLENO DE BAJO PESO CON NEUMÁTICO TRITURADO, CARRETERA US 101 .....	43
FIGURA 3- 19 COMBUSTIÓN ESPONTÁNEA EN RELLENO CON GOMA, CARRETERA SR 100 ILWACO, WASHINGTON. (FOTO DE BAKER Y OTROS, 2003) .....	44
FIGURA 3- 20 GEOMETRÍA E INSTRUMENTACIÓN DEL TERRAPLÉN (SALGADO Y OTROS, 2003) .....	45
FIGURA 3- 21 ASENTAMIENTOS DEL TERRAPLÉN CON EL TRAFICO (SALGADO Y OTROS, 2003).....	46
FIGURA 3- 22 GEOMETRÍA DEL TERRAPLÉN (HOPPE Y MULLEN, 2004).....	47
FIGURA 3- 23 INSTRUMENTACIÓN DEL TERRAPLÉN (HOPPE Y MULLEN, 2004) .....	47

FIGURA 3- 24 CARACTERÍSTICAS DE LAS SECCIONES TRANSVERSALES DE LOS PROTOTIPOS. (ZORNBERG Y OTROS, 2004).....	49
FIGURA 3- 25 INSTRUMENTACIÓN DE LAS SECCIONES ENSAYADAS (ZORNBERG Y OTROS, 2004).....	50
FIGURA 3- 26 ASENTAMIENTOS DE CADA SECCIÓN DESPUÉS DE LA CONSTRUCCIÓN (ZORNBERG Y OTROS, 2004).....	51
FIGURA 3- 27 DIAGRAMA DE LA MÁQUINA DE ENSAYO PARA MEDIR PRESIONES DE TIERRA (TERZAGHI, 1932) .....	54
FIGURA 4- 1 GOMA TRITURADA .....	58
FIGURA 4- 2 GOMA TRITURADA OBSERVADA EN SU LADO MÁS CORTO .....	58
FIGURA 4- 3 CURVA DE GRADACIÓN DE LA GOMA TRITURADA 7-14 .....	59
FIGURA 4- 4 FOTOGRAFÍA DE ARENA DE RÍO (ARENA NO. 1) .....	60
FIGURA 4- 5 GRANULOMETRÍA DE LA ARENA NO 1 .....	60
FIGURA 4- 6 IMAGEN REPRESENTATIVA ARENA NO. 2 .....	61
FIGURA 4- 7 GRANULOMETRÍA DE LA ARENA NO. 2 .....	62
FIGURA 4- 8 GRANULOMETRÍA DE LOS TRES MATERIALES ESTUDIADOS .....	64
FIGURA 4- 9 MEZCLA 25T75A <sub>1</sub> (25% GOMA TRITURADA Y 75% ARENA NO. 1).....	65
FIGURA 4- 10 MEZCLA 50T50A <sub>1</sub> (50% GOMA TRITURADA Y 50% ARENA NO. 1).....	66
FIGURA 4- 11 MEZCLA 75T25A <sub>1</sub> (75% GOMA TRITURADA Y 25% ARENA NO. 1).....	66
FIGURA 4- 12 VALORES DE PERMEABILIDAD OBTENIDOS DEL ENSAYO DE CABEZA CONSTANTE PARA LA ARENA NO 1 Y MEZCLAS CON GOMA.....	68
FIGURA 4- 13 PERMEABILIDAD COMO FUNCIÓN DEL TAMAÑO DE LA GOMA (ADAPTADO DE REDDY Y MARELLA, 2001).....	69
FIGURA 5- 1 COMPRESIBILIDAD UNIDIMENSIONAL A CORTO PLAZO, VELOCIDAD LENTA.....	79
FIGURA 5- 2 COMPRESIBILIDAD UNIDIMENSIONAL A CORTO PLAZO, VELOCIDAD LENTA, ESCALA LOGARÍTMICA.....	80
FIGURA 5- 3 COMPRESIBILIDAD UNIDIMENSIONAL A CORTO PLAZO, EFECTO DE VELOCIDAD .....	81
FIGURA 5- 4 CAMBIO DE RIGIDEZ CON LA VELOCIDAD DE CARGA .....	82
FIGURA 5- 5 COMPRESIBILIDAD UNIDIMENSIONAL A LARGO PLAZO PARA MEZCLAS DE GOMA-ARENA NO 1 Y ESFUERZO AXIAL APLICADO DE 25 KPA .....	84
FIGURA 5- 6 COMPRESIBILIDAD UNIDIMENSIONAL A LARGO PLAZO PARA MEZCLAS DE GOMA-ARENA NO 1 Y ESFUERZO AXIAL APLICADO DE 50 KPA .....	85
FIGURA 5- 7 COMPRESIBILIDAD UNIDIMENSIONAL A LARGO PLAZO PARA MEZCLAS DE GOMA-ARENA NO 1 Y ESFUERZO AXIAL APLICADO DE 100 KPA .....	86
FIGURA 5- 8 COMPRESIBILIDAD UNIDIMENSIONAL A LARGO PLAZO PARA MEZCLAS DE GOMA-ARENA NO 1 Y ESFUERZO AXIAL APLICADO DE 200 KPA .....	87
FIGURA 5- 9 VARIACIÓN DEL COEFICIENTE DE COMPRESIBILIDAD A LARGO PLAZO PARA MEZCLAS DE GOMA-ARENA NO 1 .....	88

FIGURA 5- 10 COMPRESIBILIDAD UNIDIMENSIONAL A LARGO PLAZO PARA MEZCLAS DE GOMA-ARENA NO 2 Y ESFUERZO AXIAL APLICADO DE 25 KPA .....	89
FIGURA 5- 11 COMPRESIBILIDAD UNIDIMENSIONAL A LARGO PLAZO PARA MEZCLAS DE GOMA-ARENA NO 2 Y ESFUERZO AXIAL APLICADO DE 50 KPA .....	90
FIGURA 5- 12 COMPRESIBILIDAD UNIDIMENSIONAL A LARGO PLAZO PARA MEZCLAS DE GOMA-ARENA NO 2 Y ESFUERZO AXIAL APLICADO DE 100 KPA .....	91
FIGURA 5- 13 COMPRESIBILIDAD UNIDIMENSIONAL A LARGO PLAZO PARA MEZCLAS DE GOMA-ARENA NO 2 Y ESFUERZO AXIAL APLICADO DE 200 KPA .....	92
FIGURA 5- 14 VARIACIÓN DEL COEFICIENTE DE COMPRESIBILIDAD UNIDIMENSIONAL A LARGO PLAZO PARA MEZCLAS DE GOMA-ARENA NO 2.....	93
FIGURA 5- 15 GRAFICA DE COMPRESIBILIDAD DE LA GOMA TRITURADA PARA $\Sigma = 50$ KPA. ESCALA LOGARÍTMICA.....	95
FIGURA 5- 16 GRAFICA DE COMPRESIBILIDAD DE LA GOMA TRITURADA PARA $\Sigma = 50$ KPA. ESCALA ARITMÉTICA. ....	96
FIGURA 5- 17 CURVA TÍPICA DE ENSAYOS DE CREEP.....	97
FIGURA 5- 18 ECUACIONES DE NORTON PARA MEZCLAS CON ARENA NO. 1.....	98
FIGURA 5- 19 ECUACIONES DE NORTON PARA MEZCLAS CON ARENA NO. 2.....	99
FIGURA 6- 1 ESTADOS LÍMITES PARA UN MURO DE CONTENCIÓN SEGÚN RANKINE (1857).....	106
FIGURA 6- 2 RELACIONES ENTRE EL MOVIMIENTO DEL MURO Y COEFICIENTES DE PRESIONES DE TIERRA (ADAPTADO DE REFERENCIA SEGÚN KIM Y OTROS, 1991).....	108
FIGURA 6- 3 SECCIÓN TRANSVERSAL DEL PROTOTIPO.....	109
FIGURA 6- 4 FOTOGRAFÍA DE LAS PARTES DEL MODELO.....	110
FIGURA 6- 5 EQUIPO DE ADQUISICIÓN DE DATOS .....	110
FIGURA 6- 6 FOTO MOSTRANDO MONTAJE TÍPICO DEL ENSAYO.....	111
FIGURA 6- 7 ARREGLO UTILIZADO PARA REDUCIR FRICCIÓN EN EL RELLENO.....	112
FIGURA 6- 8 MODELO DE PLEXIGLÁS CUBIERTO CON PLÁSTICO PARA REDUCIR FRICCIÓN .....	113
FIGURA 6- 9 DETALLE DE LOS DOS TIPOS DE PLÁSTICOS UTILIZADOS.....	113
FIGURA 6- 10 RESULTADOS DEL ÁNGULO DE INTERFASE .....	116
FIGURA 6- 11 FUERZAS DE FRICCIÓN ACTUANTES CASO ACTIVO .....	118
FIGURA 6- 12 RESULTADOS DE CARGA PARA LA PRUEBA ACTIVA DE LA ARENA .....	119
FIGURA 6- 13 RESULTADOS DE $K_A$ PARA LA ARENA .....	120
FIGURA 6- 14 FUERZAS DE FRICCIÓN ACTUANTES CASO PASIVO.....	121
FIGURA 6- 15 RESULTADOS DE CARGA PARA LA PRUEBA PASIVA DE LA ARENA NO 2 .....	122
FIGURA 6- 16 RESULTADOS DE $K_P$ PARA LA ARENA .....	123
FIGURA 6- 17 RESULTADOS DE CARGA PARA LA PRUEBA ACTIVA DE LA GOMA TRITURADA .....	124
FIGURA 6- 18 RESULTADOS DE $K_A$ PARA LA GOMA TRITURADA.....	125
FIGURA 6- 19 RESULTADOS DE CARGA PARA LA PRUEBA PASIVA DE LA GOMA TRITURADA .....	126

FIGURA 6- 20 RESULTADOS DE $K_p$ PARA LA GOMA TRITURADA .....	126
FIGURA 6- 21 RESULTADOS DE CARGA PARA LA PRUEBA ACTIVA DE LA MEZCLA 50% GOMA TRITURADA - 50% ARENA NO 2 .....	128
FIGURA 6- 22 RESULTADOS DE $K_a$ PARA LA MEZCLA 50% GOMA TRITURADA -50% ARENA NO 2 .....	128
FIGURA 6- 23 RESULTADOS DE CARGA PARA LA PRUEBA PASIVA DE LA MEZCLA 50% GOMA TRITURADA - 50% ARENA NO 2 .....	129
FIGURA 6- 24 RESULTADOS DE $K_p$ PARA LA MEZCLA 50% GOMA TRITURADA -50% ARENA NO 2 .....	129
FIGURA 6- 25 RESULTADOS DE $K_a$ PARA LA ARENA, GOMA TRITURADA Y MEZCLA GOMA-ARENA, ESTADO SUELTO.....	130
FIGURA 6- 26 RESULTADOS DE $K_p$ PARA LA ARENA, LA GOMA TRITURADA Y MEZCLA DE ARENA-GOMA, ESTADO SUELTO.....	131
FIGURA 7- 1 DISEÑO ESTRUCTURAL DEL MURO DE CONTENCIÓN CON RELLENO GRANULAR.....	137
FIGURA 7- 2 DISEÑO ESTRUCTURAL DEL MURO DE CONTENCIÓN CON RELLENO DE GOMA TRITURADA.....	139
FIGURA 7- 3 DISEÑO ESTRUCTURAL DEL MURO DE CONTENCIÓN CON MEZCLA DE 50% RELLENO DE GOMA TRITURADA-50% ARENA .....	140
FIGURA A- 1 EQUIPO UTILIZADO PARA ENSAYO DE CORTE DIRECTO .....	174
FIGURA A- 2 RESULTADOS DE ENSAYO DE CORTE DIRECTO PARA ARENA NO 2 .....	175
FIGURA A- 3 ENVOLVENTE DE ESFUERZOS, ENSAYO DE CORTE DIRECTO, ARENA NO 2.....	176
FIGURA B- 1 ENSAYO DE COMPRESIBILIDAD A CORTO PLAZO, PASO 1, REALIZACIÓN DE LA MEZCLA .....	180
FIGURA B- 2 ENSAYO DE COMPRESIBILIDAD A CORTO PLAZO, PASO 2, COLOCACIÓN DE LA MUESTRA EN LA ANILLA .....	180
FIGURA B- 3 ENSAYO DE COMPRESIBILIDAD A CORTO PLAZO, PASO 3, COLOCACIÓN DE LA ANILLA EN EL ODÓMETRO .....	181
FIGURA B- 4 ENSAYO DE COMPRESIBILIDAD A CORTO PLAZO, PASO 4, APLICACIÓN DE CARGA EN EL EQUIPO DE COMPRESIÓN.....	181
FIGURA B- 5 ESQUEMA DE DISEÑO PARA EL CONTROL DE TEMPERATURA EN EL ENSAYO DE COMPRESIBILIDAD A LARGO PLAZO .....	182
FIGURA B- 6 EQUIPO DE COMPRESIBILIDAD A LARGO PLAZO PARA TEMPERATURA CONSTANTE .....	182
FIGURA B- 7 MECANISMO PARA CONTROL DE TEMPERATURA.....	183
FIGURA B- 8 MOLDE Y MUESTRA DE ENSAYO .....	183
FIGURA B- 9 TERMOCUPLA Y DATALOGGER .....	184
FIGURA B- 10 EQUIPO UTILIZADO PARA EL ENSAYO DE COMPRESIBILIDAD A LARGO PLAZO.....	184
FIGURA B- 11 GRAFICA DE COMPRESIBILIDAD A LARGO PLAZO PARA 100% DE GOMA TRITURADA, CON VARIACIÓN DEL ESFUERZO AXIAL APLICADO .....	185

FIGURA B- 12 GRAFICA DE COMPRESIBILIDAD A LARGO PLAZO PARA 75% DE GOMA TRITURADA-25% DE ARENA No 1, CON VARIACIÓN DEL ESFUERZO AXIAL APLICADO. ....	186
FIGURA B- 13 GRAFICA DE COMPRESIBILIDAD A LARGO PLAZO PARA 50% DE GOMA TRITURADA-50% DE ARENA No 1, CON VARIACIÓN DEL ESFUERZO AXIAL APLICADO. ....	187
FIGURA B- 14 GRAFICA DE COMPRESIBILIDAD A LARGO PLAZO PARA 25% DE GOMA TRITURADA-75% DE ARENA No 1, CON VARIACIÓN DEL ESFUERZO AXIAL APLICADO. ....	188
FIGURA B- 15 GRAFICA DE COMPRESIBILIDAD A LARGO PLAZO PARA 0% DE GOMA TRITURADA-100% DE ARENA No 1, CON VARIACIÓN DEL ESFUERZO AXIAL APLICADO. ....	189
FIGURA B- 16 GRAFICA DE COMPRESIBILIDAD A LARGO PLAZO PARA 75% DE GOMA TRITURADA-25% DE ARENA No 2, CON VARIACIÓN DEL ESFUERZO AXIAL APLICADO. ....	190
FIGURA B- 17 GRAFICA DE COMPRESIBILIDAD A LARGO PLAZO PARA 50% DE GOMA TRITURADA-50% DE ARENA No 2, CON VARIACIÓN DEL ESFUERZO AXIAL APLICADO. ....	191
FIGURA B- 18 GRAFICA DE COMPRESIBILIDAD A LARGO PLAZO PARA 25% DE GOMA TRITURADA-75% DE ARENA No 2, CON VARIACIÓN DEL ESFUERZO AXIAL APLICADO. ....	192
FIGURA B- 19 GRAFICA DE COMPRESIBILIDAD A LARGO PLAZO PARA 0% DE GOMA TRITURADA-100% DE ARENA No 2, CON VARIACIÓN DEL ESFUERZO AXIAL APLICADO. ....	193
FIGURA C- 1 CONFIGURACIÓN INICIAL DE DISPOSITIVO PARA APLICACIÓN DE CARGA EN EL MURO DE PLEXIGLÁS. ....	195
FIGURA C- 2 CONFIGURACIÓN No 2 DE DISPOSITIVO PARA APLICACIÓN DE CARGA EN EL MURO DE PLEXIGLÁS. ....	195
FIGURA C- 3 CONFIGURACIÓN FINAL DE DISPOSITIVO PARA APLICACIÓN DE CARGA EN EL MURO DE PLEXIGLÁS. ....	196
FIGURA C- 4 PROCESO DE LLENADO DEL TANQUE DE PLEXIGLÁS. ....	196
FIGURA C- 5 MEDICIÓN DEL ÁNGULO DE INTERFASE ( $\Delta$ ) ENTRE EL MATERIAL ANALIZADO Y LAS PAREDES DEL PROTOTIPO, ENSAYO DE CORTE DIRECTO, ARENA-PLEXIGLÁS. ....	198
FIGURA C- 6 ENVOLVENTE DE ESFUERZOS, ENSAYO DE CORTE DIRECTO, ARENA-PLEXIGLÁS. ....	199
FIGURA C- 7 MEDICIÓN DEL ÁNGULO DE INTERFASE ( $\Delta$ ) ENTRE EL MATERIAL ANALIZADO Y LAS PAREDES DEL PROTOTIPO, ENSAYO DE CORTE DIRECTO, ARENA-PLÁSTICO. ....	201
FIGURA C- 8 ENVOLVENTE DE ESFUERZOS, ENSAYO DE CORTE DIRECTO, ARENA-PLÁSTICO. ....	202
FIGURA C- 9 MEDICIÓN DEL ÁNGULO DE INTERFASE ( $\Delta$ ) ENTRE EL MATERIAL ANALIZADO Y LAS PAREDES DEL PROTOTIPO, ENSAYO DE CORTE DIRECTO, GOMA -PLEXIGLÁS. ....	204
FIGURA C- 10 ENVOLVENTE DE ESFUERZOS, ENSAYO DE CORTE DIRECTO, GOMA -PLEXIGLÁS. ....	205
FIGURA C- 11 MEDICIÓN DEL ÁNGULO DE INTERFASE ( $\Delta$ ) ENTRE EL MATERIAL ANALIZADO Y LAS PAREDES DEL PROTOTIPO, ENSAYO DE CORTE DIRECTO, GOMA -PLÁSTICO. ....	207
FIGURA C- 12 ENVOLVENTE DE ESFUERZOS, ENSAYO DE CORTE DIRECTO, GOMA -PLÁSTICO. ....	208
FIGURA C- 13 MEDICIÓN DE LA FRICCIÓN DEL PROTOTIPO DE MURO CON LA CAJA DE PLEXIGLÁS. ....	209

FIGURA C- 14 FOTOGRAFÍA DE LA ARENA, AL FINAL DEL ENSAYO ACTIVO .....	211
FIGURA C- 15 FOTOGRAFÍA DE LA ARENA, AL FINAL DEL ENSAYO PASIVO.....	213
FIGURA C- 16 FOTOGRAFÍA DE LA GOMA TRITURADA, AL FINAL DEL ENSAYO ACTIVO .....	215
FIGURA C- 17 FOTOGRAFÍA DE LA GOMA TRITURADA, AL FINAL DEL ENSAYO PASIVO.....	217

# **CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN**

## **1.1 Introducción**

El propósito de esta investigación de maestría en ciencias es estudiar la viabilidad técnica de utilizar goma triturada, o mezclas de este material con arenas, como relleno para muros de contención. De encontrarse viable, esta aplicación ofrecería una alternativa de reciclaje de gomas con potencial de reutilizar un alto volumen de gomas y a la vez ayudar al medio ambiente. La literatura existente indica que esta alternativa tiene potencial, sin embargo aun quedan incógnitas por estudiar como su compresibilidad a largo plazo y las presiones laterales que genera este nuevo tipo de relleno. Por lo tanto este estudio tiene dos componentes principales: el primero consiste en determinar las propiedades de compresibilidad a largo plazo (creep) de la goma triturada sin mezclar y también mezclada con arena en distintos porcentajes; y el segundo consiste en evaluar los empujes laterales que se generan en muros usando estos tipos de rellenos. Este segundo componente incluye evaluar teorías de empuje de tierras comúnmente utilizadas para rellenos de suelos convencionales y compararlos con resultados de un modelo a escala diseñado y construido como parte de esta tesis.

Este trabajo también incluye una revisión de literatura exhaustiva del tema de reciclaje de gomas en aplicaciones de ingeniería civil, pero con especial énfasis en la aplicación escogida de muros de contención. Cabe resaltar que hasta la fecha la mayoría de estudios existentes acerca de la goma triturada se concentran en el comportamiento a corto plazo. Este trabajo pretende aportar mediante el estudio de deformaciones a largo plazo, incluyendo efectos de temperatura, y sobre la evaluación de las presiones pasivas y activas generadas por el relleno de goma triturada sola o mezclada con arena.

## 1.2 Justificación

El destino final de neumáticos usados se ha convertido en un problema ambiental complejo de resolver a nivel mundial. Según la Sociedad Americana de Ingenieros Civiles (ASCE, por sus siglas en inglés), en Estados Unidos cerca de 280 millones de neumáticos son desechados cada año (aproximadamente un neumático por persona), alrededor de 30 millones son reencauchados o rehusados y 250 millones son dispuestos en diferentes alternativas (ASCE, 2006). De los neumáticos reutilizados o dispuestos, el 7% son exportados a países extranjeros, el 8% es reciclado a nuevos productos, el 40% es usado para fabricación de combustible y el 45% es depositado en terraplenes, en pilas de almacenamiento o vertederos ilegales (ASCE, 2006).

La situación de desechos de neumáticos en Puerto Rico es crítica. En este país se produce alrededor de cuatro millones de neumáticos desechados cada año (Botero y otros, 2005). En Puerto Rico tradicionalmente hay dos opciones para el manejo de gomas: 1) recoger las gomas y exportarlas (en Puerto Rico hay por lo menos dos empresas que se encargan de este trabajo); y 2) triturar la llanta, y reciclarla (labor que es realizada actualmente en Puerto Rico por empresas como REMA, Inc. e Integrated Waste Management) (Botero y otros, 2005).

Velásquez (2001) sugiere cuatro alternativas para subsanar el problema ambiental generado por la cantidad de deshecho de neumáticos. La primera es mejorar la calidad del producto desde su fabricación y así aumentar su periodo de vida útil; otra opción es reencauchar el neumático viejo para utilizarlo nuevamente; como tercera medida se puede aprovechar el producto para producción de energía; y finalmente propone la cuarta opción de reutilizar el producto en otras aplicaciones. Dentro de las alternativas más comunes de reciclaje se encuentran, la manipulación del material en obras de ingeniería civil y construcción, la utilización de gomas en la fabricación de superficies deportivas, y la generación de productos industriales (Hylands y Shulman, 2003).

Dentro del campo de la ingeniería civil se han identificado varias alternativas de reciclaje de neumáticos usados. Por ejemplo se han identificado usos en: revestimiento de taludes, rellenos de bajo peso para carreteras, como parte de un sistema de suelos reforzados, aplicaciones de drenaje, control de erosión, arrecifes artificiales, protección ambiental, barreras de sonido, aislamiento térmico, concreto modificado, asfalto modificado, sustituto de agregado, mejoramiento de subrasantes, entre otros (Hylands y Shulman, 2003).

Como se indicó antes, esta tesis está relacionada al estudio detallado de la aplicación de reciclaje de gomas trituradas para utilizarse como relleno en muros de contención. Esta aplicación se ha estudiado en bastante detalle a corto plazo como se mostrará en el capítulo de revisión de literatura. Las ventajas que se han identificado en esta opción de reciclaje son la reducción del peso unitario del relleno, el cual es beneficioso en áreas en las que los suelos de fundación tienen baja capacidad de carga, buenas características de aislamiento térmico, buena resistencia al congelamiento, características de drenaje favorables (que reducen presiones de poros), larga vida, disponibilidad abundante, bajo costo y su utilización que de por sí constituye una solución a un problema ambiental.

El uso de goma triturada como relleno en carreteras y muros de contención, ha sido objeto de diversas investigaciones, donde se ha estudiado las propiedades mecánicas del material en laboratorio en estado solo y mezclado con suelo, (por ejemplo en estudios por Yang y otros 2002; Ghazavi y Saki 2005), y se han hecho estudios de su comportamiento en el campo mediante la construcción de terraplenes instrumentados, (por ejemplo en estudios por Ahmed y Lovell 1993; Humphrey y otros 2000; Reddy y Marella 2001, entre otros). A pesar de diversas investigaciones realizadas en torno al tema de utilizar la goma triturada como relleno de bajo peso en muros y terraplenes, aún se encuentran varios aspectos importantes que hace falta estudiar antes de poder aceptar esta opción de reciclaje como una solución segura y viable. Durante la revisión de literatura de este trabajo se encontró que una de las áreas sin mucho estudio es la compresibilidad a largo plazo o creep de este material y la posible influencia de la temperatura en esta. Este aspecto se ha identificado como una posible desventaja en la

evaluación de proyectos contruidos utilizando este material. La compresibilidad a largo plazo o creep se puede describir como la deformación del material en el tiempo bajo un nivel de esfuerzo constante. Existen pocos estudios en el tema por lo que esta investigación se justifica ya que aporta datos experimentales sobre este aspecto crítico aun por dilucidar. Otro aspecto importante que busca evaluar este trabajo es la pertinencia de teorías convencionales de empuje lateral de tierra para rellenos compuestos por partículas de goma triturada. Al ser partículas viscoelásticas las teorías convencionales quizás no sean aplicables a este tipo de material.

### **1.3 Objetivos**

Este proyecto de investigación tiene dos objetivos principales:

- Determinar las características de deformación a largo plazo de goma triturada y de mezclas de este material con distintas proporciones de arena.
- Evaluar si las teorías convencionales de empuje de tierra son adecuadas para diseñar muros con rellenos conformados con goma triturada o mezclas de goma y arena.

Adicionalmente se han identificado el siguiente objetivo secundario para este trabajo:

- Establecer las propiedades físicas y mecánicas de la goma triturada y de mezclas realizadas con diferentes contenidos de arena y goma. Entre las propiedades a determinarse están: peso unitario, parámetros de resistencia al corte y módulo de rigidez.

## 1.4 Organización de la tesis

Este documento ha sido organizado en 7 capítulos y 5 apéndices. A continuación se describe brevemente el contenido y alcance de cada sección.

El Capítulo 1 es la introducción de la tesis e incluye una descripción general del problema ambiental a nivel mundial y local generado por el desecho descontrolado de neumáticos. Se presenta una justificación del estudio y se presentan los objetivos de la investigación. El capítulo termina con una descripción de la organización de la tesis.

El Capítulo 2 presenta un resumen de conceptos básicos relacionados al tema central de la tesis, por ejemplo se presenta la clasificación de las gomas trituradas según la ASCE (2006) y también se presenta información sobre los tipos de goma triturada que se producen en Puerto Rico.

En el Capítulo 3 se presenta la revisión de literatura dividida en tres áreas principales: literatura general sobre reciclaje de neumáticos o gomas con énfasis en aplicaciones dentro de la ingeniería civil; literatura relacionada a estudios experimentales sobre propiedades mecánicas, hidráulicas y compresibilidad de goma triturada incluyendo mezclas con suelos; y resumen de estudios experimentales y analíticos sobre muros de contención y rellenos.

El Capítulo 4 presenta una descripción detallada de los materiales empleados en este estudio experimental, incluyendo resultados de ensayos de caracterización realizados como parte de esta tesis.

El Capítulo 5 presenta resultados de pruebas de compresibilidad unidimensional realizadas tanto a corto como a largo plazo. También se presentan resultados de ensayos realizados a distintas temperaturas para evaluar la posible influencia de la temperatura en los parámetros de compresibilidad de la goma triturada y sus mezclas con arenas.

El Capítulo 6 presenta resultados del estudio experimental que involucró el diseño, construcción, calibración y ensayos con un prototipo de muro de contención construido para estudiar las presiones laterales que se generan al utilizar goma triturada, y/o mezclas con arenas, como relleno en muros de contención.

El Capítulo 7 presenta un análisis económico preliminar de un muro de contención, de 10 pies de altura. El estudio involucra comparar el diseño geotécnico y estructural del muro de contención hipotético en el cual se proponen tres alternativas de relleno: material granular, goma triturada y mezcla de 50% goma-50% arena. El análisis de costos se basa en comparar las cantidades de materiales para los tres casos.

Finalmente un resumen y las conclusiones de este estudio son presentados en el Capítulo 8. Este capítulo también incluye recomendaciones para trabajos futuros.

Esta tesis también incluye 5 apéndices que proveen información más detallada de varios componentes de esta investigación. El Apéndice A presenta información adicional sobre las pruebas de caracterización de los materiales. El Apéndice B provee información detallada sobre los ensayos de compresibilidad unidimensional. El Apéndice C presenta detalles sobre el prototipo de muro incluyendo diseño, calibración y resultados. El Apéndice D incluye información suplementaria sobre el modelamiento del muro de contención y el Apéndice E contiene información sobre el diseño estructural del muro.

## CAPITULO 2. CONCEPTOS BÁSICOS

### 2.1 Introducción

En este capítulo se presenta la clasificación de las gomas trituradas propuesta por ASCE (2006). Esta información se expone de manera general como una breve introducción sobre el tema, el lector familiarizado con estos conceptos puede optar por saltarse este capítulo.

### 2.2 Clasificación de la goma triturada proveniente de neumático reciclado

La goma triturada proveniente del neumático reciclado, abarca un sin número de tipos de material que varía según su tamaño, forma, y empleo del material. Para evitar confusiones la Sociedad Americana de Ingenieros Civiles, (ASCE, 2006) ha propuesto la terminología que se resume en la Tabla 2-1.

Tabla 2- 1 Clasificación de la goma triturada según (ASCE, 2006)

Termino <sup>(1)</sup>	Descripción del material
Neumático entero (whole tires)	Neumático entero
Neumático triturado (shredded tires)	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 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> ).
Viruta de Neumático (Tire Chips)	Es un material uniforme en cuanto a tamaño, este se encuentra en un rango entre 25 mm (1in) y 50 mm (2in), 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.
Caucho molido triturado (Ground Rubber)	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 maquinas de corte fino, las correas de acero son removidas con separadores magnéticos, también se remueven algunas partículas de fibra de vidrio.
Miga de goma (Crumb Rubber)	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.

Nota: (1): En paréntesis se indica el nombre en inglés utilizado por (ASCE, 2006).

## 2.3 Tipos de goma triturada en Puerto Rico

En esta investigación se utilizó goma triturada proveniente de Rema Inc., los tamaños producidos por esta compañía se listan en la Tabla 2-2.

**Tabla 2- 2 Subproductos de neumático triturado producidos por REMA, Inc.**

Tamaño de la goma	Clasificación ASCE	Descripción del material	Uso común
2 in (50.8 mm)	Viruta de Neumático (Tire Chips)	Pedazos de goma y nylon con algo de metal. Formas diversas	Sustituto de agregado grande.
5/8 in (15.88 mm)	Caucho molido triturado (Ground Rubber)	Pedazos de goma y nylon con algo de metal	Sustituto de agregado en muros de concretos.
Tamiz 7-14 (2.6 mm - 1.3 mm)	Miga de goma (Crumb Rubber)	Granulado	Pistas atléticas
Tamiz 14-20(1.3 mm - 0.85 mm)	Miga de goma (Crumb Rubber)	Granulado	Pistas atléticas
Material más fino que tamiz 30 (0.64 mm)	Miga de goma (Crumb Rubber)	Granulado fino	Bulkbond (pegamento o sellador)
Nylon	No Aplica	Nylon con restos de goma	Dispone en vertederos
Metal	No Aplica	Alambre con restos de goma	Dispone en vertederos

Nota: fuente REMA, Inc. (2006).

Específicamente en esta investigación se utilizó el material 7-14 (que está conformado por partículas libre de metal y con tamaños entre 1.3 mm y 2.6 mm). Este material, según la clasificación de la ASCE (Tabla 2-1), clasifica como miga de goma o *crumb rubber*.

## **CAPITULO 3. REVISIÓN DE LITERATURA**

### **3.1 Introducción**

En este capítulo se presenta la revisión de literatura realizada para esta tesis. Este capítulo fue organizado en tres categorías las cuales se presentan a continuación:

- Literatura general sobre reciclaje de neumáticos con énfasis en aplicaciones dentro de la ingeniería civil.
- Literatura que resume estudios experimentales sobre propiedades mecánicas, hidráulicas y compresibilidad de goma triturada y mezclas con suelos.
- Resumen de estudios experimentales y analíticos sobre muros de contención y rellenos.

Las siguientes subsecciones presentan el resumen correspondiente a cada una de estas tres categorías.

### **3.2 Literatura general sobre reciclaje de neumáticos con énfasis en aplicaciones dentro de la ingeniería civil**

Existen múltiples estudios que identificaran posibles aplicaciones y opciones de reciclaje para neumáticos usados dentro de la ingeniería civil. Esta sección resume algunos de los estudios más relevantes encontrados en esta área. Sin embargo el énfasis de este capítulo será literatura asociada a la aplicación de rellenos con goma triturada en estado aislado o mezclado con suelos.

Humphrey (1999) recomienda el uso de la goma proveniente de neumático reciclado como un material útil en aplicaciones para ingeniería civil especialmente para vías y taludes. Describe la goma triturada como un material de bajo peso, bajo esfuerzo horizontal, buen drenaje y compresibilidad. Enumera usos de la goma en rellenos para construcción de terraplenes para vías, rellenos para muros de contención, aislamiento térmico y rellenos sanitarios. En la Tabla 3-1 se presentan ejemplos de estas aplicaciones. Este autor propone la goma triturada como un material útil en aplicaciones de ingeniería civil debido a la reducción de costos y como solución a un problema ambiental debido a que es un material reciclable.

**Tabla 3- 1 Ejemplos de aplicaciones identificadas por Humphrey**

<b>Aplicación</b>	<b>Ejemplo de aplicación</b>	<b>Referencia</b>
Terraplenes para vías	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Relleno para terraplén de “Portland Jetport Interchange”.</li> <li>• Dixon landing Interchange, Milpitas, CA</li> <li>• Landslide stabilization, Roseburg, OR</li> <li>• Connector interstate, Denver, CO</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• (Humphrey y otros, 1998)</li> <li>• (Humphrey, 2004)</li> </ul>
Rellenos para muros de contención	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Muro de ensayo universidad de Maine.</li> <li>• Relleno en el estribo de un puente en el proyecto “North Abutment of the Merry-meeting Bridge in Topsham, Maine”.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• (Tweedie y otros, 1998)</li> <li>• (Humphrey y otros, 2000)</li> </ul>
Aislamiento térmico	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Subrasante de aislamiento al congelamiento en Maine.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• (Humphrey, 1999)</li> </ul>
Rellenos sanitarios	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Capa drenaje en relleno en Fort Fairfield, Maine</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• (Humphrey, 1999)</li> </ul>

Hylands y Shulman (2003) presentan un resumen de opciones disponibles para el manejo post-consumo del neumático en aplicaciones dentro del campo de la ingeniería civil. Para cada opción de reciclaje los autores proveen listados de características técnicas. Dentro de las aplicaciones que describen dentro de ingeniería civil se

encuentran: rellenos de bajo peso, suelos reforzados, aplicaciones de drenaje, control de erosión, arrecifes artificiales, barreras de protección, aislamiento térmico, asfalto modificado con goma, y concreto modificado con goma. En la Tabla 3-2 se presenta un resumen de diferentes aplicaciones presentadas en este estudio.

**Tabla 3- 2 Aplicaciones identificadas por Hylands y Shulman (2003)**

<b>Aplicación</b>	<b>Descripción</b>	<b>Ventajas técnicas</b>
Taludes	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sistemas de colección de aguas</li> <li>• Protección de capas de geotextil</li> <li>• Capas de drenaje en taludes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alta permeabilidad</li> <li>• Durabilidad</li> <li>• Bajo peso</li> <li>• Reducción de asentamientos diferenciales</li> <li>• Resistencia química</li> </ul>
Rellenos y suelos reforzado	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rellenos para terraplenes</li> <li>• Rellenos detrás de muros</li> <li>• Rellenos detrás estribos de puentes</li> <li>• Rellenos para estabilidad de taludes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ventaja económica</li> <li>• Reduce presiones de poros</li> <li>• Reduce densidad de la capa</li> </ul>
Aplicaciones de drenaje	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rellenos para drenajes de agua lluvia</li> <li>• Rellenos para pozos sépticos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Excelente drenaje medio</li> <li>• Alta resistencia química</li> <li>• Durabilidad</li> </ul>
Control de erosión	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Control de erosión fluvial y marina</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Durabilidad</li> <li>• Mínimo impacto en la calidad del agua</li> </ul>
Protección ambiental	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Barreras artificiales</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Baja densidad</li> <li>• Libre drenaje</li> <li>• Durabilidad</li> </ul>
Aislamiento térmico	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aislamiento térmico en vías y estructuras</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Protección de suelo por heladas</li> <li>• Protección de tuberías</li> <li>• Aislamiento entre estructuras</li> </ul>

Botero y otros (2005), sintetizan información sobre la situación del reciclado de neumáticos con el fin de conocer los diferentes usos dados a la goma triturada. Se estudiaron temas como el uso de la goma triturada en sistemas de recolección de lixiviados y en absorción de contaminantes, como componente del concreto y como sustituto de agregados, el asfalto caucho y el uso de la goma triturada en terraplenes. Adicionalmente se analizó la situación actual (2005) de Puerto Rico frente a este problema. Este artículo también presenta un resumen de propiedades mecánicas de la goma triturada que se muestra en la Tabla 3-3.

**Tabla 3- 3 Resumen propiedades de resistencia al corte (Botero y otros., 2005)**

Autor	Tamaño Máximo (mm)	Peso Unitario (kN/m <sup>3</sup> )	Presión de confinamiento (kPa)	Parámetros de resistencia al corte <sup>(1)</sup>			
				10% deformación unitaria		20% deformación unitaria	
				C (kPa)	$\Phi$ (°)	C (kPa)	$\Phi$ (°)
Ahmed (1993)	13	6.2	36-199	22.7	11.2	35.8	20.5
Benda (1995)	9.5	5.9	35-55	0	20.6	0	32.1
Cecich y otros. (1996)	12.5	5.97	3.5-27.6 <sup>(2)</sup>	----	----	7 <sup>(2)</sup>	27 <sup>(2)</sup>
Masad y otros. (1996)	4.75	6.24	150-350	70	6	82	15
Yang y otros. (2002)	10	5.73	23.4-84.1	21.6	11	37.7	18.8
Gutiérrez y otros. (2004)	4.75	6.3	25-100	0	11.3	0	14.9

Nota: (1): Obtenido de ensayos triaxiales excepto Cecich y otros. (1996).  
 (2): Obtenido de ensayos de corte directo. Rango de presiones presentado corresponde a las presiones normales del ensayo y los parámetros de resistencia al corte corresponden a los valores pico.

ASCE (2006), provee información sobre cifras de neumático desechado en Estados Unidos. Esta referencia clasifica la goma triturada de acuerdo a su tamaño y describe propiedades físicas, químicas y mecánicas del material y el proceso de trituración. Presenta opciones de manejo para el neumático usado como reciclaje y disposición final. También presenta aplicaciones del neumático triturado en terraplenes, sustituto de agregado, asfalto modificado, muros de contención, entre otras aplicaciones.

### **3.3 Estudios experimentales sobre propiedades mecánicas, hidráulicas, y compresibilidad de la goma triturada y mezclas con suelos**

Se encontraron varias referencias relacionadas a estudios experimentales que involucran la evaluación de propiedades de goma triturada y sus mezclas con suelos, las siguientes subsecciones presentan un resumen de la literatura encontrada para distintos tipos de propiedades.

### *3.3.1 Estudios experimentales sobre propiedades mecánicas e hidráulicas*

En esta sección se recolectaron estudios experimentales sobre las propiedades mecánicas e hidráulicas de la goma triturada, y de mezclas goma-suelo, en los estudios se encuentran resultados de peso unitario, gravedad específica, permeabilidad y propiedades de resistencia al corte.

- **Estudio de Cecich y otros (1996)**

Cecich y otros (1996) realizaron diferentes pruebas de laboratorio para determinar propiedades ingenieriles de goma triturada (*shredded tires*) de tamaño máximo 1.27 centímetros, coeficiente de uniformidad de 2.14, coeficiente de concavidad de 1.26 y gradación uniforme. Los investigadores realizaron pruebas de compactación por Proctor modificado, ensayo de permeabilidad por carga constante y ensayos de corte directo. Obteniendo los siguientes resultados: pesos unitarios entre  $5.61 \text{ kN/m}^3$  y  $6.1 \text{ kN/m}^3$ , para estos pesos unitarios se obtuvieron rangos de permeabilidad de 0.033 a 0.034 cm/s y resistencia al corte con cohesión de 7 kPa y ángulo de fricción de  $27^\circ$ . Con estos resultados los autores generaron diferentes diseños de muros de contención variando la altura del muro y utilizando como relleno, goma triturada y arena, esto con el fin de comparar los dos materiales. La arena utilizada para el diseño fue una arena media fina sin cohesión, ángulo de fricción de  $38^\circ$  y peso unitario de  $20 \text{ kN/m}^3$ . Las alturas del muro analizadas fueron 3,6 y 9 metros. El diseño de los muros no incluyó la solicitación sísmica. La resistencia a compresión del concreto del muro fue de 3000 psi. La geometría y dimensiones escogidas para el caso del muro de 3 metros de altura se muestran en la Figura 3-1.

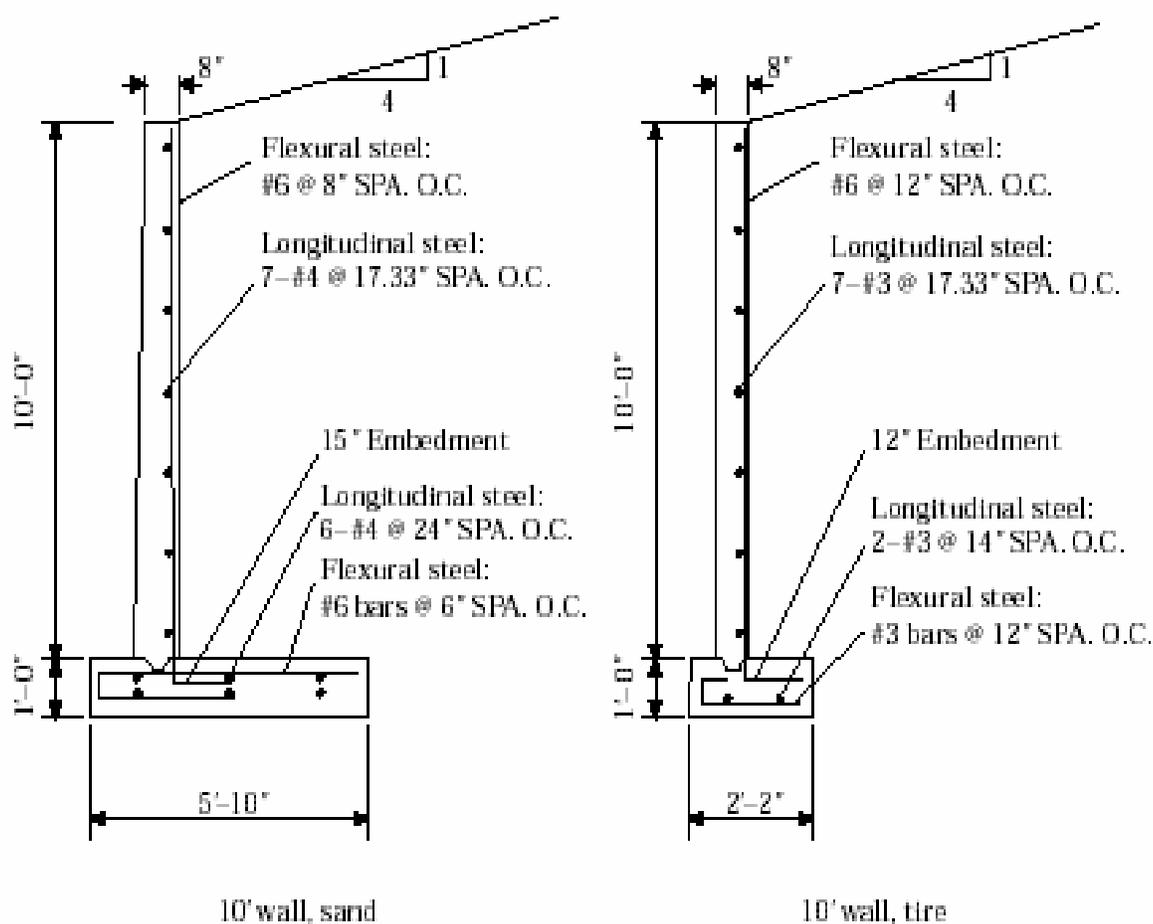


Figura 3- 1 Diseño estructural del muro de altura 3 metros (10 pies) (Cecich y otros, 1996)

Los resultados de los análisis de estabilidad de los distintos muros se presentan en la Tabla 3-4. Se observa un incremento en los factores de seguridad para los muros con relleno de goma triturada. En la Tabla 3-5 se presenta el análisis de costos del muro, se observa ahorros entre el 52 y 67% al utilizar relleno de goma triturada. Estos análisis se realizaron para una longitud de muro de 30 m (100 pies). Los resultados de esta investigación sugieren que la goma triturada tiene un buen potencial para ser usada como material de relleno para estructuras de retención.

**Tabla 3- 4 Análisis de estabilidad del muro por (Cecich y otros, 1996)**

Altura del muro en metros (pies)	Factor de seguridad al deslizamiento		Factor de seguridad al vuelco	
	Relleno arena	Relleno goma triturada	Relleno arena	Relleno goma triturada
3 (10)	4.15	>20	2.1	>20
6 (20)	1.68	10.37	1.84	2.12
9 (30)	1.54	3.35	1.65	2.14

**Tabla 3- 5 Comparación de costos entre goma triturada y arena (Cecich y otros, 1996)**

Altura del muro en metros (pies)	Costo estimado del material (U.S.\$)			Costo total estimado (U.S.\$)		
	Relleno arena	Relleno goma triturada	Ahorro con relleno goma triturada (%)	Relleno arena	Relleno goma triturada	Ahorro con relleno goma triturada (%)
3 (10)	8,000	1,300	84	17,900	8,600	52
6 (20)	29,700	5,600	81	53,900	19,700	63
9 (30)	82,500	12,400	85	145,800	48,300	67

- **Estudio de Collins (1997)**

Collins (1997) en una tesis de maestría estudia el uso de agregados de bajo peso como relleno en terraplenes. Entre los diferentes agregados livianos estudiados este autor incluye una goma triturada de forma rectangular con dimensiones aproximadas de 15 mm de ancho y 30 mm de longitud. Su gravedad específica fue 1.27 y densidades mínimas y máximas de 505 y 546 kg/m<sup>3</sup> respectivamente. Para la goma triturada y su mezcla con arena se realizaron ensayos de compresión en una dimensión, compresión triaxial y permeabilidad a estos materiales.

Los ensayos de compresión en una dimensión fueron realizados en un odómetro de diámetro 254 mm y altura 230 mm, la adición de arena (en la mezcla arena-goma) disminuyó la compresibilidad de las muestras. En la Tabla 3-6 se presentan los resultados de las pruebas

**Tabla 3- 6 Resultados ensayos de compresión en una dimensión por (Collins, 1997)**

Muestra	Índice compresión $C_c, (\log \text{kPa})^{-1}$	Módulo confinamiento $E_c, (\text{MPa})$ (@ deformación vertical)	Módulo tangente inicial $E_i, (\text{MPa})$	Módulo secante $E_s, (\text{MPa})$ (@ deformación vertical)	Módulo de recarga $E_r, (\text{MPa})$
Goma Triturada	0.57193	0.3 @ 4% 0.58 @ 27.6%	0.73	0.8 @ 4% 0.56 @ 6%	No reportan
Goma-Arena	0.280404	0.14 @ 14% 1.14 @ 28%	1.2	2.75 @ 2% 1.35 @ 13%	2.32

Los ensayos triaxiales fueron realizados con densidad de  $535 \text{ kg/m}^3$ . Para la goma triturada las presiones de confinamiento fueron de 30 y 50 kPa. La goma triturada no mostró una tendencia clara de falla de corte es decir no hubo disminución pronunciada de esfuerzos. Se presentó cambio de volumen de la muestra hasta deformaciones entre 25 y 30%. También se realizaron ensayos en mezcla goma-arena con proporción en peso de 1:09 y esfuerzos de confinamiento de 20,28 y 40 kPa, las muestras fueron ensayadas hasta deformación vertical del 30%. Se concluyó que la adición de arena (en la mezcla arena-goma) incrementa la resistencia del espécimen. Los ángulos de fricción encontrados para las probetas con goma y mezcla de arena-goma (diferentes proporciones) estuvieron entre  $28^\circ$  y  $40^\circ$  respectivamente. La permeabilidad disminuyó con la adición de arena a la mezcla y también disminuyó con el incremento de la deformación axial. Los resultados de las pruebas son presentados en la Tabla 3-7.

**Tabla 3- 7 Resultados ensayos de compresión triaxial (Collins, 1997)**

Muestra	Peso unitario máximo ( $\text{kg/m}^3$ )	Angulo de fricción interno ( $^\circ$ )	$K(\text{mm/s})$ @ aplicando esfuerzo vertical (kPa)
Goma Triturada	535	28	$6.85 \times 10^{-3}$ @ 30 $5.84 \times 10^{-3}$ @ 160
Goma - Arena	1082	40	$5.48 \times 10^{-3}$ @ 20 $4.4 \times 10^{-3}$ @ 160

- **Estudio de Reddy y Marella (2001)**

Reddy y Marella (2001) presentan un resumen de diferentes propiedades ingenieriles de la goma triturada basada en estudios anteriores. En síntesis se mostraron las siguientes propiedades: peso unitario, conductividad hidráulica, ángulo de fricción, cohesión, compresibilidad, propiedades de resistencia al corte en la interfase con suelo, propiedades de resistencia al corte de interfase con geotextil, propiedades de resistencia al corte de interfase con geomembrana suave, propiedades de resistencia al corte de interfase con geomembrana texturizada. En la Tabla 3-8 se presenta en resumen de las propiedades recopiladas en esta referencia.

**Tabla 3- 8 Representación estadística de propiedades de goma triturada (Reddy y Marella, 2001)**

Propiedad		Unidades	Mínimo	Máximo	Media	Desviación estándar
Peso unitario		kN/m <sup>3</sup>	2.45	8.5	5.82	1.22
Conductividad hidráulica		cm/s	0.01	59.3	6.8	12.6
Propiedades de resistencia al corte	C	kPa	0	39	12.21	13.14
	Ø	Grados	14	85	33.7	15
Compresibilidad, (deformación unitaria)		%	18	65	37.3	11.1
Propiedades de resistencia al corte en la interfase con suelo	Ca	kPa	0	2.1	0.84	0.86
	δ	Grados	33	39	35.8	2.9
Propiedades de resistencia al corte de interfase con geotextil	Ca	kPa	0	0	0	0
	δ	Grados	30	34	32	2.82
Propiedades de resistencia al corte de interfase con geomembrana suave	Ca	kPa	0.31	0.6	0.47	0.14
	δ	Grados	15	21	18	3.0
Propiedades de resistencia al corte de interfase con geomembrana texturizada	Ca	kPa	0.53	1.03	0.73	0.27
	δ	Grados	30	35	33	2.6

En el estudio se advierte una variación grande de los valores reportados, debido a las diferencias en cuanto a tamaño y composición de las distintas gomas trituradas y los métodos de ensayo empleados por los distintos estudios.

- **Estudio de Yang, Lohnes y Kjartanson (2002)**

Yang, Lohnes y Kjartanson (2002) evaluaron las características mecánicas del neumático triturado con tamaños entre 2 y 10 mm. En este estudio se realizaron dos ensayos de compresión confinada en odómetro, dos ensayos de compresión confinada en celda triaxial, ensayos de corte directo y ensayos de compresión triaxial consolidada drenada. En el ensayo de compresión confinada en celda triaxial los especímenes mostraron deformación volumétrica entre 23% y 40%, bajo esfuerzos verticales de 120 y 480 kPa, respectivamente. Tatlisoz y otros (1998) presentan deformaciones volumétricas de 26% para esfuerzos verticales de 120 kPa. Humphrey y otros (1993) presentan deformaciones volumétricas de 40% para esfuerzos verticales de 400 kPa. Estos resultados son comparados con los obtenidos por Zimmerman (1997) que reporta deformación volumétrica de 40% para esfuerzo vertical de 17 kPa para goma triturada de tamaño entre 100 y 900 mm. Se concluyó que la goma triturada en tamaños pequeños, entre 2 a 10 mm, tiene valores más bajos de compresibilidad confinada que los tamaños grandes, de 100 a 900 mm.

Yang y otros (2002) realizaron ensayos de corte directo a muestras de goma triturada de tamaño máximo 10 mm y peso unitario de  $5.73 \text{ kN/m}^3$ . El esfuerzo normal aplicado estuvo en el rango entre 0 y 83 kPa. Se reportan resultados de cohesión de 0 kPa y ángulo de fricción de  $32^\circ$ . Comparando los resultados obtenidos en este estudio con datos de estudios previos los autores indican que el tamaño de la goma no influye mucho los parámetros de resistencia al corte. La variación en los parámetros de resistencia depende de los esfuerzos normales colocados en la muestra durante el ensayo.

Yang y otros (2002) también llevaron a cabo pruebas triaxiales. La Figura 3-2, presenta resultados de los ensayos triaxiales. Esta gráfica muestra el módulo elástico tangente inicial obtenido de los ensayos triaxiales en función de la presión de confinamiento aplicada.

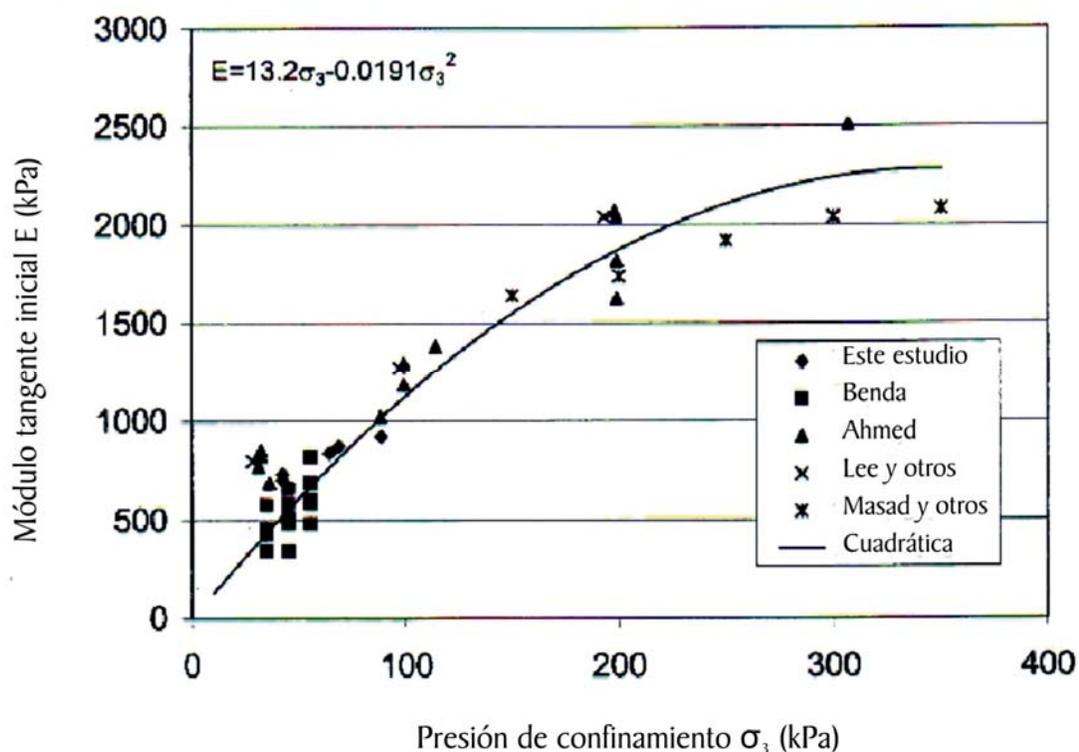


Figura 3- 2 Relación entre módulo tangente y presión de confinamiento de goma triturada del ensayo compresión triaxial (Yang, Lohnes y Kjartanson, 2002)

- **Estudio de Youwai y Bergado (2003)**

Youwai y Bergado (2003) presentan resultados de ensayos triaxiales drenados mezclando diferentes porcentajes de neumático triturado (shredded rubber tire de tamaño máximo 16 mm) y arena. Encontraron que a medida que se incrementa la relación de arena en la mezcla, se aumenta el peso unitario. Para mezclas con contenido de arena mayor del 30%, la deformación se redujo significativamente. Las características de dilatancia del neumático triturado mezclado con arena son relativamente similares a

las propias de materiales sin cohesión. Propone un modelo general para las características esfuerzo-deformación de la mezcla arena-goma de acuerdo a diferentes proporciones de neumático destrozado. En la Figura 3-3 se presenta la variación del ángulo interno de fricción entre  $30^\circ$  y  $34^\circ$  de acuerdo al contenido de arena en la mezcla.

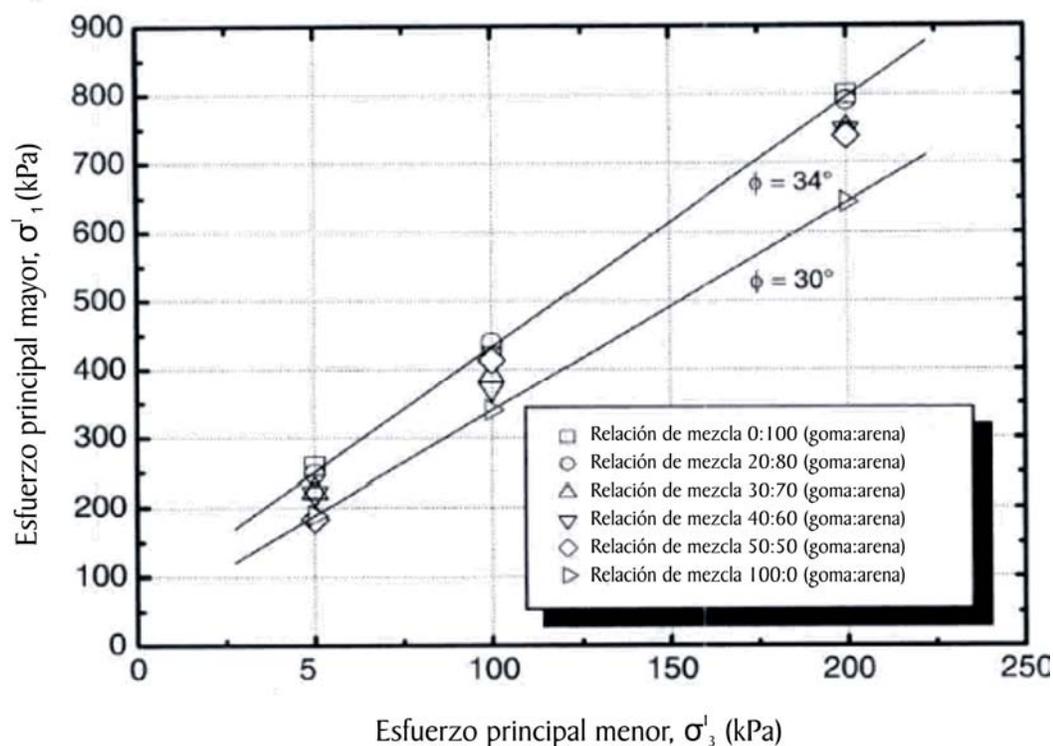


Figura 3- 3 Relación entre esfuerzo principal mayor y esfuerzo principal menor para goma triturada del ensayo compresión triaxial (Youwai y Bergado, 2003)

- **Estudio de Zornberg y otros (2004)**

Zornberg y otros (2004) utilizaron un aparato triaxial a gran escala para evaluar la dosificación óptima de goma triturada de tamaños entre 12.7 y 25.4 mm. Los autores llegaron a las siguientes conclusiones: El contenido de goma triturada influye significativamente el comportamiento esfuerzo-deformación y la deformación volumétrica de los especímenes. Las deformaciones axiales de falla se incrementaron

con el aumento de goma triturada. La resistencia al corte se incremento con el aumento del contenido goma triturada hasta un valor óptimo de 35 % por encima del cual la resistencia al corte disminuye. La forma de goma triturada no tuvo mucha incidencia en el comportamiento esfuerzo-deformación y en la deformación volumétrica de las muestras para deformaciones axiales por debajo del 5%. Sin embargo sí afectó estos parámetros para deformaciones axiales altas. El incremento de la relación de forma aumento la resistencia al corte. Finalmente los autores concluyen que la contribución de las mezclas arena-goma a la resistencia al corte es significativa pero especialmente para presiones de confinamiento bajas ( $\leq 48$  kPa). Un resumen de este estudio se presenta en la Tabla 3-9.

**Tabla 3- 9 Resumen de resultados (Zornberg y otros, 2004)**

Serie	Densidad relativa de la arena, $D_r$ (%)	Contenido de goma triturada (% peso)	Ancho de goma triturada (mm)	Relación de forma de goma triturada	$\Phi$ (°)	C (KPA)	$\Phi_{EQ}$ (°)
1	55	0	na	na	36.8	7.8	37.9
2	75	0	na	na	41	3.8	41.4
3	55	10	12.7 (0.5 in.)	4	35.7	21.7	38.9
4	55	30	12.7 (0.5 in.)	4	35.7	30.4	40.2
5	55	60	12.7 (0.5 in.)	4	34.4	18.2	37.3
6	na	100	12.7 (0.5 in.)	4	21.4	22.8	26.5
7	75	30	12.7 (0.5 in.)	4	36.4	30.7	40.8
8	55	30	12.7 (0.5 in.)	2	35.6	22.3	38.9
9	55	30	25.4 (1 in.)	1	35.1	23.7	38.7
10	75	20	12.7 (0.5 in.)	4	37.2	22	40.3
11	55	30	12.7 (0.5 in.)	8	36.1	60	44.5
12	55	38.3	12.7 (0.5 in.)	4	36.1	41.2	42
13	55	10	25.4 (1 in.)	1	36.5	19.8	39.4
14	55	5	12.7 (0.5 in.)	4	36.1	7	37.1
15	65	15	12.7 (0.5 in.)	4	34.8	21.7	38.2

Nota: na= no aplica.

- **Estudio de Ghazavi y Saki (2005)**

Ghazavi y Saki (2005) realizan un estudio de arena mezclada con neumático en tiras de forma rectangular analizando las propiedades de resistencia al corte. El ancho de las tiras de neumático es de 2, 3, 4 cm y la longitud es variada. La variación de forma se define como la longitud de la tira dividida entre el ancho de la tira de goma. El contenido de neumático en la mezcla varía entre de 15, 30, y 50% por volumen. Los pesos unitarios analizados son 15.5 y de 16.8 kN/m<sup>3</sup>. En el estudio se quiere mostrar la influencia de parámetros como peso unitario, contenido de goma, compactación, longitud y ancho de la goma, en las características de resistencia al corte del material.

En los resultados se presenta que para una relación de forma óptima de la goma, el ángulo de fricción se incrementa, con el aumento de contenido de goma y nivel de compactación. El incremento en el contenido de goma causó aumento en el ángulo de fricción entre 10% y 94%, este porcentaje varía en función de: ancho de la tira, relación de forma, contenido de goma y el nivel de compactación. La optimización de la relación de forma de la goma para anchos de 2, 3, 4 cm puede incrementar el ángulo de fricción en promedio 25%. En la Figura 3-4 y 3-5 se presenta la variación del ángulo de fricción de acuerdo al contenido de goma y la variación en la relación de forma.

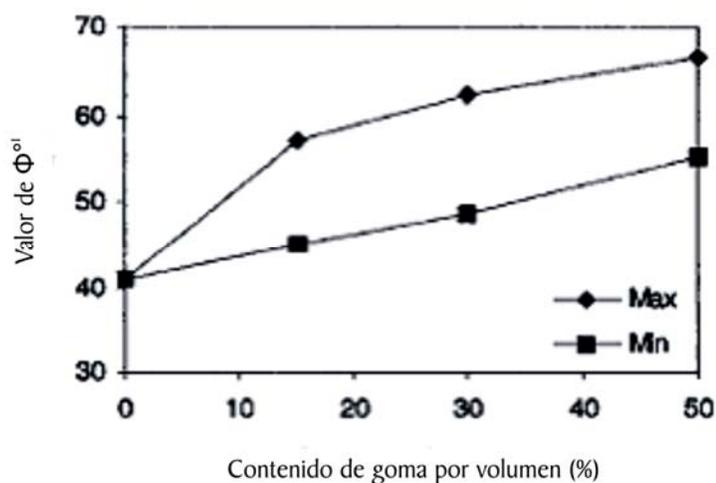


Figura 3- 4 Variación del ángulo de fricción interno con el contenido de goma para  $\gamma=16.8 \text{ kN/m}^3$  (Ghazavi y Saki, 2005).

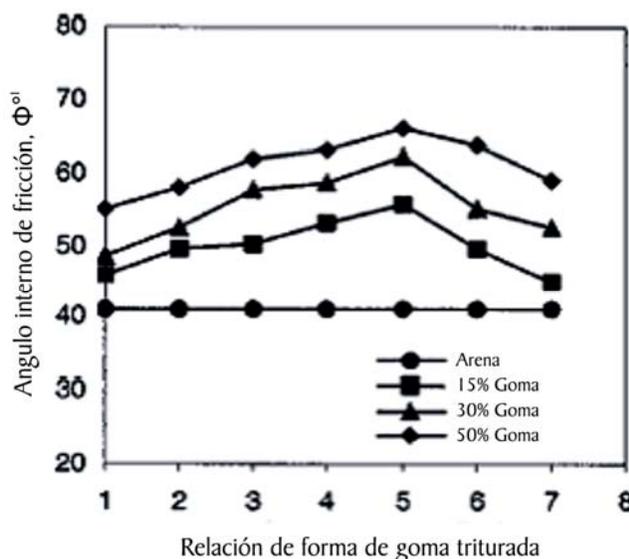


Figura 3- 5 Variación del ángulo de fricción interno con la relación de forma para un ancho de 2 cm de goma y  $\gamma=16.8 \text{ kN/m}^3$  (Ghazavi y Saki, 2005).

Se presenta que, para un ancho dado solo con cierta longitud se obtiene un mayor ángulo de fricción, esto para cierto nivel de compactación y contenido de goma. El mayor valor obtenido de ángulo de fricción fue de  $67^\circ$ , obtenido para un contenido de goma de 50%, dimensiones de goma de  $4 \times 8 \text{ cm}$  y peso unitario de  $16.8 \text{ kN/m}^3$ .

- **Estudio de Rao (2005)**

Rao (2005) en este estudio examinó el cambio en la conductividad hidráulica en muestras de 100% goma triturada (*tire shreds*) cuando se utiliza como material de drenaje medio en sistemas de colección de lechadas en rellenos, para esto examino el cambio en la permeabilidad en muestras de goma triturada después de estar sujetas a deformaciones por compresión hasta un 50%, aplicando esfuerzos verticales entre 75 a 330 kPa. El método empleado para medir la permeabilidad fue el permeámetro de carga constante. El aparato se modifico para permitir mediciones bajo diferentes niveles de deformación axial y diferentes niveles de esfuerzos. Los resultados muestran que la compresibilidad natural de la goma triturada no interfiere con la función de drenaje del material.

## • Resumen

De los distintos estudios encontrados se preparó la Tabla 3-10 resumiendo los valores de parámetros de la resistencia al corte reportados. De forma similar las Tablas 3-11 y 3-12 resumen resultados de coeficiente de permeabilidad y módulo tangente inicial, respectivamente.

**Tabla 3- 10 Resumen parámetros de resistencia al corte**

Referencia	% Goma (por peso)	Tamaño máximo de goma (mm)	Peso unitario (kN/m <sup>3</sup> )	Angulo de fricción (°)	Cohesión (kPa)	Criterio de falla (%)	Ensayo
Cecich et al. (1996)	100	10	6	27	7	Desplazamiento 15	Corte directo
Collins (1997)	100 53	30 30	5.35 10.82	28 40	0 0	Máximo esfuerzo desviador	Compresión triaxial
Reddy y Marella (2001)	100	2 a 381	2.45 a 8.5	14 a 85	0 a 39	Diferentes criterios	Resumen de varios reportes
Yang, Lohnes y Kjartanson (2002)	100 100	10 10	5.73 5.73	32 11	0 21.6	Desplazamiento 10 Deforma. Unitaria 10	Corte directo Compresión triaxial
Youwai y Bergado (2003)	0 100	16 16	17.35 7.37	34 30	0 0	Máximo esfuerzo desviador o Deforma. Unitaria 15%	Compresión triaxial
Zornberg et al. (2004)	5 a 100	25.4	6 a 9	21.4 a 37.2	22.8 a 22	Máximo esfuerzo desviador o Deforma. Unitaria 15%	Compresión triaxial
Ghazavi y Saki (2005)	15 a 50 ( <sup>1</sup> )	2 a 4	15.5 y 16.8	30 a 68	0 a 32	Máximo esfuerzo desviador	Corte directo

Nota: (<sup>1</sup>) Dosificación por volumen

**Tabla 3- 11 Resumen parámetros de permeabilidad**

Referencia	% Goma (por peso)	Tamaño máximo de goma (mm)	Peso unitario (kN/m <sup>3</sup> )	Coficiente de permeabilidad (k) (cm/s)
Cecich et al. (1996)	100	10	5.6 a 6.1	0.033 a 0.034
Collins (1997)	100	30	5.35	0.685 x 10 <sup>-3</sup> @ 30 kPa 0.584 x 10 <sup>-3</sup> @ 160 kPa
	53	30	10.82	0.548 X 10 <sup>-3</sup> @ 20 kPa 0.44 x 10 <sup>-3</sup> @ 160 kPa
Reddy y Marella (2001)	100	2 a 381	2.45 a 8.5	0.01 a 59.3

**Tabla 3- 12 Resumen parámetros módulo tangente inicial**

Referencia	% Goma (por peso)	Tamaño máximo de goma (mm)	Peso unitario (kN/m <sup>3</sup> )	Módulo Tangente Inicial kPa
Collins (1997)	100	30	5.35	730
	53	30	10.82	1200
Yang, Lohnes y Kjartanson (2002)	100	10	5.73	800

### 3.3.2 Estudios experimentales sobre compresibilidad de la goma triturada y mezclas suelo-goma

Los estudios experimentales sobre compresibilidad de la goma triturada se resumen en la Tabla 3-13. Adicionalmente se presenta una explicación más detallada a continuación.

**Tabla 3- 13 Resumen de estudios experimentales sobre compresibilidad de la goma triturada y mezclas suelo-goma**

Referencia	Descripción breve	Resultados principales
Ahmed y Lovell (1993)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Presenta los beneficios de utilizar goma triturada como relleno de bajo peso y la experiencia de campo en tres estados Minnesota, Oregon y Colorado.</li> <li>Presenta ensayos de compactación y compresión de laboratorio realizados usando muestras de goma triturada y mezclas con arena.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Los asentamientos observados en campo en terraplenes construidos con goma triturada están entre 10% y 15 % calculados con respecto al espesor inicial de la capa</li> <li>Para que no se generen grandes asentamientos en terraplenes, se consideró óptimo un contenido de goma de 40% en peso en la mezcla suelo-goma.</li> </ul>
Drescher, Newcomb y Heimdhl (1999)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Determina la respuesta de la goma triturada ante carga cíclica</li> <li>Estudia la compresibilidad del neumático triturado a largo plazo</li> <li>Analiza las posibles propiedades anisotrópicas del material.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>En el estudio se observa un comportamiento no lineal de la goma triturada ante carga cíclica.</li> <li>Las deformaciones por creep en un tiempo de 24 horas fueron de 15% en muestras inconfiadas y 2% en muestras confinadas.</li> <li>Se presentan ecuaciones representativas de la compresión a largo plazo del material</li> </ul>
Wartman, Natale y Strenk (2007)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Examinan la compresión a largo plazo de la goma triturada y mezclas de esta con arena.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>El esfuerzo aplicado y el tamaño de la partícula tienen un efecto despreciable en la compresión en el tiempo de la goma triturada.</li> <li>La deformación a largo plazo se analiza mediante el índice de compresión secundaria modificado (<math>C_{\alpha\epsilon}</math>), el cual se encuentra en un rango desde 0.0010 (50% tire chips) a 0.0074 (100% tire chips).</li> </ul>

- **Estudio de Ahmed y Lovell (1993)**

Ahmed y Lovell (1993) recolectaron la experiencia de campo en rellenos construidos con neumático triturado hasta la fecha y realizaron algunos ensayos de compresibilidad en laboratorio. En el estudio se muestra información sobre la experiencia en los estados de Minnesota, Oregon y Colorado. En Minnesota según la Agencia Estatal de Control de Polución (MPCA) para febrero de 1992 se documentaron 23 sitios donde se había utilizado la goma triturada como relleno. La mayoría de los sitios estudiados eran vías. En un proyecto de Oregon se investigó un relleno con goma triturada (*shredded-tire*) de espesor de 3.81 metros (12.5 pies) el cual se comprimió verticalmente un 13% (0.51 m (20 pulgadas) en total. Los asentamientos observados en campo en terraplenes construidos con goma triturada están entre el 10% y 15 % calculados con respecto al espesor inicial de la capa. Sin embargo, estos se pueden reducir usando mezclas de suelo-goma. El estudio determinó que el uso de la goma triturada tiene un costo efectivo menor comparado con otros materiales de relleno de bajo peso como el polietileno. Sin embargo los autores expresaron la necesidad de mirar el impacto ambiental a largo plazo y el comportamiento mecánico.

Por otro lado este estudio también evaluó la compactación y compresión de la goma triturada y mezclas de suelo-goma. El tamaño de la goma triturada varió desde 50.8 mm hasta 4.75 mm y presentaron un pequeño porcentaje de alambre expuesto. Los suelos utilizados fueron, arcilla arenosa limosa y arena tipo Ottawa. El contenido de goma en las mezclas de suelo-goma varió desde 0% hasta 100%. Se compactaron muestras en 8 capas, bajo tres energías de compactación, Proctor modificado, Proctor estándar y 50% de Proctor estándar. Estas muestras fueron sometidas a ciclos de carga y descarga en el laboratorio. Con los ensayos de compresión se llegó a la conclusión que tres mecanismos son responsables de la compresión total del material, el reacondicionamiento y deslizamiento de la goma triturada, la colocación del material en capas una sobre la otra y la deformación elástica de la goma. La compresión total de las muestras se incrementó con el aumento del contenido de goma, el valor más alto de compresión se obtuvo para

muestras con 100% goma. Para que no se generen grandes asentamientos en terraplenes, se considero optimo un contenido de goma de 40% en peso en la mezcla suelo-goma.

Finalmente estos autores llegaron a la conclusión que el uso de neumático triturado tiene tres problemas grandes los cuales son la posible generación de lechada de materiales e hidrocarburos, riesgo de incendio, y alta compresibilidad.

- **Estudio de Drescher, Newcomb y Heimdhl (1999)**

Drescher, Newcomb y Heimdhl (1999) estudiaron el comportamiento de goma triturada bajo carga cíclica, la compresibilidad a largo plazo y las propiedades anisotrópicas del material, para muestras confinadas e inconfiadas. La goma triturada tiene tamaño promedio de 55\*25\*10 mm (2.2\*1\*0.4 pulgadas).

En los ensayos cíclicos se muestra que el material se volvió más rígido con el incremento de la carga. En los ensayos de compresión a largo plazo en muestras confinadas e inconfiadas durante dos años, se presentaron fluctuaciones en la rata de deformación durante los meses de verano probablemente por el incremento en la humedad y temperatura. Se encontraron deformaciones inmediatas de 21% para muestras inconfiadas y 15% para muestras confinadas. Las deformaciones por creep en un tiempo de 24 horas fueron de 15% en muestras inconfiadas y 2% en muestras confinadas. Las Ecuaciones 3-1 y 3-2, describen la deformación unitaria del material en un intervalo de tiempo de 0 a 24 horas y 30 a 630 días respectivamente.

$$\varepsilon_c = 0.366 * t^{0.359} \quad (3-1)$$

$$\dot{\varepsilon} = 12.06 * t^{1.08} \quad (3-2)$$

Estas ecuaciones aplican para muestras confinadas, donde  $\epsilon_c$  es la deformación unitaria,  $t$  es el tiempo en días y  $\dot{\epsilon}$  es el cambio de deformación unitaria en el tiempo.

Este estudio, también investiga las posibles propiedades anisotrópicas del material. Un módulo de elasticidad más grande fue encontrado en dirección paralela a las capas que en dirección perpendicular a las capas.

- **Estudio de Wartman, Natale y Strenk (2007)**

Wartman, Natale y Strenk (2007) presentan datos de compresión a largo plazo de goma triturada y la mezcla de este material con arena. Para realizar la investigación dos equipos de laboratorio fueron adaptados para acomodar las muestras de acuerdo al tamaño de partícula. La compresión inmediata de goma triturada se debió casi totalmente a la reducción de volumen de poros, esta se incremento con el contenido de goma y el tamaño de la partícula. El módulo secante confinado de goma triturada calculado en el rango entre 0 y 50 kPa vario desde 255 kPa para muestras de 100% neumático triturado hasta 1320 kPa para muestras preparadas con 50% viruta de neumático. La deformación a largo plazo se analizó mediante el índice de compresión secundaria modificado ( $C_{\alpha\epsilon}$ ), el cual se encuentra en un rango desde 0.0010 (50% tire chips) a 0.0074 (100% tire chips). La deformación a largo plazo es inversamente proporcional al contenido de arena, se observo un cambio significativo en esta para un contenido de arena de 15%. El esfuerzo aplicado y el tamaño de la partícula tienen un efecto despreciable en la compresión en el tiempo de goma triturada. En este estudio, se recomienda tener en cuenta el asentamiento a largo plazo en el diseño de estructuras que utilicen goma triturada.

### **3.4 Estudios experimentales de campo**

Esta sección resume la literatura encontrada que involucró pruebas de campo y monitoreo a corto y largo plazo de construcciones, involucrando goma triturada. La

mayoría de los estudios involucraron terraplenes y algunos muros de contención. La Tabla 3-14 presenta un listado de los estudios encontrados.

**Tabla 3- 14 Resumen de estudios experimentales de campo involucrando goma triturada**

Referencia	Tipo de proyecto	% Goma (peso)	Tamaño máximo de goma (mm)	Espesor máximo de capa de goma triturada (m)	Peso unitario (kN/m <sup>3</sup> )	Descripción resumida
Boscher y otros (1993)	Terraplén de prueba en vías – varias secciones.	100 y 50	76	1.5	5 y 11.8	El terraplén de ensayo fue dividido en varias secciones, cada una de 6.1 m de longitud, cada sección contiene diferentes composiciones de capas (solo goma triturada, arena sobre goma triturada, mezcla de goma-arena).
Tweedie y otros (1998)	Modelo de muro de retención a gran escala	100	76	4.88	7	Se recomienda un coeficiente de presión activa de 0.25 para diseño. La cantidad de movimiento necesaria para activar la condición activa fue de 0.04H. La orientación del plano de falla con respecto a la horizontal oscilo entre 61° y 70°.
Humphrey y otros (2000)	Dos casos históricos de rellenos de aproximación a puentes	100% en la capa intercalada con otros suelos	Tipo B = 305 Tipo A = 75	Tipo B =3 Tipo A =1.2	7.7	Se midieron en campo presiones horizontales, asentamientos y temperatura. Los asentamientos medidos en el terreno resultaron 13% más altos que los esperados de acuerdo al laboratorio debido en parte a la compresión a largo plazo. La temperatura de la goma oscilo de acuerdo a la temperatura ambiental.
Dickson y otros (2001)	Terraplén en vías	100	305	3	6	La capa de goma triturada fue sometida a precarga durante cuatro meses para minimizar los asentamientos.
Shalaby y Khan (2002)	Terraplén de acceso	100	300	1.5	3. 36	Se utilizó un modelo para predecir la compresibilidad de la goma triturada en campo, a base de ensayos de laboratorio.
Baker y otros (2003)	Resumen de varios proyectos	-	-	-	-	Realiza una recopilación de varios proyectos construidos con goma triturada, realizando una descripción de estos.
Salgado y otros (2003)	Terraplén en vías	50 ( <sup>1</sup> )	38.1	2	11.53	El máximo asentamiento fue de 12 mm y el movimiento lateral máximo fue de 5 mm. No se evidenciaron asentamientos diferenciales significativos.
Hoppe y Mullen (2004)	Terraplenes en vías	50 ( <sup>1</sup> )	250	6	----	El uso de mezclas goma-arena no creo reacciones exotérmicas para terraplenes de 6.1 metros (20 ft). Las presiones verticales del relleno en el suelo de fundación fueron la mitad que las ejercidas normalmente en terraplenes convencionales. El asentamiento en represas con neumático triturado es aproximadamente dos veces que el presentado en represas convencionales. El uso de precarga por un periodo de 6 meses minimiza futuros asentamientos.
Zornberg y otros (2004)	Tres prototipos de terraplenes con tres secciones distintas, suelo, goma triturada y mezcla de suelo-goma.	i 0 ii 100 iii 10 iv 30	50 a 150 para ii, iii, iv	ii 1.5	iii 17.1 iv 6.6	El prototipo construido con mezcla de neumático-suelo mostró un comportamiento satisfactorio a corto y largo plazo durante la exposición al tráfico. La gravedad específica de la goma triturada fue de 1.26

Nota: (<sup>1</sup>) Dosificación por volumen

Las siguientes subsecciones describen en mayor detalle los estudios listados en la Tabla 3-14.

### 3.4.1 Estudio de Bosscher y otros (1993)

Este estudio involucró la construcción y monitoreo de un terraplén, diseñado para evaluar el uso de neumático triturado como reemplazo del suelo en la construcción de vías. Dentro de las variables investigadas se encuentran, el tamaño de la goma triturada, las presiones de sobrecarga y el uso de diferentes cubiertas sobre la capa de goma triturada. Para evaluar estas variables, el terraplén de ensayo fue dividido en varias secciones, cada una con 6.1 metros (20 pies) de longitud. Cada sección de estudio contiene diferentes composiciones de capas como, goma triturada, arena sobre goma triturada y mezcla de goma-arena. El terraplén fue construido paralelo a una vía de acceso a un relleno sanitario. El terraplén experimental fue expuesto a tráfico pesado, se presenta la configuración de este en la Figura 3-6.

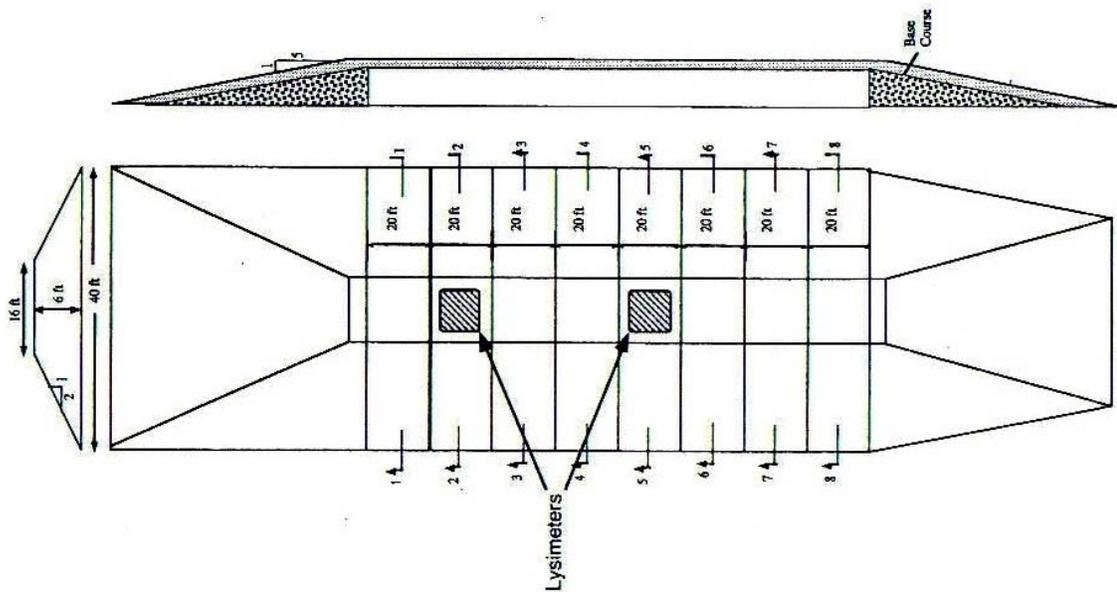
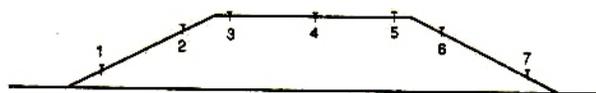


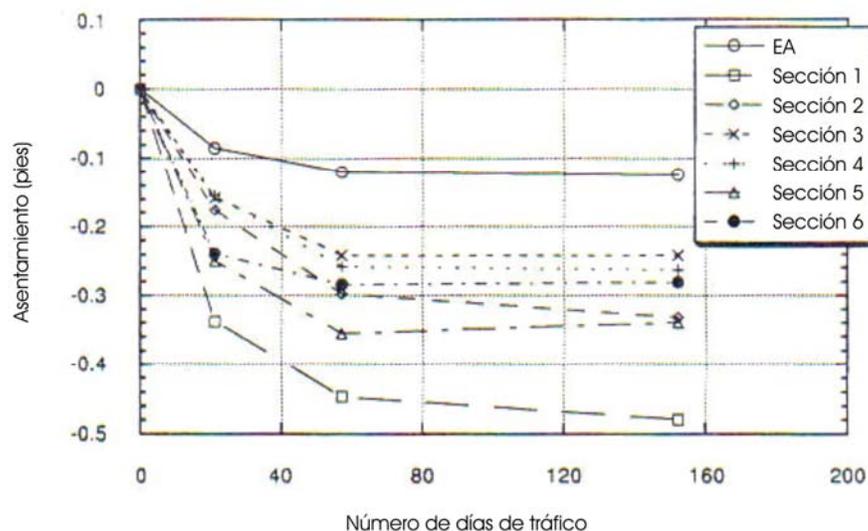
Figura 3- 6 Geometría del terraplén de ensayo (Bosscher y otros, 1993)

El monitoreo se llevo a cabo mediante instrumentos colocados internamente para recolección de datos de campo. Para determinar la deformación de la superficie, se utilizó equipo regular de topografía y platos de asentamientos. En el terraplén se colocaron 70 marcas superficiales de acuerdo a la **Error! Reference source not found.**, periódicamente se tomaron coordenadas x, y, z de estos puntos para observar su variación. Adicionalmente fueron colocados 10 platos de asentamientos en la mitad del terraplén y uno en la base. Para medir la calidad de la lechada que pasa a través del neumático triturado fueron colocados dos lisímetros.



**Figura 3- 7 Localización de los puntos superficiales donde se midieron asentamientos (Bosscher y otros, 1993)**

Las mediciones de los asentamientos del terraplén indicaron un incremento rápido en la compresibilidad durante los primeros 20 días de tráfico. Después de 60 días la curva de asentamientos es prácticamente constante, como se ilustra en la Figura 3-8.



**Figura 3- 8 Asentamientos de cada sección (Bosscher y otros, 1993)**

La sección 3 presentada en la Figura 3-9, estuvo compuesta por una capa de goma triturada de espesor 0.91 metros (3 pies) y cubierta por una capa de arena de 0.61 metros (2 pies) de espesor, tuvo un mejor comportamiento al mostrar una menor compresibilidad comparada con la sección constituida por capas alternadas de goma triturada y arena de 0.31 m (1 pie) de espesor. Se observó que el cambio en la relación de vacíos, debido a los diferentes tamaños de goma empleados y a la combinación de esta con el suelo afectó la rigidez de la capa.

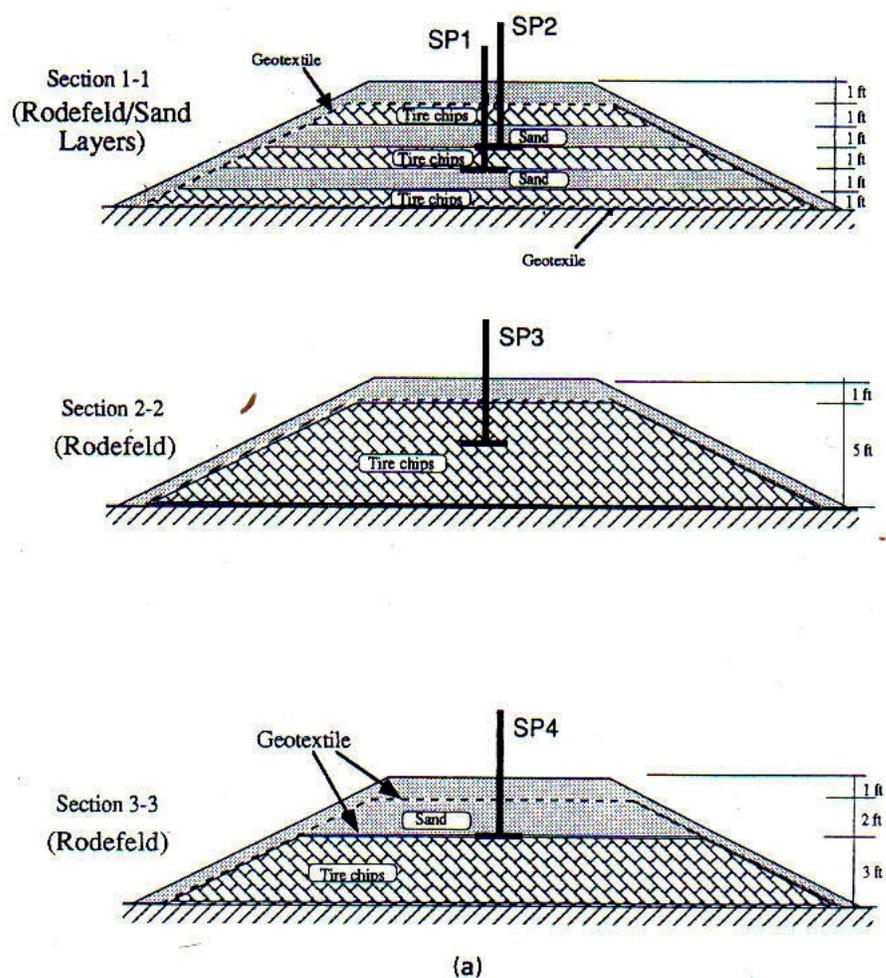


Figura 3- 9 Secciones estudiadas del terraplén (Bosscher y otros, 1993)

En cuanto a la compactación, se observó la dificultad para depositar y compactar capas de neumático triturado. Sin embargo, los autores encontraron que maquinaria convencional de construcción puede ser usada con éxito en la compactación de la goma triturada. Sin embargo reportaron algunos inconvenientes como el pinchado de las ruedas del vehículo de compactación por existir algunos alambres expuestos dentro de la goma triturada, Los autores no encontraron diferencias significativas debido al tipo de compactación estática o vibratoria.

Los autores analizaron el agua que filtraba a través del relleno y reportaron agua sin contaminación y además estimaron una baja probabilidad que la calidad del agua se vea afectada por la goma triturada proveniente de automóviles. En resumen esta investigación encontró viable el uso de goma triturada como relleno liviano para proyectos de carreteras. Los autores encontraron compresibilidad como un problema potencial si no se incluyen suficientes capas de arena.

### *3.4.2 Estudio de Tweedie y otros (1998)*

Estos autores realizaron un estudio el cual consistió en la construcción de un muro de retención de 4.88 metros de altura con el objetivo de efectuar ensayos en condiciones de reposo y condiciones activas. Se utilizó como material de relleno goma triturada la cual fue suministrada por tres empresas. El muro fue instrumentado con celdas de carga para medir las fuerzas actuantes sobre él y celdas de presión para medir las presiones producidas por el relleno. Las celdas de carga fueron usadas para determinar la distribución de esfuerzos horizontales, se presenta un esquema en la Figura 3-10.

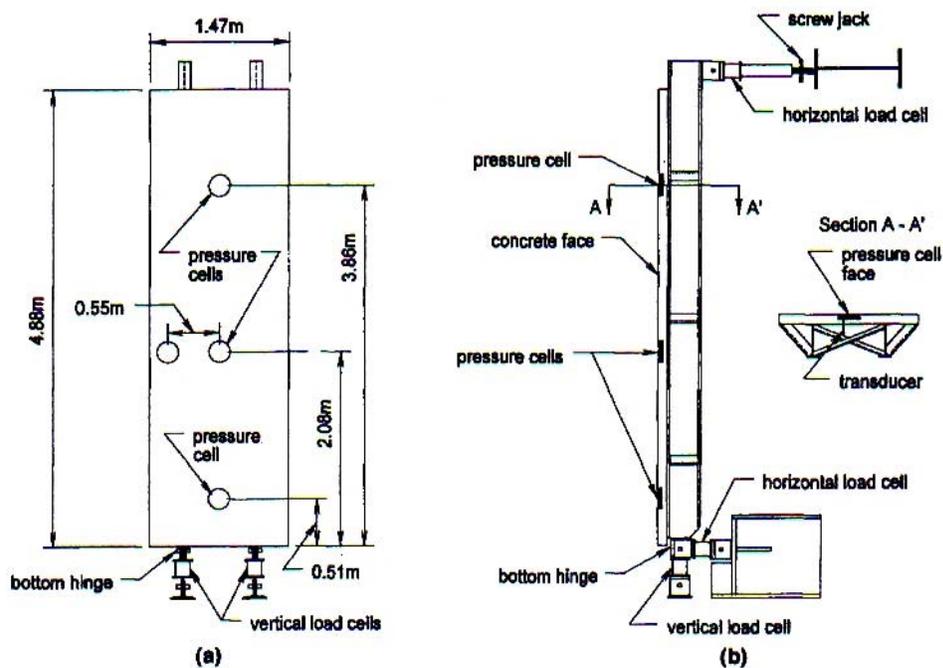
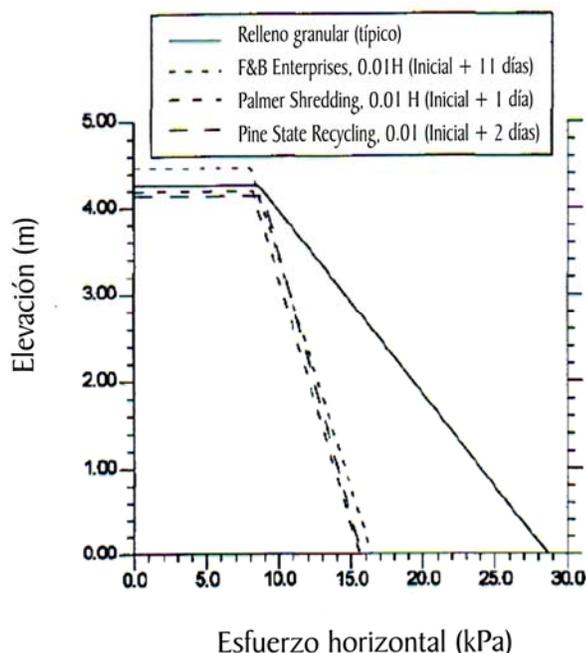


Figura 3- 10 Panel central del muro: (a) perfil (b) sección transversal (Tweedie y otros, 1998)

La goma triturada utilizada presento gradación uniforme y tamaños máximos entre 38 mm y 76 mm. Los parámetros de resistencia al corte fueron medidos con ensayos de corte directo a gran escala, realizados a tres tipos de goma triturada, encontrándose ángulos de fricción de 25°, 19° y 21° y cohesión de 8,6 kPa, de 11.9 kPa, de 7,7 kPa, respectivamente.

Para medir la condición activa, la parte frontal del muro fue rotado en dirección contraria al relleno. Los ensayos fueron realizados con una sobrecarga vertical de 35.9 kPa, la cual fue aplicada por medio de bloques de concreto encima del relleno de goma triturada. Para la rotación de 0.01H el esfuerzo horizontal fue aproximadamente el mismo para las tres tipos de goma triturada y fue 35% menos que los esfuerzos esperados para un relleno convencional granular, ver Figura 3-11.



**Figura 3- 11 Distribución de esfuerzos horizontales en condiciones activas de la goma en el muro (Tweedie y otros, 1998)**

El esfuerzo horizontal para la goma triturada disminuyó al aumentar la rotación hacia fuera del muro, por lo tanto el coeficiente de presión de lateral disminuyó con el incremento de la rotación del muro hacia fuera. Cuando la rotación fue mantenida constante por un periodo de tiempo, el esfuerzo horizontal se incremento debido al creep, el esfuerzo horizontal se estabilizo después de varios días.

Las pequeñas diferencias encontradas en los coeficientes de presiones de tierra (K), para la goma triturada suministrada por los tres proveedores, sugieren que el valor de K no depende del tamaño, ni de la cantidad de correas de acero expuestas, esto es valido para los tamaños máximo empleados en esta investigación (38mm y 76 mm).

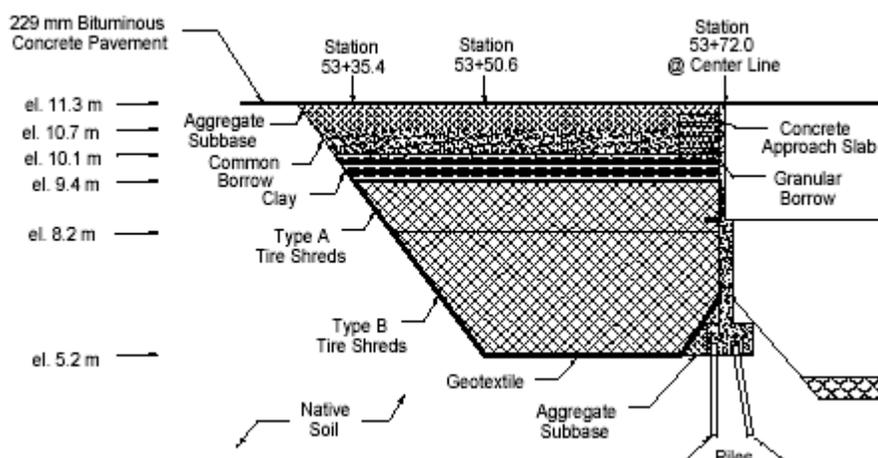
Para muros con condiciones activas similares a las de este estudio se recomendó un coeficiente de presión de tierras de 0.25. Se observo que la rotación necesaria para

alcanzar las condiciones activas debe ser mayor que  $0.04H$  ( $2.2^\circ$ ). La inclinación del plano de deslizamiento con respecto a la horizontal estuvo en el rango de  $61^\circ$  a  $70^\circ$  para los tres tipos de goma triturada.

Dentro de esta investigación se estudiaron patrones de movimiento de un relleno y los asentamientos de su superficie, además se obtuvieron parámetros de diseño para un muro usando dos procedimientos: el coeficiente de presión lateral de tierras y el método del fluido equivalente. Con este estudio se encontró la viabilidad de utilizar goma triturada de tamaño entre 36mm y 76 mm como material de relleno en muros.

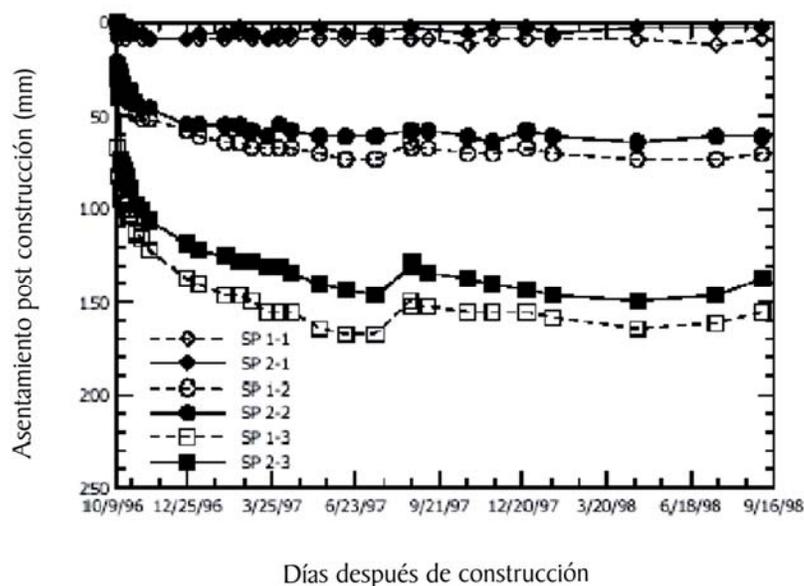
### *3.4.3 Estudio de Humphrey y otros (2000)*

Estos autores presentan un estudio con dos casos históricos en los cuales se utilizó neumático triturado como relleno de bajo peso para terraplenes en vías, estos rellenos fueron construidos sobre una fundación de arcilla marina débil. Los terraplenes fueron instrumentados con diversos equipos de medición como platos de asentamiento, celdas de presión y sensores de temperatura para evaluar presiones horizontales, asentamientos y temperaturas en campo. En el primer caso el neumático triturado fue usado como relleno en el estribo de un puente en el proyecto “North Abutment of the Merry-meeting Bridge in Topsham, Maine”. El perfil inicial del suelo subsuperficial en esta locación consistía en una capa de arena limosa marina de espesor variable entre 3 y 6 metros, colocada sobre una capa de arcilla limosa con espesor variable entre 14 y 15 metros y finalmente se encontraba la roca, el proyecto consistió en excavar material de la banca del río y reemplazarlo con una capa de neumático triturado de 4.3 metros de espesor. En la Figura 3-10 se puede ver la sección longitudinal del estribo y el terraplén construido con goma triturada.



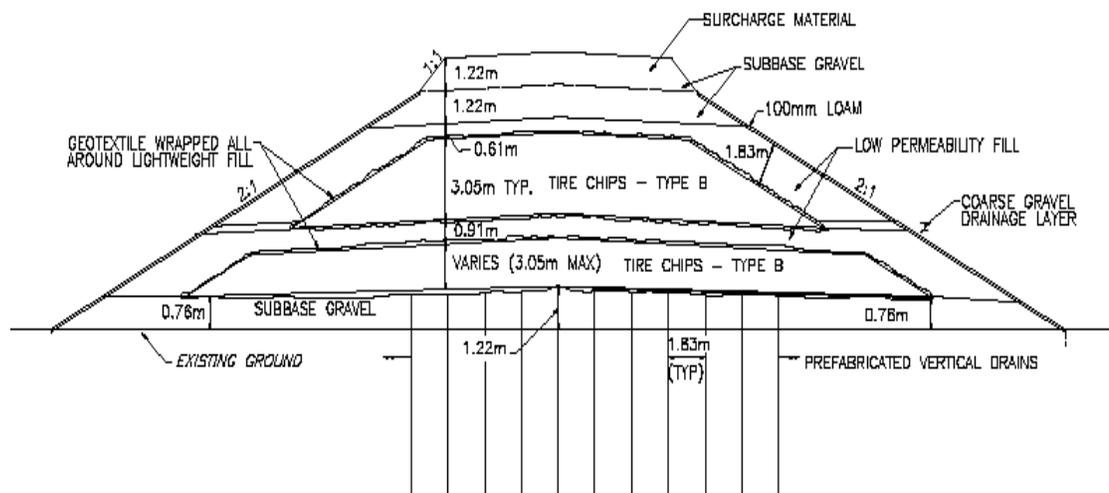
**Figura 3- 12 Sección transversal del relleno con tire shred en North Abutment.  
(Humphrey y otros, 2000)**

En este relleno se utilizaron dos tipos de goma triturada, la denominada tipo B con máxima dimensión de 305 mm y la tipo A con máxima dimensión de 75 mm. Como se puede ver en la Figura 3-12, en la parte superior de la goma triturada se colocó una capa de arcilla con el fin de evitar el paso de flujos de agua y aire a través de la goma y así evitar el sobrecalentamiento de este material. Las presiones horizontales medidas en condiciones de reposo estuvieron entre 17.1 y 20.9 kPa. El asentamiento durante la construcción fue de 370 mm, en la etapa de postconstrucción (60 días) fue de 135 mm y el asentamiento a largo plazo fue de 15 mm. Los asentamientos medidos en el terreno resultaron 13% más altos que los esperados de acuerdo al laboratorio (el total de la compresión fue de 520 mm y en laboratorio se había calculado 460 mm), según el autor esto se debe en gran parte al asentamiento a largo plazo. Las temperaturas monitoreadas en campo estuvieron entre 30 y 40 °C, debido a las variaciones de temperatura registradas, el autor sugiere que la goma triturada tipo B es menos susceptible a la temperatura que la goma tipo A. En la Figura 3-13 se presentan los asentamientos después de la construcción del relleno.



**Figura 3- 13 Asentamientos después de construcción en relleno con tire shred en North Abutment (Humphrey y otros, 2000)**

En el segundo proyecto el neumático triturado fue usado como relleno de bajo peso para construcción de dos terraplenes de altura 9.8 metros en Portland, Maine (Humphrey y otros, 1998), estos terraplenes fueron rellenos de aproximación a nuevos puentes sobre Maine Turnpike. Ver Figura 3-14. La fundación en este caso fue una arcilla marina de 12 metros de espesor, sobreconsolidada, moderadamente sensitiva, e inorgánica y de baja plasticidad. En este proyecto se utilizó el neumático triturado tipo B, el cual tiene una dimensión máxima de 305 mm. En las mediciones de campo se observó, que la compresibilidad promedio medida en la capa de goma triturada fue de 15.6%, valor muy pequeño comparado con el valor esperado de acuerdo a los resultados de los ensayos de compresión en laboratorio en los cuales se había pronosticado una compresión de 22%, la diferencia probablemente se ocasionó porque los ensayos de compresibilidad en laboratorio fueron realizados a goma triturada con tamaño máximo de 75 mm. El monitoreo de la temperatura en el relleno de neumático triturado fue realizado porque en el pasado se habían presentado problemas de calentamiento en rellenos donde se había utilizado este material, el valor inicial de la temperatura osciló entre 24 y 38 °C, después que se colocaron las capas superiores del relleno las temperaturas disminuyeron y se estabilizaron entre 11 y 15 °C.



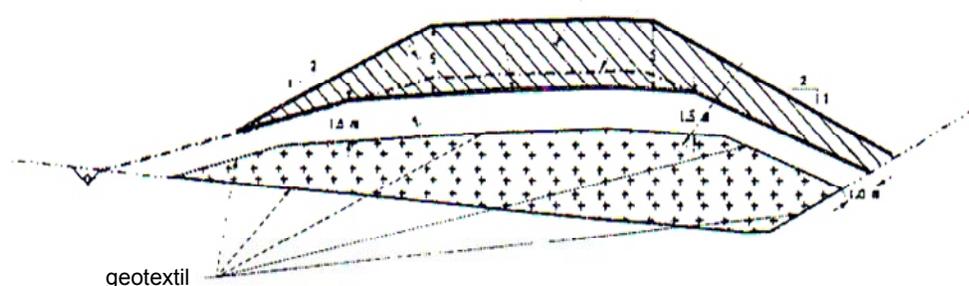
**Figura 3- 14 Sección transversal del terraplén para Pórtland Jetport Interchange  
(Humphrey y otros, 1998)**

En este artículo se llegó a la conclusión que el neumático triturado es un material viable para utilizarlo como relleno de bajo peso en la construcción de vías, sobre arcillas marinas suaves y aplicaciones similares. El estudio recomienda seguir ciertos requisitos de construcción para evitar reacciones exotérmicas de la goma. Las especificaciones para limitar el calentamiento interno del neumático triturado están disponibles en (ASTM, 1998), dentro de los parámetros más importantes que se mencionan en estas guías están, utilizar tamaños grandes de goma triturada, limitar la cantidad de material fino, limitar el espesor de la capa a 3 metros y restringir el acceso al relleno de agua y aire. Las especificaciones completas son contenidas en la norma ASTM D6270 (ASTM, 1998a).

#### *3.4.4 Estudio de Dickson y otros (2001)*

En este artículo se describe un proyecto piloto en el cual se utiliza goma triturada como relleno en un terraplén de 200 metros de longitud, este fue construido por el departamento de transportación del estado de New York. Dentro del terraplén la zona de goma triturada tiene un espesor máximo de 3 metros y esta rodeada con geotextil para

evitar la entrada de agua y aire. En la parte superior y en los lados fue cubierta con un relleno de espesor entre 1.5 y 1 metros. Adicionalmente, la sección entera fue sobrecargada con otro relleno de espesor entre 1.25 y 2.5 metros, el propósito de la sobrecarga es minimizar el asentamiento a largo plazo. Después de cuatro meses la sobrecarga fue removida hasta el nivel de la subrasante, y en su lugar fue colocada la capa de base granular de espesor 300 mm y la sección fue pavimentada. La geometría del terraplén es presentada en Figura 3-15.



**Figura 3- 15 Sección transversal del terraplén (Dickson y otros 2001)**

El proyecto fue diseñado de acuerdo con las guías ASTM D6270 (ASTM, 1998a) para limitar el calentamiento interno del relleno de goma triturada. La goma triturada fue colocada en el relleno con la pala de un cargador y compactada con un rodillo de tambor liso. El terraplén fue instrumentado y monitoreado durante y después de la construcción con, 10 platos de asentamientos, 15 sensores de temperatura y 2 sistemas colectores de agua en los cuales se realizaron observaciones de agua subterránea.

Los asentamientos medidos en esta investigación fueron los esperados basado en proyectos anteriores. La compresibilidad inmediata debida a la colocación de la sobrecarga estuvo entre el 10% y el 12%, y el asentamiento a largo plazo medido en un periodo de 60 días después de la colocación de la sobrecarga estuvo entre 0.01 y 0.025 m o en términos de deformación unitaria entre 0.3% y 0.9%. La mayoría de estos asentamientos ocurrieron durante los primeros 30 días después de colocado el relleno. En las Figuras 3-16 y 3-17 se presentan los resultados de deformación unitaria y asentamientos para este proyecto.

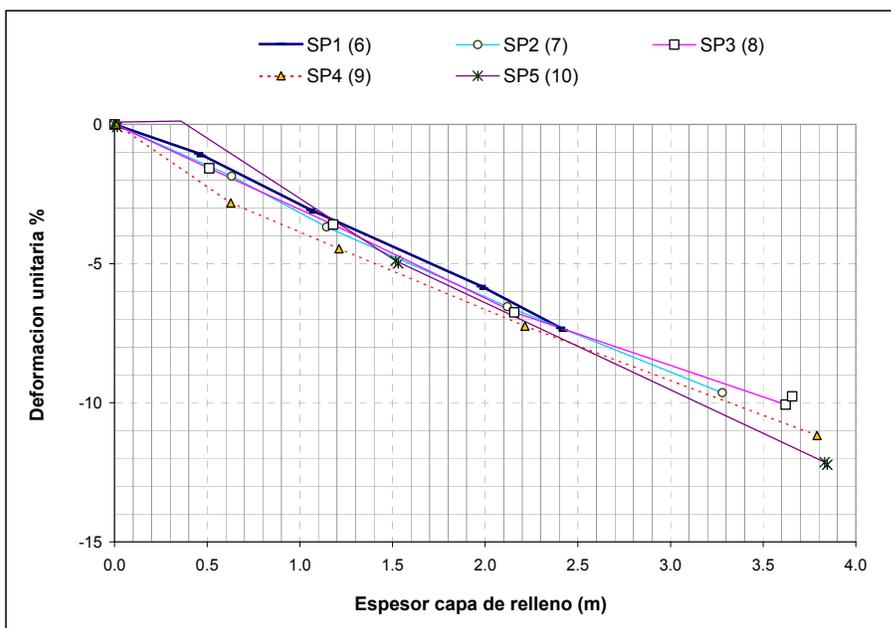


Figura 3- 16 Deformación unitaria en el relleno (Dickson y otros 2001)

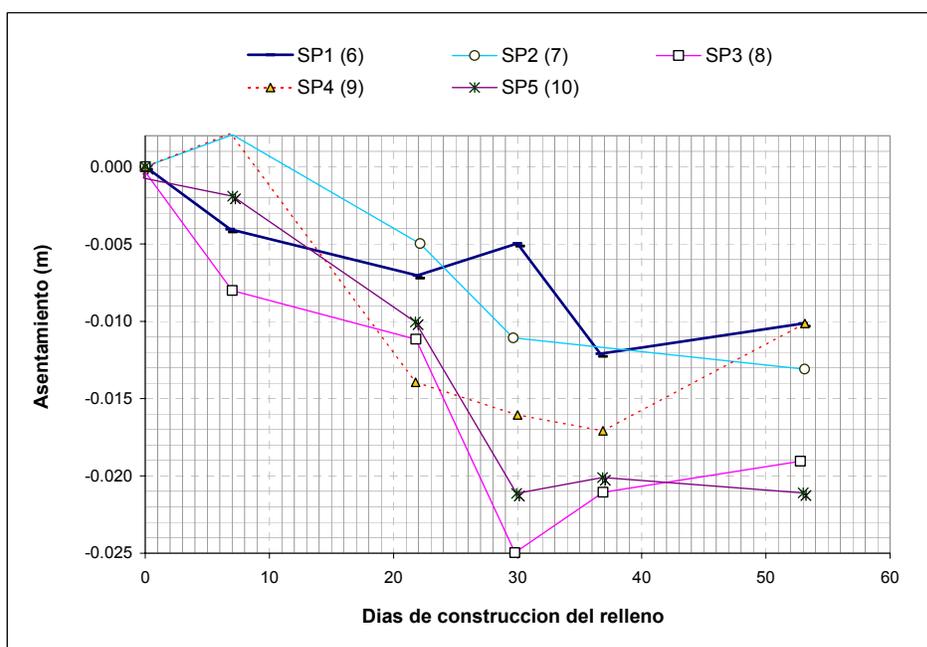


Figura 3- 17 Asentamientos después de la construcción (Dickson y otros 2001)

La medición de la temperatura muestra que no hubo calentamiento interno del relleno, la temperatura mínima después que se terminó la construcción del relleno fue aproximadamente de 3.1°C y la máxima fue de aproximadamente 17.1°C.

En este proyecto se observó viabilidad de utilizar goma triturada en terraplenes para vías.

### *3.4.5 Estudio de Shalaby y Khan (2002)*

Estos investigadores evaluaron las características en el campo y en el laboratorio de la goma triturada en tamaños grandes (large-size shredded tires). Los autores examinaron el comportamiento térmico y mecánico en campo de la goma triturada por medio de monitoreo de temperatura y compresibilidad de un relleno construido para una vía en Winnipeg, Manitoba, Canadá. En el laboratorio se determinó el módulo elástico de la goma triturada en función de la densidad bulk, se utilizó un software (KENLAYER) para predecir y verificar la compresibilidad del neumático triturado en campo basado en ensayos de laboratorio.

En el laboratorio, los tamaños de goma triturada examinados fueron de 300 mm, 150 mm y 50 mm. Los pesos unitarios de este material, en estado suelto para los tamaños mencionados fueron de 3.43 kN /m<sup>3</sup>, 3.55 kN /m<sup>3</sup> y 5.34 kN /m<sup>3</sup> respectivamente. Varios ensayos de laboratorio fueron realizados para determinar la resiliencia del material para altos niveles de esfuerzo. Ensayos de compresión confinada con la aplicación de carga cíclica (carga y descarga) fueron realizados a la goma triturada.

Los resultados de los ensayos cíclicos para un nivel de esfuerzo de 600 KPa en el primer ciclo de carga, arrojaron como resultado deformaciones de 36.5%, 38.5% y 41% para los tamaños de goma de 50 mm, 150 mm y 300 mm respectivamente. Se observó que el módulo elástico de la goma triturada analizada es proporcional a la densidad bulk. El análisis isotrópico elástico no lineal dio como resultado un valor conservador de la

deflexión de la goma triturada utilizada en terraplenes comparado con el análisis elástico lineal. El artículo recomienda utilizar el modelo de análisis plástico no-lineal para el diseño de terraplenes para vías con capas de goma triturada de gran tamaño.

### *3.4.6 Estudio de Baker y otros (2003)*

Baker y otros (2003) evaluaron el uso de gomas trituradas en proyectos de transportación como terraplenes y asfaltos para pavimentos. Este estudio fue para la legislatura del estado de Washington en respuesta a la preocupación de algunos casos reportados por combustión espontánea de rellenos que usaban goma triturada. En el estudio de comportamiento de terraplenes señalan, que el uso de desecho de neumático en rellenos de bajo peso es posible (minimizando el riesgo de fuego o combustión) para estructuras con alturas menores de 3 m (10 pies), si estas son diseñadas adecuadamente y siguen las especificaciones publicadas por la norma ASTM D6270 (ASTM, 1998a).

Las especificaciones se realizaron debido a la combustión espontánea ocurrida en tres obras de tierra que emplearon goma triturada, dos ubicadas en el estado de Washington y una en Colorado. Las fotos de la Figura 3-18 y 3-19 muestran dos de los sitios donde hubo problemas de combustión espontánea.



**Figura 3- 18 Construcción de relleno de bajo peso con neumático triturado, carretera US 101  
(Foto de Baker y otros, 2003)**



**Figura 3- 19 Combustión espontánea en relleno con goma, carretera SR 100 Ilwaco, Washington.  
(Foto de Baker y otros, 2003)**

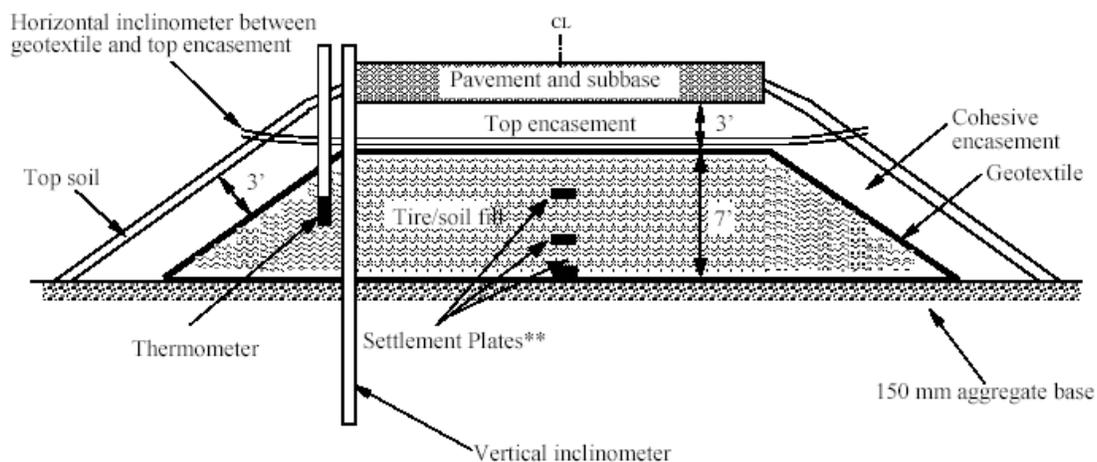
Con base en observaciones realizadas en estos terraplenes construidos con neumático triturado e investigaciones realizadas sobre el calentamiento e incendio que ocurrió, se llegó a la conclusión que, los mecanismos de generación de reacciones exotérmicas son, la oxidación de alambres de acero expuestas, la aparición de microbios que generan condiciones acidas, la oxidación de la goma, y la aparición de microbios que consumen las correas de acero expuestas y productos de petróleo líquido. Dentro de los factores que han favorecido la creación de reacciones exotérmicas se han señalado, el espesor de la capa (el riesgo de combustión espontánea se reduce grandemente en terraplenes con alturas menores de 3 metros (10 pies), la entrada de aire al relleno y el tamaño de las partículas.

### *3.4.7 Estudio de Salgado y otros (2003)*

Estos autores elaboraron un reporte técnico sobre la construcción de un terraplén de ensayo utilizando como relleno mezcla de goma triturada y suelo. El proyecto se

localizó en la estatal Rd. 31 en Lakeville, la mezcla de goma y suelo fue realizada en proporción 50 /50 en volumen (23/77 en peso).

La goma triturada utilizada tiene un tamaño máximo de 38.1 mm (1.5 pulgadas), su peso unitario varia (debido a diferentes tipos de compactación) y se encuentra en el rango entre  $2.4 \text{ kN/m}^3$  y  $7 \text{ kN/m}^3$ . La goma es mezclada con una arena uniformemente gradada con gravedad específica igual a 2,67 y peso unitario sin compactación de  $17.48 \text{ kN/m}^3$ . El espesor de la capa de goma-suelo es de 2.1 m (7 pies) y esta recubierta por un geotextil. Encima de esta capa fue colocada una capa de suelo cohesivo de espesor 0.9 m (3 ft). La longitud del terraplén es de 20 metros. La geometría del terraplén se presenta en la Figura 3-20.



**Figura 3- 20 Geometría e instrumentación del terraplén (Salgado y otros, 2003)**

En el terraplén se realizó instrumentación instalando nueve platos de asentamientos e inclinómetros horizontales y verticales, se realizó monitoreo de temperatura, y análisis de calidad de agua subterránea. El máximo asentamiento medido fue de aproximadamente 12 mm, los asentamientos se estabilizaron después de 200 días, contados a partir de la fecha de apertura de la vía al tráfico. Después de un año no se observó, asentamientos diferenciales, movimientos laterales, muestras de erosión, rotura

en el pavimento de la vía, movimientos de agua subterránea, o problemas de estabilidad de taludes. La máxima temperatura fue de 70 °C, y no hubo evidencia de reacciones exotérmicas esto confirma que la mezcla de goma triturada con suelo previene el calentamiento interno del relleno. El asentamiento máximo en el centro del terraplén es presentado en Figura 3-21.

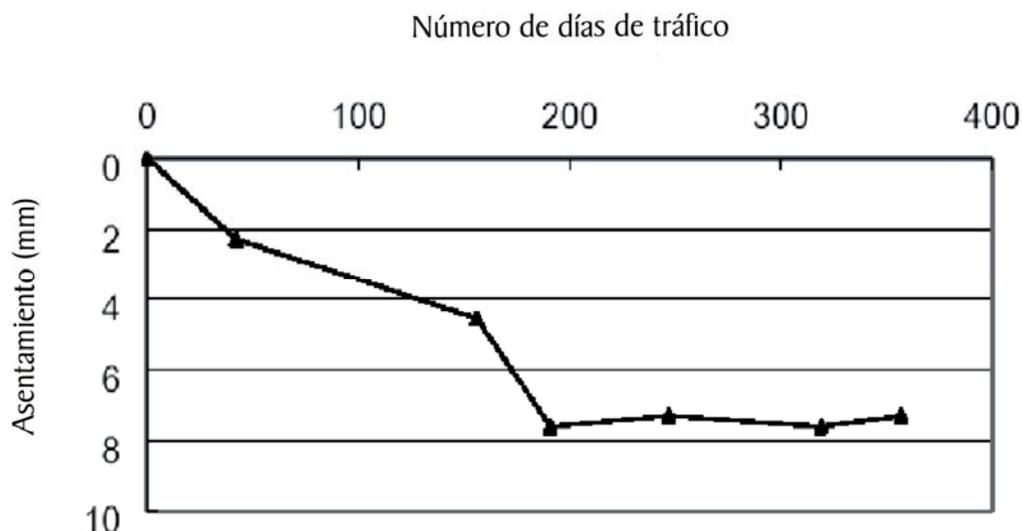


Figura 3- 21 Asentamientos del terraplén con el tráfico (Salgado y otros, 2003)

Con este proyecto se demostró la posibilidad de usar la mezcla de goma triturada y suelo como material de relleno para terraplenes.

### 3.4.8 Estudio Hoppe y Mullen (2004)

Analizaron el comportamiento en campo de un terraplén de una vía construido con la mezcla de suelo y goma triturada (shredded tires) en proporción 50/50 en volumen. Dentro del estudio se analizaron, los asentamientos en campo, esfuerzos verticales y niveles freáticos, técnicas y costos de construcción. Las dimensiones de las secciones fueron de 80 metros de longitud (sección norte) y 160 metros de longitud (sección sur), la máxima altura fue de aproximadamente 6 metros (20 pies). Ver Figura 3-22.

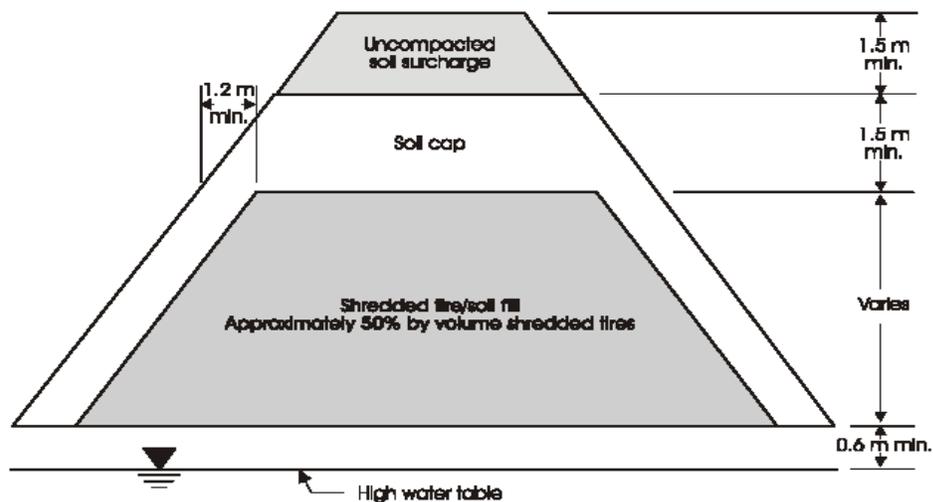


Figura 3- 22 Geometría del terraplén (Hoppe y Mullen, 2004)

En la Figura 3-23 se muestra la instrumentación del terraplén realizada con sensores de asentamientos, celdas para leer presiones de tierra, monitoreo de nivel freático y dispositivos para medir temperatura.

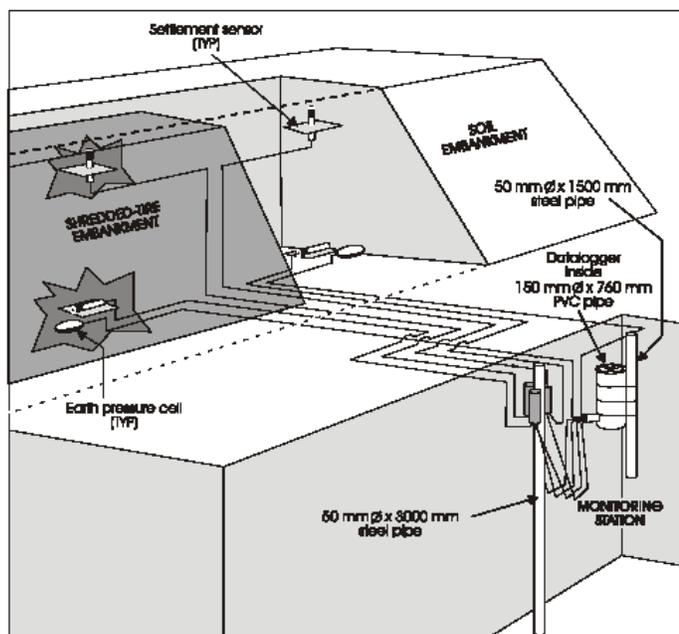


Figura 3- 23 Instrumentación del terraplén (Hoppe y Mullen, 2004)

El asentamiento medido fue aproximadamente el doble del que se obtiene en terraplenes convencionales. Las presiones verticales del relleno en el suelo de fundación fueron la mitad que las ejercidas normalmente en terraplenes convencionales. En el caso de monitoreo de la temperatura no hubo signos de reacciones exotérmicas las cuales se habían presentado anteriormente en algunos casos en donde estaba el neumático triturado sin mezclar con suelo. En este estudio se recomendó el uso de recarga por un periodo de 6 meses para minimizar futuros asentamientos.

Con este estudio se conoció el posible comportamiento en campo de terraplenes para vías construidos con la mezcla de goma triturada y suelo.

#### *3.4.9 Estudio de Zornberg y otros (2004)*

En esta investigación se construyeron tres prototipos de terraplenes conformados por tres secciones: suelo cohesivo, neumático destrozado y mezcla de neumático destrozado y suelo cohesivo (la porción de goma triturada o *tire shreds* fue de 10% en peso). Las dimensiones de las estructuras fueron de 1.5 metros de alto, por 10 metros de longitud. Los terraplenes fueron sometidos a tráfico duro y los asentamientos fueron monitoreados por dos años. Ver las secciones en la Figura 3-24.

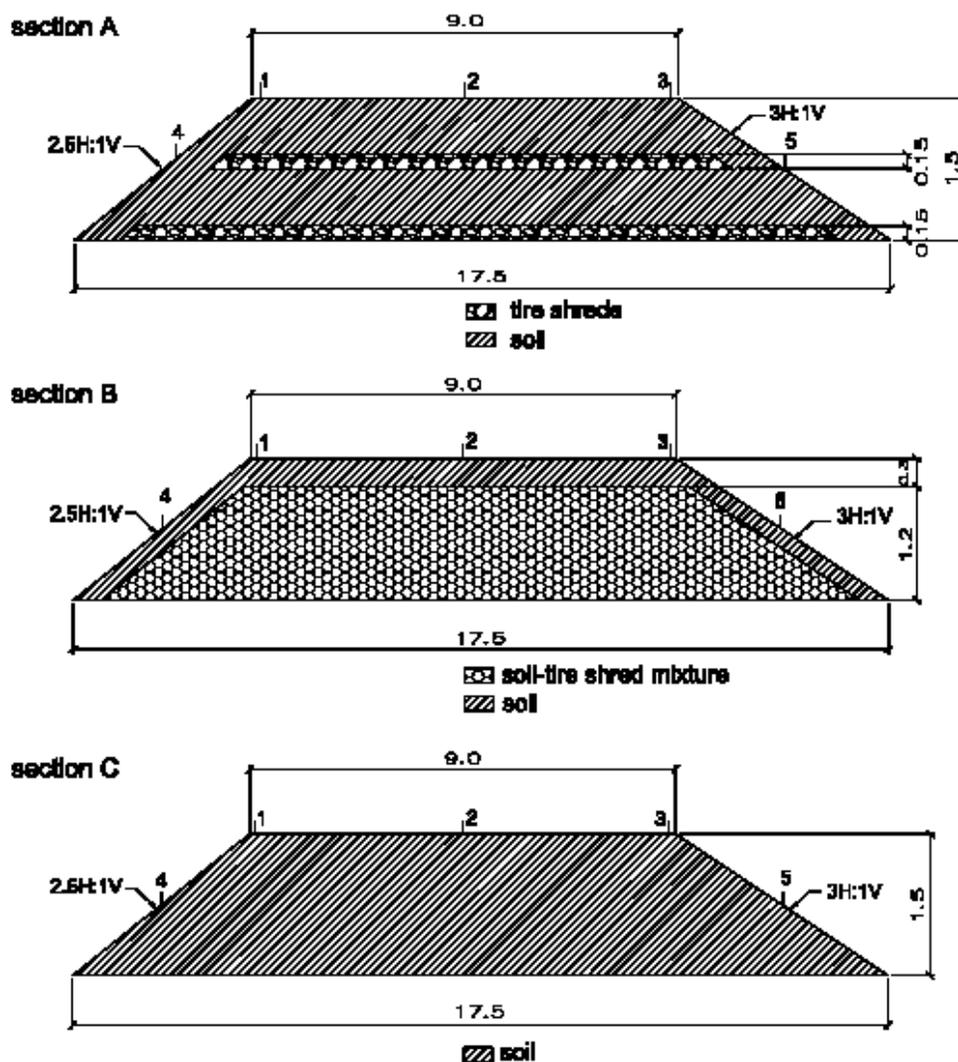


Figura 3- 24 Características de las secciones transversales de los prototipos. (Zornberg y otros, 2004).

En la Figura 3-25 se muestran los puntos donde fueron realizados los ensayos de carga mediante una placa cuadrada y los puntos donde se colocaron marcas de referencia para medición de asentamientos.

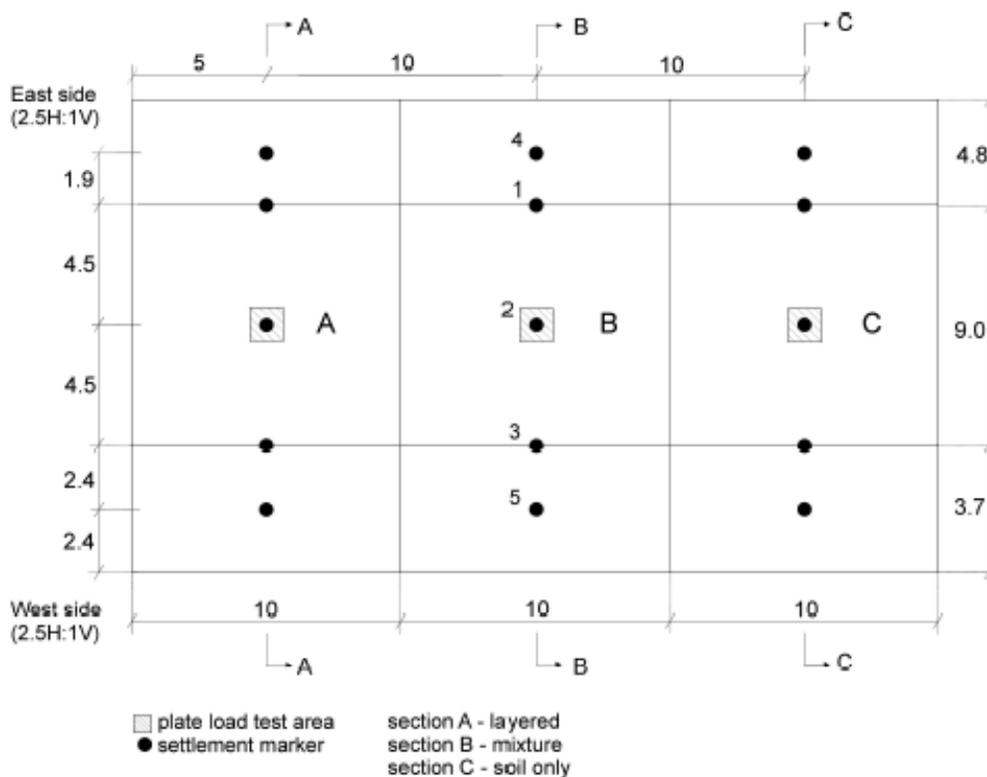


Figura 3- 25 Instrumentación de las secciones ensayadas (Zornberg y otros, 2004).

Los asentamientos fueron más altos en las secciones que contenían solo goma triturada, que en las unidades que contenían suelo puro. La sección construida con mezclas de goma-suelo presentó menores asentamientos que la sección que contenía solo goma. El prototipo construido con mezcla de neumático-suelo mostró un comportamiento satisfactorio a largo plazo durante la exposición al tráfico. En todas las secciones la compresión se produjo durante los primeros 120 días. El proceso de compactación preliminar en campo fue afectado negativamente por la adición del neumático triturado particularmente para contenidos de goma mayores al 30% en peso, debido a esto se utilizó finalmente un 10% como proporción de goma triturada (tire shreds). En la Figura 3-26 se observan los asentamientos de cada sección después de la construcción y tráfico.

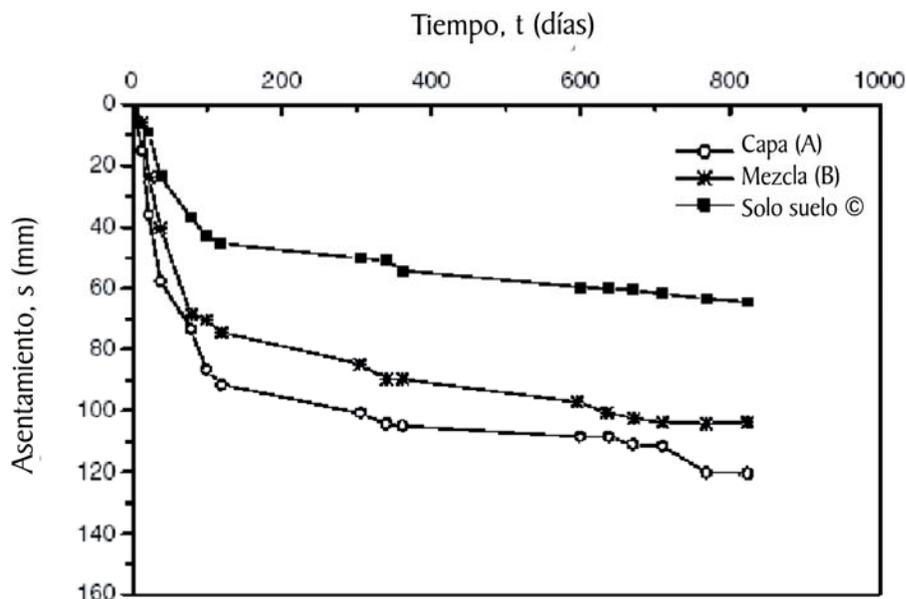


Figura 3- 26 Asentamientos de cada sección después de la construcción (Zornberg y otros, 2004).

Con los resultados de este estudio se observó la viabilidad de construir terraplenes expuestos a tráfico, con goma triturada, suelo y mezclas de estos dos materiales.

### 3.5 Estudios experimentales y analíticos sobre muros de contención y rellenos

Esta sección presenta un resumen de la literatura encontrada sobre estudios experimentales y analíticos para estudiar presiones laterales sobre muros a escala. En la Tabla 3-15 se presenta la información encontrada en este tema y a continuación una explicación más detallada.

**Tabla 3- 15 Resumen de estudios experimentales y analíticos sobre muros de contención y rellenos**

Referencia	Descripción breve	Resultados principales
Fang y otros (2003)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Construyen un prototipo de un muro de contención, instrumentado para medir la presión pasiva de la arena.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se obtienen valores experimentales de presiones pasivas de la arena tipo Ottawa.</li> </ul>
Hanna y Khoury (2005)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Desarrollan un modelo de un muro de contención, instrumentado para medir la presión pasiva en lugares seleccionados.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se muestran cartas de diseño para la arena donde se presentan valores de <math>K_p</math> (coeficiente lateral de tierras pasivo), para diferentes relaciones de sobreconsolidación, ángulo de fricción interno del suelo y ángulo de fricción del muro.</li> </ul>
Mei y Zai (2006)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Investigan el cambio de presiones de tierra con el desplazamiento de muros de contención.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Proponen una nueva fórmula para el cálculo de presiones de tierra considerando el movimiento del muro.</li> </ul>
Terzaghi (1932)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Construye un muro experimental para estudiar el efecto de rigidez del muro en la intensidad de las presiones laterales y el efecto de la saturación del relleno.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• El artículo registra que el error debido a la fricción puede estar en un rango entre el 2% y 3%, este valor depende del coeficiente interno de fricción del relleno.</li> <li>• Se observó que la lubricación tiene un efecto mínimo en la intensidad de las presiones de tierra.</li> </ul>

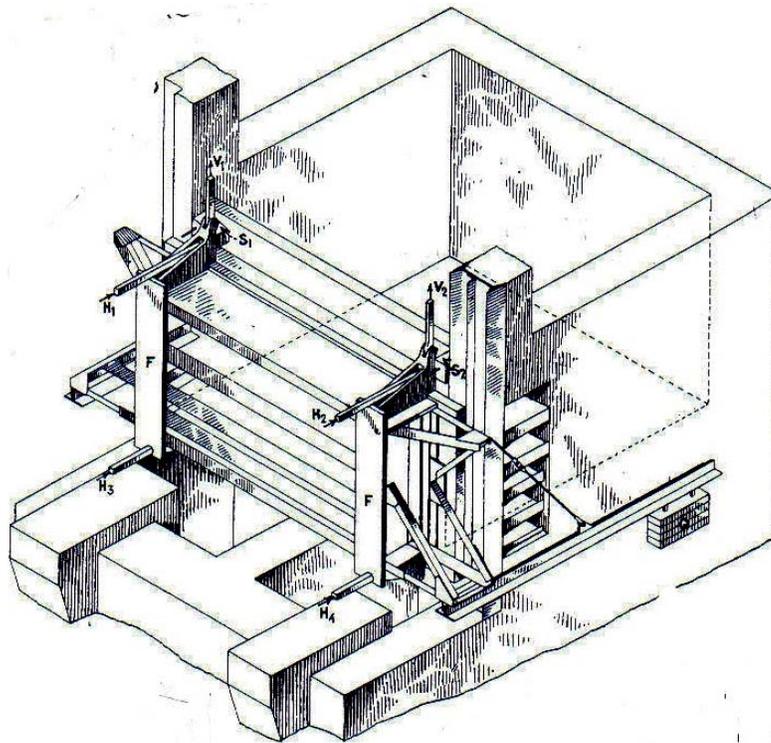
Fang y otros (2003) investigan las condiciones de deformación plana mediante un modelo en laboratorio, y un método para reducir la fricción entre el suelo y la pared del muro. Dentro del artículo se describe un nuevo ensayo para medir el ángulo de interfase entre el suelo y diferentes materiales para condiciones de esfuerzos bajas. Se prueban ocho técnicas diferentes de reducción de fricción, siete con diferentes combinaciones de láminas de plástico y una con goma-grasa. Los resultados indican que el ángulo de interfase obtenido con el método de laminas de plástico es independiente de la magnitud de los esfuerzos normales, por otro lado el ángulo de interfase muestra gran variación cuando es medido por el método de la goma-grasa (para esfuerzos normales bajos se obtuvieron altos ángulos de interfase). Como conclusión se plantea que, el método de láminas de plástico es una técnica más apropiada para reducir la fricción cuando se

tienen esfuerzos bajos como en los modelos a escala en laboratorio. El método de hojas de plástico también tiene otras ventajas como, menor tiempo de preparación de la superficie y menor tiempo de limpieza.

Hanna y Khoury (2005) realizan una investigación experimental y analítica para medir la presión pasiva de suelos sin cohesión sobreconsolidados en muros de retención, para esto se desarrollo en el laboratorio un modelo de un muro de contención, el cual es instrumentado para medir la presión pasiva en lugares seleccionados. El experimento consistió en empujar un muro horizontalmente hacia un relleno sin permitir rotación. El relleno fue arena, la cual fue colocada en el tanque en capas delgadas y fue compactada mecánicamente durante un periodo de tiempo, produciéndose así sobreconsolidación. El ensayo fue realizado sobre la arena sobreconsolidada homogéneamente dispuesta sobre una capa inferior también de arena. El método de rodajas desarrollado por Shields y Tolunay (1972) utilizado usualmente para predecir la presión pasiva de tierras para suelos sin cohesión normalmente consolidados fue adoptado para calcular las presiones pasivas para los suelos con las condiciones arriba mencionadas, los valores teóricos obtenidos por este método son comparados con los resultados experimentales de la presente investigación. Se observo que el OCR y la condición del suelo abajo del nivel de fundación tienen un efecto significativo en el valor del coeficiente de tierras en este tipo de muros, en el artículo se presentan cartas de diseño y formulas para uso práctico.

Mei y Zai (2006) estos autores investigan el cambio de presiones de tierra con el desplazamiento de muros de contención. Propone una nueva fórmula para el cálculo de presiones de tierra considerando el movimiento del muro. Los parámetros propuestos en esta fórmula pueden ser obtenidos por medio de los coeficientes de presiones de tierras de Ranking o por retrocálculo con tres valores de desplazamiento y tres de presiones de tierra. La formula se verifico comparando sus resultados con las presiones obtenidas del ensayo de centrifuga, este análisis dio como resultado una diferencia del 5%. Por esto se considera que este método podría ser seguro para aplicarlo en diseño ingenieril de muros de contención.

Terzaghi (1932) construye un muro experimental para estudiar el efecto de rigidez del muro en la intensidad de las presiones laterales y el efecto de la saturación del relleno. En la construcción del muro de ensayo se tuvo en cuenta el efecto de fricción a lo largo del muro, de tal forma que fuera despreciable y no incidiera en las presiones laterales de tierra. Por experiencias anteriores se decidió que el ancho del muro fuera 2 veces la altura del relleno. Las dimensiones finales del muro fueron 4.3 metros (14 pies) de ancho, 4.3 metros de longitud y 2.15 metros (7 pies) de altura. Una grafica del muro se presenta en la Figura 3-27.



**Figura 3- 27 Diagrama de la máquina de ensayo para medir presiones de tierra (Terzaghi, 1932)**

En este muro de ensayo fue posible medir la componente vertical y horizontal de presiones de tierras. La componente vertical fue medida en dos puntos y la horizontal en cuatro puntos. Las mediciones se realizaron con celdas de presión.

Dentro del artículo se registra que el error debido a la fricción puede estar en un rango entre el 2% y 3% y este valor depende del coeficiente interno de fricción del relleno. También se observó que la lubricación tiene un efecto mínimo en la intensidad de las presiones de tierra. Este artículo se utilizó como referencia en el cálculo de presiones de tierra en el muro dentro de esta tesis.

### **3.6 Estudios de combustión espontánea**

Estudios como el de Baker y otros (2003), descrito en la Sección 3.4.6, reportaron que combustión espontánea se debe a factores como: la oxidación de alambres de acero expuestas, la aparición de microbios que generan condiciones ácidas, la oxidación de la goma, y la aparición de microbios que consumen las correas de acero expuestas y productos de petróleo líquido. Sin embargo, estos autores indicaron que la combustión espontánea se había reportado solo en rellenos de goma triturada que excedían los 7 metros de altura. No se encontró evidencia de combustión espontánea en terraplenes con alturas menores de 3 metros (10 pies). La norma ASTM D6270 (ASTM, 1998a) incorpora guías para minimizar el problema de combustión espontánea en rellenos de goma triturada. Entre las recomendaciones se destacan el usar rellenos con alturas de hasta 3 metros (10 pies), minimizar la entrada de aire usando capas intermedias de suelo, reducir o eliminar los filamentos de acero en la goma triturada, entre otros.

### **3.7 Resumen**

Del proceso de revisión de literatura se encontró abundancia de trabajos donde se ha estudiado la viabilidad para utilizar goma triturada en rellenos para vías y presas. En la revisión de literatura de estudios experimentales de campo se encontraron investigaciones sobre instrumentación de terraplenes y presas. En estos estudios se midieron valores de presiones horizontales, asentamientos, temperatura, monitoreo de aguas y técnicas de construcción. También se observó que en todos los casos las

presiones horizontales de las capas con goma triturada disminuyeron alrededor de un 35%, los asentamientos totales estuvieron entre 13 y 22%, las temperaturas no se elevaron significativamente y el agua no resulto contaminada. Se considera viable la construcción de terraplenes y rellenos con goma triturada, sin embargo es necesario continuar con el seguimiento y monitoreo de este tipo de proyectos debido a que se está tratando con un material muy heterogéneo como la goma triturada.

Diferentes autores han estudiado experimentalmente las propiedades mecánicas del material para diferentes tamaños, formas, densidades y presiones de confinamiento. También se encontraron algunos datos sobre esfuerzo-deformación a corto plazo para casos específicos y algunos modelos de predicción del comportamiento de estructuras. Pocas referencias se encontraron sobre medición de compresibilidad a largo plazo en laboratorio.

A pesar de los numerosos estudios encontrados, existen todavía algunos campos por investigar como el comportamiento esfuerzo-deformación para materiales específicos, tamaño y forma óptima de las partículas de neumático triturado y como estas afectan sus propiedades mecánicas e hidráulicas, efecto de la combinación de tamaños en las propiedades mecánicas e hidráulicas, y consecuencia de mezclar diversos porcentajes de neumático triturado con diferentes tipos de suelos.

En cuanto a la compresibilidad hace falta investigación sobre el efecto del tamaño del material en la compresión a largo plazo, datos experimentales de laboratorio sobre la compresión a largo plazo y métodos para minimizar cambios de volumen.

Pocas publicaciones se encontraron sobre la utilización de goma triturada como relleno en muros de contención, y este es uno de los aspectos en los que este trabajo se concentra.

## **CAPITULO 4. MATERIALES**

### **4.1 Introducción**

Este Capítulo presenta una descripción de los materiales utilizados en este trabajo experimental y se incluye resultados de ensayos de caracterización realizados.

### **4.2 Descripción de los materiales**

Los materiales escogidos para esta investigación fueron los siguientes: goma triturada proveniente de la compañía Rema Inc., bajo la designación comercial 7-14, arena de río con partículas angulares obtenida de la empresa Cemex, y arena silíceo con partículas subredondeadas y tamaños uniformes. Las siguientes subsecciones describen en mayor detalle estos tres materiales.

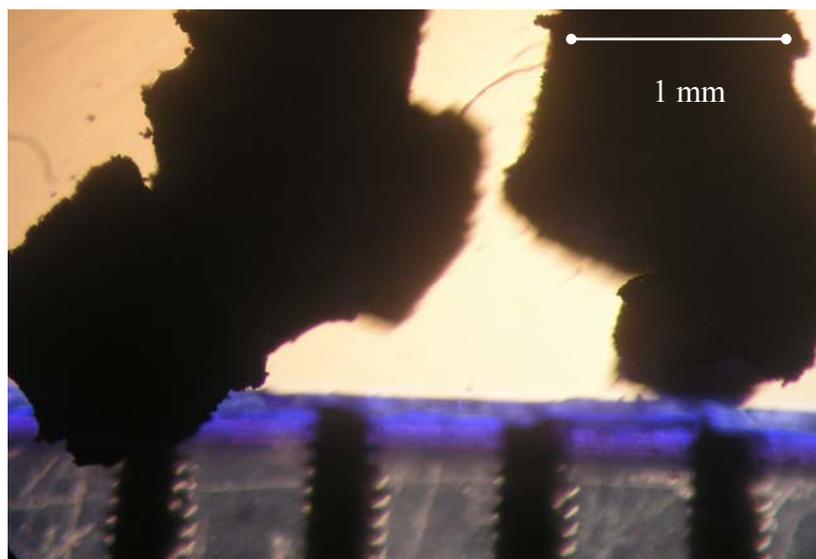
#### *4.2.1 Goma triturada*

La goma triturada utilizada en esta investigación fue obtenida de la empresa Rema Inc. La designación comercial de este material es goma 7-14. Según la terminología de la Sociedad Americana de Ingenieros Civiles (ASCE, 2006), esta goma clasifica como miga de goma o crumb rubber, por contener partículas que van desde 4.75 mm hasta 0.075 mm. La Figura 4-1 muestra una fotografía representativa de este material.



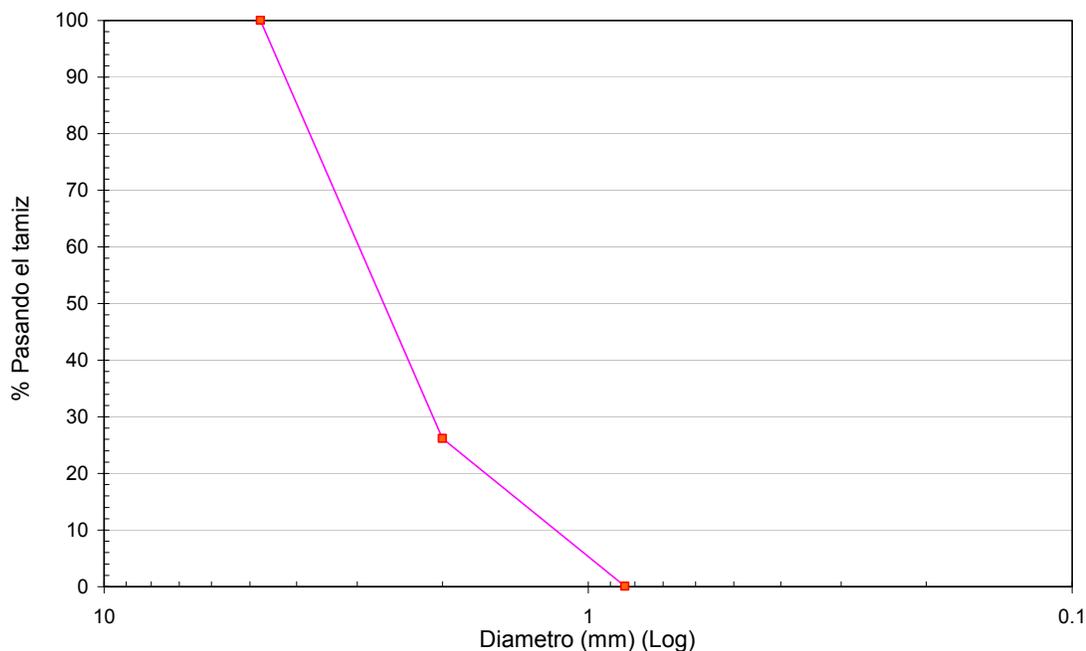
**Figura 4- 1 Goma triturada**

La Figura 4-2 muestra una imagen ampliada obtenida con microscopio. En esta imagen, se puede apreciar que la partícula de goma es de forma alargada y tiene aproximadamente un ancho entre 1 y 2 milímetros (0.04-0.08 in) en su segmento más angosto y aproximadamente 4 milímetros (0.16 in) en su lado más largo.



**Figura 4- 2 Goma triturada observada en su lado más corto**

La distribución de tamaños de este material se determinó mediante un tamizado. La curva de gradación obtenida se realizó en la Figura 4-3. Esta curva muestra un material bastante uniforme con un tamaño de partícula promedio aproximado de 2.5 mm.



**Figura 4- 3 Curva de gradación de la goma triturada 7-14**

#### 4.2.2 Arena No. 1

Una de las arenas utilizadas en esta investigación fue una arena de río obtenida de la empresa Cemex. Esta arena se caracteriza por tener partículas subangulares a subredondeadas, de color gris claro y mineral cuarzo. Una foto representativa de esta arena se muestra en la Figura 4-4. En esta tesis esta arena será designada como Arena No. 1. La granulometría del material se presenta en la Figura 4-5. Se puede observar de esta curva que la arena No 1 es uniforme con un  $D_{50}$  cercano a 3 mm.



Figura 4- 4 Fotografía de arena de río (Arena No. 1)

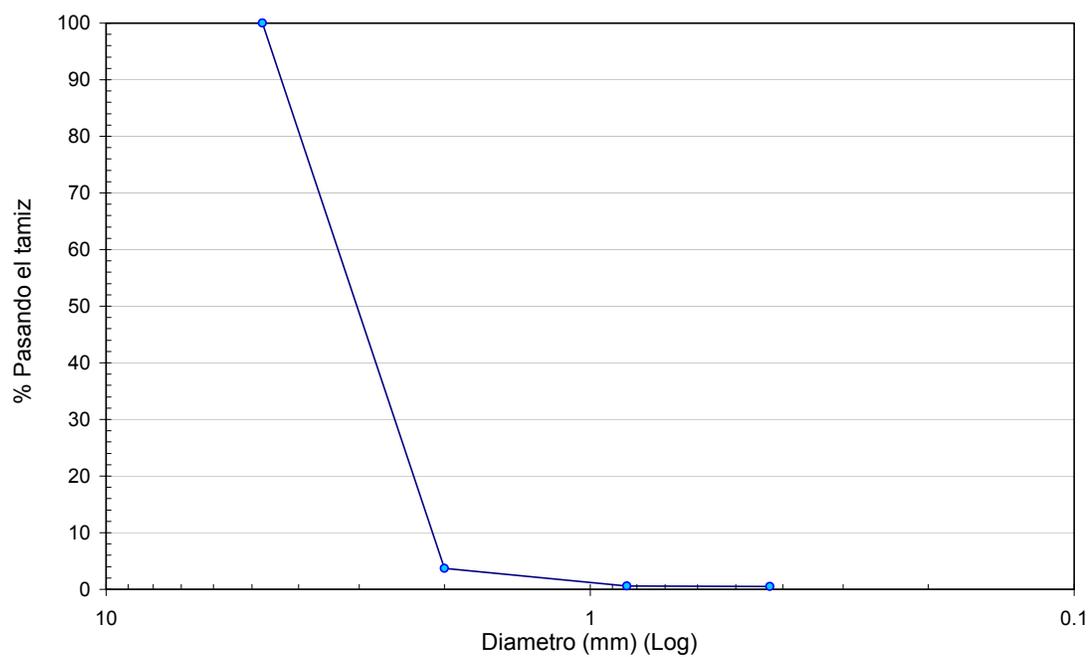
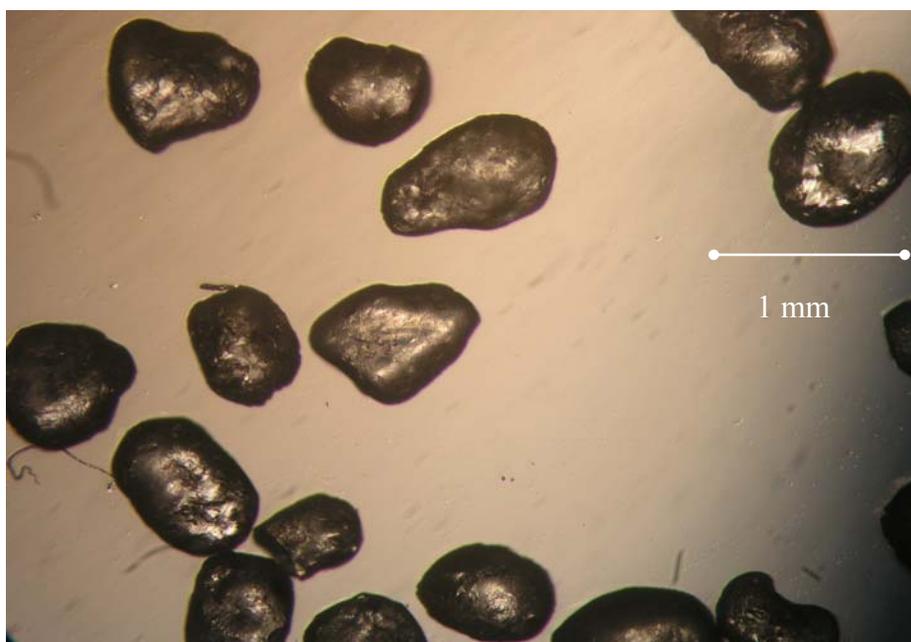


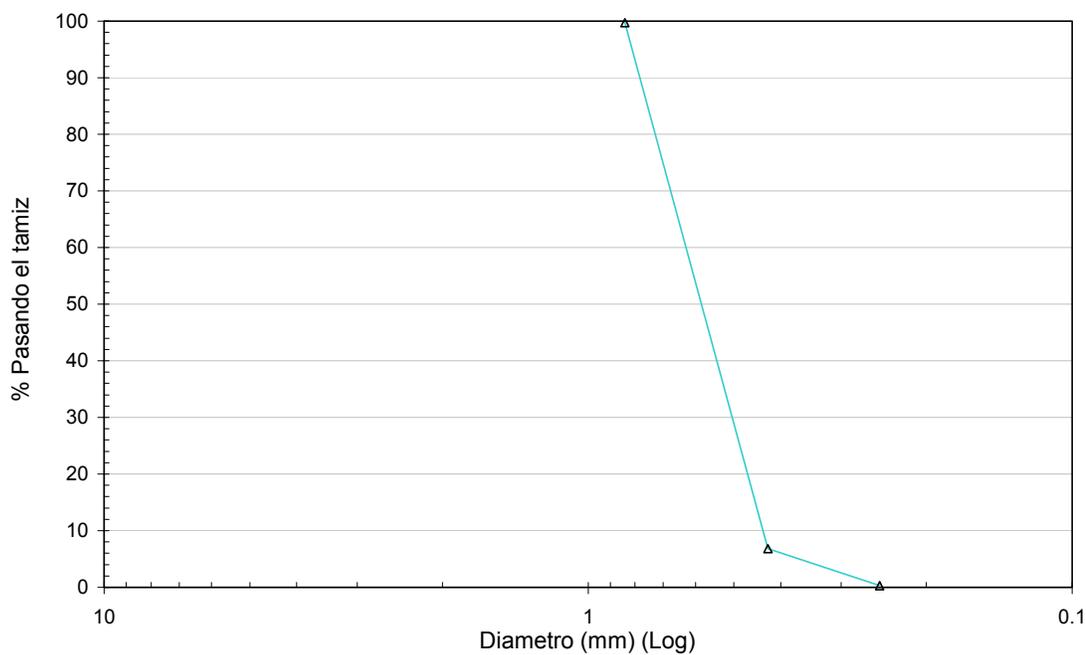
Figura 4- 5 Granulometría de la Arena No 1

### 4.2.3 Arena No. 2

La segunda arena utilizada en esta tesis es una arena sílicea con partículas redondeadas, color blanco, y gradación uniforme. Una foto mostrando la Arena No. 2 se presenta en la Figura 4-6. En esta foto se aprecian los granos redondeados a subredondeados. La granulometría de la Arena No. 2 se presenta en la Figura 4-7. Esta grafica muestra una arena uniforme con un tamaño promedio (D50) de aproximadamente 0.6 mm.



**Figura 4- 6 Imagen representativa Arena No. 2**



**Figura 4- 7 Granulometría de la Arena No. 2**

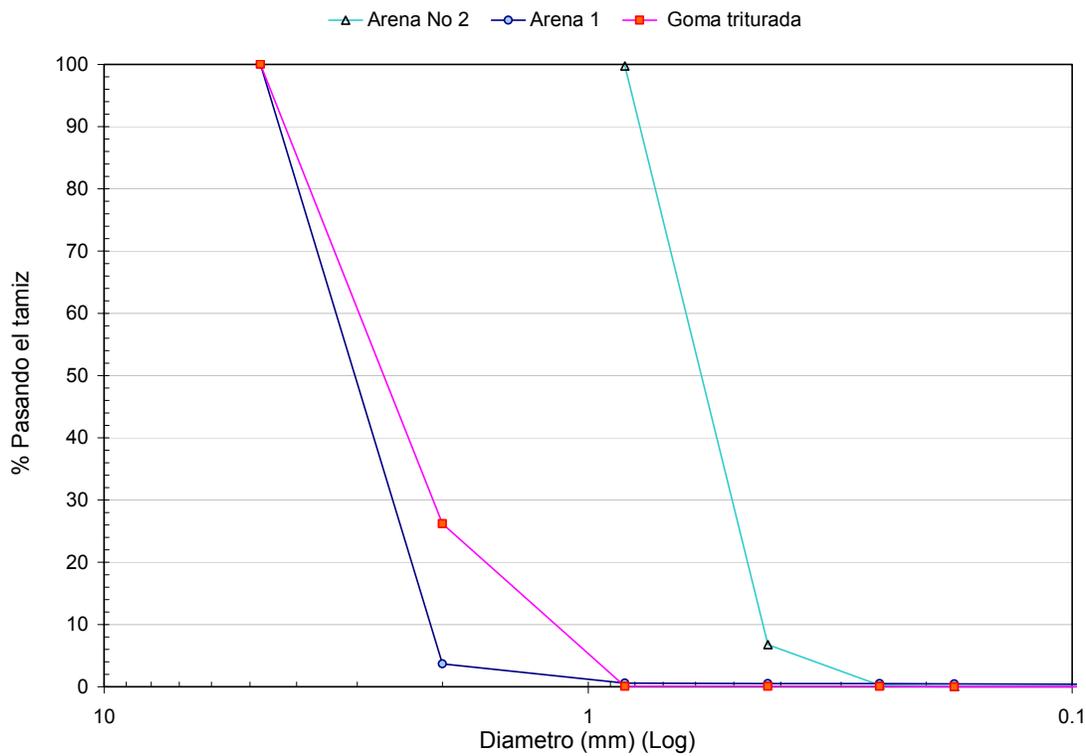
#### *4.2.4 Resumen de propiedades índice*

Los tres materiales fueron ensayados para evaluar propiedades índice como gravedad específica y sus densidades máximas y mínimas. La tabla 4-1 presenta un resumen de las propiedades de cada uno de los materiales de este estudio.

Las diferencias de gradación de los tres materiales estudiados se pueden apreciar en la Figura 4-8.

**Tabla 4- 1 Resumen propiedades índice de materiales utilizados**

<b>Propiedad</b>	<b>Goma Triturada</b>	<b>Arena No. 1</b>	<b>Arena No. 2</b>
D <sub>60</sub> (mm)	2.8	3.1	0.65
D <sub>50</sub> (mm)	2.5	3.0	0.6
D <sub>30</sub> (mm)	1.9	2.6	0.48
D <sub>10</sub> (mm)	1.4	2.2	0.43
Coficiente de uniformidad (Cu)	2	1.41	1.53
Coficiente de gradación (Cc)	0.92	0.99	0.83
Forma particular	Angular	Subangular a angular	Subredondeada a redondeada
Gravedad específica (Gs) ASTM D 854-02	1.16	2.67	2.65
Densidad máxima (lb/ft <sup>3</sup> ) ASTM D 4254-00	36	98	110
Densidad mínima (lb/ft <sup>3</sup> ) ASTM D 4253-00	30	77	97
Color	Negro	Gris	Blanco
Clasificación	Miga de goma “Crumb rubber”	SP	SP



**Figura 4- 8 Granulometría de los tres materiales estudiados**

### 4.3 Mezclas de materiales

El programa experimental de esta investigación involucró también mezclas de los tres materiales descritos en las secciones anteriores. Las mezclas se hicieron tomando proporciones por volumen de material suelto. La Tabla 4-2 resume el tipo de proporciones consideradas en esta tesis.

Fotos de mezclas 25T75A<sub>1</sub>, 50T50A<sub>1</sub>, 75T25A<sub>1</sub> se presentan en las Figura 4-9, a la 4-11 respectivamente.

Tabla 4- 2 Tipos de mezclas de arena-goma triturada.

NOMENCLATURA	% DE MATERIAL (en volumen)	
	% Goma (T)	% Arena (A1 o A2)
100 T	100	0
75 T 25 A	75	25
50 T 50 A	75	25
25 T 75 A	50	50
0 T	50	50

Figura 4- 9 Mezcla 25T75A<sub>1</sub> (25% goma triturada y 75% Arena No. 1).



**Figura 4- 10 Mezcla 50T50A<sub>1</sub> (50% goma triturada y 50% Arena No. 1).**



**Figura 4- 11 Mezcla 75T25A<sub>1</sub> (75% goma triturada y 25% Arena No. 1).**

### 4.3.1 Propiedades índice de mezclas con Arena No. 1

Las propiedades índices de los distintos tipos de mezclas entre goma triturada y la Arena No. 1 se resumen en la Tabla 4-3. Como se puede observar los valores de peso unitario, relación de vacíos máxima ( $e_{\text{máx}}$ ), y relación de vacíos mínima ( $e_{\text{mín}}$ ) para las mezclas varían con el nivel de compactación. El efecto es menor para 100% goma donde se obtuvo un valor de 30 lb/ft<sup>3</sup> en estado suelto y de 36 lb/ft<sup>3</sup> en estado denso. Estos valores se encuentran dentro del rango presentado por Reddy y Marella (2001), que reportan una variación del peso unitario de la goma triturada entre 15.3 y 53 lb/ft<sup>3</sup>, como función del porcentaje. El otro extremo es 100% arena No. 1 donde se midieron peso unitario de 77 y 98 lb/ft<sup>3</sup> para el estrato suelto y denso, respectivamente.

**Tabla 4- 3 Resumen propiedades índice de mezclas de Goma y Arena No. 1**

Propiedades Índice	100 T	75T25A <sub>1</sub>	50T50A <sub>1</sub>	25T75A <sub>1</sub>	0T100A <sub>1</sub>
% Goma en Volumen suelto	100	75	50	25	0
Peso unitario mínimo (lb/ft <sup>3</sup> )	30	40	55	67	77
Relación de vacíos máxima ( $e_{\text{máx}}$ ) <sup>1</sup>	1.42	1.53	1.26	1.19	1.17
Peso unitario máximo (lb/ft <sup>3</sup> )	36	53	72	88	98
Relación de vacíos mínima ( $e_{\text{mín}}$ ) <sup>2</sup>	1.01	0.91	0.72	0.66	0.70
Gravedad Especifica medida	1.16	1.62	1.99	2.35	2.67

Nota: <sup>(1)</sup>  $e_{\text{máx}}$ . Según ASTM No 4253

<sup>(2)</sup>  $e_{\text{mín}}$ . Según ASTM No 4254

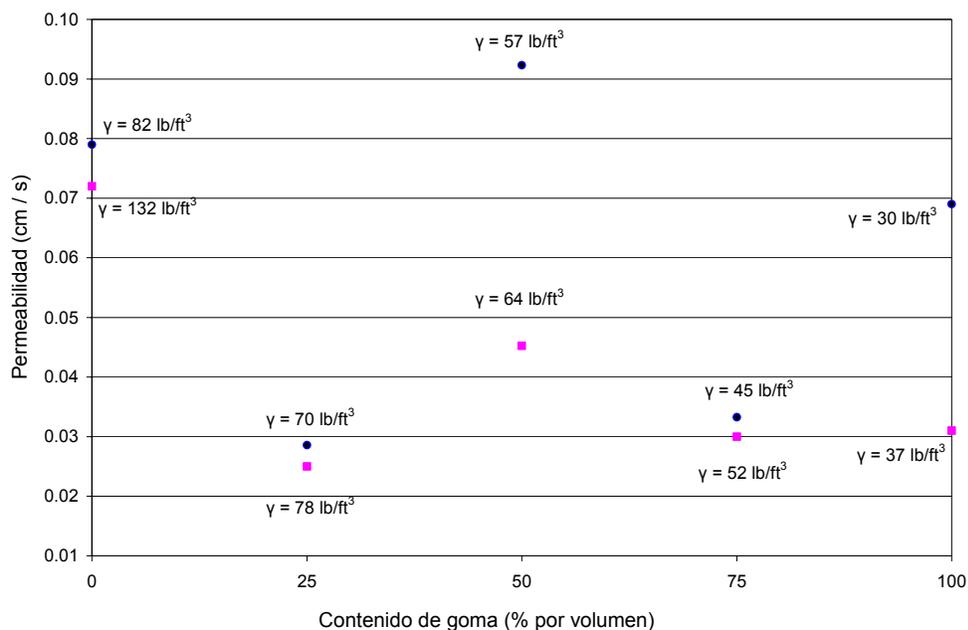
## 4.4 Ensayos de permeabilidad de mezclas Goma y Arena No.1

En muros de contención, es importante que el material de relleno tenga una permeabilidad alta para asegurar un buen drenaje y evitar altas presiones de agua, sobre la estructura de retención. Los ensayos de permeabilidad se realizaron por el método de permeámetro de carga constante de acuerdo al procedimiento indicado en la norma ASTM D 2434 (ASTM, 2000a). Los resultados obtenidos se resumen en la Tabla 4-4. La

influencia que tiene el peso específico de la muestra en la permeabilidad se ilustra en la Figura 4-12.

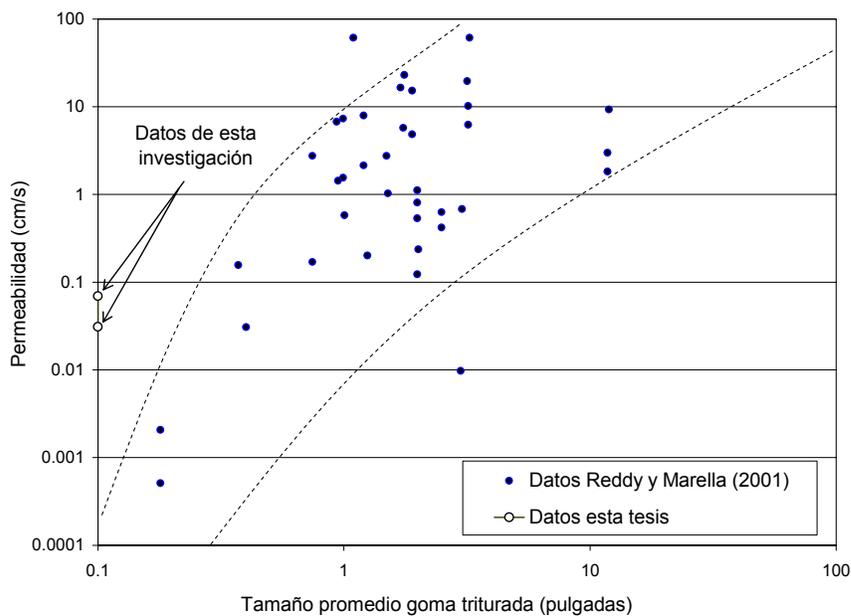
**Tabla 4- 4 Permeabilidad de mezclas de Goma y Arena No 1**

Ensayo No.	1	2	3	4	5
% Goma en Volumen	100	75	50	25	0
Peso unitario de la muestra (lb/ft <sup>3</sup> )	30	45	57	70	82
Permeabilidad, K (cm/s)	$3.1 \cdot 10^{-2}$	$3.3 \cdot 10^{-2}$	$4.5 \cdot 10^{-2}$	$2.9 \cdot 10^{-2}$	$7.4 \cdot 10^{-2}$



**Figura 4- 12 Valores de Permeabilidad obtenidos del ensayo de cabeza constante para la arena No 1 y mezclas con goma.**

Los datos experimentales para 100% goma se grafican en la Figura 4-13 junto con los datos reportados por Reddy y Marella (2001). Cabe mencionar que este estudio incluye datos de permeabilidad realizados sobre muestras de goma de varios tamaños. Los valores de esta tesis son ligeramente mayores a los reportados por Reddy y Marella (2001).



**Figura 4- 13 Permeabilidad como función del tamaño de la goma (adaptado de Reddy y Marella, 2001)**

## 4.5 Resistencia al corte de los materiales

La resistencia al corte de los materiales utilizados en los ensayos del muro prototipo (Capítulo 6) fue evaluada como parte de esta investigación. Específicamente se evaluaron la Arena No. 2, la goma sola y una mezcla de 50% de Arena No. 2 con 50% de goma (proporciones por volumen). Las siguientes subsecciones presentan los resultados de esta evaluación.

- Resistencia al Corte de la Arena No. 2:

La resistencia al corte de la Arena No. 2 se midió mediante ensayos de corte directo siguiendo en líneas generales el procedimiento establecido por la norma ASTM D 3080 (ASTM, 1998b). Se utilizó la caja de corte directo circular con un diámetro de 2.5 pulgadas. La arena se depositó en estado seco dejándola caer a través de un embudo que

se fue moviendo en forma sistemática dentro de la caja de corte. Las muestras al final del proceso de preparación tenían un peso unitario entre 98 y 100 lb/ft<sup>3</sup>. Se llevaron a cabo tres ensayos con esfuerzos normales de 7.5, 15 y 30 lb/in<sup>2</sup>. Los resultados de estas pruebas se presentan en el Apéndice A. El ángulo de fricción interna obtenido para la arena No. 2, a la densidad arriba mencionada, fue de 32°.

- Resistencia al Corte de la Goma Sola:

La resistencia al corte de la goma sola se midió mediante ensayos triaxiales de compresión llevado a cabo a una velocidad constante de 1 mm/min. El ensayo se llevo a cabo siguiendo las recomendaciones generales de la norma ASTM D4767 (ASTM, 1995). Las muestras se prepararon usando goma seca depositada en capas de 10 mm de espesor compactadas con 10 golpes por capa usando un pisón de 90 gramos de peso. Las muestras terminadas tenían una altura aproximada de 127 mm y un diámetro de 50 mm. El procedimiento escogido resulto en muestras con pesos específicos entre 39 y 42 lb/ft<sup>3</sup>. Los resultados de estas pruebas se presentan en el Apéndice A. El ángulo de fricción interna obtenido para la goma sola, a la densidad arriba mencionada, fue de 19°. En el Apéndice A se puede observar que una envolvente de Mohr-Coloumb de tipo lineal no es la más adecuada y que los resultados parecen sugerir una envolvente más bien curva. Sin embargo para esta tesis no se exploraron otros tipos de envolvente de resistencia al corte.

- Resistencia al Corte de 50% de Goma mezclada con 50% de Arena No. 2 (proporciones por volumen):

La resistencia al corte de mezclas de 50% goma con 50% de Arena No. 2 (proporciones por volumen) se midió mediante ensayos triaxiales de compresión similares a los utilizados para la goma sola. El procedimiento seguido fue similar

resultando en muestras de dimensiones similares con un rango de pesos específicos entre 108 y 112 lb/ft<sup>3</sup>. Los resultados de estas pruebas se presentan en el Apéndice A. El ángulo de fricción interna obtenido para esta mezcla de 50% goma y 50% de Arena No. 2, a la densidad arriba mencionada, fue de 25°.

- Resumen de la Evaluación de Resistencia al Corte

La evaluación de los parámetros a la resistencia al corte se limitó a los 3 materiales arriba mencionados y para los rangos de peso específico indicados. Estos 3 casos corresponden a los 3 casos ensayados con el muro prototipo presentado y discutido en el Capítulo 6. Se observa que la resistencia al corte más alta corresponde a la Arena No. 2 en estado solo con un ángulo de fricción de 32 grados. La menor resistencia al corte se observó para la goma sola donde se midió un ángulo de fricción de 19 grados.

## 4.6 Resumen

Este capítulo presentó una descripción de los materiales utilizados. También se presentó un resumen de las propiedades índices obtenidas para los materiales base así como sus mezclas. Se evidencia que la goma triturada es un material que tiene bajo peso específico y una permeabilidad del mismo orden de magnitud de una arena fina a media. En la Tabla 4-5 se presenta un resumen de los resultados para la goma triturada y para la arena de río No 1. La Tabla 4-6 presenta un resumen similar para mezclas con la Arena No.2.

**Tabla 4- 5 Resumen propiedades de mezclas de goma triturada y arena de río (No. 1)**

<b>% Goma (volumen)</b>	<b>100</b>	<b>75</b>	<b>50</b>	<b>25</b>	<b>0</b>
% Goma (peso)	100	55	27	12	0
Color	Negro	Mezcla	Mezcla	Mezcla	Gris
Forma	Variable	Mezcla	Mezcla	Mezcla	Subangular- Angular
Tamaño máximo	4.75 mm (0.2 in)				
Clasificación	Crumb rubber	Mezcla	Mezcla	Mezcla	SP
D <sub>50</sub> (mm)	2.5	Mezcla	Mezcla	Mezcla	3
Cu	2	Mezcla	Mezcla	Mezcla	1.41
Cc	0.92	Mezcla	Mezcla	Mezcla	0.99
Gradación	Mal gradada	Mezcla	Mezcla	Mezcla	Mal gradada
Peso unitario mínimo (lb/ft <sup>3</sup> )	30	40	55	67	77
Peso unitario máximo (lb/ft <sup>3</sup> )	36	53	72	88	98
Relación de vacíos máxima (e máx.)	1.42	1.53	1.26	1.19	1.17
Relación de vacíos mínima (e min.)	1.01	0.91	0.72	0.66	0.7
Gravedad específica (gs)	1.16	1.62	1.99	2.35	2.67
Permeabilidad (cm/s) <sup>(1)</sup>	0.031	0.033	0.045	0.029	0.074

Nota: (1): Permeabilidad obtenida por medio de ensayos con muestras preparadas en estado suelto.

**Tabla 4- 6 Resumen propiedades de mezclas de goma triturada y arena uniforme (No. 2)**

<b>% Goma (volumen)</b>	<b>100</b>	<b>50</b>	<b>0</b>
Color	Negro	Mezcla	Blanco
Forma	Variable	Mezcla	Angular
Tamaño máximo	4.75 mm (0.2 in)	4.75 mm (0.2 in)	0.84 mm (0.03 in)
Clasificación	Crumb rubber	Mezcla	SP
D <sub>50</sub> (mm)	2.5	Mezcla	0.6
Cu	2	Mezcla	1.53
Cc	0.92	Mezcla	0.83
Gradación	Mal gradada	Mezcla	Mal gradada
Peso unitario mínimo (lb/ft <sup>3</sup> )	30	55	97
Peso unitario máximo (lb/ft <sup>3</sup> )	36	72	110
Relación de vacíos máxima (e máx.)	1.42	1.26	1.17
Relación de vacíos mínima (e min.)	1.01	0.72	0.7
Angulo de fricción interno (grados)	19°	25°	32°

## **CAPITULO 5. ENSAYOS COMPRESIBILIDAD**

### **5.1 Introducción**

Este capítulo presenta resultados del trabajo experimental llevado a cabo con el objetivo de evaluar la compresibilidad de la goma triturada sin mezclar y mezclada con las dos arenas descritas en el Capítulo 4. La compresibilidad de la goma triturada y sus mezclas con arenas se evaluó mediante ensayos de compresión unidimensional usando odómetros convencionales. La compresibilidad se evaluó a corto plazo y a largo plazo. La influencia de la temperatura, también se investigó para muestras de solo goma.

### **5.2 Plan experimental**

#### *5.2.1 Matriz de ensayos*

La matriz de ensayos que se llevó a cabo para la evaluación de la compresibilidad de las gomas trituradas a corto plazo se presenta en la Tabla 5-1. Las matrices de ensayos para compresibilidad a largo plazo para 100% goma y mezclas con las Arenas No.1 y No. 2 se presentan en las Tablas 5-2, 5-3 y 5-4, respectivamente. Ambos tipos de ensayos se llevaron a cabo usando un odómetro convencional como el que se utiliza comúnmente para ensayos de consolidación de arcillas.

**Tabla 5- 1 Matriz de ensayos de compresibilidad unidimensional a corto plazo con Arena No.1**

Identificación	Contenido Goma (%)	Peso unitario (lb/ft <sup>3</sup> )	Densidad Relativa (Dr)	Velocidad de Deformación (mm/min)	Temperatura °C <sup>(1)</sup>
CP 100T	100	31	19	0.2	24
CP 100T	100	31	19	2	24
CP 75T 25A1	75	42	19	0.2	24
CP 75T 25A1	75	42	19	2	24
CP 50T 50A1	50	56	8	0.2	24.5
CP 50T 50A1	50	56	8	2	25
CP 25T 75A1	25	67	0	0.2	26.5
CP 25T 75A1	25	67	0	2	24
CP 100 <sup>a</sup> A1	0	77	0	0.2	25.5
CP 100 <sup>a</sup> A1	0	77	0	2	25

Nota: (1): Temperatura ambiente en laboratorio con aire acondicionado.

**Tabla 5- 2 Matriz ensayos de compresibilidad unidimensional a largo plazo para goma triturada**

Identificación	Tipo	Contenido de goma (%)	Peso unitario (lb/ft <sup>3</sup> )	$\sigma$ normal (kPa)	Duración (días)	Temperatura °C
LP 100T-1	1D	100	31	25	38	24.4
LP 100T-2	1D	100	30	50	71	24.4
LP 100T-3	1D	100	31	100	62	22.8
LP 100T-4	1D	100	30	200	33	23.8

**Tabla 5- 3 Matriz ensayos de compresibilidad unidimensional a largo plazo para mezclas con Arena No. 1**

<b>Identificación</b>	<b>Tipo</b>	<b>Contenido de goma (%)</b>	<b>Peso unitario (lb/ft<sup>3</sup>)</b>	<b>Esfuerzo normal (kPa)</b>	<b>Duración (días)</b>	<b>Temperatura °C</b>
LP 75T 25A1-1	1D	75	42	25	38	24.4
LP 75T 25A1-2	1D	75	40	50	71	24.4
LP 75T 25A1-3	1D	75	42	100	47	23.3
LP 75T 25A1-4	1D	75	42	200	33	23.8
LP 50T 50A1-1	1D	50	51	25	38	24.4
LP 50T 50A1-2	1D	50	56	50	71	24.4
LP 50T 50A1-3	1D	50	56	100	47	22.8
LP 50T 50A1-4	1D	50	56	200	47	23.8
LP 25T 75A1-1	1D	25	67	25	38	24.4
LP 25T 75A1-2	1D	25	67	50	71	24.4
LP 25T 75A1-3	1D	25	67	100	62	22.8
LP 25T 75A1-4	1D	25	67	200	33	23.8
LP 100A1-1	1D	0	77	25	38	24.4
LP 100A1-2	1D	0	78	50	71	24.4
LP 100A1-3	1D	0	78	100	62	22.8
LP 100A1-4	1D	0	78	200	33	23.8

**Tabla 5- 4 Matriz ensayos de compresibilidad unidimensional a largo plazo para mezclas con Arena No.2**

Identificación	Tipo	Contenido de goma (%)	Peso unitario (lb/ft <sup>3</sup> )	Esfuerzo normal (kPa)	Duración (días)	Temperatura °C
LP 75T 25A2-1	1D	75	53	25	37	26.11
LP 75T 25A2-2	1D	75	50	50	37	23.8
LP 75T 25A2-3	1D	75	50	100	40	23.8
LP 75T 25A2-4	1D	75	50	200	33	26.11
LP 50T 50A2-1	1D	50	75	25	37	26.11
LP 50T 50A2-2	1D	50	75	50	37	23.8
LP 50T 50A2-3	1D	50	75	100	40	23.8
LP 50T 50A2-4	1D	50	75	200	40	26.11
LP 25T 75A2-1	1D	25	92	25	37	26.11
LP 25T 75A2-2	1D	25	92	50	37	23.8
LP 25T 75A2-3	1D	25	93	100	33	23.8
LP 25T 75A2-4	1D	25	93	200	33	26.11
LP 100A2-1	1D	0	101	25	37	26.11
LP 100A2-2	1D	0	101	50	37	23.8
LP 100A2-3	1D	0	101	100	40	23.8
LP 100A2-4	1D	0	101	200	31	26.11

Cabe mencionar que la Tabla 5-2 incluye un ensayo de compresibilidad a largo plazo realizado a una temperatura de 40 °C. Este ensayo se llevo a cabo para una muestra constituida por 100% de goma triturada compactada a una densidad de 28 lb/ft<sup>3</sup>. El objetivo de esta prueba fue evaluar si la goma presenta mayores deformaciones a una temperatura mayor cercana a lo que se esperaría en una obra civil expuesta a altas temperaturas ambiente. Aunque 40 °C quizás no sea la temperatura máxima que se puede esperar en el campo, especialmente en Puerto Rico, se consideró como un valor conservador para el promedio anual. Los resultados se presentan y discuten más adelante.

## 5.2.2 Procedimiento de los experimentos

A continuación se describe el procedimiento de los experimentos de compresibilidad unidimensional a corto y largo plazo. Mayores detalles, incluyendo múltiples fotos de los ensayos, se presentan en el Apéndice B.

### 5.2.2.1 Procedimiento compresión unidimensional corto plazo

Las pruebas de compresión unidimensional a corto plazo se realizaron para calcular el módulo de compresión confinada ( $D$ ) de los materiales analizados. Este módulo se define como la relación entre el esfuerzo de compresión axial y la deformación axial medida sobre un espécimen restringido a deformación lateral. Matemáticamente se expresa como:

$$D = \frac{\Delta\sigma_v}{\epsilon_v} \quad (5-1)$$

Donde  $\Delta\sigma_v$  es el cambio de esfuerzo axial aplicado y  $\epsilon_v$  es la deformación unitaria axial ( $\epsilon_v$ ) definida como:

$$\epsilon_v = \frac{\Delta l}{L} \quad (5-2)$$

Los ensayos de compresión unidimensional a corto plazo se realizaron, a la goma triturada, a la arena de río No 1, y a mezclas de estos dos materiales. Los ensayos se llevaron a cabo sobre muestras en estado suelto y seco. La velocidad de carga en los ensayos se mantuvo constante. Sin embargo se consideraron las siguientes dos velocidades extremas para evaluar efectos viscosos: 0.2 mm/min y 2 mm/min.

### **5.2.2.2 Compresión unidimensional a largo plazo**

La compresibilidad a largo plazo se evaluó para la goma triturada, la arena No 1 (arena de río), y la arena No 2 (arena subredondeada), y mezclas de ambas arenas con goma. Se evaluaron solo muestras en estado suelto.

Las pruebas de compresibilidad a largo plazo en una dimensión se realizaron siguiendo las recomendaciones generales presentadas en la norma ASTM D 2435 (ASTM, 2000b). Las muestras se prepararon en estado suelto en la anilla del odómetro, luego se aplicó un nivel de carga axial a la muestra la cual permaneció constante durante el ensayo. Bajo carga constante se midió la deformación axial. En función del tiempo de aplicación de carga. En función del tiempo de aplicación de carga. El ensayo se termino cuando los cambios de deformación axial fueron menores. La duración de estos ensayos varió entre 38 y 71 días.

## **5.3 Resultados**

Esta sección presenta los resultados de los experimentos de compresibilidad a corto y largo plazo.

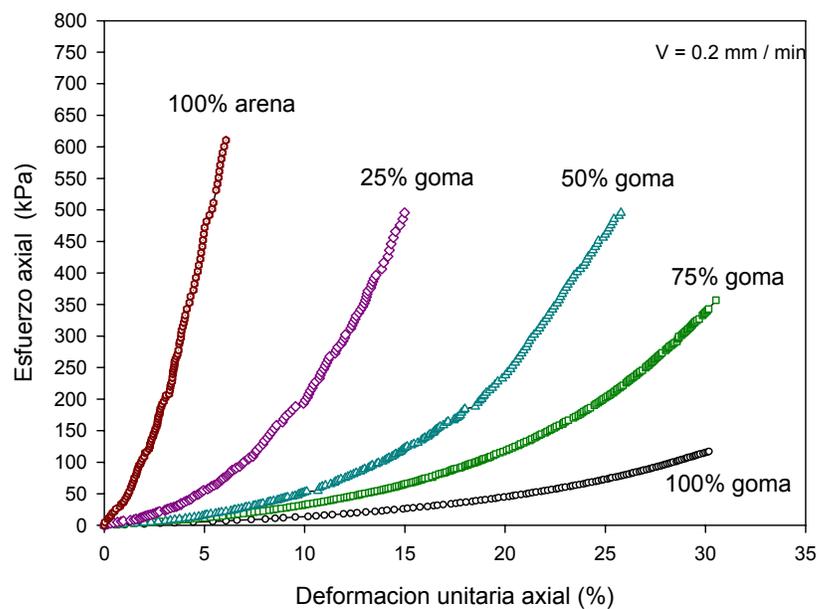
### *5.3.1 Resultados de compresibilidad unidimensional corto plazo*

Los resultados de los ensayos de compresión unidimensional llevados a cabo a velocidad lenta (0.2 mm/min) se presentan en las Figuras 5-1 y 5-2. Estas figuras corresponden a mezclas de goma con la Arena No. 1. Las densidades correspondientes a estos ensayos se resumen a la Tabla 5-5. Esta tabla también presenta los valores iniciales del módulo de compresión confinado D (medidos al principio del ensayo para el rango de deformación axial entre 0 y 1%).

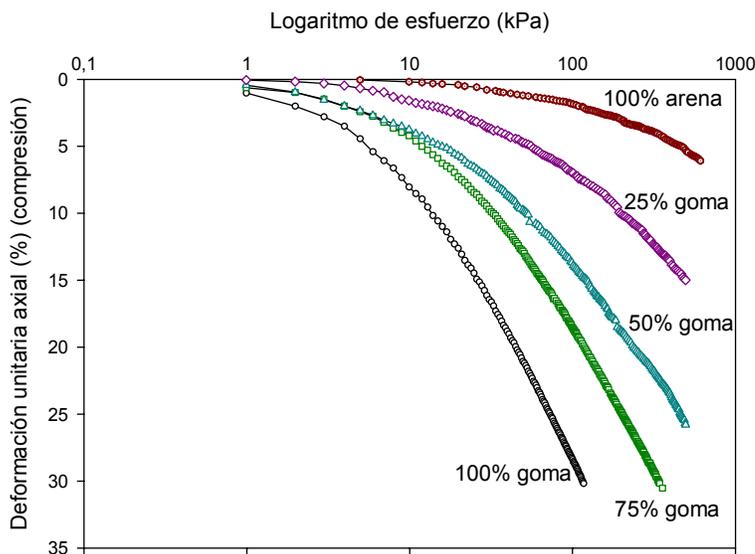
**Tabla 5- 5 Densidades y módulos iniciales de los ensayos de compresión unidimensional a velocidad lenta**

Contenido de goma (%)	100 T	75 T	50 T	25 T	0 T
Peso unitario (lb/ft <sup>3</sup> )	31	42	56	67	77
D inicial (kPa) <sup>(1)</sup>	97	201	207	723	3952

Nota: (1): Módulo secante entre  $\epsilon$  axial = 0 y 1%.



**Figura 5- 1 Compresibilidad unidimensional a corto plazo, velocidad lenta**



**Figura 5- 2 Compresibilidad unidimensional a corto plazo, velocidad lenta, escala logarítmica**

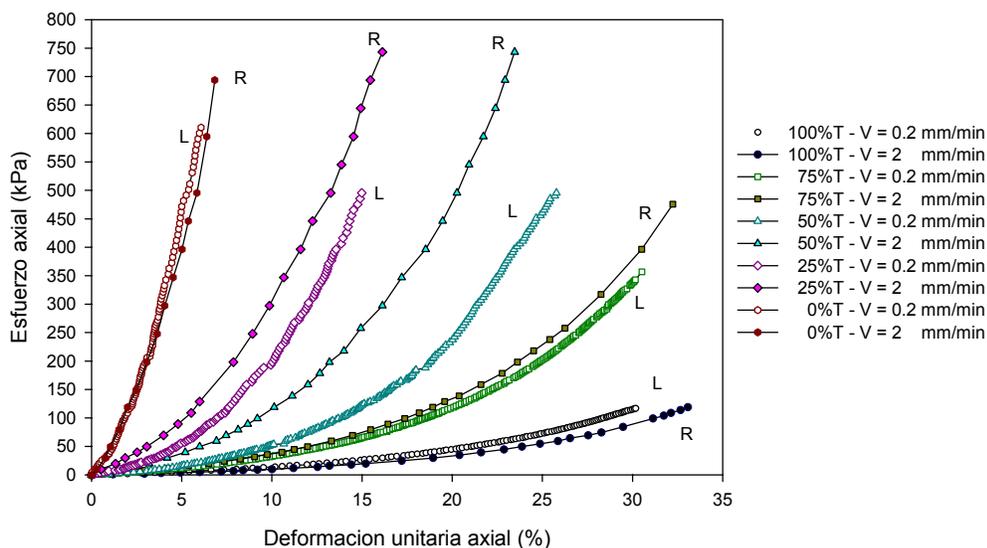
De las Figuras 5-1 y 5-2 se observa que las mezclas aumentan su rigidez a medida que aumenta el porcentaje de arena. La muestra de solo goma alcanzó una deformación unitaria axial de 20% a un nivel de esfuerzo de 45 kPa; en contraste la muestra de solo arena a este mismo nivel de esfuerzo solo se deforma 1%. Estos resultados son los esperados y son consistentes con lo reportado por otros autores.

Con el fin de observar el cambio en el módulo de confinamiento con la variación de la velocidad de deformación se realizaron una serie de ensayos a una velocidad de deformación de 2 mm/min. Esta velocidad es diez veces mayor que la primera serie de ensayos. La Tabla 5-6 resume las densidades de las muestras ensayadas en forma rápida y resume los valores de módulo de confinamiento inicial. Los resultados de los ensayos rápidos se presentan en la Figura 5-3, también muestra los resultados de los ensayos lentos.

**Tabla 5- 6 Densidad de los ensayos de compresión confinada, velocidad 2 (mm/min)**

Contenido de goma (%)	100 T	75 T	50 T	25 T	0 T
Peso unitario (lb/ft <sup>3</sup> )	30	43	55	66	78
D inicial (kPa) <sup>(1)</sup>	83	256	646	1487	4705

Nota: (1): Módulo secante entre  $\epsilon$  axial = 0 y 1%.



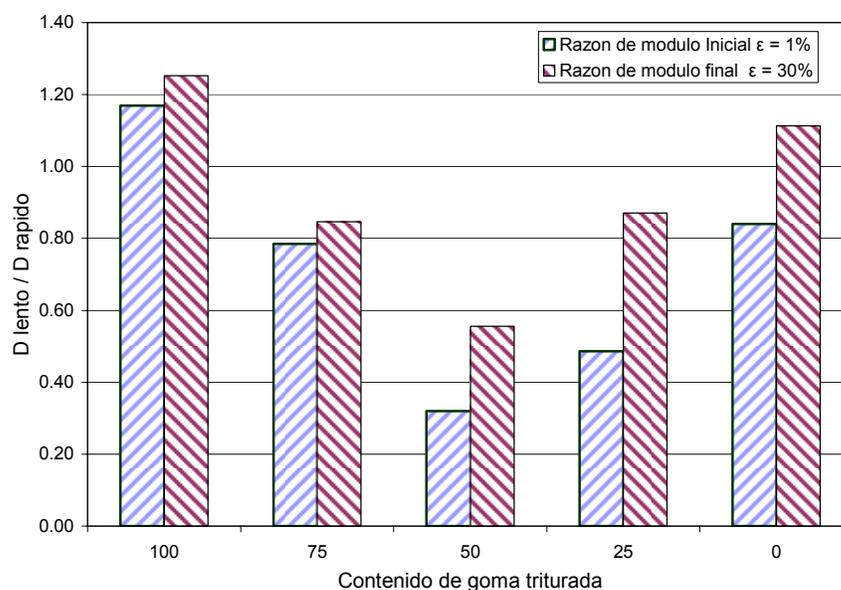
**Figura 5- 3 Compresibilidad unidimensional a corto plazo, efecto de velocidad**

En la Figura 5-3 se observa que las curvas para un mismo material son algo similares para las dos velocidades ensayadas. Sin embargo para las mezclas (25%, 50% y 75% goma) se observa que las muestras ensayadas a la velocidad más rápida de 2 mm/min resultaron en curvas de esfuerzo-deformación más rígidas que las ensayadas a velocidad lenta. Sin embargo se observa lo contrario para 100% goma y 100% arena. Esto es contrario a lo esperado por efectos de viscosidad. Sin embargo puede deberse a diferencias en las densidades finales de las muestras. En la Tabla 5-7 se muestran los

valores del módulo de confinamiento (D) a corto plazo, para 5 y 10% de deformación unitaria.

**Tabla 5- 7 Módulo de confinamiento de las mezclas de arena y goma triturada**

Parámetro	Módulo de confinamiento secante D (kPa)									
	100 T		75 T		50 T		25 T		0 T	
Contenido de goma										
Velocidad de deformación (mm / min)	0.2	2	0.2	2	0.2	2	0.2	2	0.2	2
Rango $\epsilon = 0$ a 5 %	110	80	249	295	324	779	1111	1858	9386	7887
Rango $\epsilon = 0$ a 10 %	138	103	338	372	827	1862	3034	4957	-----	-----



**Figura 5- 4 Cambio de rigidez con la velocidad de carga**

Los efectos viscosos se observan en mayor grado en las muestras que contienen arena. Esto se refleja en la Figura 5-4 con razones de módulo lento a rápido menores que uno. Lo contrario se observa para las muestras de alto contenido de goma donde al aumentar la velocidad de carga resulta en reducción del módulo de compresibilidad (de confinamiento D).

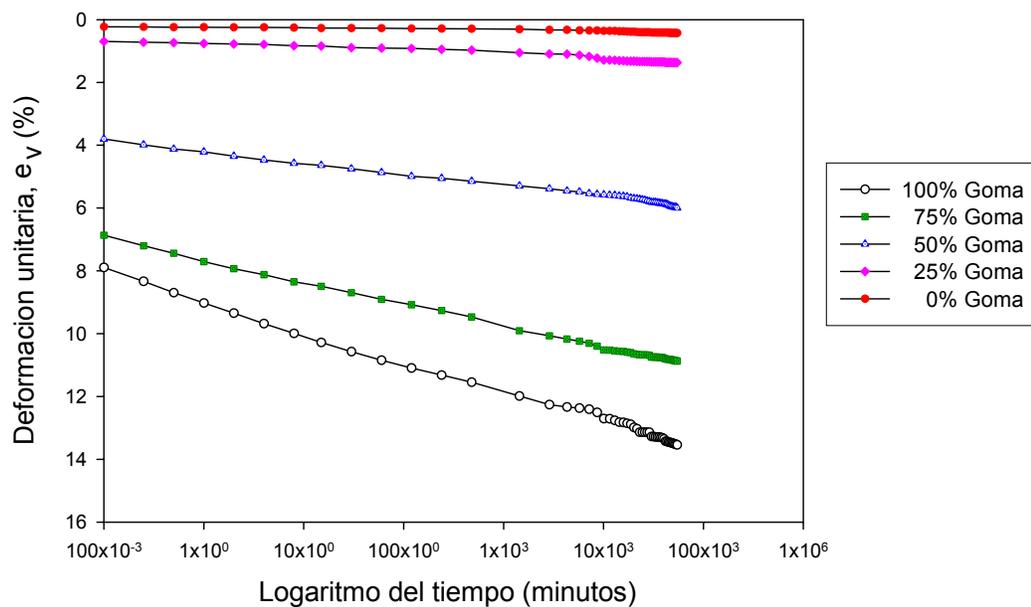
### *5.3.2 Resultados de compresibilidad unidimensional a largo plazo*

En el capítulo de revisión de literatura se identificó como deficiencia la falta de información relacionada a la compresibilidad a largo plazo de estos materiales. Esto se considera sumamente importante para poder utilizar rellenos con goma triturada en muros de contención o rellenos para obras viales. Las siguientes subsecciones resumen los resultados.

#### **5.3.2.1 Compresibilidad unidimensional a largo plazo a temperatura ambiente**

En las Tablas 5-2 a la 5-4 se presentó la matriz de ensayos de compresibilidad unidimensional a largo plazo. En total se realizaron 40 pruebas con duraciones entre 33 y 60 días. Todas las pruebas se llevaron a cabo a temperatura ambiente cercana a 20 °C.

Los resultados de las pruebas para la Arena No. 1 se presentan en las Figura 5-5 a la 5-8. Para esfuerzos aplicados de 25, 50, 100, 200 kPa, respectivamente. También se presentan las densidades y la deformación total medidas en las muestras al final de los ensayos en las Tabla 5-8 a la 5-11, para 25, 50, 100 y 200 kPa, respectivamente.

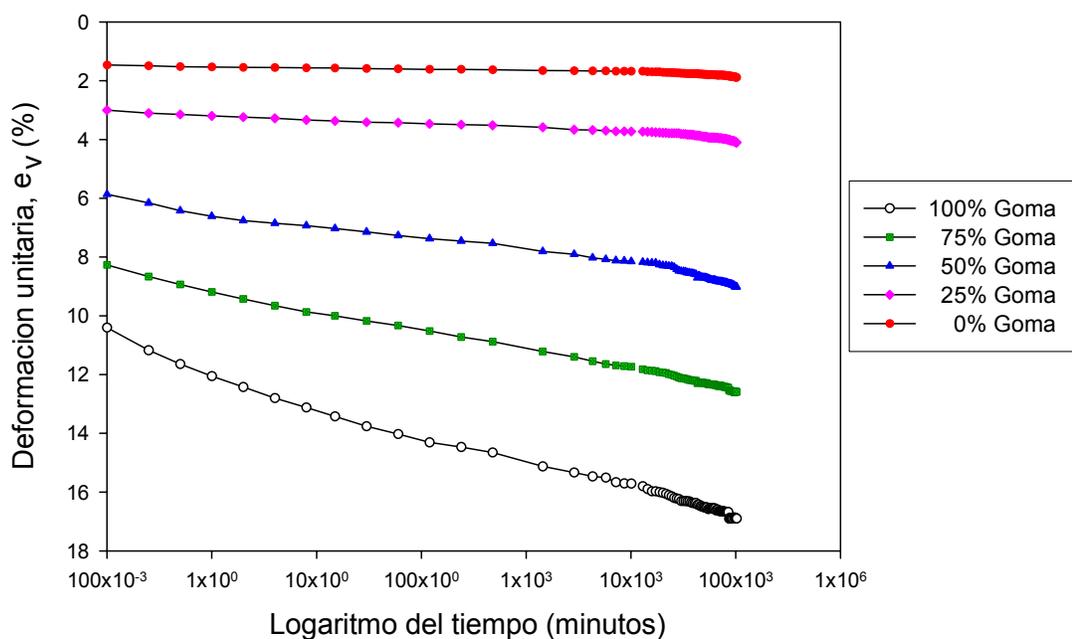


**Figura 5- 5 Compresibilidad unidimensional a largo plazo para mezclas de goma-arena No 1 y esfuerzo axial aplicado de 25 kPa**

**Tabla 5- 8 Resumen del ensayo de compresibilidad a largo plazo para mezclas de goma-arena No 1 y esfuerzo axial aplicado de 25 kPa**

Parámetro	LP100T-1	LP75T25A1-1	LP50T50A1-1	LP25T75A1-1	LP100A1-1
Contenido de goma en volumen	100	75	50	25	0
Contenido de goma en peso	100	52	28	11	0
Peso unitario (lb/ft <sup>3</sup> )	31	42	51	67	77
Deformación total final en % <sup>a</sup>	13.5	10.9	6.3	1.4	0.4

Nota: <sup>a</sup> Calculada en % con respecto a la altura inicial de la muestra.

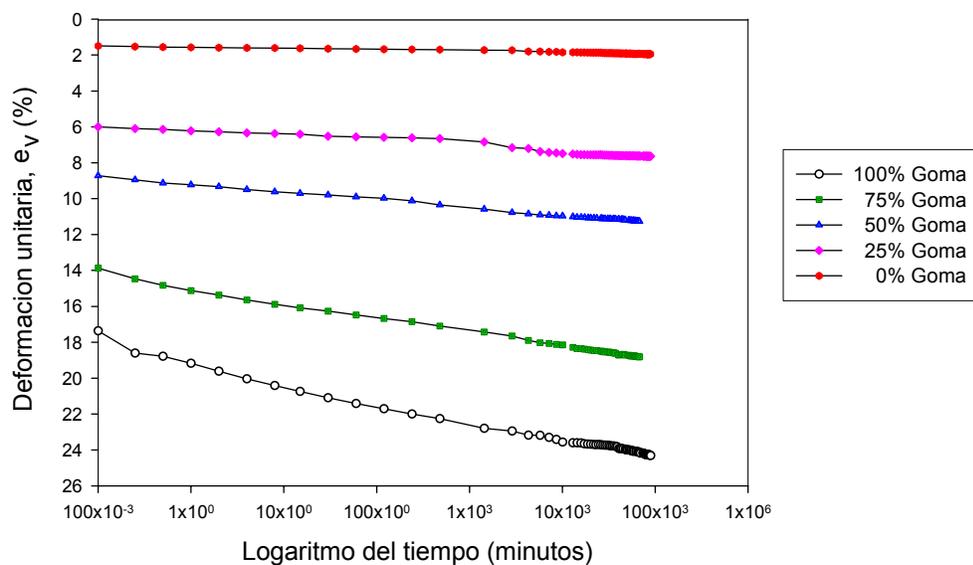


**Figura 5- 6 Compresibilidad unidimensional a largo plazo para mezclas de goma-arena No 1 y esfuerzo axial aplicado de 50 kPa**

**Tabla 5- 9 Resumen del ensayo de compresibilidad a largo plazo para mezclas de goma-arena No 1 y esfuerzo axial aplicado de 50 kPa**

Parámetro	LP100T-2	LP75T25A1-2	LP50T50A1-2	LP25T75A1-2	LP100A1-2
Contenido de goma en volumen	100	75	50	25	0
Contenido de goma en peso	100	55	27	12	0
Peso unitario (lb/ft <sup>3</sup> )	30	40	56	67	78
Deformación total final en % <sup>a</sup>	16.9	12.6	9	4.1	1.89

Nota: <sup>a</sup> Calculada en % con respecto a la altura inicial de la muestra.

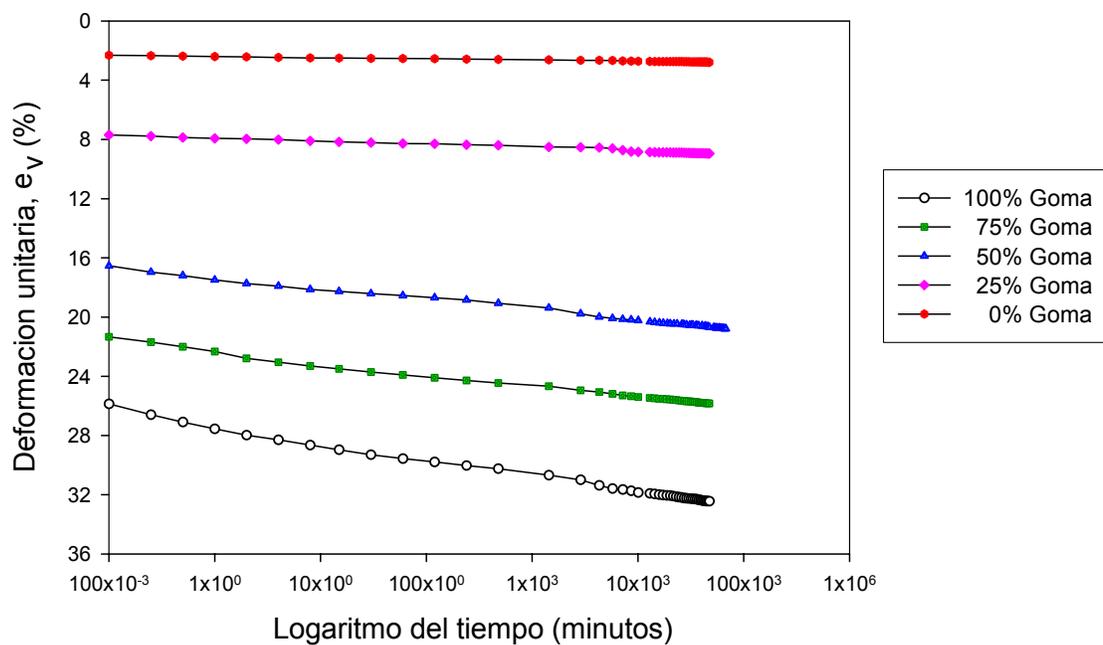


**Figura 5- 7 Compresibilidad unidimensional a largo plazo para mezclas de goma-arena No 1 y esfuerzo axial aplicado de 100 kPa**

**Tabla 5- 10 Resumen del ensayo de compresibilidad a largo plazo para mezclas de goma-arena No 1 y esfuerzo axial aplicado de 100 kPa**

Parámetro	LP100T-3	LP75T25A1-3	LP50T50A1-3	LP25T75A1-3	LP100A1-3
Contenido de goma en volumen	100	75	50	25	0
Contenido de goma en peso	100	52	27	11	0
Peso unitario (lb/ft <sup>3</sup> )	31	42	56	67	78
Deformación total final en % <sup>a</sup>	24.3	18.8	11.3	7.6	1.95

Nota: <sup>a</sup> Calculada en % con respecto a la altura inicial de la muestra.



**Figura 5- 8 Compresibilidad unidimensional a largo plazo para mezclas de goma-arena No 1 y esfuerzo axial aplicado de 200 kPa**

**Tabla 5- 11 Resumen del ensayo de compresibilidad a largo plazo para mezclas de goma-arena No 1 y esfuerzo axial aplicado de 200 kPa**

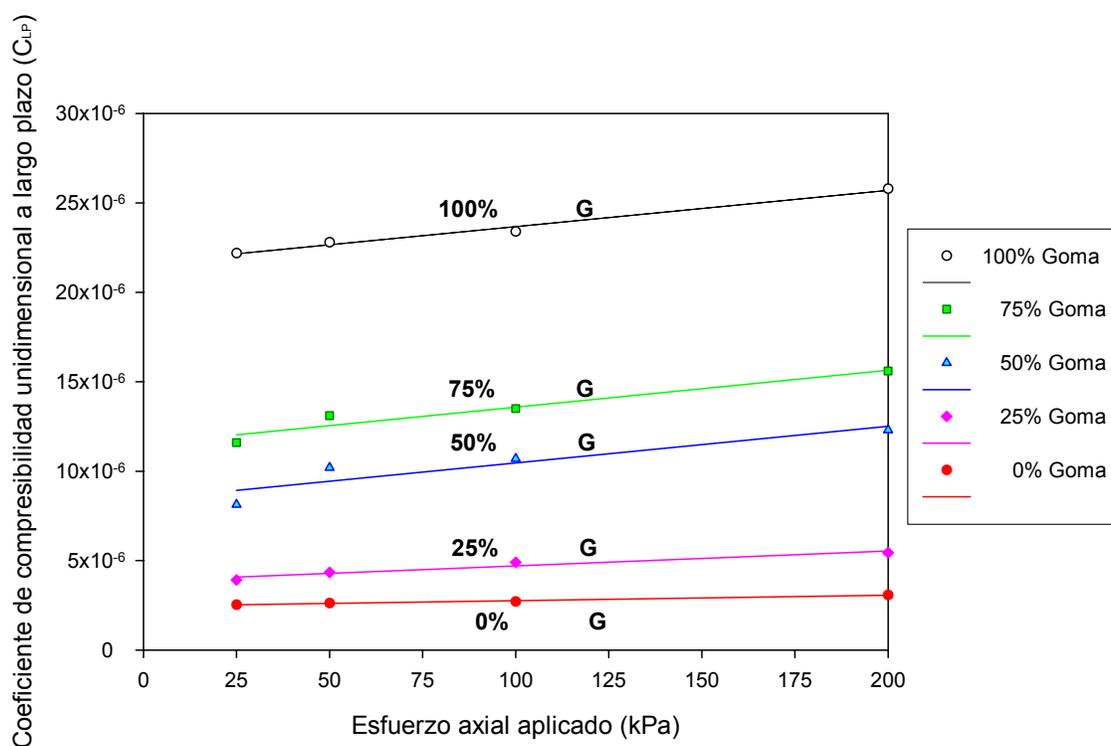
Parámetro	LP100T-4	LP75T25A1-4	LP50T50A1-4	LP25T75A1-4	LP100A1-4
Contenido de goma en volumen	100	75	50	25	0
Contenido de goma en peso	100	52	27	11	0
Peso unitario (lb/ft <sup>3</sup> )	30	42	56	67	78
Deformación total final en % <sup>a</sup>	32.4	25.8	20.8	8.95	2.8

Nota: <sup>a</sup> Calculada en % con respecto a la altura inicial de la muestra.

De los resultados se observa que al aumentar el esfuerzo aplicado en la muestra, se aumento la compresibilidad, obteniéndose valores de deformación unitaria axial para la muestra con 100% de goma desde 13.5% para un esfuerzo axial de 25 kPa, hasta 32.4% para un esfuerzo axial de 200 kPa. Las gráficas de variación de compresibilidad con el esfuerzo se pueden observar en el Apéndice B.

También se puede observar que al aumentar el contenido de goma en la muestra aumento la deformación unitaria axial, obteniéndose valores de deformación unitaria desde 0.4% para la muestra con 100% arena hasta 13.5% para la muestra con 100% de goma y un esfuerzo axial de 25 kPa.

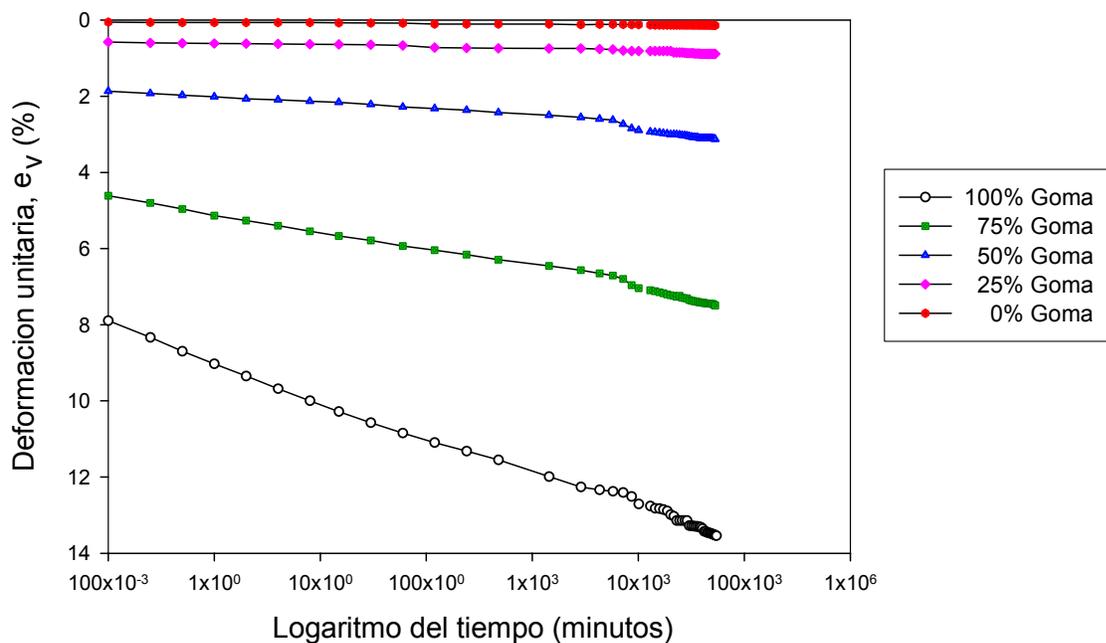
El aumento de compresibilidad unidimensional a largo plazo se representa aquí como un aumento en la pendiente de la gráfica de deformación unitaria versus logaritmo del tiempo. Esto se resume en la Figura 5-9.



**Figura 5- 9 Variación del coeficiente de compresibilidad a largo plazo para mezclas de goma-arena No 1**

Encontramos de la Figura 5-9 que la compresibilidad a largo plazo es significativa para mezclas de arena A1 con contenido de goma de 75% y 100%. Por lo tanto para fines ingenieriles como muros de contención o rellenos en obras viales se deberá considerar este aspecto cuidadosamente. Especialmente si los niveles de esfuerzos son altos (por encima de 25kPa).

En forma similar se presentan los resultados de las pruebas de compresibilidad unidimensional a largo plazo para la Arena No. 2 en las Figuras 5-10 a la 5-13, para esfuerzos de 25, 50, 100 y 200 kPa respectivamente. Las Tablas 5-12 a la 5-15 presentan datos adicionales para estas mismas pruebas.

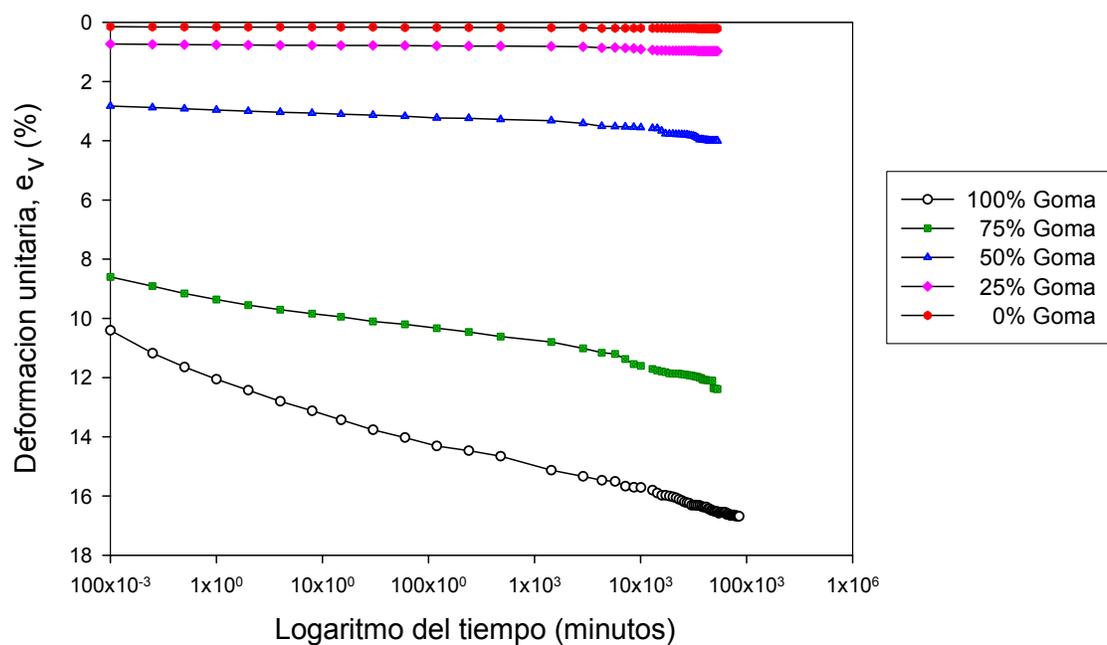


**Figura 5- 10 Compresibilidad unidimensional a largo plazo para mezclas de goma-arena No 2 y esfuerzo axial aplicado de 25 kPa**

**Tabla 5- 12 Resumen del ensayo de compresibilidad a largo plazo para mezclas de goma-arena No 2 y esfuerzo axial aplicado de 25 kPa**

Parámetro	LP100T-1	LP75T25A2-1	LP50T50A2-1	LP25T75A2-1	LP100A2-1
Contenido de goma en volumen	100	75	50	25	0
Contenido de goma en peso	100	45	22	9	0
Peso unitario (lb/ft <sup>3</sup> )	31	53	75	92	101
Deformación total final en % <sup>a</sup>	13.5	10.23	3.1	0.89	0.14

Nota: <sup>a</sup> Calculada en % con respecto a la altura inicial de la muestra.

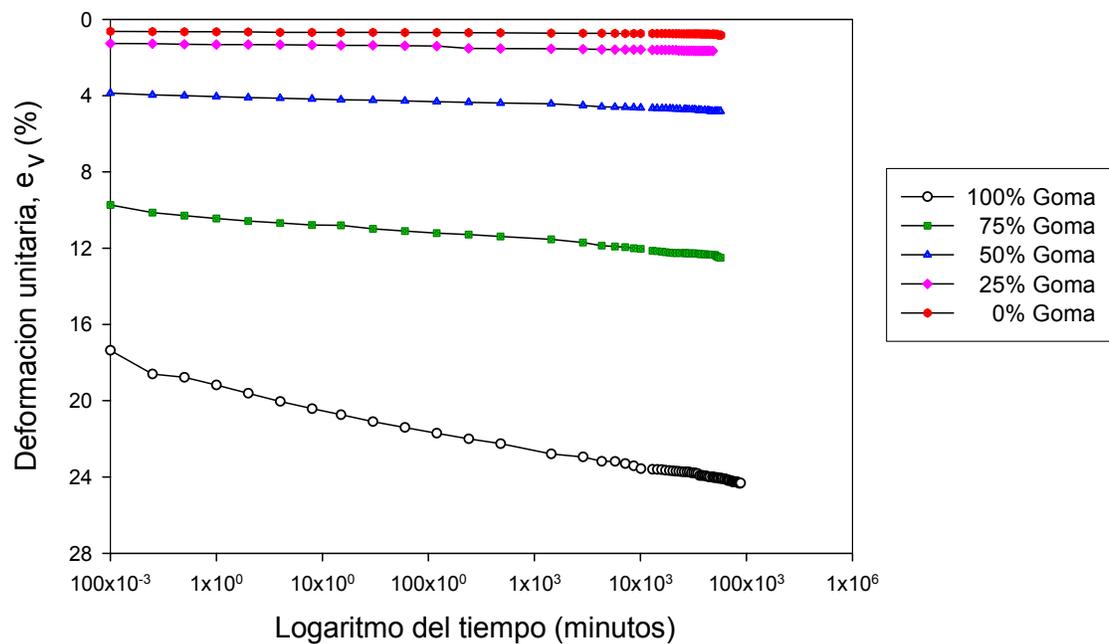


**Figura 5- 11 Compresibilidad unidimensional a largo plazo para mezclas de goma-arena No 2 y esfuerzo axial aplicado de 50 kPa**

**Tabla 5- 13 Resumen del ensayo de compresibilidad a largo plazo para mezclas de goma-arena No 2 y esfuerzo axial aplicado de 50 kPa**

Parámetro	LP100T-2	LP75T25A2-2	LP50T50A2-2	LP25T75A2-2	LP100A2-2
Contenido de goma en volumen	100	75	50	25	0
Contenido de goma en peso	100	45	22	9	0
Peso unitario (lb/ft <sup>3</sup> )	30	50	75	92	101
Deformación total final en % <sup>a</sup>	16.9	12.4	4	0.97	0.21

Nota: <sup>a</sup> Calculada en % con respecto a la altura inicial de la muestra.

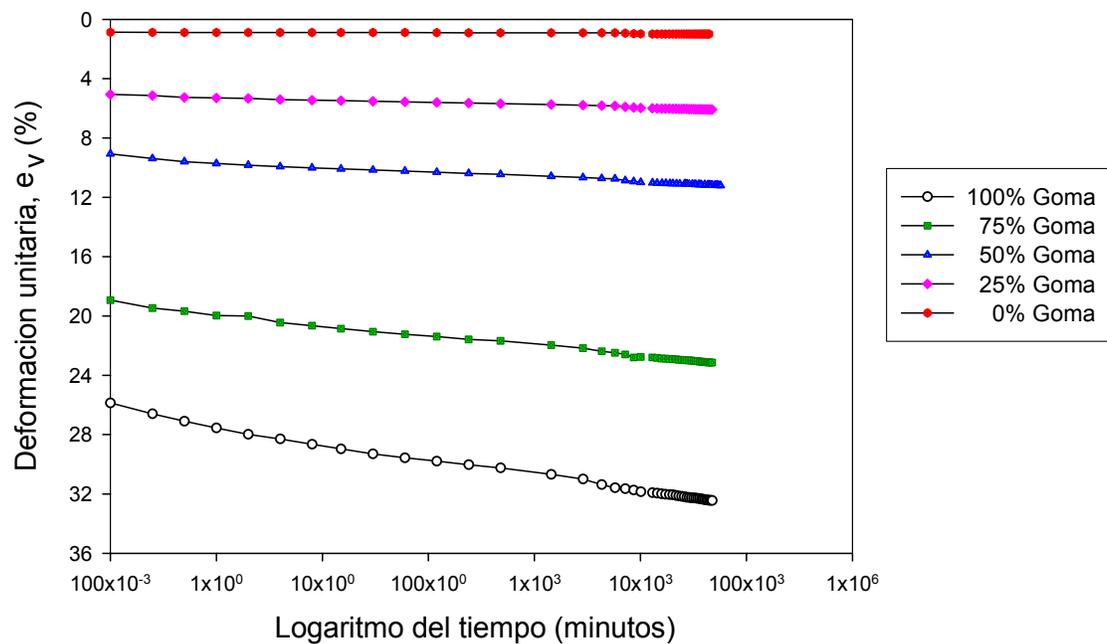


**Figura 5- 12 Compresibilidad unidimensional a largo plazo para mezclas de goma-arena No 2 y esfuerzo axial aplicado de 100 kPa**

**Tabla 5- 14 Resumen del ensayo de compresibilidad a largo plazo para mezclas de goma-arena No 2 y esfuerzo axial aplicado de 100 kPa**

Parámetro	LP100T-3	LP75T25A2-3	LP50T50A2-3	LP25T75A2-3	LP100A2-3
Contenido de goma en volumen	100	75	50	25	0
Contenido de goma en peso	100	45	22	8	0
Peso unitario (lb/ft <sup>3</sup> )	31	50	75	93	101
Deformación total final en % <sup>a</sup>	24.31	12.51	4.81	1.65	0.83

Nota: <sup>a</sup> Calculada en % con respecto a la altura inicial de la muestra.

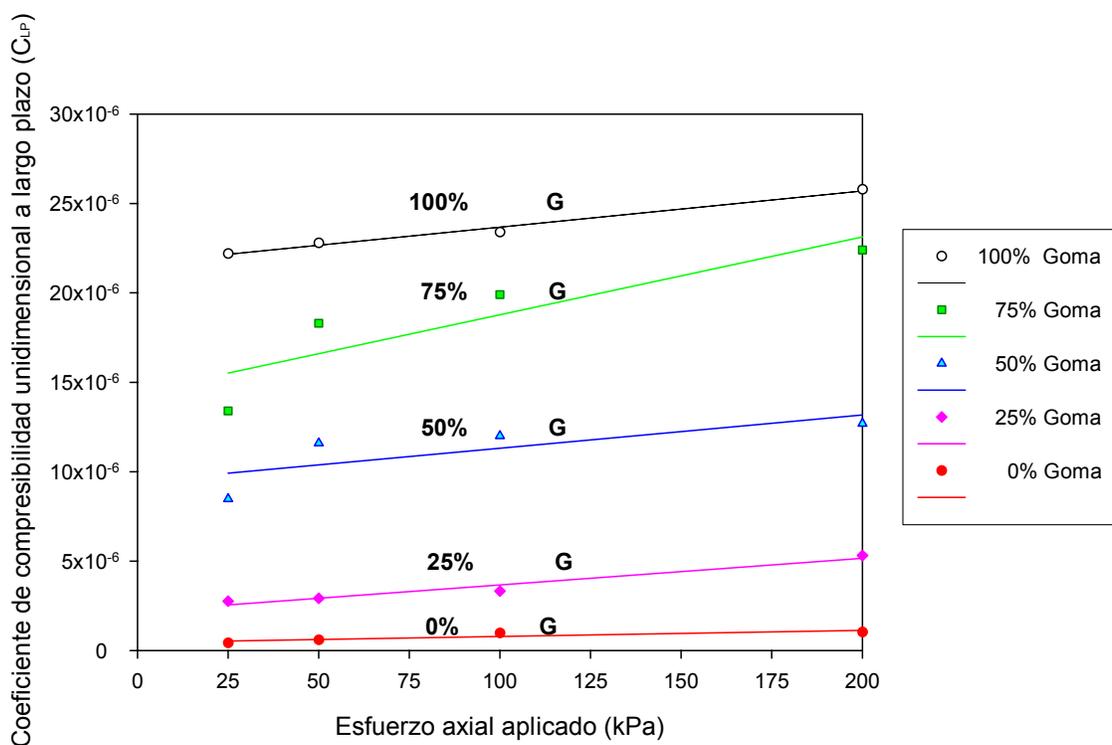


**Figura 5- 13 Compresibilidad unidimensional a largo plazo para mezclas de goma-arena No 2 y esfuerzo axial aplicado de 200 kPa**

**Tabla 5- 15 Resumen del ensayo de compresibilidad a largo plazo para mezclas de goma-arena No 2 y esfuerzo axial aplicado de 200 kPa**

Parámetro	LP100T-4	LP75T25A2-4	LP50T50A2-4	LP25T75A2-4	LP100A2-4
Contenido de goma en volumen	100	75	50	25	0
Contenido de goma en peso	100	45	22	8	0
Peso unitario (lb/ft <sup>3</sup> )	30	50	75	93	101
Deformación total final en % <sup>a</sup>	32.44	23.14	11.2	6.08	0.99

Nota: <sup>a</sup> Calculada en % con respecto a la altura inicial de la muestra.



**Figura 5- 14 Variación del coeficiente de compresibilidad unidimensional a largo plazo para mezclas de goma-arena No 2**

Para la arena No 2, se observa que, al aumentar el esfuerzo aplicado en la muestra, se aumento la compresibilidad, los valores de deformación unitaria axial para la muestra con 75% de goma van desde 10.23% para un esfuerzo axial de 25 kPa, hasta 23.14% para un esfuerzo axial de 200 kPa.

Se puede observar que al aumentar el contenido de goma en la muestra aumentó la deformación unitaria axial, obteniéndose valores de deformación unitaria desde 0.14% para la muestra con 100% arena hasta 13.5% para la muestra con 100% de goma y un esfuerzo axial de 25 kPa. La deformación unitaria axial de la arena No 2 y de las mezclas de esta arena, con la goma triturada fue menor que las obtenidas para la arena No 1 y respectivas mezclas. De acuerdo a los experimentos de esta sección se observo que el esfuerzo aplicado, el contenido de arena, y el tipo de arena influyeron en la compresibilidad de las muestras ensayadas.

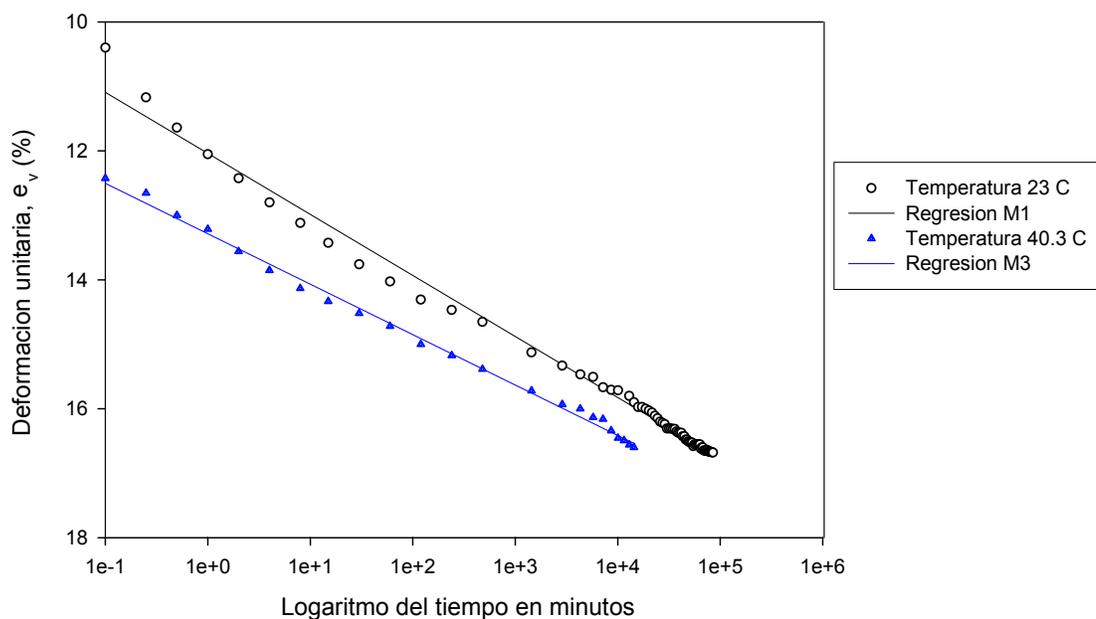
### **5.3.2.2 Ensayos de compresibilidad en una dimensión a largo plazo bajo temperatura constante de 40 °C**

Esta subsección presenta resultados de dos ensayos de compresibilidad a temperatura elevada. El sistema utilizado para el control de temperatura y otros detalles de este experimento se presentan en el Apéndice B.

Los resultados obtenidos de los ensayos de compresibilidad con temperatura constante se muestran en las Figuras 5-15 y 5-16. Dos ensayos fueron realizados, el primero se denomino M1 y se ensayo con temperatura ambiente variable. El segundo se designo como M3 en este se mantuvo la temperatura constante durante toda la prueba por medio del arreglo experimental descrito en el Apéndice B. El esfuerzo axial colocado sobre la muestra fue de 50 kPa. La temperatura ambiente promedio e interior para la M1 fue de 23 ° C y para M3 la temperatura ambiente fue de 27.6 ° C y la temperatura interior en la muestra fue de 40.3 ° C.

**Tabla 5- 16 Resumen del ensayo de compresibilidad a largo plazo con control de temperatura para goma triturada y un esfuerzo axial aplicado de 50 kPa**

Muestra No.	M1	M3
Contenido de goma en volumen	100	100
Peso unitario (lb/ft <sup>3</sup> )	30	28



**Figura 5- 15 Grafica de compresibilidad de la goma triturada para  $\sigma = 50$  kPa. Escala logarítmica**

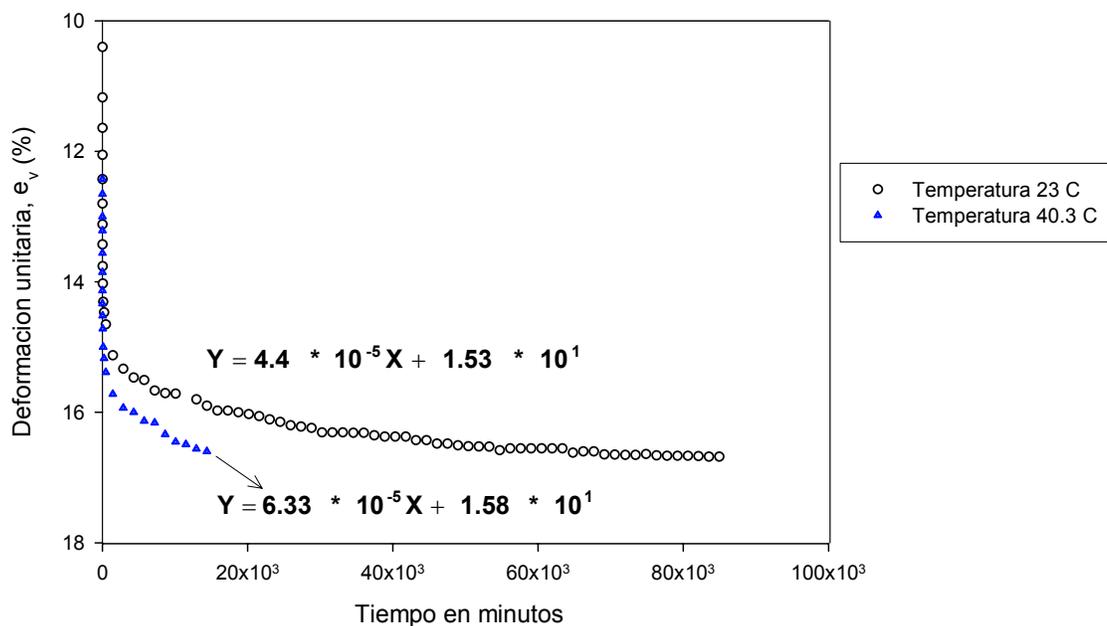


Figura 5- 16 Grafica de compresibilidad de la goma triturada para  $\sigma = 50$  kPa. Escala aritmética.

En la Figura 5-16, al aumentar la temperatura interior en la muestra de 23 ° C a 40.3 ° C, la pendiente de las curvas no cambia significativamente. La pendiente fue medida en el tramo de creep secundario.

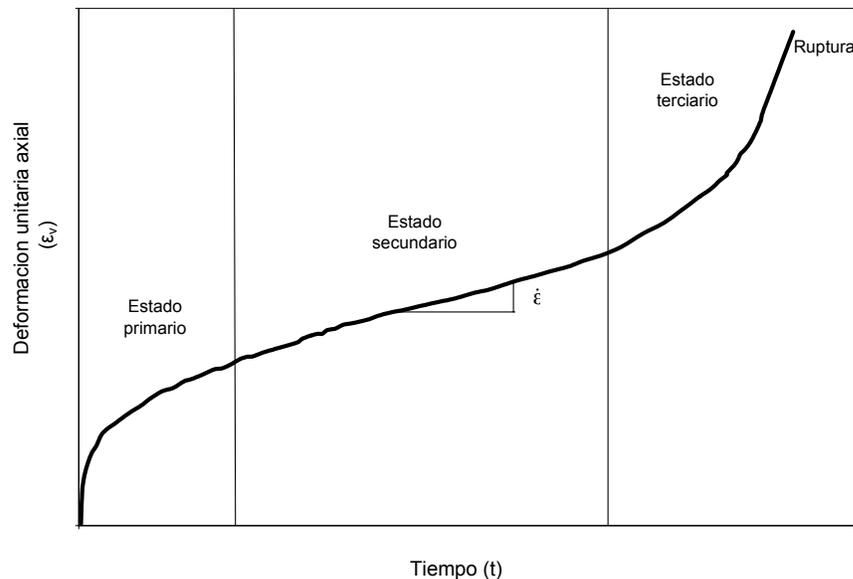
## 5.4 Análisis de resultados

Los resultados de compresión unidimensional a largo plazo bajo carga constante fueron utilizados para evaluar si estos se representan adecuadamente mediante el modelo de creep de Norton, (Boresi y Schmidt, 2003). Esta sección presenta una breve descripción del modelo de creep de Norton y los resultados obtenidos.

### 5.4.1 Descripción del modelo de Norton

Modelos reológicos son generalmente utilizados para describir el comportamiento de los materiales ante el creep. Diferentes tipos de curvas se presentan en los materiales y la forma de la curva dependerá del tipo de material, de la carga aplicada y de la temperatura de ensayo.

Las curvas de creep resultantes de ensayos experimentales generalmente se componen de tres partes: estado primario (transient), estado secundario (steady state) donde la pendiente es constante, y estado terciario, el cual se termina con fractura. Esto se ilustra en la Figura 5-17.



**Figura 5- 17 Curva típica de ensayos de creep**

Una de las funciones más comunes para describir el creep de materiales es la ley de Norton, (Boresi y Schmidt, 2003). El estado secundario de creep en este modelo se presenta por la siguiente Ecuación:

$$\dot{\epsilon} = B \times \sigma^b \quad (5-3)$$

Donde  $\dot{\epsilon}$  es la pendiente de estado secundario de creep,  $\sigma$  es el esfuerzo axial aplicado,  $b$  y  $B$  son parámetros de regresión experimentales. El material se ensaya a temperatura constante y se trabaja con el logaritmo, como se muestra a continuación.

$$\text{Log}\dot{\epsilon} = \text{Log}B + b \times \text{Log}\sigma \quad (5-4)$$

Para medir las constantes  $B$  y  $b$  se realizaron ensayos de compresibilidad a largo plazo para distintos valores de  $\sigma$ . La siguiente subsección muestra las regresiones obtenidas usando el modelo de Norton.

#### 5.4.2 Regresiones usando el modelo de Norton

Las regresiones para las mezclas con las Arenas No. 1 y No. 2 se presentan en las Figuras 5-18 y 5-19, respectivamente.

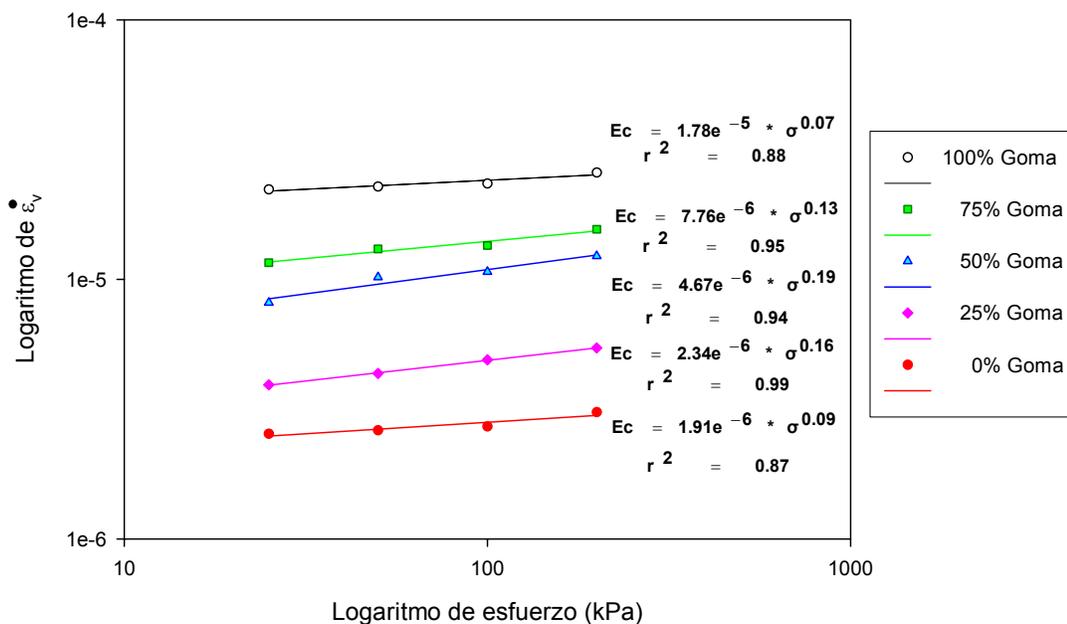


Figura 5- 18 Ecuaciones de Norton para mezclas con Arena No. 1

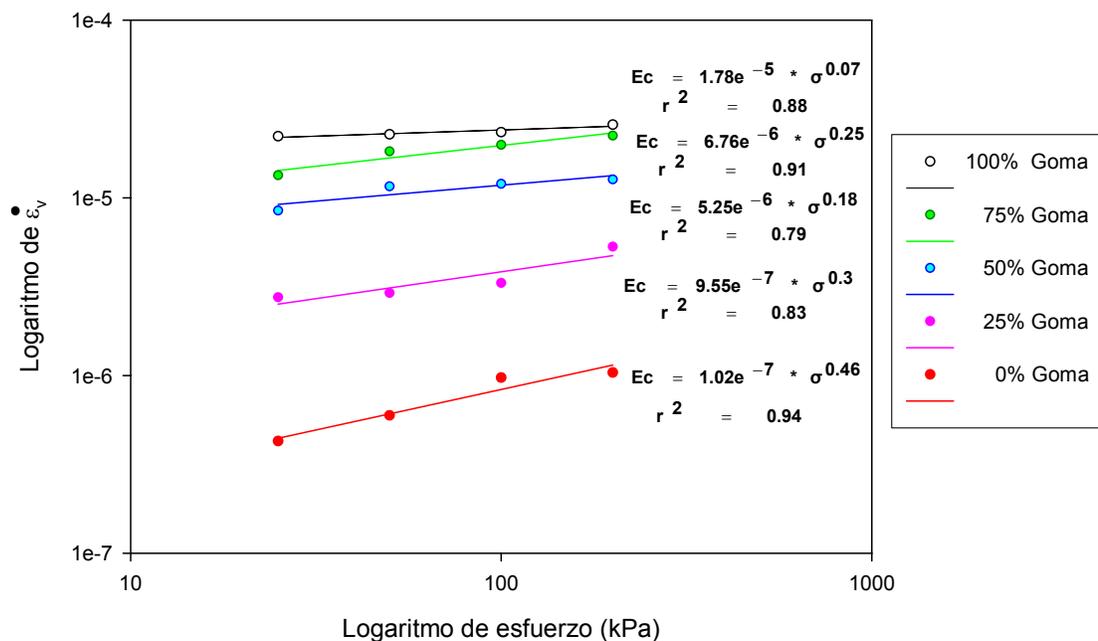


Figura 5- 19 Ecuaciones de Norton para mezclas con Arena No. 2

### 5.4.3 Resumen de regresiones usando el modelo de Norton

Los parámetros de Norton y los valores del coeficiente de correlación ( $r^2$ ) se resumen para ambos tipos de mezclas en las Tablas 5-17 y 5-18. Las regresiones obtenidas utilizando la ley de Norton dan ajustes razonablemente buenos.

Tabla 5- 17 Resumen análisis de Norton Arena No. 1

Arena	% Goma	Parámetros Norton		
		b	B	$r^2$
A1	100	0.07	$1.78 \times 10^{-5}$	0.88
	75	0.13	$7.76 \times 10^{-6}$	0.95
	50	0.19	$4.67 \times 10^{-6}$	0.94
	25	0.16	$2.34 \times 10^{-6}$	0.99
	0	0.09	$1.91 \times 10^{-6}$	0.87

**Tabla 5- 18 Resumen análisis de Norton Arena No. 2**

Arena	% Goma	Parámetros Norton		
		b	B	r <sup>2</sup>
A2	100	0.07	1.78x10 <sup>-5</sup>	0.88
	75	0.25	6.76x10 <sup>-6</sup>	0.91
	50	0.18	5.25x10 <sup>-6</sup>	0.79
	25	0.3	9.55x10 <sup>-7</sup>	0.83
	0	0.46	1.02x10 <sup>-7</sup>	0.94

## 5.5 Resumen y Conclusiones

En este capítulo se presentaron resultados de ensayos de compresibilidad a corto y largo plazo realizados a la goma triturada y a mezclas goma-arena. Se obtuvieron las siguientes conclusiones.

En los ensayos de compresibilidad a corto plazo, se observó que el contenido de goma en la mezcla aumentó la compresibilidad. Las muestras con goma de (100%, 75% y 50%) alcanzaron grandes deformaciones unitarias llegando hasta 30%. La disminución en el contenido de goma disminuyó las deformaciones unitarias máximas alcanzadas.

Los módulos de confinamiento (D) fueron mayores en la arena y disminuyeron proporcionalmente con la adición de goma triturada.

Para los ensayos de compresibilidad a corto plazo, la velocidad en la aplicación de la carga axial ocasionó un ligero cambio en el módulo de confinamiento (D). Para el caso de 100% arena y 100 % de goma, el módulo de confinamiento disminuyó cuando se aumento la velocidad del ensayo, en el caso de 75%, 50% y 25% sucedió lo contrario. Para la arena el comportamiento de las dos curvas del módulo (D) con diferentes velocidades fue muy similar.

En el ensayo de compresibilidad a largo plazo se observó que al aumentar la temperatura interior en la muestra de 23 ° C a 40.3 ° C, el cambio en pendiente no fue significativo.

En los ensayos de compresibilidad a largo plazo se observó que el aumento en el esfuerzo aplicado en la muestra, aumentó la compresibilidad, obteniéndose valores de deformación unitaria axial para la muestra con 100% de goma desde 13.5% para un esfuerzo axial de 25 kPa, hasta 32.4% para un esfuerzo axial de 200 kPa. Para la arena No 1, los valores de deformación unitaria axial para la muestra con 75% de goma varían desde 10.9% para un esfuerzo axial de 25 kPa, hasta 25.8% para un esfuerzo axial de 200 kPa. Para la arena No 2, los valores de deformación unitaria axial para la muestra con 75% de goma van desde 10.23% para un esfuerzo axial de 25 kPa, hasta 23.14% para un esfuerzo axial de 200 kPa.

En los ensayos de compresibilidad a largo plazo, también se pudo observar que al aumentar el contenido de goma en la muestra aumentó la deformación unitaria axial final, obteniéndose valores de deformación unitaria ( $\epsilon$ ) de 13.5% para la muestra con 100% de goma, 0.4% para la muestra con 100% arena No. 1, y 0.14% para la muestra con 100% arena No 2 todos los valores fueron para un esfuerzo axial de 25 kPa.

La deformación unitaria axial de la arena No 2 y de las mezclas de esta arena, con la goma triturada fue menor que las obtenidas para la arena No 1 y respectivas mezclas.

Con ayuda de la ley de Norton, se obtuvieron regresiones, que describen la deformación unitaria axial del material ante la aplicación de un esfuerzo axial, de acuerdo al contenido de goma.

Las graficas obtenidas por medio de la ley de Norton muestran que a mayor esfuerzo aplicado se obtuvieron pendientes más altas ( $\dot{\epsilon}$ ) de creep. También se observa que para

el contenido de goma del 100% los valores de ( $\dot{\epsilon}$ ) fueron mayores, estos disminuyeron cuando se redujo el contenido de goma en la muestra.

La compresibilidad a largo plazo es un factor que se debe estudiar cuidadosamente en el diseño de rellenos con goma triturada o mezclas de goma-arena construidos para muros de contención u obras viales. Los factores que incidieron en la compresibilidad a largo plazo fueron: el esfuerzo aplicado, el contenido de goma triturada en la mezcla, y el tipo de arena en la mezcla.

# **CAPITULO 6. EXPERIMENTOS USANDO UN MURO PROTOTIPO**

## **6.1 Introducción**

Una de las posibles ventajas de utilizar goma triturada como material de relleno detrás de muros de contención es la posible disminución de las presiones laterales sobre la pared del muro. Sin embargo la predicción acertada de estos esfuerzos es esencial para poder obtener diseños adecuados de muros de contención usando gomas trituradas y/o mezclas. Para ésto se incluyó en esta investigación experimental una serie de ensayos con un muro prototipo que permitiera evaluar las presiones generadas sobre muros por rellenos conformados por gomas trituradas y mezclas con arenas. En este capítulo se describe la etapa de diseño, construcción, calibración y ensayo de un muro a escala o prototipo de muro de contención construido en plexiglás. El objetivo de estos ensayos con el muro prototipo fue el de evaluar las presiones activas y pasivas, generadas por distintos rellenos (goma y mezclas con arena) y su relación con niveles de desplazamiento del muro prototipo. En la parte final del capítulo se presentan los resultados obtenidos al efectuar las pruebas con el modelo, y la comparación entre el comportamiento de la goma triturada con la Arena No 2.

## **6.2 Evaluación preliminar del problema**

La revisión de literatura presentada en el Capítulo 3 mostró que la goma triturada tiene valores de peso específico aproximadamente 50% menores a los valores para rellenos convencionales como suelos arenosos o gravas. Basados en teorías convencionales de empuje de tierras en muros de contención (Rankine, 1857) sabemos que la fuerza resultante debido a los empujes activos o pasivos actuando sobre un muro es directamente proporcional al peso unitario del relleno. Esto implicaría, en principio,

que el uso de goma triturada en muros resultaría en una reducción substancial de las presiones laterales actuantes solamente basado en la reducción del peso unitario del relleno. Sin embargo, un factor potencial que podría contrarrestar esta reducción de presiones para el caso activo es el aumento que podría existir debido a un posible aumento en los coeficientes de empuje lateral para materiales viscoelásticos como son las gomas trituradas. Supongamos preliminarmente que la teoría clásica de Rankine (1857) aplica para un medio de partículas viscoelásticas, como son las gomas trituradas. Al tener la goma triturada un ángulo de fricción efectivo ( $\phi'$ ) menor que para rellenos convencionales (Ver capítulo 4) tendríamos que la goma triturada con  $\phi'$  menor resulta en un aumento en el coeficiente activo ( $K_a$ ). Para ilustrar este punto en forma más clara, imaginemos primero un muro con un relleno convencional con un peso unitario de 20  $\text{kN/m}^3$  y un ángulo de fricción,  $\phi' = 37^\circ$ . Basado en la teoría de Rankine, este muro tendría, una fuerza lateral (por metro de muro), debido al relleno en estado seco de:

$$P_{a_1} = 2.486H^2 \quad [KN / m] \quad (6-1)$$

Donde H es la altura del muro en metros y  $P_a$  es la fuerza resultante de KN/m.

Ahora imaginemos un muro similar, con las mismas características y dimensiones, pero ahora con un relleno conformado por goma triturada con un peso unitario de 6  $\text{kN/m}^3$  y un ángulo de fricción,  $\phi' = 19^\circ$  (Ver capítulo 4). Si asumimos, que la teoría clásica de Rankine aplica para un relleno de goma triturada tendríamos una fuerza resultante debida al relleno de goma igual a:

$$P_{a_2} = 1.526H^2 \quad [KN / m] \quad (6-2)$$

Donde H es la altura del muro en metros y  $P_a$  es la fuerza resultante actuando sobre el muro en KN/m.

Esta comparación preliminar y simplificada, basada en la aplicación directa de la teoría clásica de Rankine, predice una reducción de las presiones laterales en el muro del orden del 60% al pasar de relleno convencional a un relleno de goma triturada.

Este computo preliminar y simplificado parecería indicar que gomas trituradas podrían ser una alternativa atractiva para usarse en muros de contención. Sin embargo ya vimos que existe el problema potencial de deformaciones excesivas, especialmente a largo plazo (creep). También está la incertidumbre de si las teorías clásicas de empujes (Rankine, etc) aplican para rellenos conformados por gomas trituradas al ser partículas deformables viscoelásticas como es el caso de las gomas trituradas.

La evaluación económica y técnica de la alternativa de usar goma triturada o mezclas como rellenos para muros de contención, requiere un entendimiento adecuado de los niveles de presiones laterales generados por estos tipos de materiales. Adicional a los niveles de presiones es necesario evaluar la relación presión lateral versus nivel de movimiento del muro. Por lo tanto este componente experimental de la tesis busca determinar si las teorías convencionales de empujes de tierras son apropiadas.

### **6.3 Teorías clásicas de empujes de tierra**

Las presiones laterales que ejercen rellenos convencionales sobre muros de contención han sido investigadas mediante teorías clásicas, como las propuestas por, Coulomb (1776) y Rankine (1857).

Por cuestiones de brevedad, aquí se presenta solo un resumen breve de la teoría de Rankine. La idea es simplemente resaltar los factores principales que influyen en las presiones laterales generadas por rellenos granulares convencionales y resaltar al lector algunos aspectos que podrían diferir cuando se utilizan rellenos de goma triturada.

Rankine (1857) investigó las condiciones de esfuerzo en el suelo en estado de equilibrio plástico, esto se refiere a la condición donde cada punto en la masa de suelo está a punto de fallar. Los estados límites para un muro de contención con un relleno tradicional propuestos por Rankine se resumen en la Figura 6-1.

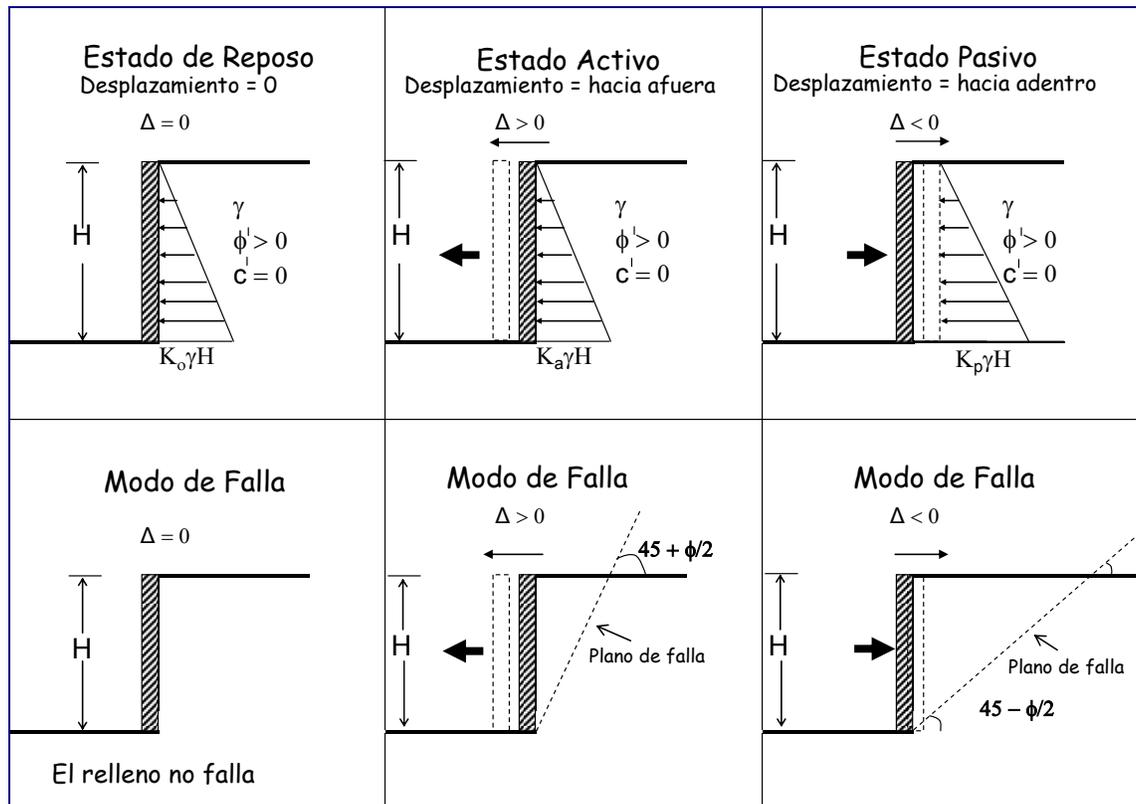


Figura 6-1 Estados límites para un muro de contención según Rankine (1857)

Rankine (1857) asumió que los rellenos fallaban en un plano y que el estado era de equilibrio plástico. La fuerza resultante ejercida por el relleno sobre un ancho unitario de muro se puede estimar usando la siguiente ecuación:

$$P = \frac{1}{2} K * \gamma * H^2 \quad (6-3)$$

Donde  $K$  = empuje de presiones activo ( $K_a$ ) o pasivo ( $K_p$ ) según sea el caso,  $\gamma$  es el peso unitario del relleno y  $H$  es la altura del relleno.

La ecuación anterior asume un relleno seco, no cohesivo y con superficie horizontal plana. Los coeficientes de empuje ( $K_a$  y  $K_p$ ) se calculan en función del ángulo de fricción interna del relleno con las siguientes expresiones:

$$k_a = \tan^2\left(45 - \frac{\phi'}{2}\right) = \frac{1 - \text{sen}\phi'}{1 + \text{sen}\phi'} \quad (6-4)$$

$$k_p = \tan^2\left(45 + \frac{\phi'}{2}\right) = \frac{1 + \text{sen}\phi'}{1 - \text{sen}\phi'} \quad (6-5)$$

Donde  $\phi'$  es el ángulo de fricción interno efectivo del relleno.

Usando los valores de ángulo de fricción internos medidos y reportados en el Capítulo 4 tenemos, según la teoría de Rankine, los valores de empuje de presiones laterales listados en la Tabla 6-1.

**Tabla 6- 1 Empuje de presiones laterales según Rankine para los materiales investigados**

Material	Peso específico (lb/ft <sup>3</sup> )	$K_a$ activo	$K_p$ pasivo
Arena No. 2	99	0.31	3.25
Goma sola	40	0.51	1.97
50% arena No 2-50% goma	110	0.41	2.5

Lo anterior atañe principalmente a la magnitud del empuje generado por el relleno para los casos extremos de falla activa (movimiento del muro alejándose del relleno) y falla pasiva (muro moviéndose hacia el relleno). Sin embargo las presiones generadas serán función de la magnitud del desplazamiento relativo entre el muro y el relleno. Para el caso de un muro estacionario (donde no hay desplazamiento) el empuje se calcula

considerando una condición de reposo. Para el caso de reposo, el coeficiente se puede estimar usando la siguiente ecuación propuesta por Jaky (1948):

$$k_o = 1 - \text{sen}\phi' \quad (6-6)$$

La cantidad de movimiento requerida para obtener los estados de falla activo y pasivo depende de la altura del muro y del nivel de compactación o peso específico del relleno del muro. Por lo general a mayor altura se requiere mayor desplazamiento para llegar a los estados de falla. Esto se debe a que a mayor altura se afecta un mayor volumen de suelo. A su vez, el estado pasivo requiere mayor desplazamiento que el estado activo al ser la cuña pasiva más grande. El peso específico del suelo influye también al requerirse mayores deformaciones para desarrollar el pico en un suelo suelto versus un suelo en estado denso. Todo esto se puede visualizar mejor en forma gráfica como se muestra en la Figura 6-2.

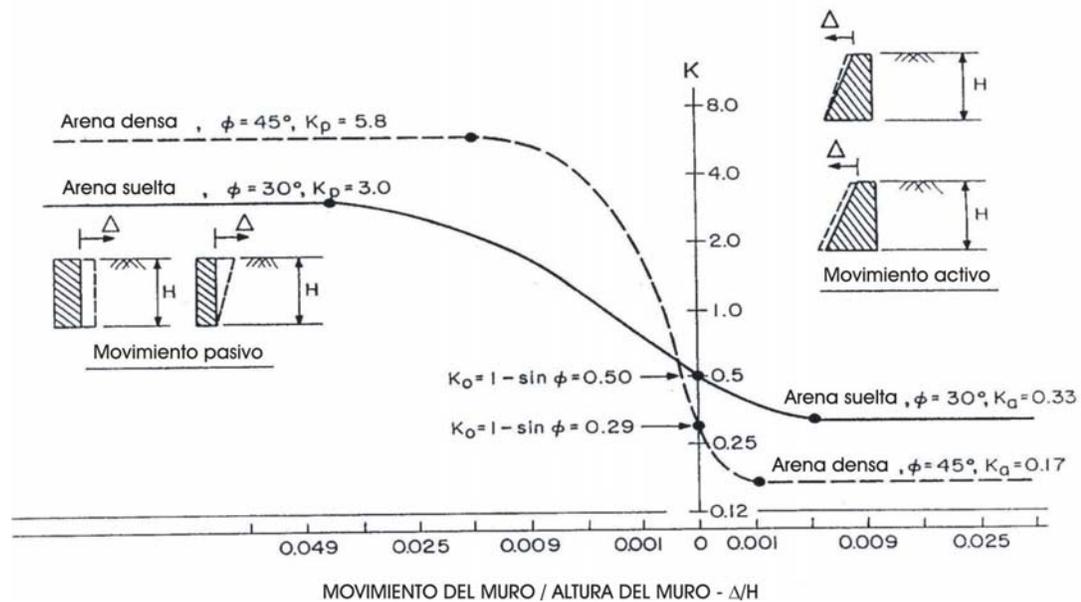
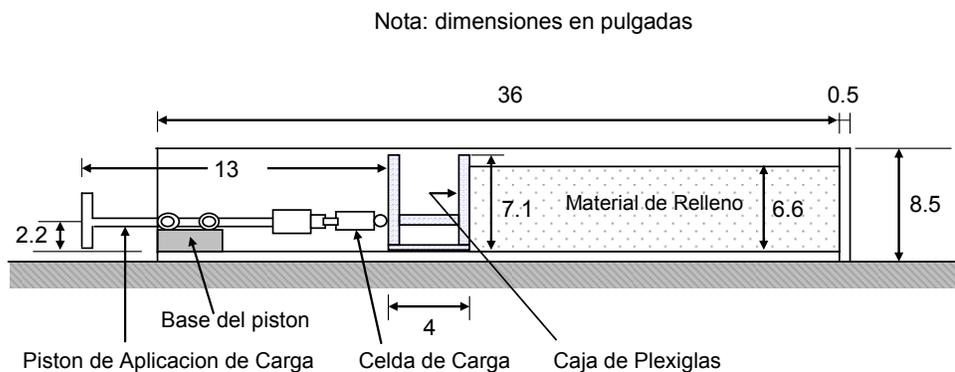


Figura 6- 2 Relaciones entre el movimiento del muro y coeficientes de presiones de tierra (Adaptado de referencia según Kim y otros, 1991)

Para evaluar la aplicabilidad de teorías clásicas, como la que se acaba de presentar de Rankine (1857), se realizaron pruebas a escalas usando un prototipo como el que se describe a continuación.

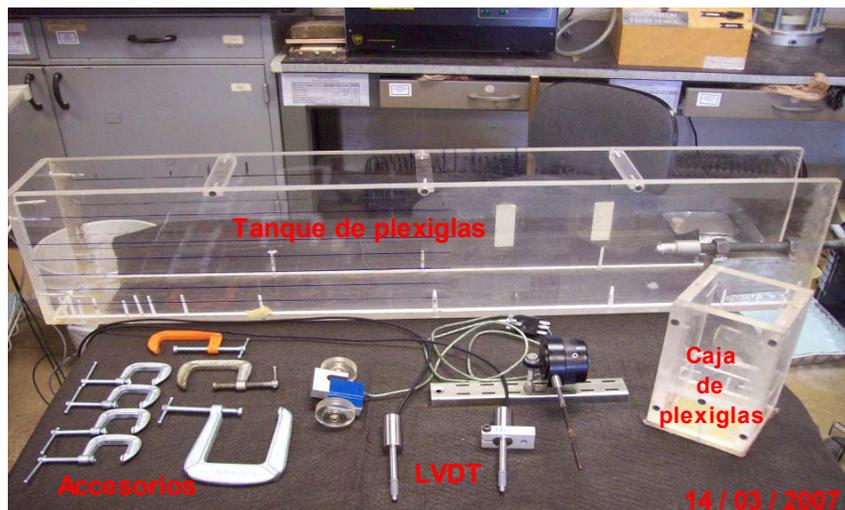
## 6.4 Descripción del muro prototipo

El experimento se diseñó y construyó en forma conjunta por el equipo de trabajo conformado por el Dr. Miguel A. Pando López (presidente del comité graduado para esta investigación, profesor del departamento de Ingeniería Civil, UPRM), el Señor Jaime Ramírez (técnico de laboratorio de suelos del departamento de Ingeniería Civil, UPRM), la estudiante subgraduada de Ingeniería Civil, UPRM, Julieta Gómez Fragoso y la estudiante graduada, UPRM, Hebenly Celis Leguizamo (autora de esta tesis). En la Figura 6-3 se observa el esquema del modelo.



El modelo está constituido por los siguientes elementos, un tanque rectangular elaborado con láminas de plexiglás. Las dimensiones del tanque son: 5 pulgadas de ancho, 8.5 pulgadas de alto y 36.5 pulgadas de longitud, una caja cuadrada de 4 pulgadas de lado y 7.1 pulgadas de alto. También consta de un sistema de aplicación y medición de carga, conformado por un pistón manual, y una celda de carga marca interfase que tiene una capacidad máxima de 250 libras. El desplazamiento del muro se mide

mediante un deformímetro digital, y dos sensores de deformación LVDT. Estos equipos se fijan al tanque de plexiglás mediante otros accesorios adicionales. En la Figura 6-4 se observan las partes principales del equipo.



**Figura 6- 4 Fotografía de las partes del Modelo**

Todas las medidas fueron obtenidas mediante un sistema de adquisición de datos el cual se puede observar en las Figura 6-5. Se puede ver el montaje general del ensayo en la Figura 6-6.



**Figura 6- 5 Equipo de adquisición de datos**



Figura 6- 6 Foto mostrando montaje típico del ensayo

## 6.5 Descripción de los materiales

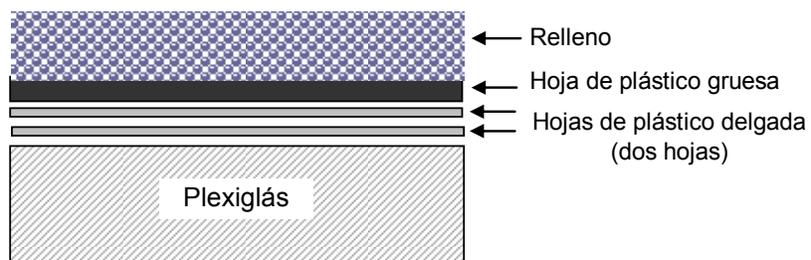
Para los ensayos elaborados en este capítulo se utilizaron dos tipos de materiales: goma triturada y la arena No. 2. Estos materiales se describieron en el Capítulo 4. Se llevaron a cabo ensayos con el muro prototipo usando arena No. 2 sola, goma sola y una mezcla conformada por 50% de goma y 50% de arena No. 2 (proporcionada por volumen). Los ensayos de arena No. 2 sola se utilizaron para validar la metodología experimental. Se realizaron ensayos buscando falla en estado activo y también falla por estado pasivo.

## 6.6 Evaluación fricción en las paredes del prototipo

Antes de validar la metodología experimental, se identificó como un problema importante la fricción generada entre el relleno y las paredes del tanque de plexiglás. Este factor fue estudiado por Fang y otros (2003). Estos autores evaluaron varios

sistemas para reducir la fricción entre paredes de prototipos y rellenos. De los distintos sistemas estudiados encontraron que el más efectivo fue el de usar varias hojas de polietileno entre las paredes del tanque y el relleno. Fang y otros (2003) encontraron que usar 3 capas de plástico como se muestra en la Figura 6-7 resultaba en la menor fricción y se encontró que no dependía del nivel de esfuerzo normal aplicado.

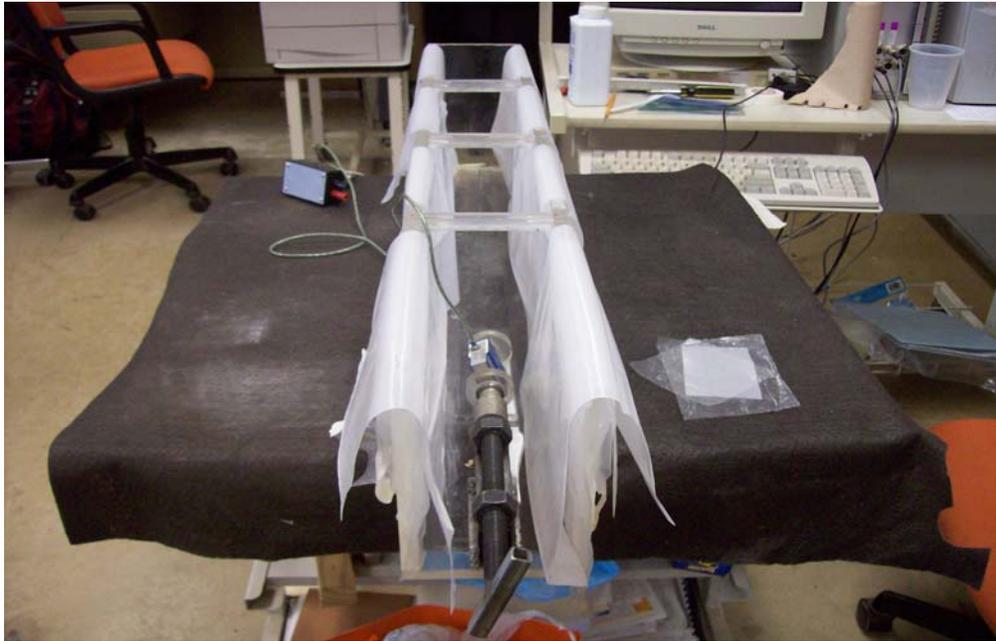
La configuración seleccionada se muestra esquemáticamente en la Figura 6-7 y consistió en primero poner dos capas de plástico delgado y luego una hoja gruesa. Las hojas delgadas tuvieron un espesor de 0.7 mil (0.018 mm), mientras que la hoja gruesa seleccionada tenía un espesor de 6 mil (0.152 mm).



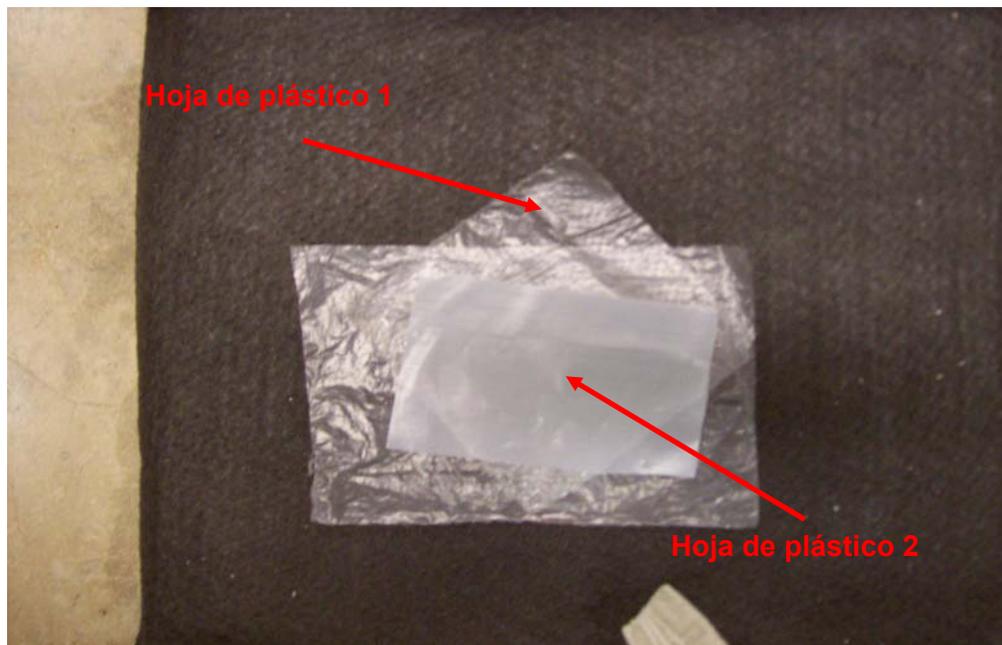
**Dibujo no esta a escala**

**Figura 6- 7 Arreglo utilizado para reducir fricción en el relleno**

Una fotografía del modelo de plexiglás cubierto con el sistema utilizado para reducción de fricción se muestra en la Figura 6-8. En la Figura 6-9 se muestran fotos de los dos tipos de plástico utilizados.



**Figura 6- 8 Modelo de plexiglás cubierto con plástico para reducir fricción**



**Figura 6- 9 Detalle de los dos tipos de plásticos utilizados**

La fricción reducida de este sistema se evaluó mediante ensayos de corte directo y de plano inclinado. Detalles adicionales de estos experimentos se presentan en el Apéndice C.

El método del plano inclinado fue similar al seguido por de Fang y otros (2003). Este ensayo consiste en monitorear el deslizamiento de una anilla con relleno sobre una lámina de plexiglás. Dentro de la anilla se coloca la arena o goma triturada (según sea el caso), sobre este material se coloca una sobrecarga para obtener el esfuerzo normal requerido. La lámina o base es entonces inclinada con un sistema hidráulico hasta que la anilla con el material comience a deslizarse. El ángulo de inclinación para el cual la anilla con relleno se desplaza corresponde al ángulo de interfase. Este sencillo ensayo se puede repetir para varios sistemas de reducción de fricción.

Adicional a este ensayo de plano inclinado se realizaron ensayos de interfase usando el equipo de corte directo modificado para incluir en la mitad inferior plexiglás o plexiglás con el sistema reductor de presiones. Detalles de este ensayo se presentan en el Apéndice C.

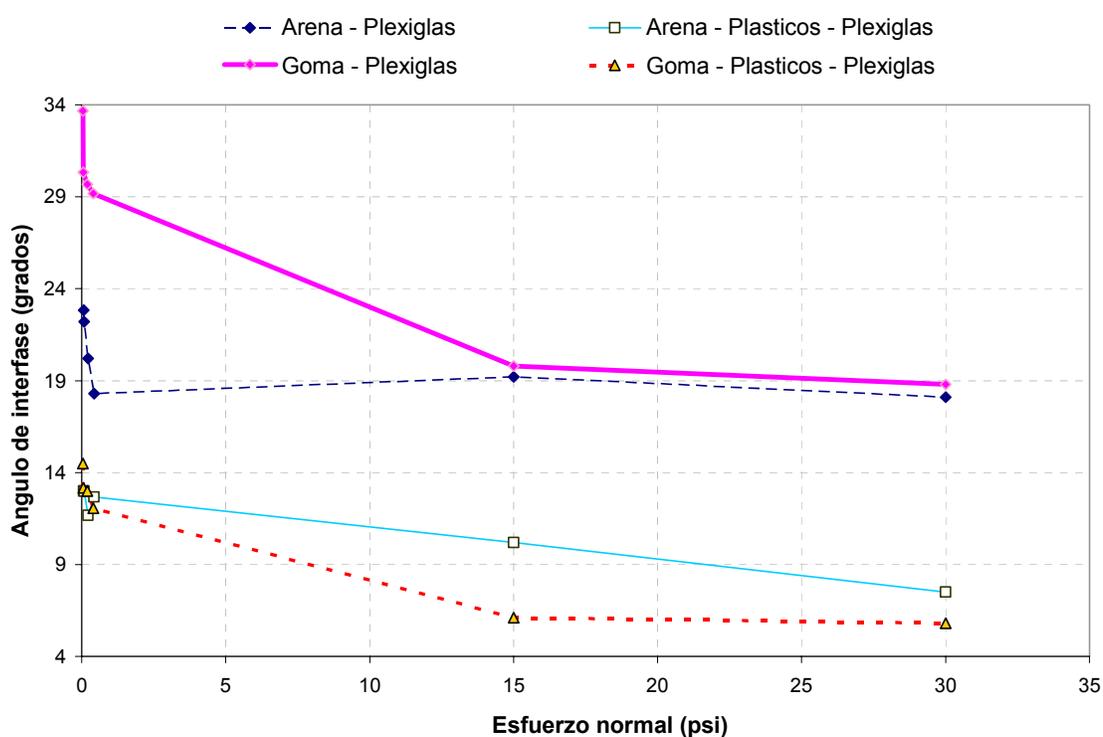
La Tabla 6-2 presenta un resumen de los resultados obtenidos para 2 tipos de relleno (goma sola y arena No. 2). La tabla presenta resultados para varios niveles de esfuerzo normal y para el caso donde no se usó el sistema reductor de fricción (sin plásticos) y en el caso donde se utilizó el sistema reductor (Figura 6-7).

Tabla 6- 2 Resumen resultados de ensayos de ángulo de interfase

Tipo de interfase	Esfuerzo normal (lb/in <sup>2</sup> )	Angulo de interfase (grados)	Método de ensayo
Arena No. 2 – Plexiglás (sin sistema de plásticos)	0.072	22.8	Plano inclinado
	0.078	22.2	
	0.225	20.2	
	0.430	18.3	
	15	19.2	Interfase con corte directo
	30	18.1	
Arena No. 2– Plásticos –Plexiglás (sistema de 3 plásticos)	0.072	13.0	Plano inclinado
	0.078	13.0	
	0.225	11.7	
	0.430	12.7	
	15	10.2	Interfase con corte directo
	30	7.5	
Goma - plexiglás	0.043	33.7	Plano inclinado
	0.049	30.3	
	0.196	29.7	
	0.397	29.2	
	15	19.8	Interfase con corte directo
	30	18.8	
Goma – plásticos – Plexiglás (sistema de 3 plásticos)	0.04	14.5	Plano inclinado
	0.05	13.2	
	0.20	13.0	
	0.397	12.1	
	15	6.1	Interfase con corte directo
	30	5.8	

La Figura 6-10 presenta los ángulos de interfase medidos en forma gráfica como función del nivel de esfuerzo normal aplicado y el tipo de interfase. Para arena contra

plexiglás (sin sistema reductor) se observa que la fricción depende del esfuerzo normal y los valores de ángulo de interfase oscilan entre  $23^\circ$  para esfuerzos normales bajos a  $19^\circ$  para esfuerzos normales altos. El uso del sistema reductor se traduce a ángulos menores entre  $8^\circ$  y  $13^\circ$  y con una menor sensibilidad a nivel de esfuerzo normal. De forma similar, para goma sola los ángulos varían entre  $34^\circ$  para esfuerzos normales bajos a  $19^\circ$  para esfuerzos normales altos. El uso del sistema reductor hizo que los ángulos de interfase bajaran entre  $14^\circ$  y  $5^\circ$ .



**Figura 6- 10 Resultados del ángulo de interfase**

Más detalles sobre el estudio de interfase, incluyendo todas las graficas correspondientes a los resultados de los ensayos de interfase, se pueden encontrar en el Apéndice C.

## 6.7 Resultados de ensayos de prototipo

La primera serie de ensayos usando el prototipo fue para fines de validación o calibración e involucró usar Arena No. 2 la cual se espera siga razonablemente bien las teorías clásicas de empuje de tierra. La segunda etapa involucró ensayos con goma triturada y mezclas con la Arena No. 2. Los ensayos realizados en este componente experimental se presentan en la Tabla 6-3. En esta tabla solo se presentan los ensayos definitivos que no presentan problemas y cuyos resultados son expuestos más adelante.

**Tabla 6- 3 Matriz de ensayos muro prototipo**

<b>Material</b>	<b>Tipo de ensayo</b>	<b>Identificación del ensayo</b>	<b>Peso unitario (lb/ft<sup>3</sup>)</b>
Arena No. 2	Activo	AAS-1B	108.35
Goma	Activo	GAS-4B	31.8
Arena No. 2- Goma	Activo	MAS-1	90.49
Arena No. 2	Pasivo	APS-1c	99.27
Goma	Pasivo	GPS-2c	32
Arena No. 2- Goma	Pasivo	MPS-1	90.49

En todos los ensayos listados en la Tabla 6-3 se utilizó el sistema reductor de fricción presentado con anterioridad. La altura del relleno en todos los ensayos fue alrededor de 6.5 pulgadas.

### 6.7.1 Pruebas de validación con Arena No. 2

Varias pruebas de validación se llevaron a cabo usando la Arena No. 2. Esta sección resume los resultados obtenidos. Más detalles se presentan en el Apéndice D.

#### 6.7.1.1 Resultados pruebas activas

El ensayo activo se realizó colocando una restricción inicial al muro para impedir su movimiento. La restricción se fue quitando lentamente, de manera que el muro se mueva alejándose del relleno. Se tomaron medidas en la celda de carga y deformación en el LVDT. Resultados típicos de este tipo de prueba se muestran en la Figura 6-12. Como se explica en detalles en el Apéndice C, los resultados de estas pruebas deben corregirse por efectos de fricción entre el relleno y el tanque de plexiglás y la fricción entre el muro y el tanque.

La fuerza medida en la celda de carga en la prueba activa es menor a la fuerza resultante ejercida por las presiones del relleno ( $P_a$ ). Esto se debe a que la fricción ( $Fr_1$ ) entre el relleno y el tanque tienen sentido contrario al del empuje. Esto se muestra esquemáticamente en la Figura 6-11.

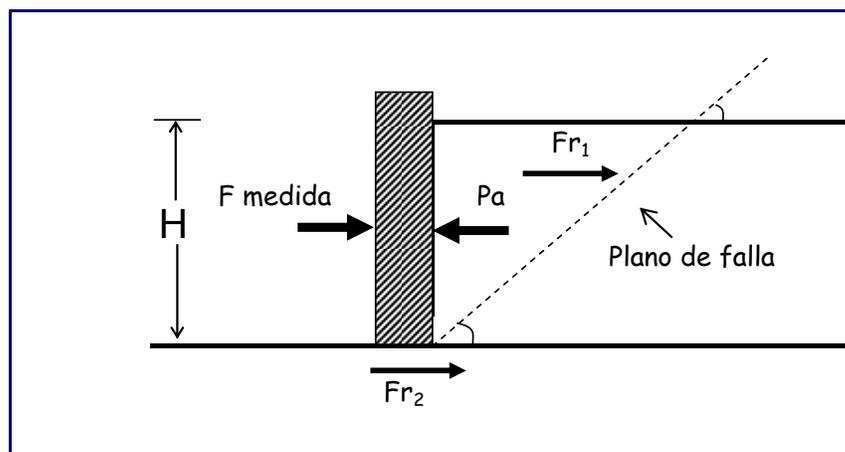
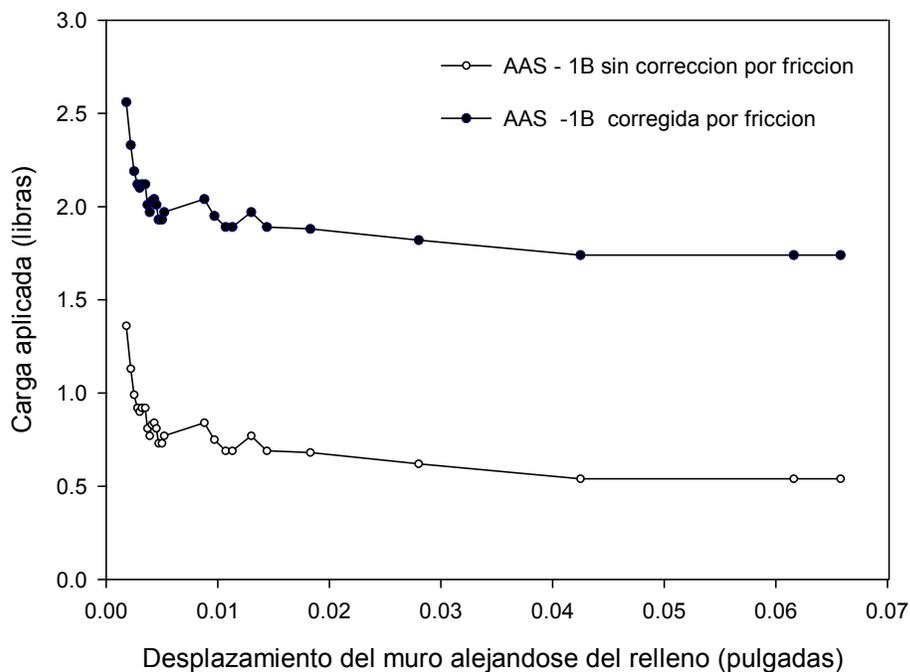


Figura 6- 11 fuerzas de fricción actuantes caso activo

Se puede observar en la figura que la fricción ( $Fr_1$ ) sobre el relleno es una fuerza a lo largo de las caras laterales de la cuña de falla. Para estimar el valor de esta fuerza debemos multiplicar el área de las caras laterales por el valor de fricción promedio estimado actuante en estas áreas. Esto se calcula estimando el esfuerzo normal promedio entre el relleno y las paredes laterales del tanque de plexiglás, y usando el ángulo de interfase medido para arena – plástico – plexiglás. Para la prueba AAS-1B este valor se estimó como 1 libra (ver detalles en Apéndice C). La fuerza de fricción entre el muro prototipo y la base del tanque de plexiglás ( $Fr_2$ ) se midió en un ensayo sin relleno y también inclinando el modelo. Esta fuerza se midió de 0.2 libras. La corrección total por fricción es la suma de estas dos correcciones, es decir 1.20 libras. La figura 6-12 muestra la curva de carga versus deformación corregida por fricción del sistema.



**Figura 6- 12 Resultados de carga para la prueba activa de la arena**

El coeficiente de presiones laterales activas,  $K_a$ , se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$K = \frac{2 * (F)^*}{\gamma * H^2} \quad (6-7)$$

Donde:

$K$  = Coeficiente de empuje lateral para un desplazamiento dado.

$F^*$  = La fuerza de medida (y corregida por fricción) para un desplazamiento lateral del muro dado (en libras)

$\gamma$  = Peso específico del material de relleno (en lb/in<sup>3</sup>)

$H$  = Altura del relleno (en in)

La Figura 6-13 muestra los resultados del cálculo del coeficiente lateral de presión de tierras para la arena No.2 en estado suelto. Se presenta también la curva promedio para una arena en estado suelto sugerida por el manual de muros de contención de Virginia Tech (Kim y otros, 1991). Se observa que el muro prototipo produce resultados muy similares a los reportados por referencias basadas en las teorías clásicas como Rankine (1857).

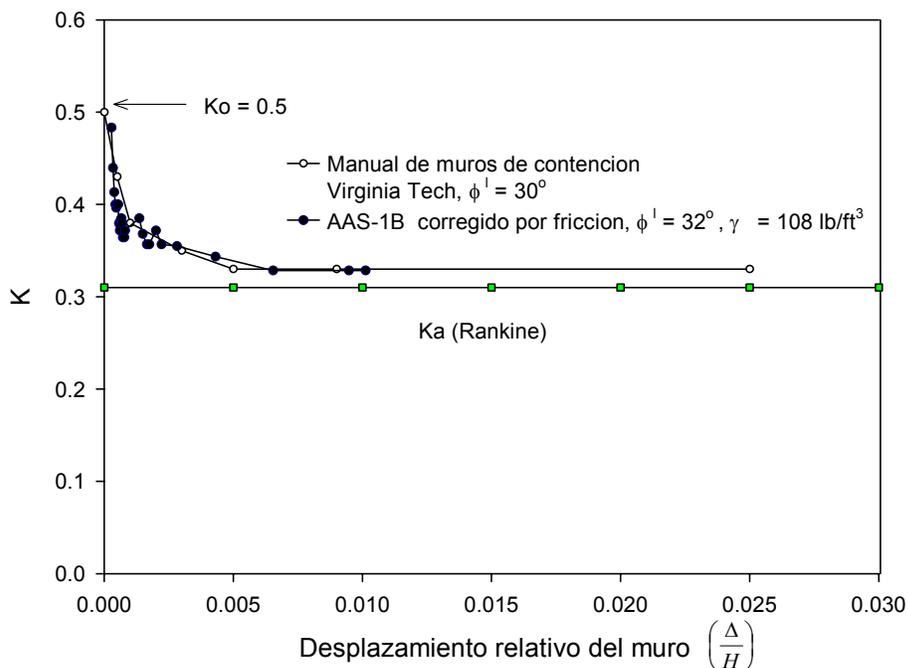


Figura 6- 13 Resultados de  $K_a$  para la arena

### 6.7.1.2 Resultados pruebas pasivas

El objetivo de estos ensayos es validar la metodología experimental basada en el muro prototipo. Las pruebas para representar el estado pasivo de la arena y la goma triturada en el modelo de plexiglás fueron realizadas aplicando carga al muro, y tomando lecturas de carga y desplazamiento del muro.

De manera similar que en el ensayo activo, en esta prueba también se realizó corrección por fricción. En este caso la fuerza medida en la celda de carga en la prueba pasiva es mayor a la fuerza resultante ( $P_p$ ) ejercida por las presiones del relleno, debido a que la fricción entre el relleno y las paredes laterales del tanque ( $Fr_1$ ) y la fricción entre el muro y la base del tanque ( $Fr_2$ ) se oponen a la carga aplicada ( $F$  medida). Esto se muestra esquemáticamente en la Figura 6-14.

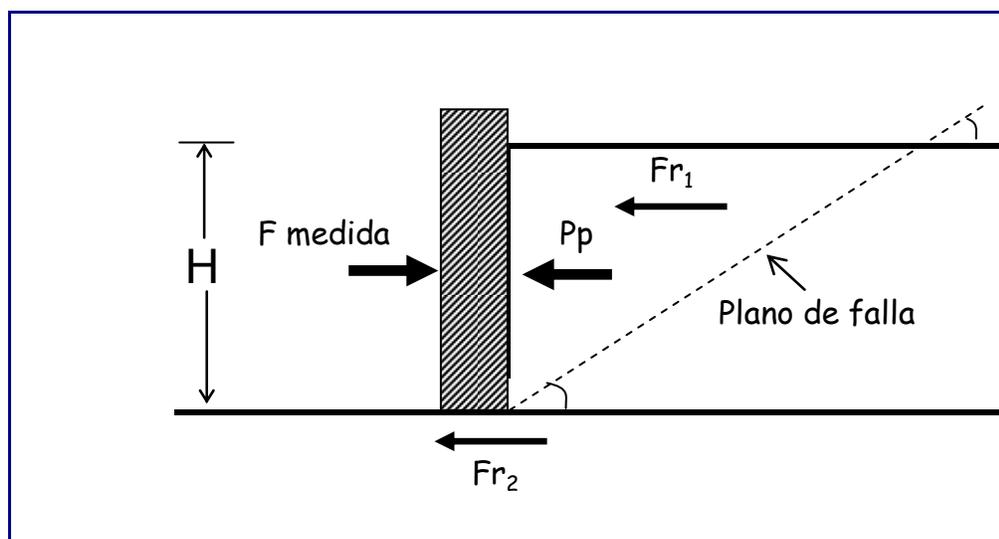


Figura 6- 14 fuerzas de fricción actuantes caso pasivo

En la Figura 6-15, se muestran los resultados de la prueba APS-1C. Para este caso, la corrección por fricción de paredes ( $Fr_1$ ) fue de 4 libras, y la fuerza de fricción a lo largo de la base del muro ( $Fr_2$ ) la cual es constante en todos los casos e igual a 0.2 libras. El valor de corrección por fricción total fue de 4.2 libras. Todos los detalles del cálculo de estas correcciones se presentan en el Apéndice C.

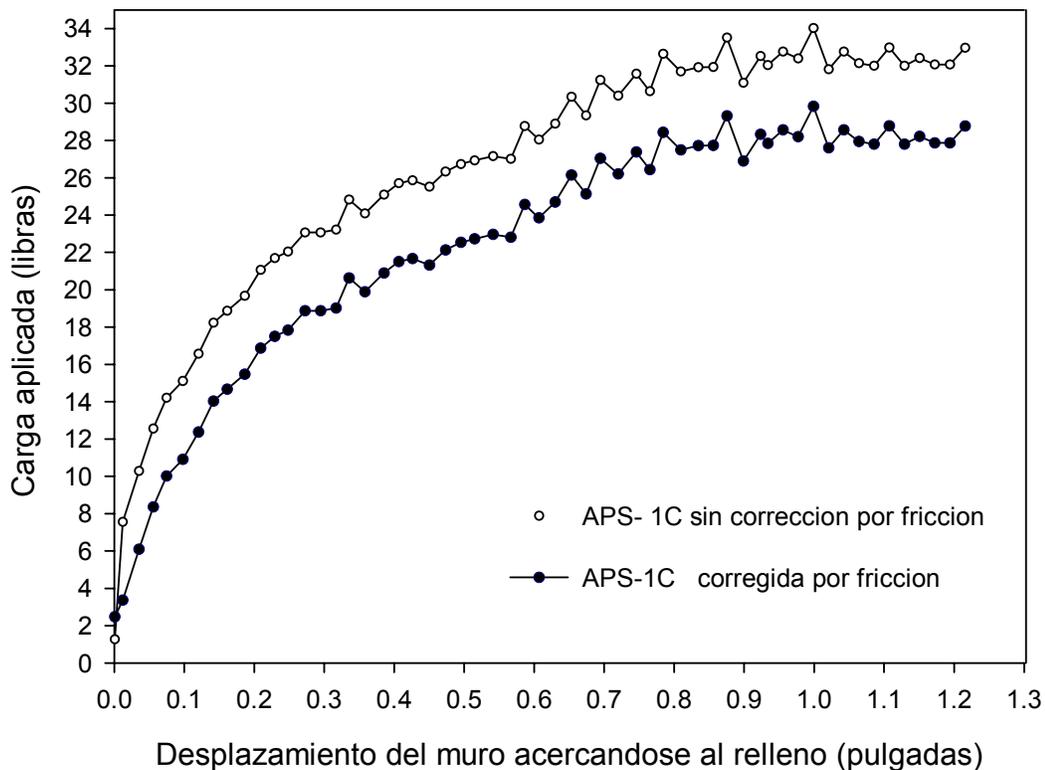


Figura 6- 15 Resultados de carga para la prueba pasiva de la arena No 2

El coeficiente pasivo de presiones laterales ( $K_p$ ) se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$k = \frac{2 * (F^*)}{\gamma * H^2} \quad (6-8)$$

Donde:

$K$  = Coeficiente de empuje lateral para un desplazamiento dado.

$F^*$  = La fuerza de medida (y corregida por fricción) para un desplazamiento lateral del muro dado (en libras)

$\gamma$  = Peso unitario del material de relleno (en  $\text{lb/in}^3$ )

$H$  = Altura del relleno (en in)

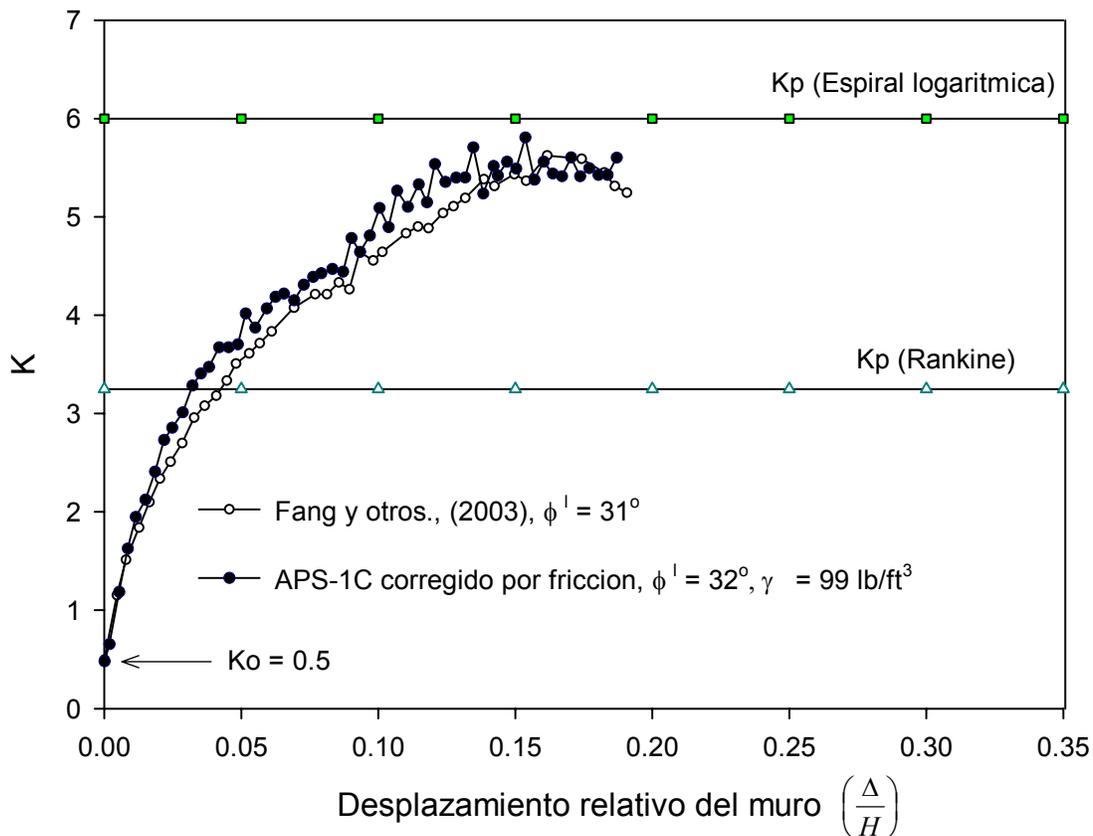


Figura 6- 16 Resultados de  $K_p$  para la arena

En las Figuras 6-13 y 6-16, se ilustraron los coeficientes de empuje lateral medidos en esta tesis y los calculados por medio de teorías como Rankine y el método de espiral logarítmica para la Arena No.2. Para el caso activo, la teoría de Rankine presentó valores muy similares de coeficiente de empuje lateral. Sin embargo para el caso Pasivo el método de espiral logarítmica fue el que presentó resultados más cercanos.

### 6.7.2 Pruebas en Goma triturada

A continuación se presentan las pruebas activas y pasivas realizadas a la goma triturada. Estas pruebas y sus cálculos fueron realizadas de manera similar que la arena.

### 6.7.2.1 Resultados pruebas activas en goma triturada

Para la goma triturada la fricción de las paredes fue de 0.13 libras. La corrección total realizada por la fricción en este caso fue de 0.33 libras. Se presentan resultados en la Figura 6-17. El cálculo del coeficiente lateral de presión de tierras se realizó de acuerdo a la Ecuación 6-7 y se pueden observar los resultados en la Figura 6-18.

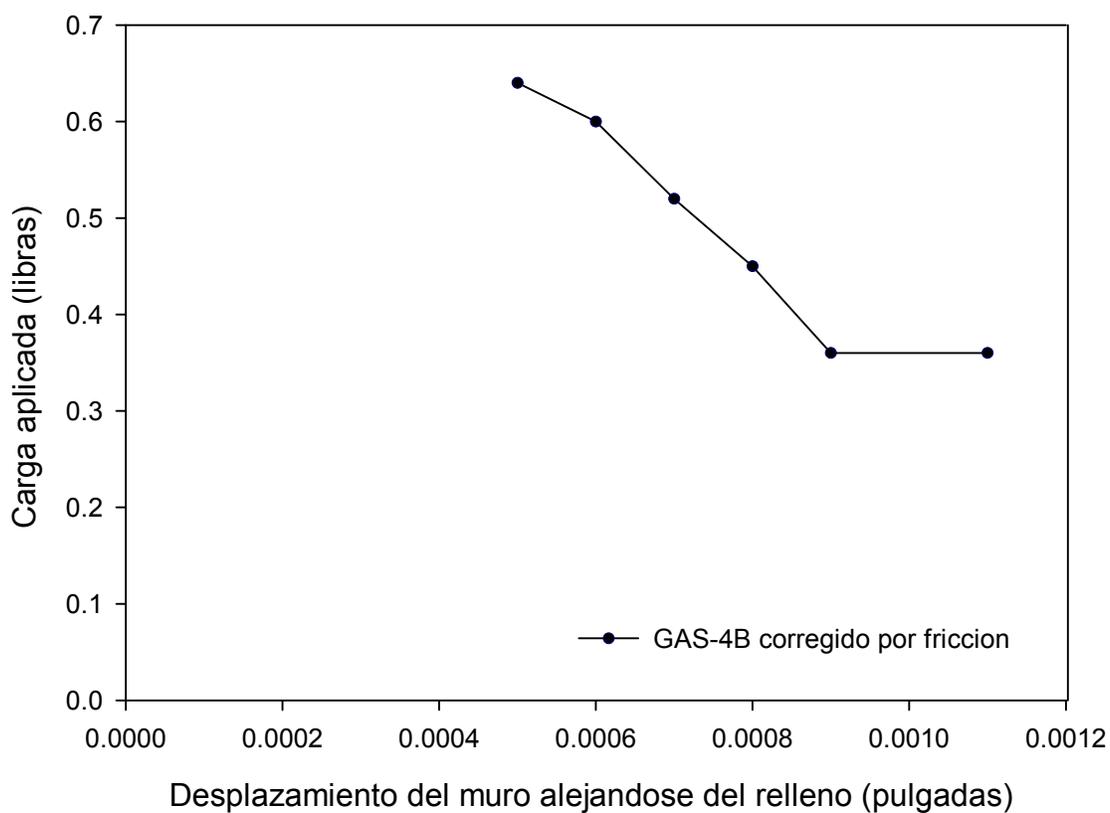
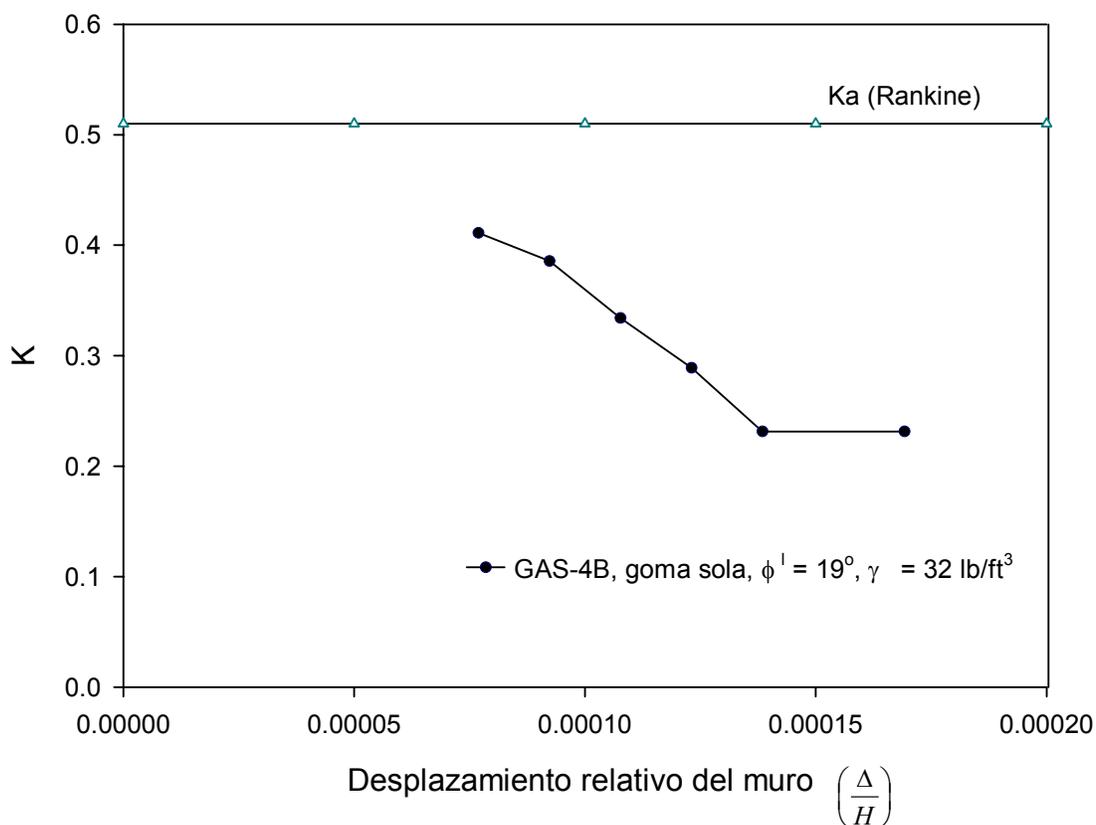


Figura 6- 17 Resultados de carga para la prueba activa de la goma triturada



**Figura 6- 18 Resultados de Ka para la goma triturada**

En la figura 6-18, se observa gran diferencia entre el valor de coeficiente lateral medido ( $K=0.231$ ) y el obtenido teóricamente por el método de Rankine ( $K= 0.51$ ).

### 6.7.2.2 Resultados pruebas pasivas en goma triturada

De igual forma que en la arena, las pruebas pasivas fueron realizadas para la goma triturada. La corrección por fricción de paredes fue de 0.69 libras y la corrección total por fricción fue de 0.89 libras. En la Figura 6-19 se muestran los resultados de aplicación de carga obtenidos para la prueba pasiva GPS-2. El cálculo del coeficiente lateral de presión de tierra se realizó de acuerdo a la Ecuación 6-8, obteniéndose los resultados de la Figura 6-20.

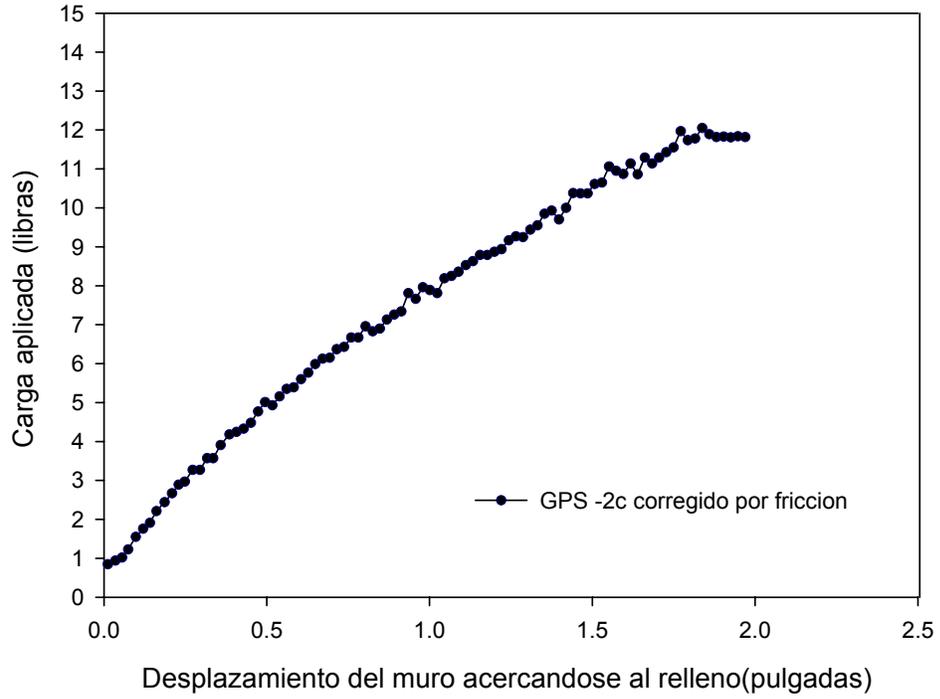


Figura 6- 19 Resultados de carga para la prueba pasiva de la goma triturada

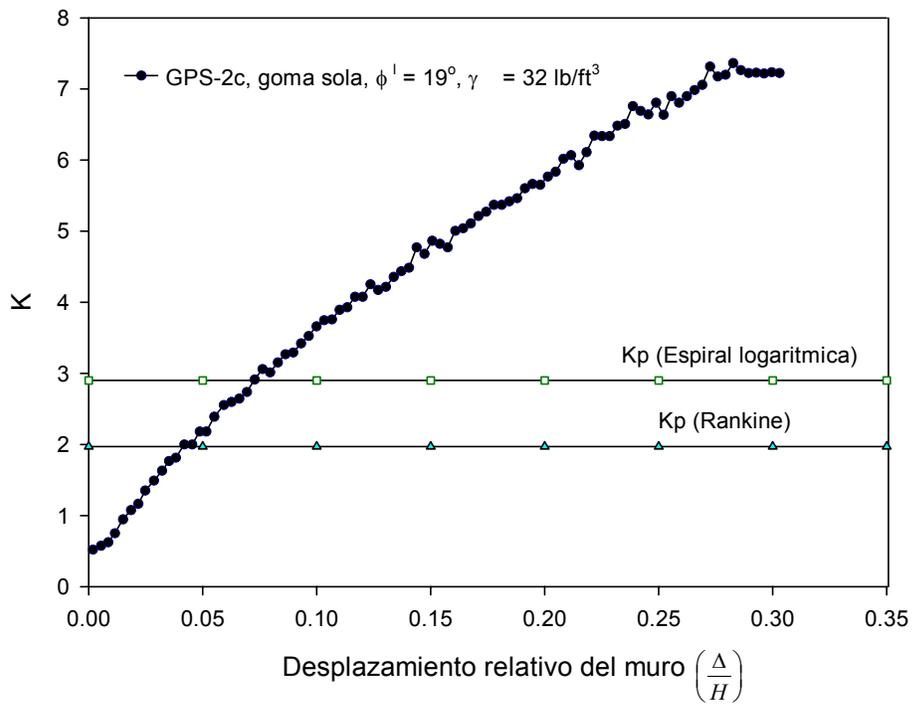


Figura 6- 20 Resultados de  $K_p$  para la goma triturada

En las pruebas realizadas a la goma triturada se obtuvieron valores de coeficiente lateral de presión de tierras ( $K = 3.75$ ) para un desplazamiento relativo del muro de 0.1 y ( $K = 4.86$ ) para desplazamiento relativo del muro de 0.15. De acuerdo con la teoría de Rankine el valor de coeficiente lateral calculado fue ( $K = 1.97$ ) y por el método de la espiral logarítmica se encontró ( $K = 2.9$ ). Ambos valores se encuentran lejos del valor experimental encontrado en esta tesis.

### *6.7.3 Pruebas en mezclas*

Con el propósito de estudiar las presiones laterales de mezclas goma triturada-arena se realizaron pruebas activas y pasivas mezclando 50% de goma triturada con 50% de arena No 2. Las proporciones fueron medidas en volumen. Los procedimientos de ensayo y cálculos fueron similares a los utilizados para la arena y goma triturada y se pueden apreciar en los Apéndices C y D.

#### **6.7.3.1 Resultados pruebas activas en mezclas**

La prueba activa presentada se identificó como MAS-1 (mezcla activa suelta). La corrección total por fricción para esta prueba activa fue de 0.74. Los resultados de esta prueba se pueden ver en la Figura 6-21 y en la Figura 6-22.

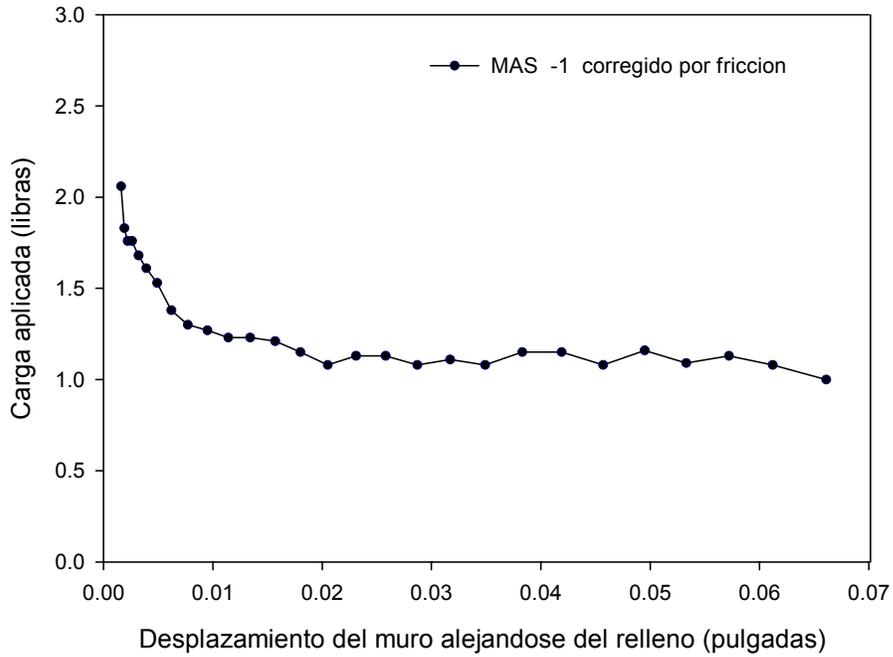


Figura 6- 21 Resultados de carga para la prueba activa de la mezcla 50% goma triturada -50% arena No 2

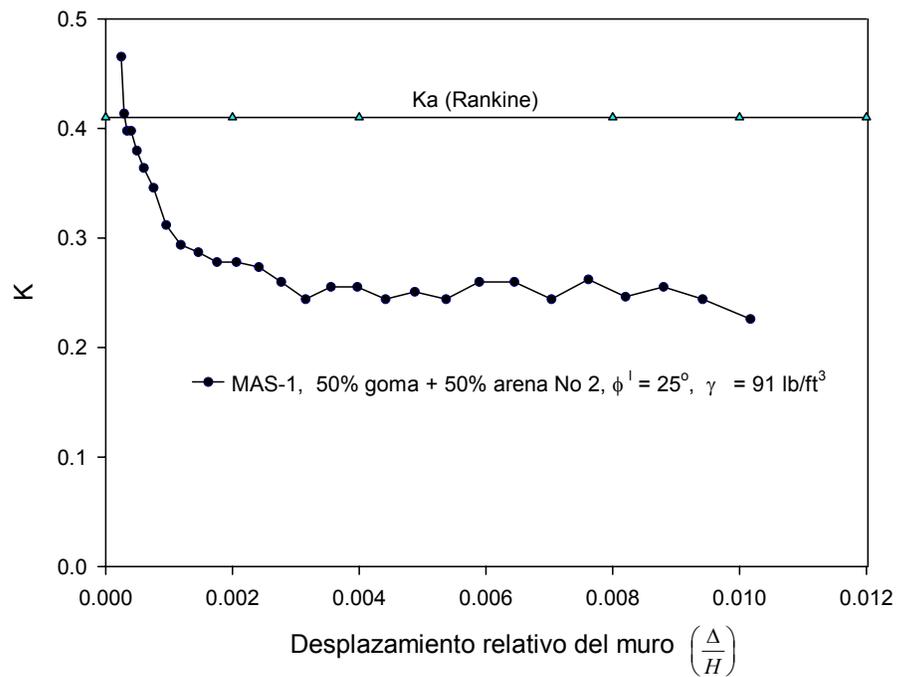
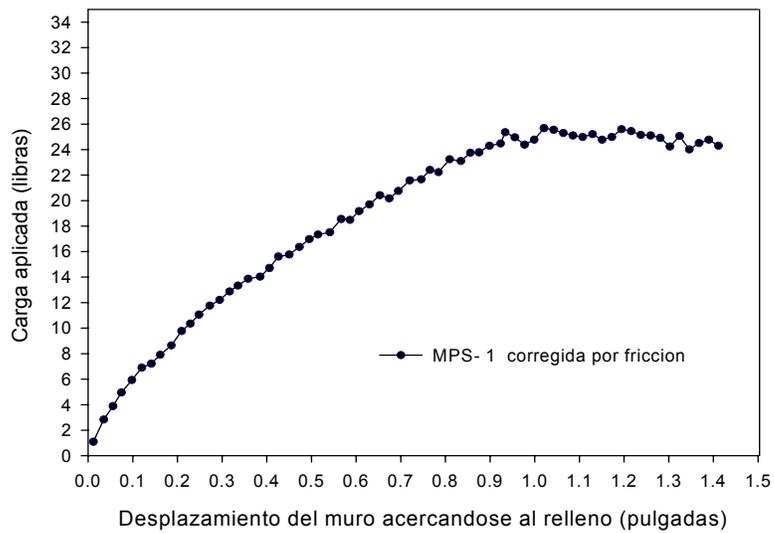


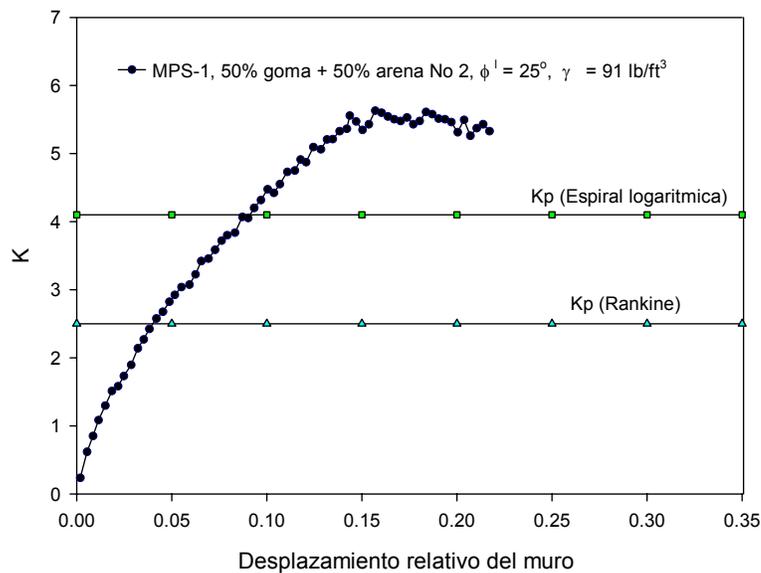
Figura 6- 22 Resultados de Ka para la mezcla 50% goma triturada -50% arena No 2

### 6.7.3.2 Resultados pruebas pasivas en mezclas

La prueba pasiva de la mezcla goma-arena, se identifico como MPS-1. La corrección por fricción total de este caso fue de 2.39 libras. Los resultados se presentan en la Figura 6-23 y 6-24.



**Figura 6- 23 Resultados de carga para la prueba pasiva de la mezcla 50% goma triturada -50% arena No 2**



**Figura 6- 24 Resultados de Kp para la mezcla 50% goma triturada -50% arena No 2**

En la Figura 6-24 se presentaron resultados de coeficiente lateral en pruebas pasivas para mezclas realizadas con 50% goma y 50% arena. Nótese que el método de espiral logarítmica es el que presenta los resultados más cercanos a los resultados obtenidos en esta tesis (MPS-1).

## 6.8 Discusión de resultados

Con el fin de comparar resultados de ensayos realizados a la arena, a la goma triturada, y a mezclas de estos dos materiales se graficó dentro de la misma figura el comportamiento de estos materiales. En la Figura 6-25, se observan los ensayos AAS-1B (arena en estado activo, suelta), GAS-4B (goma, en estado activo, suelta) y MAS-1 (mezcla de goma-arena en estado suelto). De esta grafica se obtuvo un valor de  $K_a$  para la arena de 0.32 y para la goma triturada de 0.23. También se presenta el ensayo realizado para la mezcla de 50% arena-50% goma, en el cual se obtuvo un valor de  $K_a = 0.28$  para un valor de desplazamiento/ altura del muro de 0.002.

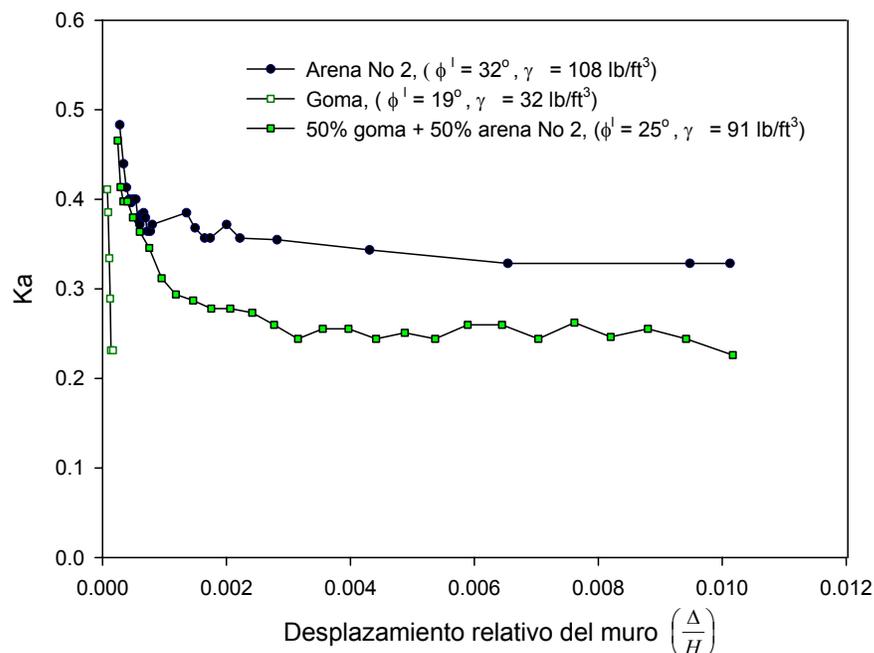
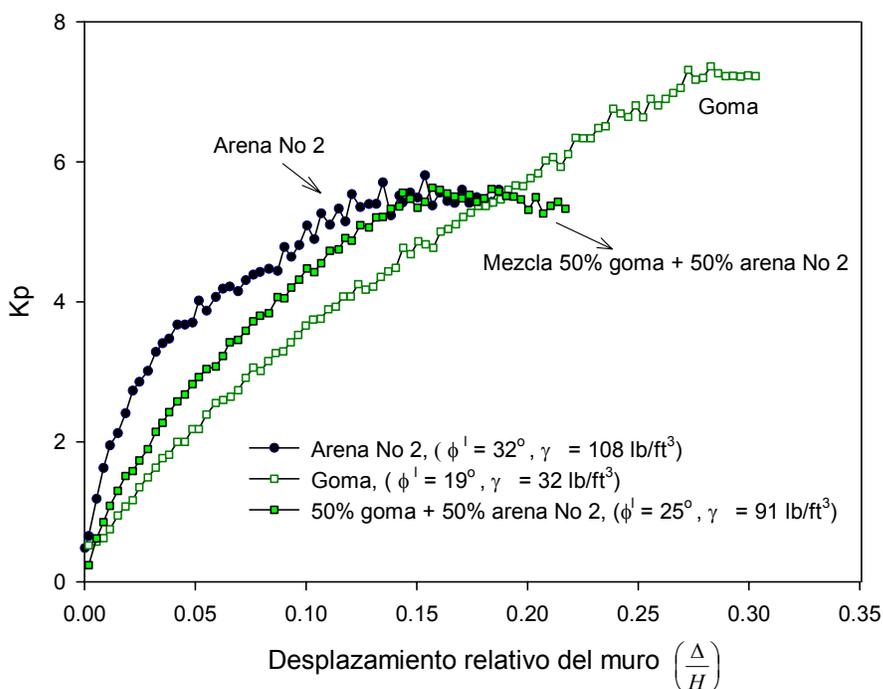


Figura 6- 25 Resultados de  $K_a$  para la arena, goma triturada y mezcla goma-arena, estado suelto

En la Figura 6-26, se obtuvieron valores del coeficiente lateral de presiones en condiciones pasivas ( $K_p$ ), para la arena se obtuvo un valor de 5.4, este valor es el que corresponde a un desplazamiento del muro/ altura del muro ( $\Delta h/H$ ) de 0.15 y para la goma triturada se obtuvo un valor de 7.2 para un  $\Delta h/H$  de 0.3. El resultado obtenido para la mezcla arena-goma fue de  $K_p = 5.5$  para un  $\Delta h/H$  de 0.1637.



**Figura 6- 26 Resultados de  $K_p$  para la arena, la goma triturada y mezcla de arena-goma, estado suelto**

En términos generales se observa que la gráfica de la goma triturada presenta un comportamiento lineal, y la gráfica de la arena un comportamiento curvo.

## 6.9 Resumen y conclusiones

Para la arena y goma triturada el tipo de falla observado en el caso pasivo, fue similar a una espiral logarítmica como se observa en las Figuras D-1 y D-4. Para las pruebas activas, el tipo de falla observado fue similar a la falla propuesta en la teoría de Rankine.

En las Tablas 6-4 a la 6-6 se documenta el resumen con todas las características de los ensayos para el estado activo y pasivo.

**Tabla 6- 4 Resumen de resultados definitivos de pruebas con arena No 2**

Caso	Ensayo	Peso unitario (lb/ft <sup>3</sup> )	Ka	Kp	Δ / H
Activo	AAS-1B	108	0.32		0.019
Pasivo	APS-1c	99		5.1	0.10
				5.4	0.15

APS = Prueba para arena, estado pasivo, condición suelta

AAS = Prueba para arena, estado activo, condición suelta

**Tabla 6- 5 Resumen de resultados definitivos de pruebas con goma triturada**

Caso	Ensayo	Peso unitario (lb/ft <sup>3</sup> )	Ka	Kp	Δ / H
Activo	GAS-4B	32	0.231		0.0004
Pasivo	GPS-2c	32		3.8	0.10
				4.9	0.15
				7.2	0.30

GPS = Prueba para goma, estado pasivo, condición suelta

GAS = Prueba para goma, estado activo, condición suelta

**Tabla 6- 6 Resumen de resultados definitivos de pruebas con mezcla 50% arena-50% goma triturada**

Caso	Ensayo	Peso unitario (lb/ft <sup>3</sup> )	Ka	Kp	Δ / H
Activo	MAS-1	91	0.28		0.002
Pasivo	MPS-1	91		4.5	0.1
				5.4	0.15
				5.5	0.16

MAS = Prueba para mezcla goma-arena, estado activo, condición suelta

MPS = Prueba para mezcla goma-arena, estado pasivo, condición suelta

En las Tablas 6-7, 6-8 y 6-9 se presenta comparación de los resultados de esta tesis con teorías clásicas de empuje de tierras como Rankine y el método de espiral logarítmica. Para la goma triturada y mezcla de arena-goma, los valores obtenidos de coeficientes laterales difieren de los encontrados por medio de las teorías clásicas de empuje de tierras. Sin embargo el método de espiral logarítmica fue el que presentó valores más cercanos a los resultados obtenidos en los ensayos de esta tesis.

**Tabla 6- 7 Comparación de resultados con teoría clásicas, Arena No 2,  $\Phi^\circ= 32$**

Caso	Valor Medido	Valor Teórico	Teoría
Activo	0.32	0.31	Rankine
Pasivo	5.4	3.3	Rankine
		6	Espiral logarítmica

**Tabla 6- 8 Comparación de resultados con teoría de clásicas, goma triturada,  $\Phi^\circ= 19$**

Caso	Valor Medido	Valor Teórico	Teoría
Activo	0.231	0.51	Rankine
Pasivo	5	1.97	Rankine
		2.9	Espiral logarítmica

**Tabla 6- 9 Comparación de resultados con teoría de clásicas, Mezcla goma-arena No. 2,  $\Phi^{\circ}= 25$** 

<b>Caso</b>	<b>Valor Medido</b>	<b>Valor Teórico</b>	<b>Teoría</b>
Activo	0.28	0.41	Rankine
Pasivo	5.4	2.5	Rankine
		4.1	Espiral logarítmica

# **CAPITULO 7. EVALUACIÓN TÉCNICA Y ECONÓMICA DE UN MURO HIPOTÉTICO PARA UN RELLENO DE GOMA TRITURADA**

## **7.1 Introducción**

En este capítulo se plantea la posibilidad de utilizar goma triturada en rellenos para muros de retención, mediante el diseño estructural y geotécnico de tres alternativas de muros. La primera alternativa consiste en una estructura que se encuentra en un suelo granular regular (la arena denominada en esta tesis No 2), en la segunda alternativa se utiliza un material de goma triturada como relleno detrás de la estructura de retención y la tercera alternativa consiste en un relleno conformado por mezcla de 50% goma y 50% arena. El análisis se realizó con base en las presiones laterales de la arena, la goma triturada, y la mezcla goma-arena, obtenidas en el Capítulo 6, mediante un modelo a escala de un muro elaborado en plexiglás. En la parte final se exponen las cantidades de materiales que consume cada una de las alternativas analizadas.

## **7.2 Materiales estructurales y especificaciones**

El propósito de este diseño es obtener los requisitos estructurales que debería tener un muro de contención utilizado para contener un relleno tradicional y compararlos con los requisitos estructurales de un muro utilizado para contener un relleno de goma triturada, también se evaluó la posibilidad de utilizar un relleno con mezcla 50% goma- 50% arena, con el fin de observar la viabilidad técnica de la goma triturada para ser utilizada en estas aplicaciones.

Las especificaciones utilizadas para los materiales empleados en el presente diseño estructural se describen a continuación, se utilizó acero de refuerzo corrugado No. 4 y resistencia  $f_y = 60$  ksi. Los valores de resistencia a la compresión del concreto fue de  $f'_c = 3000$  psi.

El presente diseño fue realizado mediante análisis con fuerzas estáticas actuantes en el muro, ocasionadas por el material de relleno. En el presente diseño no se realizó análisis sísmico debido a que las teorías convencionales usadas para el cálculo de las fuerzas sísmicas no se cumplen en el caso de la goma triturada. En el Apéndice E se puede observar en detalle el procedimiento seguido para el cálculo estructural.

El diseño estructural se realizó de acuerdo a los requerimientos del código ACI, “Standard Building Code Requirements for Reinforcement Concrete” (ACI 318-89).

### **7.3 Esquema del diseño de muro para el material granular convencional.**

El presente diseño se realizó para un muro de contención hipotético con altura de 10 pies y cuya geometría se observa en la Figura 7-1. Para el suelo de relleno se escogió una arena uniforme (denominada arena No 2), las propiedades de este material son, peso unitario de  $98.5 \text{ lb/ft}^3$ , coeficiente de presión activa ( $k_a$ ) de 0.321 y coeficiente de presión pasiva ( $k_p$ ) de 5.40.

En la Figura 7-1 se puede observar el resultado del diseño del muro de contención para un relleno granular convencional, se observa la cantidad de refuerzo requerido para las cargas actuantes en el muro, se incluye el espesor del muro, la longitud y el espaciamiento del refuerzo.

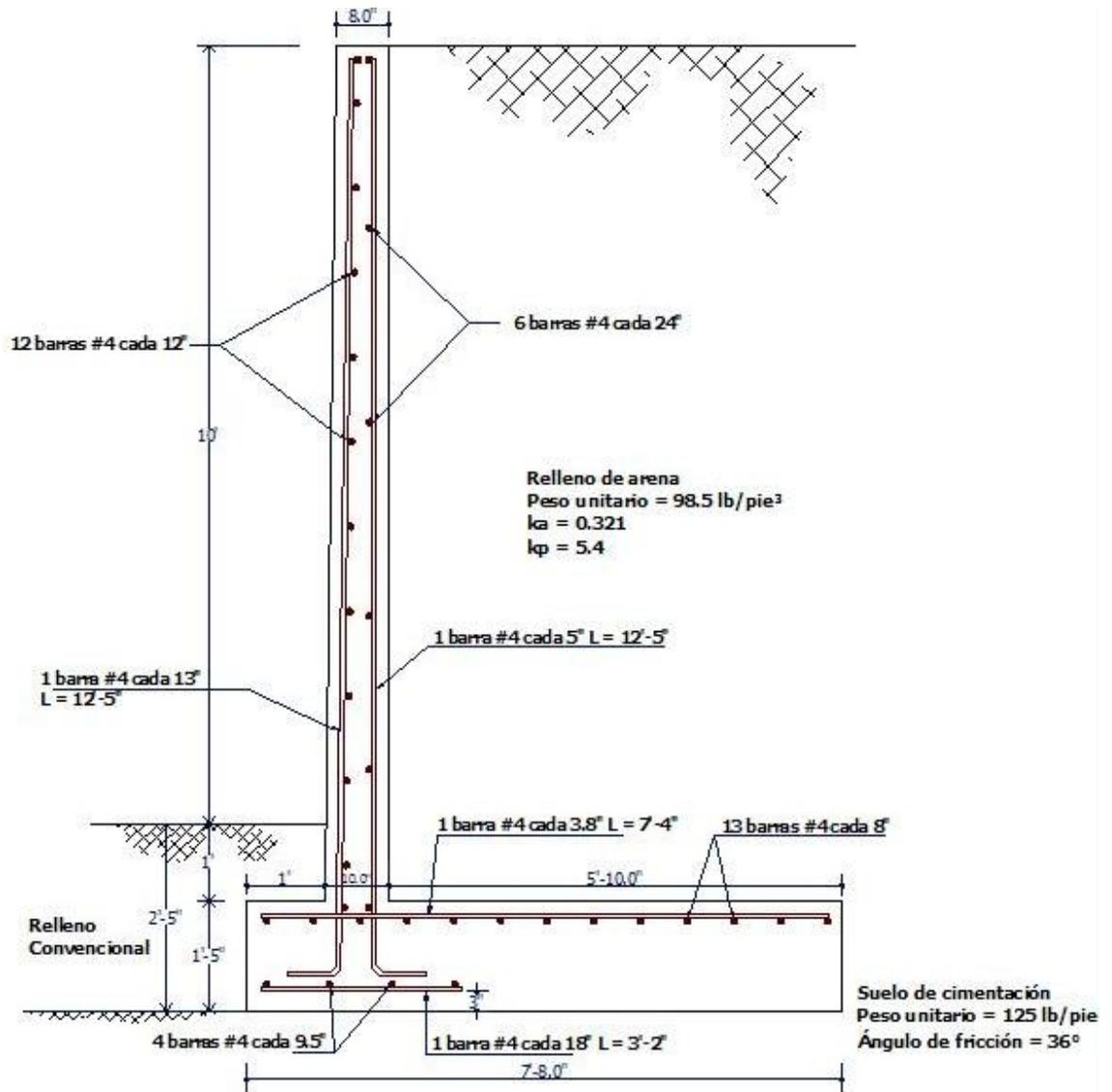


Figura 7- 1 Diseño estructural del muro de contención con relleno granular

## 7.4 Esquema de diseño de muro para la goma triturada

La posibilidad de utilizar goma triturada en rellenos detrás de muros de contención, se considero debido a los resultados obtenidos del capítulo 6, en el cual se encontraron esfuerzos laterales menores para la goma triturada, en comparación con la arena, lo cual sugiere menores requerimientos estructurales del muro utilizado para contener el relleno de goma triturada.

La geometría y el resultado del diseño estructural del muro de contención para el relleno de goma triturada es mostrado en la Figura 7-2, las propiedades empleadas en el diseño estructural fueron, peso unitario de  $30 \text{ lb/ft}^3$ , coeficiente de presión activa ( $k_a$ ) de 0.231 y coeficiente de presión pasiva ( $k_p$ ) de 5.0.

Comparando el muro con relleno granular, versus el muro con relleno de goma triturada, se observa una disminución en el ancho de la base del muro y disminución en el acero de refuerzo.

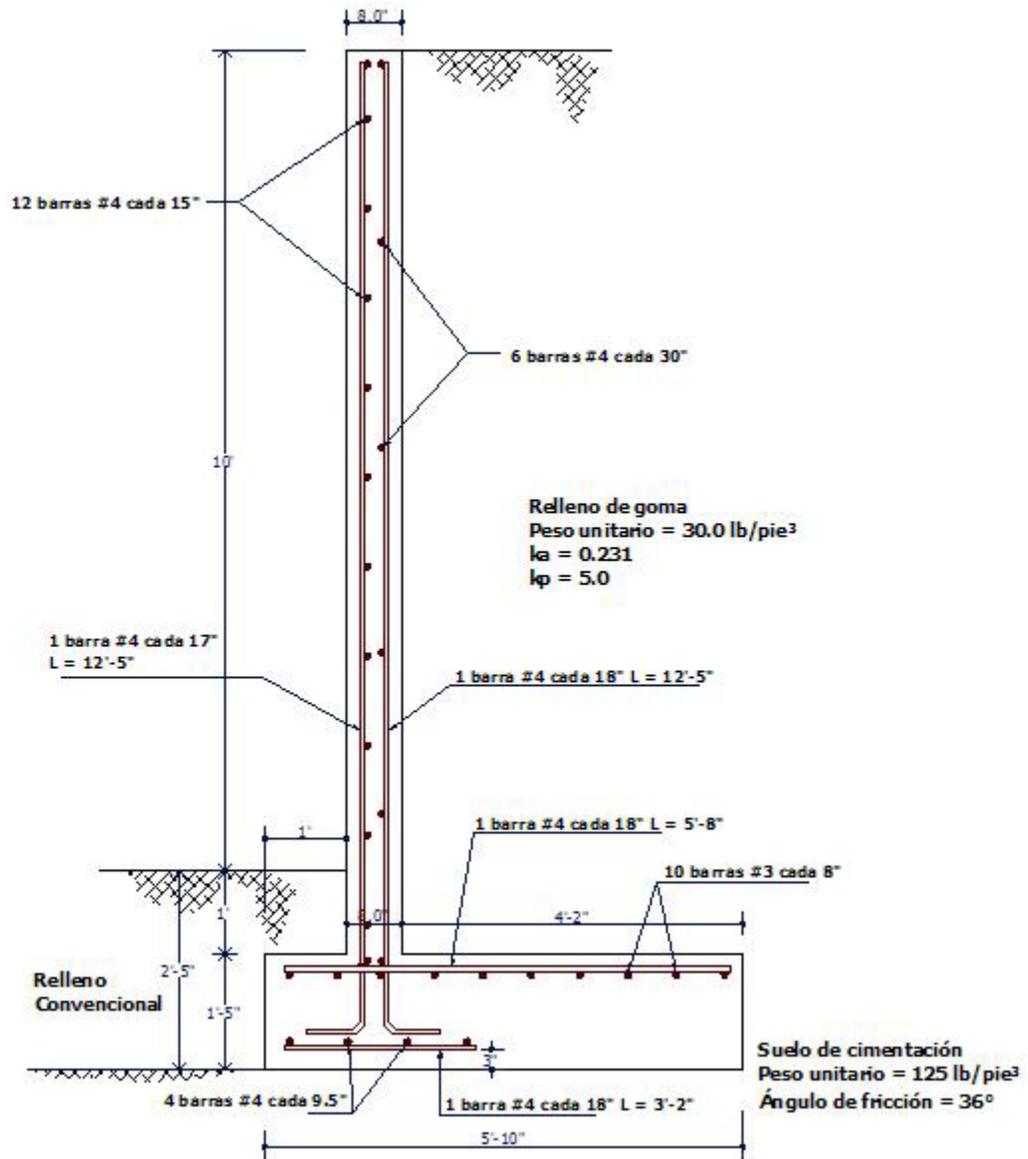


Figura 7- 2 Diseño estructural del muro de contención con relleno de goma triturada



El diseño de muro de contención para la mezcla 50% goma-50% arena No 2 se realizó con las presiones laterales obtenidas en el Capítulo 6. El peso unitario del relleno fue de  $90.5 \text{ lb/ft}^3$ , el coeficiente de presión activa ( $k_a$ ) de 0.28 y el coeficiente de presión pasiva ( $k_p$ ) de 5.35. Como resultado de este análisis se obtuvo una geometría similar al muro de contención para el relleno de arena, mostrando algunas diferencias en cuanto al acero de refuerzo.

## 7.6 Diseño geotécnico

El análisis geotécnico consistió en realizar un estudio de estabilidad a las propuestas de muro de contención consideradas anteriormente. El estudio de estabilidad de los muros consistió en el cálculo de los factores de seguridad al deslizamiento y vuelco, de acuerdo a los parámetros convencionales de diseño de muros. El factor de seguridad al deslizamiento se determinó como la relación entre las fuerzas resistentes divididas sobre las fuerzas actuantes en el muro. El factor de seguridad al vuelco se determinó como la relación entre la suma de los momentos resistentes dividida sobre la suma de los momentos actuantes en el muro. A continuación se describen otras características del diseño.

La capacidad de carga del suelo de fundación se calculó mediante la Ecuación 7-1 formulada por Terzaghi (1943). El suelo de fundación corresponde a una arena con peso unitario de  $98.5 \text{ lb/ft}^3$ , y ángulo de fricción ( $\phi$ ) de 36, con este último se calcularon los factores de capacidad de carga que corresponden a  $N_q = 47.16$  y  $N_\gamma = 52$ .

$$q_{ult} = \sigma'_D * N_q + 0.40 * \gamma' * B * N_\gamma \quad (7-1)$$

Solucionando la Ecuación 7-1 se obtiene la capacidad de carga en función del ancho de la zapata (B).

$$q_{ult} = 9291 + 2049 * B \quad (7-2)$$

Para un ancho de zapata promedio  $B= 3.5$  y un factor de seguridad = 3, se obtuvo un capacidad admisible del suelo de fundación de 5488 psf (27 ton/m<sup>2</sup>).

Para los rellenos, los valores de pesos unitarios, coeficientes activos y pasivos fueron obtenidos directamente de resultados experimentales del Capítulo 6. Para el muro de contención con relleno de arena, se utilizaron: peso unitario de 98.5 lb/ft<sup>3</sup>,  $k_a=0.321$  y  $k_p=5.40$ . Para el relleno de goma triturada los valores fueron, peso unitario de 30 lb/ft<sup>3</sup>,  $k_a=0.231$  y  $k_p=5.0$ . Para el relleno con mezcla 50% goma- 50% arena, el peso unitario fue de 90.5 lb/ft<sup>3</sup>, el coeficiente de presión activa ( $k_a$ ) de 0.28 y el coeficiente de presión pasiva ( $k_p$ ) de 5.35. Con estos coeficientes se obtuvieron las presiones laterales activas ( $P_a$ ) y pasivas ( $P_p$ ) para una altura del muro de 10 pies, despejando  $P_a$  y  $P_p$  de las Ecuaciones 6-3 y 6-4.

Como resultado del análisis de estabilidad se obtuvieron los factores de seguridad al deslizamiento y al volcamiento los cuales se presentan en la Tabla 7-1. Estos factores de seguridad deben ser mayores o iguales a 1.5, lo cual se cumple para este diseño.

**Tabla 7- 1 Análisis de estabilidad**

<b>Factor de seguridad del muro</b>	<b>Con relleno de Arena</b>	<b>Con relleno de Goma triturada</b>	<b>Con relleno de 50% Goma triturada-50% arena</b>
Deslizamiento	1.89	2.04	1.82
Volcamiento	4.47	4.94	4.95

Los resultados del análisis de estabilidad muestran, en el caso de deslizamiento y volcamiento un mayor grado de seguridad para el muro en el cual se utilizó goma

triturada, a pesar que cuenta con menores dimensiones. Para el relleno de arena y de mezcla 50% goma- 50% arena los valores permanecen muy similares.

## 7.7 Cantidades de material

En esta sección se realizó el cómputo de las cantidades de material de las alternativas de muro propuestas. Estas cantidades fueron calculadas para un ancho de muro de 1 pie lineal, los resultados se pueden ver en las Tablas 7-2, 7-3 y 7-4. En las tablas se observa una disminución en el volumen de concreto y en la cantidad de refuerzo al utilizar como relleno goma triturada detrás del muro de contención. Para el relleno con mezcla 50% goma- 50% arena el volumen de concreto permanece igual y la cantidad de refuerzo disminuye respecto al muro en que se utilizó relleno granular.

**Tabla 7- 2 Cantidades de material para el muro con relleno granular**

Diámetro (in)	Cantidad (varillas)	Longitud (ft)	Peso unitario (lb/ft)	Peso total (lb)	Concreto (ft <sup>3</sup> )	Densidad (lb/ft <sup>3</sup> )
4/8	3.1	12.41	0.67	25.72	52.29	1.71
4/8	6.5	1	0.67	4.35		
4/8	4.2	7.34	0.67	20.61		
4/8	13	1	0.67	8.69		
4/8	1.7	3.34	0.67	3.8		
4/8	4	1	0.67	2.67		
4/8	1.9	12.41	0.67	15.76		
4/8	12	1	0.67	8.02		

**Tabla 7- 3 Cantidades de material para el muro con relleno con goma triturada**

<b>Diámetro (in)</b>	<b>Cantidad (varillas)</b>	<b>Longitud (ft)</b>	<b>Peso unitario (lb/ft)</b>	<b>Peso total (lb)</b>	<b>Concreto (ft<sup>3</sup>)</b>	<b>Densidad (lb/ft<sup>3</sup>)</b>
4/8	1.7	12.41	0.67	14.1	43.91	1.36
4/8	5.9	1	0.67	3.94		
4/8	1.7	5.68	0.67	6.46		
4/8	10	1	0.67	6.69		
4/8	1.7	3.17	0.67	3.6		
4/8	4	1	0.67	2.67		
4/8	1.7	12.41	0.67	14.1		
4/8	12	1	0.67	8.02		

**Tabla 7- 4 Cantidades de material para el muro con relleno con 50% goma triturada-50% arena No 2**

<b>Diámetro (in)</b>	<b>Cantidad (varillas)</b>	<b>Longitud (ft)</b>	<b>Peso unitario (lb/ft)</b>	<b>Peso total (lb)</b>	<b>Concreto (ft<sup>3</sup>)</b>	<b>Densidad (lb/ft<sup>3</sup>)</b>
4/8	2.7	12.41	0.67	22.4	52.29	1.62
4/8	6.5	1	0.67	4.35		
4/8	3.9	7.34	0.67	19.14		
4/8	13	1	0.67	8.69		
4/8	1.7	3.34	0.67	3.8		
4/8	4	1	0.67	2.67		
4/8	1.9	12.41	0.67	15.76		
4/8	12	1	0.67	8.02		

## 7.8 Conclusiones

En este capítulo se evaluaron tres alternativas de rellenos para muros de contención, para esto se diseñaron estructuras de retención variando el relleno, de este análisis se obtuvieron las siguientes conclusiones.

Se observó que hay gran variación en el diseño estructural en aspectos como el acero de refuerzo y dimensiones del muro de retención cuando se sustituye el relleno de arena uniforme por un relleno de goma triturada.

El acero de refuerzo y las dimensiones del muro obtenidas del diseño estructural para el relleno con mezcla 50% goma- 50% arena fueron muy similares que las obtenidas para el relleno con arena.

El factor de seguridad del muro al deslizamiento aumentó de 1.89 a 2.04 y volcamiento aumentó de 4.47 a 4.94 cuando se utilizó goma triturada en lugar de relleno tradicional. En el muro de contención con relleno de mezcla 50% goma- 50% arena el factor de seguridad al deslizamiento obtenido fue de 1.82 y el factor de seguridad al vuelco fue de 4.95, valores muy similares a los obtenidos para el muro con relleno tradicional.

Se observó una disminución en el consumo de materiales en el muro en el cual se utilizó como relleno goma triturada, con respecto al muro con relleno granular. La disminución en el volumen de concreto fue de 52.3 pies<sup>3</sup> (relleno de arena) a 43.9 pies<sup>3</sup> (relleno de goma), es decir disminuyó 16%. La disminución en el peso de acero requerido fue de 89.6 libras (relleno de arena) a 59.6 libras (relleno de goma), equivalente a un 34%.

En el caso del diseño para el muro de contención en el cual se propuso la mezcla de 50% goma- 50% arena, no se observó una variación significativa en el consumo de materiales con respecto al material granular. El volumen de concreto requerido para los

dos materiales fue el mismo 52.3 pies<sup>3</sup>. La disminución en el peso de acero requerido fue de 89.6 libras (relleno de arena) a 59.6 libras (relleno de goma), equivalente a 5.3 %.

# **CAPITULO 8. RESUMEN, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS**

## **8.1 Resumen**

En esta tesis se investigó la viabilidad técnica de utilizar neumático triturado como material de relleno en muros de contención, mediante el análisis de la compresibilidad en una dimensión y el estudio de la resistencia pasiva y activa de este material.

Para la investigación experimental se emplearon tres materiales, dos tipos de arena y un tipo de goma triturada de clasificación crumb rubber (miga de goma). El análisis de compresibilidad consistió en realizar dos tipos de ensayos. El primero (denominado compresibilidad a corto plazo) se realizó aumentando la carga axial a la muestra hasta determinado % de deformación. El segundo tipo de ensayo (denominado compresibilidad a largo plazo) se realizó colocando una carga axial constante a la muestra durante 33 días aproximadamente.

También se realizó un estudio de la resistencia pasiva y activa de la goma triturada mediante la construcción de un pequeño modelo de muro de contención en plexiglás, en el cual se midió la carga aplicada en el muro y la deformación en la dirección del muro. Con los resultados experimentales de coeficientes de presiones laterales del modelo se realizó un diseño estructural de un muro de contención con dos alternativas de relleno como son la goma triturada y arena uniforme.

## 8.2 Conclusiones

Las pruebas de compresibilidad en una dimensión a corto plazo fueron realizadas a muestras de goma, arena y mezclas de estos dos materiales, las cuales se encontraban inicialmente en estado suelto. En estas pruebas se observó, que el contenido de goma en la mezcla aumentó la compresibilidad. Las muestras con contenido de goma altos (100%, 75% y 50%) alcanzaron grandes deformaciones unitarias llegando hasta el 30%. La disminución en el contenido de goma a 25% y 0% disminuyó las deformaciones unitarias máximas alcanzadas a 15% y 6% respectivamente.

En las pruebas de compresibilidad en una dimensión a corto plazo, también se obtuvieron valores de módulos de confinamiento (D), cuyos resultados fueron mayores en la arena y disminuyeron a medida que se fue agregando goma triturada. La velocidad en la aplicación de la carga axial ocasionó un ligero cambio en el módulo de confinamiento (D). Para el caso de 100% arena y 100 % de goma, el módulo de confinamiento disminuyó cuando se aumentó la velocidad del ensayo, en el caso de 75%, 50% y 25% sucedió lo contrario. Para la arena el comportamiento de las dos curvas del módulo (D) con diferentes velocidades fue muy similar.

En el ensayo de compresibilidad a largo plazo realizado a la goma triturada, con el fin de verificar el comportamiento de este material con el cambio de temperatura, se observó que al aumentar la temperatura interior en la muestra de 23 ° C a 40.3 ° C, la pendiente de la línea del tramo de creep secundario creció de  $3.36 \cdot 10^{-7}$  a  $4.65 \cdot 10^{-7}$  pulgadas/minuto, este cambio no se considera significativo.

Con base en los ensayos de compresibilidad en una dimensión a largo plazo realizados en esta tesis se concluye lo siguiente. El aumento en el esfuerzo axial aplicado a las muestras, aumenta la compresibilidad en una dimensión, obteniéndose valores de

deformación unitaria axial para la muestra con 100% de goma desde 13.5% para un esfuerzo axial de 25 kPa, hasta 32.4% para un esfuerzo axial de 200 kPa. En lo que se refiere a las mezclas, para la arena No 1, los valores de deformación unitaria axial para la muestra con 75% de goma van desde 10.9% para un esfuerzo axial de 25 kPa, hasta 25.8% para un esfuerzo axial de 200 kPa. Para la arena No 2, los valores de deformación unitaria axial para la muestra con 75% de goma van desde 10.23% para un esfuerzo axial de 25 kPa, hasta 23.1% para un esfuerzo axial de 200 kPa.

En los ensayos de compresibilidad en una dimensión a largo plazo, también se pudo observar que, el aumento en el contenido de goma en la muestra, aumento la deformación unitaria axial. Para las muestras con 100% de goma, 100% arena No 1 y 100% arena No 2, los valores de deformación unitaria obtenidos fueron de 13.5%, 0.4% y 0.14% respectivamente, esto se presentó en la muestra con un esfuerzo axial de 25 kPa. En términos generales las deformaciones unitarias axiales de la arena No 2 y de las mezclas de esta arena con goma triturada, fueron menores que las obtenidas para la arena No 1 y respectivas mezclas. En resumen en los experimentos de compresibilidad a largo plazo se observó que el esfuerzo aplicado, el contenido de arena, y el tipo de arena influyeron en la deformación unitaria axial de las muestras ensayadas.

Se presentaron regresiones experimentales obtenidas de la ley de Norton, para describir la deformación unitaria axial del material ante la aplicación de un esfuerzo axial, para varios contenidos de goma. Las graficas obtenidas por medio de la ley de Norton muestran que a mayor esfuerzo aplicado se obtuvieron pendientes de creep ( $\dot{\epsilon}$ ) más altas. También se observa que para el contenido de goma de 100% los valores de ( $\dot{\epsilon}$ ) fueron mayores, estos disminuyeron cuando se redujo el contenido de goma en la muestra.

De la modelación física del muro de contención, en el que se utilizó como relleno la goma triturada y el material granular se obtuvieron las siguientes conclusiones. Para la arena, el valor medido del coeficiente lateral en estado activo ( $K_a$ ) fue muy similar al

calculado teóricamente por medio de la teoría de Rankine (1857). En el caso pasivo el valor medido del coeficiente lateral fue más cercano a la teoría de espiral logarítmica.

Para la goma triturada y la mezcla de arena-goma, las pruebas activas arrojaron valores muy diferentes a los calculados por la teoría tradicional de Rankine (1857). En las pruebas pasivas los valores de coeficiente lateral ( $K_p$ ) medidos en esta tesis se encontraron más cercanos a los calculados por el método de espiral logarítmica.

Para la arena y goma triturada el tipo de falla observado en el caso pasivo, fue similar a una espiral logarítmica. Para las pruebas activas, el tipo de falla observado fue similar a la falla propuesta en la teoría de Rankine (1857).

En términos generales se observa que en la grafica de coeficiente lateral de tierras pasivo Vs desplazamiento del muro, la goma triturada presenta un comportamiento lineal, y la grafica de la arena un comportamiento curvo.

Para el relleno con goma triturada el factor de seguridad del muro al deslizamiento aumentó de 8% y volcamiento aumentó de 11% cuando se utilizó goma triturada en lugar de relleno tradicional. En el muro de contención con relleno de mezcla 50% goma- 50% arena el factor de seguridad al deslizamiento obtenido fue de 1.82 y el factor de seguridad al vuelco fue de 4.95, valores muy similares a los obtenidos para el muro con relleno tradicional.

Se observó una disminución en el consumo de materiales en el muro en el cual se utilizó como relleno goma triturada, con respecto al muro con relleno granular. La disminución en el volumen de concreto fue de 52.3 pies<sup>3</sup> (relleno de arena) a 43.9 pies<sup>3</sup> (relleno de goma), es decir disminuyó 16%. La disminución en el peso de acero requerido fue de 89.6 libras (relleno de arena) a 59.6 libras (relleno de goma), equivalente a un 34%.

En el caso del diseño para el muro de contención en el cual se propuso la mezcla de 50% goma- 50% arena, no se observó una variación significativa en el consumo de materiales con respecto al material granular. El volumen de concreto requerido para los dos materiales fue el mismo 52.3 pies<sup>3</sup>. La disminución en el peso de acero requerido fue de 89.6 libras (relleno de arena) a 59.6 libras (relleno de goma), equivalente a 5.3 %.

### **8.3 Recomendaciones para futuros trabajos**

Esta investigación es un aporte a la experimentación que se ha realizado hasta el momento con el ánimo de reutilizar la goma triturada proveniente de neumáticos, se consideran importantes los siguientes temas para futuros estudios.

- Se recomienda la construcción de un modelo con mayores dimensiones para establecer comparación con los resultados de esta tesis. Las dimensiones deben ser establecidas teniendo en cuenta los requerimientos de (Fang y otros, 2003).
- Para mayor exactitud en los resultados se recomienda realizar las mediciones de carga con sensores colocados en la pared interna del muro.
- Realizar un estudio dinámico de la goma triturada, el cual no fue considerado en esta investigación.

## CAPITULO 9. REFERENCIAS

American Concrete Institute (1992), Building Code Requirements for Reinforcement Concrete (ACI 318-89) and Commentary (ACI 318R-89), Detroit, U.S.A.

ASCE. (2006). "Scrap tires – material description." pp. 1-6, Página en Internet: [www.Tfhrc.gov/hnr20/recycle/waste/st1.htm](http://www.Tfhrc.gov/hnr20/recycle/waste/st1.htm) [Página consultada 4/22/2006].

ASTM (1995). "ASTM D-4767 - Standard test method for consolidated undrained triaxial compression test." American Society for Testing and Materials.

ASTM (1998a). "ASTM D-6270 - Standard practice for use of scrap tires in civil engineering applications." American Society for Testing and Materials.

ASTM (1998b). "ASTM D-3080- Standard test method for direct shear test of soils under consolidate drained conditions." American Society for Testing and Materials.

ASTM (2000a) "ASTM D-2434 - Standard test methods for permeability of granular." American Society for Testing and Materials.

ASTM (2000b) "ASTM D-2435 - Standard test methods for one-dimensional consolidation properties of soils using incremental loading." American Society for Testing and Materials.

ASTM (2000c). "ASTM D-4253 - Standard test methods for maximum index density and unit weight of soils using a vibratory table." American Society for Testing and Materials.

ASTM (2000d). "ASTM D-4254 - Standard test methods for minimum index density and unit weight of soils and calculation of relative density." American Society for Testing and Materials.

ASTM (2002). "ASTM D-854-02 - Standard test method for specific gravity of soil solids by water pycnometer." American Society for Testing and Materials.

Ahmed, I. (1993). "Laboratory study on Properties of Rubber-soils." Joint Highway Research Project, Report No. FHWA/IN/JHRP-93/4, Purdue University, Indiana.

Ahmed, I., y Lovell, C. W. (1993). "Rubber-soils as lightweight geomaterials." *Transportation Research Record*, 1422, pp. 61-70.

Baker, T. E., Allen, T. M., Jenkins, D. V., Money, D. T., Pierce, L. M., Christie, R. A., y Weston, J. T. (2003). "Evaluation of the use of scrap tires in transportation related applications in the state of Washington." Report to the Legislature as Required by SHB 2308, Department of Transportation, Washington, pp. 1-275.

Benda, C. C. (1995). "Engineering Properties of Scrap Tires Used in Geotechnical Applications." Report 95-1, Materials and Research Division, Vermont Agency of Transportation, Montpelier, Vermont.

Boresi, A. P., y Schmidt, R. J. (2003). *Advanced mechanics of materials*. Wiley.

Bosscher, P. J., Edil, T. B., y Eldin, N. N. (1993). "Construction and performance of a shredded waste tire test embankment." *Transportation Research Record*, 1345, pp. 44-52.

Botero, J. H., Valentín, M. O., Suárez, M. O., Santos, J., Acosta, F. J., Cáceres, A., y Pando, M. A. (2005). "Gomas trituradas: estado del arte, situación actual y posibles usos como materia prima en Puerto Rico." *Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*, vol. 5, No. 1, pp. 69-86.

Cecich, V., Gonzales, L., Hoisaeter, A., Williams, J., y Reddy, K. (1996). "Use of shredded tires as lightweight backfill material for retaining structures." *Waste Management & Research*, vol. 14, pp. 433-451.

Collins, P. (1997). "Geotechnical properties of sand lightweight aggregate mixtures." *Tesis de Magíster en Ingeniería*, Departamento Ingeniería Civil, Carleton University, Ottawa, Canadá, pp. 1-117.

Coulomb, C. A. (1776). "Essai sur une application des regles de maximis et minimum a quelques problems statique relatifs a l'architecture." *Mem. Acad. Roy. des Sciences*, Paris, vol. 3, pp. 38.

Das, B. M. (1990). *Principles of Geotechnical Engineering*. Pws-Kent Publishing Company, Boston, Massachusetts, USA.

Dickson, T. H., Dwyer, D. F., y Humphrey, D. N. (2001). "Prototype tire-shred embankment construction." *Transportation Research Record 1775*, National Research Council, Transportation Research Board, Washington, D.C., pp. 160-167.

Drescher, A., Newcomb, D., y Heimdahl, T. (1999). "Deformability of Shredded tires." *Final Report 1999-13*, Department of Transportation, Minnesota, pp. 1-151.

Fang, Y., Chen, T., Holtz, R., y Lee, W. (2003). "Reduction of boundary friction in model tests." *Geotechnical Testing Journal*, vol. 27, No. 1, pp. 1-10.

Ghazavi, M. (2004). "Shear strength characteristics of sand-mixed with granular rubber." *Geotechnical and Geological Engineering*, vol. 22, No. 3, pp. 401-416.

Ghazavi, M., y Sakhi, M. A. (2005). "Influence of optimized tire shreds on shear strength parameters of sand." *International Journal of Geomechanics*, vol. 5, No. 1, pp. 58-65.

Gutiérrez, E., Cataño, J. and Pando, M.A. (2004). "Evaluation of Mechanical Properties of Puerto Rican Shredded Tires for Application of Embankment and Retaining Wall Fill", Undergraduate Research Report, Department of Civil Engineering and Surveying, University of Puerto Rico at Mayagüez, Mayagüez, Puerto Rico, May.

Hanna, A., y Khoury, I. A. (2005). "Passive earth pressure of overconsolidated cohesionless backfill." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 131, No. 8, pp. 978-986.

Hoppe, E. J., y Mullen, W. G. (2004). "Field study of a shredded-tire embankment in Virginia." Final Report VTRC 04-R20, Virginia Transportation Research Council, Charlottesville, Virginia, pp. 1-55.

Humphrey, D. N., Sandford, T. C., Cribbs, M. M., y Manion, W. P. (1993). "Shear strength and compressibility of tire chips for use as retaining wall backfill." *Transportation Research Record, No. 1422*, National Research Council, Transportation Research Board, Washington, D.C., pp. 29-35.

Humphrey, D. N., Whetten, N., Weaver, J., Recker, K., y T.A. Cosgrove (1998). "Tire shreds as lightweight fill for embankments and retaining walls." *Proceedings of the Conference on Recycled Materials in Geotechnical Applications*, New York: ASCE, pp. 51-65.

Humphrey, D. N., (1999). "Civil Engineering Application of Tire Shreds." *The Tire Industry Conference*, Hilton Head, South Carolina. pp. 1-16.

Humphrey, D. N., Whetten, N., Weaver, J., y Recker, K. (2000). "Tire shreds as lightweight fill for construction on weak marine clay." *Proceedings of the International Symposium on Coastal Geotechnical Engineering in Practice*, Balkema, Rotterdam, pp. 611-616.

Humphrey, D. N., (2004). "Civil Engineering Applications of Scrap Tires." *Heartland Scrap Tire Management Conference*, Junio 3, pp. 1-19.

Hylands, K. N., y Shulman, V. (2003). "Civil engineering applications of tires." *Viridis Report VR5*, TRL, pp. 1-92.

Jaky, J. (1948). "Pressure in soils." *Proc. 2<sup>nd</sup> Int. Conference*, Soil Mech. And Fdn. Engng., vol. 1, pp. 103-107.

Juárez, E., y Rico, A. (1996). *Teoría y Aplicaciones de la Mecánica de Suelos*. Editorial Limusa, vol. 1, Mexico, D. F.

Kim, E., y otros. (1991). "Engineering manual for retaining walls and abutments." *Virginia Tech*, NCHRP Report, pp. 24-44.

Masad, E., Taha, R., Ho, C. y Papagiannakis, T. (1996). "Engineering Properties of Tire/soil Mixtures as a Lightweight Fill Material", *Geotechnical Testing Journal*, ASTM, Vol. 19, No. 3, pp. 297-304.

Mei, G. X., y Zai, J. M. (2006). "A new formula for calculating lateral earth pressure at certain displacement." *Geoshanghai Conference*, Shanghai, China. pp. 325-331.

Rankine, W. J. M. (1857). "On the stability of loose earth." *Philosophical Trans. Of the Royal Society*, vol. 147, No. 2, pp. 9-27.

Rao, S. M. (2005). "Evaluation of permeability of tire shreds under vertical loading." *Journal of Testing and Evaluation*, vol. 33, No. 1, pp. 1-4.

Reddy, K. R., y Marella, A. (2001). "Properties of different size scrap tire shreds implications on using as drainage material in landfill cover systems." *The Seventeenth International Conference on Solid Waste Technology and Management*, Philadelphia, PA, USA., pp. 1-19.

Rema, Inc. (2006), Rubber Recycling and Manufacturing, Caguas, Puerto Rico.

Salgado, R., Yoon, S., y Siddiki, N. Z. (2003). "Construction of tire shred test embankment." *Rep. No. FHWA/IN/JTRP-2002/35*, Indiana Dept. of Transportation, Indianapolis, pp. 1-61.

Shalaby, A., y Khan, R. A. (2002). "Temperature monitoring and compressibility measurement of a tire shred embankment: Winnipeg, Manitoba, Canada." *Transportation Research Record*, No. 1808, pp. 67-75.

Shields, D. H., y Tolunay, Z. A. (1972). "Passive pressure coefficients for sand." *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 9, No. 4, pp. 501-503.

Tatliso, N., Edil, T. B., y Benson, C.H. (1998). "Interaction between reinforcing geosynthetics and soil-tire chip mixtures." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 124, No. 11, pp. 1109-1119.

Terzaghi, K. (1932). "Record earth pressure testing machine." *Engineering News Record*, 109 (sept.29), pp.365-369.

Terzaghi, K. (1943). *Theoretical Soil Mechanics*. John Wiley and Sons, New York.

Tweedie, J. J., Humphrey, D. N., y Sandford, T. C. (1998). "Tire shreds as lightweight retaining wall backfill: active conditions." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 124, No. 11, pp. 61-70.

Velásquez, E. (2001). "Reciclaje de neumáticos: una gran industria." *Dimension, Colegio de Ingenieros y Agrimensores de Puerto Rico, CIAPR*, vol. 4, pp. 29-32.

Wartman, J., Natale, M. F., y Strenk, P. M. (2007). "Immediate and time-dependent compression of tire derived aggregate." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 133, No. 3, pp. 245-256.

Yang, S., Lohnes, R. A., y Kjartanson, B. H. (2002). "Mechanical properties of shredded tires." *Geotechnical Testing Journal*, vol. 25, No.1, pp. 44-52.

Youwai, S., y Bergado, D. (2003). "Strength and deformation characteristics of shredded rubber tire-sand mixtures." *Can. Geotech.*, 40 (2), pp 254-264.

Zimmerman, P. S. (1997). "Compressibility, hydraulic conductivity, and soil infiltration testing of tire shreds and field testing of a shredded tire horizontal drain." MS tesis, Iowa State University.

Zornberg, J. G., Cabral, A. R., y Viratjandr, CH. (2004). "Behaviour or tire shred-sand mixtures." *Can. Geotech.*, 41 (2), pp. 227-241.

Zornberg, J. G., Costa, Y. D., y Vollenweider, B. (2004). "Mechanical performance of a prototype embankment backfill built with tire shreds and cohesive soil." *Transportation Research Record 1874*, National Research Council, Transportation Research Board, Washington, D.C., pp. 70-77.

## **APÉNDICE A. Ensayos de caracterización de materiales**

**Tabla A- 1 Granulometría de los materiales ASTM D 422-63**

**Fecha** : Jueves 8 de febrero de 2007  
**Proyecto** : Tesis de grado  
**Muestra** : Arena triturada No 1, Goma triturada, y Arena No 2 (de otawa)

Tamiz	Diametro tamiz	Porcentaje que pasa		
		Arena 1	Goma triturada	Arena 2
No	Milímetros			
3 / 8	9.52	100.0	100	100.0
No 4	4.75	100.0	100.00	100.0
10	2	3.7	26.19	100.0
20	0.84	0.6	0.09	99.7
40	0.425	0.5	0.06	6.8
60	0.25	0.5	0.03	0.3
100	0.175	0.4	0.00	0.1
200	0.074	0.4	0.00	0.0

**Tabla A- 2 Índice de densidad mínimo y peso unitario de los suelos ASTM D 4254-00, ensayo 1**

**Fecha** : Jueves 27 de julio de 2006  
**Proyecto** : Tesis de grado  
**Muestra** : Goma triturada 100%

No de medicion	Altura inicial en mm	Altura de la muestra en cm	Area en cm2	Volumen del molde en cm3
1	37.73	3.77	31.12	117.43
2	37.63	3.76	31.28	117.71
3	37.55	3.76	31.16	117.02
4	37.52	3.75	31.52	118.26
Promedio	37.61	3.76	31.27	117.60

No de medicion	Diametro del molde en mm	Radio del molde en mm	Radio del molde en cm	Area en cm2	Area en in2
1	62.95	31.48	3.15	31.12	4.82
2	63.11	31.56	3.16	31.28	4.85
3	62.99	31.50	3.15	31.16	4.83
4	63.35	31.68	3.17	31.52	4.89
Promedio	63.10	31.55	3.16	31.27	4.85

**Peso de la muestra** 55.62 gr  
**Volumen de la muestra** 117.60 cm3  
**Densidad minima** 0.473 gr/cm3  
 30 pcf

**Tabla A- 3 Índice de densidad mínimo y peso unitario de los suelos ASTM D 4254-00, ensayo 2**

**Fecha** : Jueves 27 de julio de 2006  
**Proyecto** : Tesis de grado  
**Muestra** : Arena triturada 25% Vs Goma triturada 75%

No de medicion	Altura inicial en mm	Altura de la muestra en cm	Area en cm2	Volumen del molde en cm3
1	37.71	3.77	31.12	117.37
2	37.49	3.75	31.28	117.27
3	38.15	3.82	31.16	118.89
4	37.59	3.76	31.52	118.48
Promedio	37.74	3.77	31.27	118.00

No de medicion	Diametro del molde en mm	Radio del molde en mm	Radio del molde en cm	Area en cm2	Area en in2
1	62.95	31.48	3.15	31.12	4.82
2	63.11	31.56	3.16	31.28	4.85
3	62.99	31.50	3.15	31.16	4.83
4	63.35	31.68	3.17	31.52	4.89
Promedio	63.10	31.55	3.16	31.27	4.85

**Peso de la muestra** 76.5 gr  
**Volumen de la muestra** 118.00 cm3  
**Densidad minima** 0.648 gr/cm3  
 40 pcf

**Tabla A- 4 Índice de densidad mínimo y peso unitario de los suelos ASTM D 4254-00, ensayo 3**

**Fecha** : Jueves 27 de julio de 2006  
**Proyecto** : Tesis de grado  
**Muestra** : Arena triturada 50% Vs Goma triturada 50%

No de medicion	Altura inicial en mm	Altura de la muestra en cm	Area en cm2	Volumen del molde en cm3
1	37.56	3.76	31.12	116.90
2	37.53	3.75	31.28	117.40
3	37.81	3.78	31.16	117.83
4	37.68	3.77	31.52	118.77
Promedio	37.65	3.76	31.27	117.72

No de medicion	Diametro del molde en mm	Radio del molde en mm	Radio del molde en cm	Area en cm2	Area en in2
1	62.95	31.48	3.15	31.12	4.82
2	63.11	31.56	3.16	31.28	4.85
3	62.99	31.50	3.15	31.16	4.83
4	63.35	31.68	3.17	31.52	4.89
Promedio	63.10	31.55	3.16	31.27	4.85

**Peso de la muestra** 104 gr  
**Volumen de la muestra** 117.72 cm3  
**Densidad minima** 0.883 gr/cm3  
 55 pcf

**Tabla A- 5 Índice de densidad mínimo y peso unitario de los suelos ASTM D 4254-00, ensayo 4**

**Fecha** : Jueves 27 de julio de 2006  
**Proyecto** : Tesis de grado  
**Muestra** : Arena triturada 75% Vs Goma triturada 25%

No de medicion	Altura inicial en mm	Altura de la muestra en cm	Area en cm2	Volumen del molde en cm3
1	37.35	3.74	31.12	116.24
2	37.72	3.77	31.28	117.99
3	37.91	3.79	31.16	118.14
4	37.55	3.76	31.52	118.36
Promedio	37.63	3.76	31.27	117.68

No de medicion	Diametro del molde en mm	Radio del molde en mm	Radio del molde en cm	Area en cm2	Area en in2
1	62.95	31.48	3.15	31.12	4.82
2	63.11	31.56	3.16	31.28	4.85
3	62.99	31.50	3.15	31.16	4.83
4	63.35	31.68	3.17	31.52	4.89
Promedio	63.10	31.55	3.16	31.27	4.85

**Peso de la muestra** 127.05 gr  
**Volumen de la muestra** 117.68 cm3  
**Densidad minima** 1.080 gr/cm3  
67 pcf

**Tabla A- 6 Índice de densidad mínimo y peso unitario de los suelos ASTM D 4254-00, ensayo 5**

**Fecha** : Jueves 27 de julio de 2006  
**Proyecto** : Tesis de grado  
**Muestra** : Arena triturada 100%

No de medicion	Altura inicial en mm	Altura de la muestra en cm	Area en cm2	Volumen del molde en cm3
1	37.52	3.75	31.12	116.77
2	37.49	3.75	31.28	117.27
3	37.42	3.74	31.16	116.61
4	37.72	3.77	31.52	118.89
Promedio	37.54	3.75	31.27	117.39

No de medicion	Diametro del molde en mm	Radio del molde en mm	Radio del molde en cm	Area en cm2	Area en in2
1	63.22	31.61	3.16	31.39	4.87
2	63.06	31.53	3.15	31.23	4.84
3	63.25	31.63	3.16	31.42	4.87
4	62.85	31.43	3.14	31.02	4.81
Promedio	63.10	31.55	3.15	31.27	4.85

**Peso de la muestra** 145.34 gr  
**Volumen de la muestra** 117.39 cm3  
**Densidad minima** 1.238 gr/cm3  
 77 pcf





**Tabla A- 9 Índice de densidad máxima y peso unitario de los suelos usando una tabla vibratoria ASTM D 4253-00, ensayo 3**

**Fecha** : Sabado 23 de julio de 2006  
**Proyecto** : Tesis de grado  
**Muestra** : Arena triturada 50% - Goma triturada 50%

No de medicion	Altura inicial en mm	Espesor piedra porosa	Altura final en mm	Altura de la muestra en mm	Altura de la muestra en cm
1	34.96	6.28	4.57	24.11	2.41
2	34.58	6.21	4.57	23.80	2.38
3	34.70	6.20	4.57	23.93	2.39
4	35.09	6.22	4.57	24.30	2.43
Promedio	34.83	6.23	4.57	24.04	2.40

No de medicion	Diametro del molde en mm	Radio del molde en mm	Radio del molde en cm	Area en cm2	Area en in2
1	63.28	31.64	3.16	31.45	4.87
2	62.39	31.20	3.12	30.57	4.74
3	61.87	30.94	3.09	30.06	4.66
4	62.67	31.34	3.13	30.85	4.78
Promedio	62.55	31.28	3.13	30.73	4.76

<b>Peso aplicado</b>	9.71 lb	<b>Peso de la muestra</b>	85.02 gr
<b>Area promedio</b>	4.76 in2	<b>Volumen de la muestra</b>	73.88 cm3
<b>Presion aplicada</b>	2 lb/in2	<b>Densidad maxima</b>	1.151 gr/cm3 72 pcf

**Tabla A- 10 Índice de densidad máxima y peso unitario de los suelos usando una tabla vibratoria ASTM D 4253-00, ensayo 4**

**Fecha** : Sabado 23 de julio de 2006  
**Proyecto** : Tesis de grado  
**Muestra** : Arena triturada 75% - Goma triturada 25%

No de medicion	Altura inicial en mm	Espesor piedra porosa	Altura final en mm	Altura de la muestra en mm	Altura de la muestra en cm
1	37.63	6.50	6.21	24.92	2.49
2	37.56	6.51	6.21	24.84	2.48
3	37.80	6.49	6.21	25.10	2.51
4	37.33	6.50	6.21	24.62	2.46
Promedio	37.58	6.50	6.21	24.87	2.49

No de medicion	Diametro del molde en mm	Radio del molde en mm	Radio del molde en cm	Area en cm2	Area en in2
1	63.28	31.64	3.16	31.45	4.87
2	62.39	31.20	3.12	30.57	4.74
3	61.87	30.94	3.09	30.06	4.66
4	62.67	31.34	3.13	30.85	4.78
Promedio	62.55	31.28	3.13	30.73	4.76

<b>Peso aplicado</b>	9.71 lb	<b>Peso de la muestra</b>	107.5 gr
<b>Area promedio</b>	4.76 in2	<b>Volumen de la muestra</b>	76.43 cm3
<b>Presion aplicada</b>	2 lb/in2	<b>Densidad maxima</b>	1.406 gr/cm3 88 pcf



**Tabla A- 12 Método para determinar la gravedad específica de los sólidos ASTM D 854-02**

(Referencia: ASTM 2002)

**Fecha** : Agosto 2 de 2006  
**Proyecto** : Tesis de grado  
**Muestra** : Mezclas de arena triturada y goma triturada

**Calculo del Volumen del Picnometro**

Matraz	Contenido de Goma	W picno. con agua a la temperatura de calibracion	Peso del picnometro seco	Temperatura de calibracion	Densidad del agua a la temperatura de calibracion	Volumen calibrado
No	%	Mpwc, gramos	Mp, gramos	°C	d wc	Vp, ml
2	100	668.85	170.88	24.50	0.99717	499.38
3	75	629.73	131.45	22.00	0.99777	499.39
4	50	641.91	143.61	23.00	0.99754	499.53
4	25	641.91	143.61	23.00	0.99754	499.53
1	0	678.22	180.24	24.50	0.99717	499.39

**Calculo de la masa del picnometro y agua a la temperatura del ensayo**

Matraz	Contenido de Goma	Peso del picnometro seco	Volumen calibrado	Temperatura de ensayo	Densidad del agua a la temperatura de calibracion	W picno. con agua a la temperatura de ensayo
No	%	Mp, gramos	Vp, ml	°C	d wc	Mpwt, gramos
2	100	170.88	499.378	24.50	0.99717	668.84
3	75	131.45	499.394	24.00	0.99730	629.50
4	50	143.61	499.529	24.50	0.99717	641.73
4	25	143.61	499.529	25.50	0.99692	641.60
1	0	180.24	499.388	24.50	0.99717	678.21

**Tabla A- 13 Método para determinar la gravedad especifica de los sólidos ASTM D 854-02,  
Continuación**

(Referencia: ASTM, 2002)

**Fecha** : Agosto 2 de 2006  
**Proyecto** : Tesis de grado  
**Muestra** : Mezclas de arena triturada y goma triturada

**Calculo de la gravedad especifica de los solidos a la temperatura de ensayo**

Matraz	Contenido de Goma	Masa de los solidos seca	W picno. con agua a la temperatura de ensayo	W picno.+ agua + solido	Temperatura de ensayo	Gravedad especifica a la temp. de ensayo
No	%	Ms, gramos	Mpwt, gramos	Mpwst, gramos	°C	Gt
2	100	50.01	668.84	675.96	24.50	1.17
3	75	64.57	629.50	654.23	24.00	1.62
4	50	83.63	641.73	683.48	24.50	2.00
4	25	103.33	641.60	700.99	25.50	2.35
1	0	102.00	678.21	742.05	24.50	2.67

**Calculo de la gravedad especifica de los solidos a la temperatura de 20 grados centigrados**

Matraz	Contenido de Goma	Gravedad especifica a la temp. de ensayo	Temperatura de ensayo	Coficiente de temperatura	Gravedad especifica a 20 °C
No	%	Gt	°C	K	G 20
2	100	1.166	24.50	0.99897	1.16
3	75	1.621	24.00	0.99909	1.62
4	50	1.997	24.50	0.99897	1.99
4	25	2.352	25.50	0.99871	2.35
1	0	2.673	24.50	0.99897	2.67

**Tabla A- 14 Ensayo de permeabilidad método de la cabeza constante ASTM D 2434**

**(Referencia: ASTM, 2000a)**

**Fecha** : Febrero 5 de 2007  
**Proyecto** : Tesis de grado  
**Muestra** : Arena triturada No 1, Goma triturada, y Mezclas

Descripción	Contenido de goma				
	100	75	50	25	0
<b>Peso Muestra, gr</b>	176.3	275.8	395.6	392.9	514.59
<b>Diametro, cm</b>	6.375	6.375	6.375	6.375	6.335
<b>Area, cm<sup>2</sup></b>	31.92	31.92	31.92	31.92	31.92
<b>Longitud, cm</b>	11.30	12.00	12.10	11.00	12.29
<b>Head, cm</b>	68.00	68.00	68.00	68.00	68.00
<b>Tiempo, sg</b>	33.52	33.00	24.47	35.45	15.44
	34.04	33.36	24.91	35.36	15.12
	33.84	33.37	24.56	35.59	15.06
<b>Promedio tiempo</b>	33.80	33.24	24.65	35.47	15.21
<b>Volumen, ml</b>	200	200	200	200	200
<b>Temperatura, °C</b>	24	24	24	24	24
<b>Densidad en gr/cm<sup>3</sup></b>	0.489	0.720	1.024	1.119	1.311
<b>Permeabilidad cm/s</b>	0.031	0.033	0.045	0.029	0.074

En el Capítulo 4-5 se presentaron resultados de resistencia al corte realizados a la Arena No 2, a continuación se presenta el equipo de corte directo utilizado para realizar estas pruebas. Seguidamente se presentan los resultados de las pruebas realizadas a la arena No.2.



**Figura A- 1 Equipo utilizado para ensayo de corte directo**

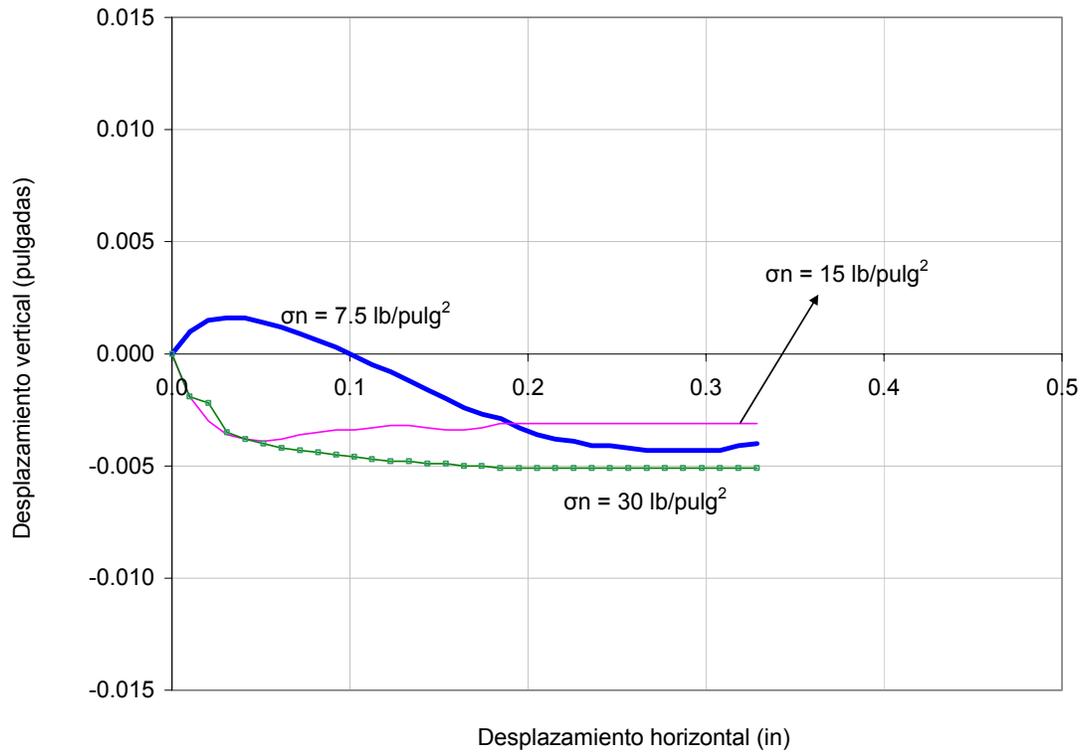
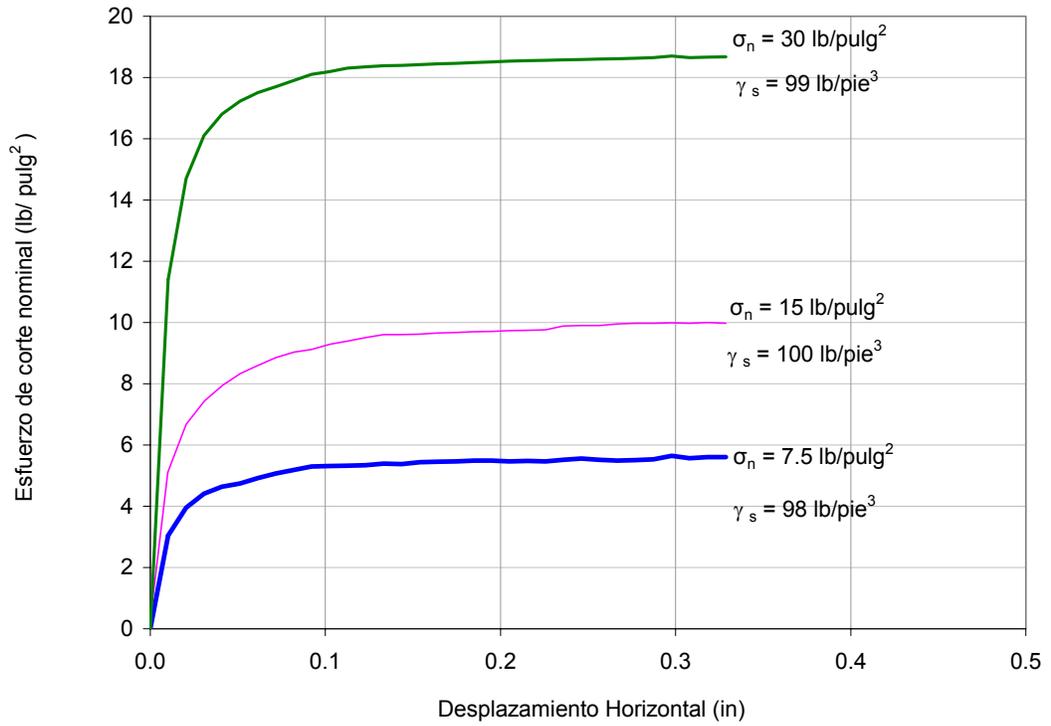


Figura A- 2 Resultados de ensayo de corte directo para arena No 2

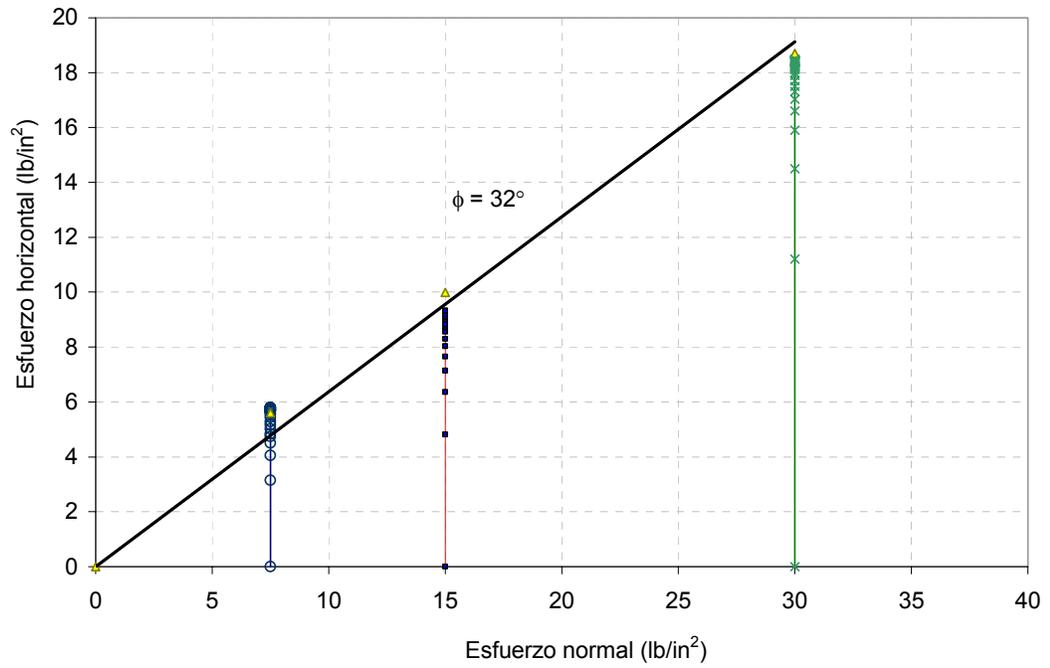
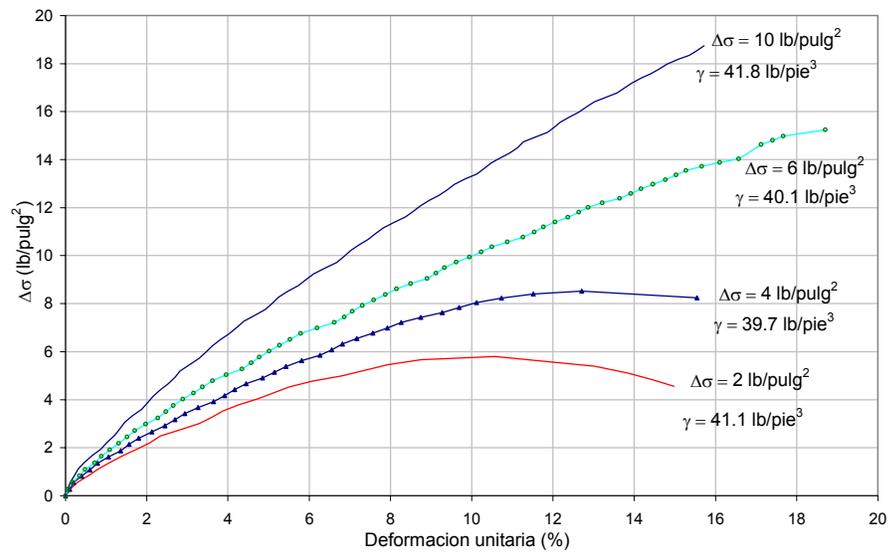
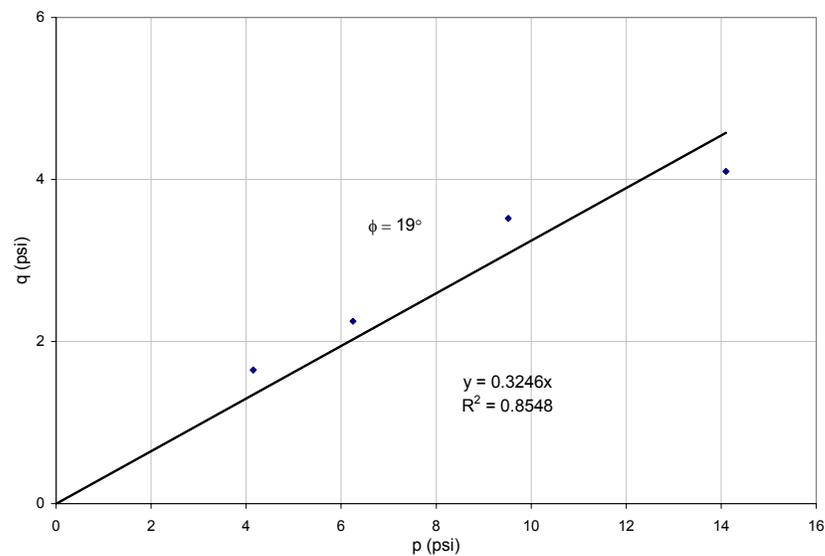


Figura A- 3 Envolvente de esfuerzos, ensayo de corte directo, arena No 2.

En el Capitulo 4-5 también se presentan parámetros de resistencia al corte de la goma triturada y la mezcla (50% goma-50% arena) obtenidos mediante ensayos de compresión Triaxial no consolidado no drenado presentados a continuación.



**Figura A- 4 Resultados ensayo de triaxial UU para goma triturada**



**Figura A- 5 Diagrama P-Q, ensayo triaxial UU, goma triturada.**

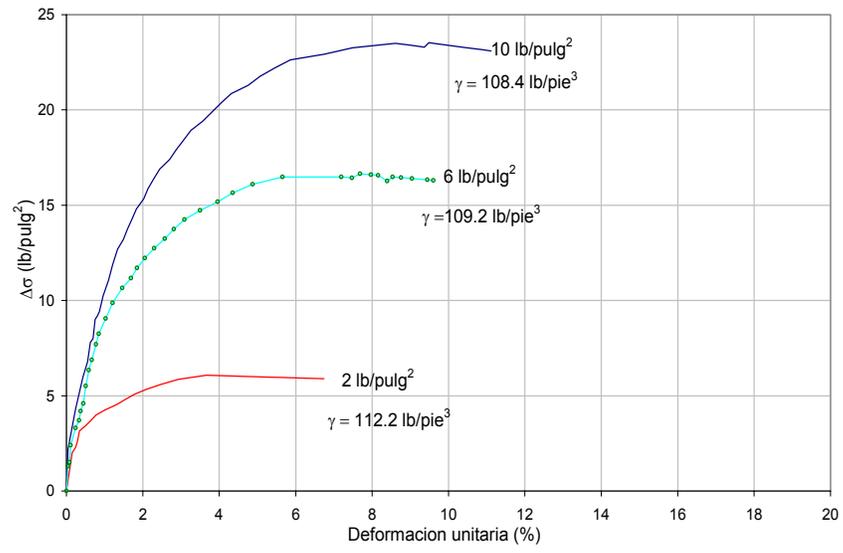


Figura A- 6 Resultados ensayo de triaxial UU para mezcla 50% goma-50% arena No. 2

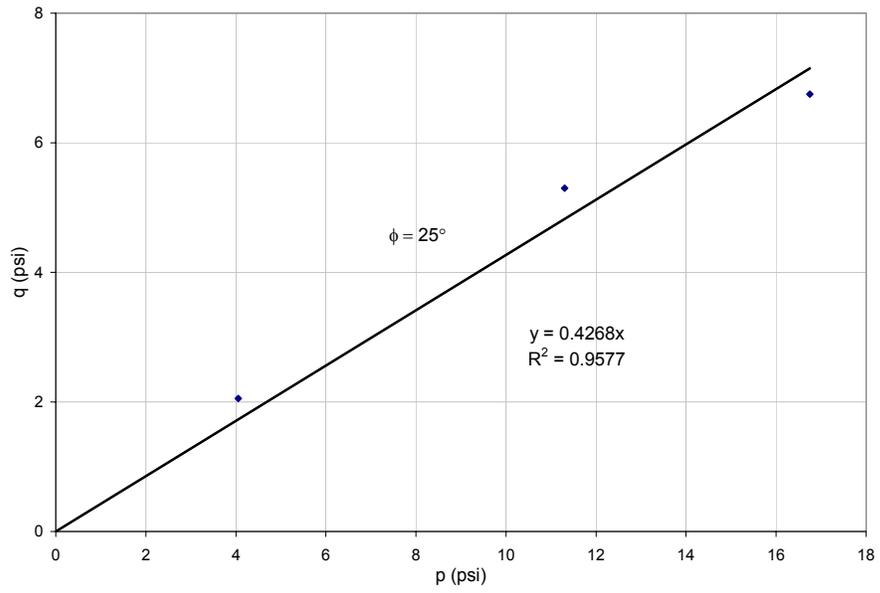


Figura A- 7 Diagrama P-Q, ensayo triaxial UU, mezcla 50% goma-50% arena No 2.

## **APÉNDICE B. Ensayos de compresibilidad**



Figura B- 1 Ensayo de compresibilidad a corto plazo, paso 1, realización de la mezcla



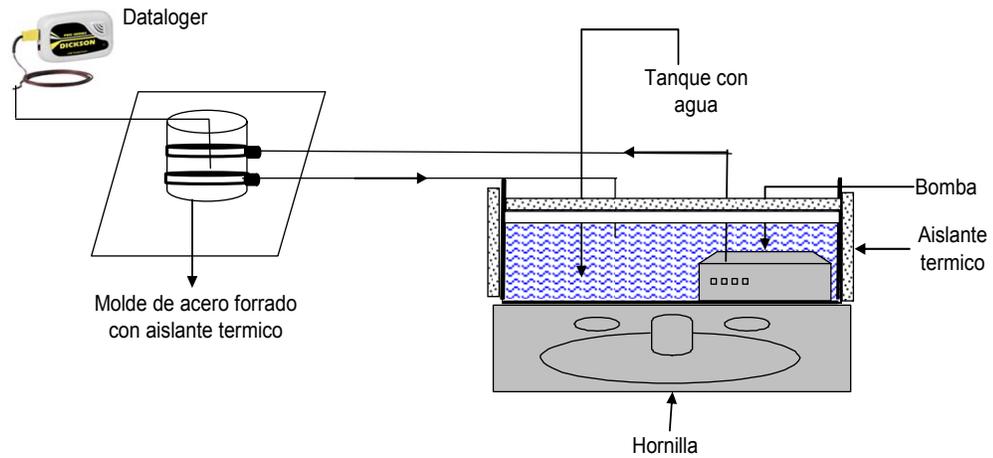
Figura B- 2 Ensayo de compresibilidad a corto plazo, paso 2, colocación de la muestra en la anilla



**Figura B- 3 Ensayo de compresibilidad a corto plazo, paso 3, colocación de la anilla en el odómetro**



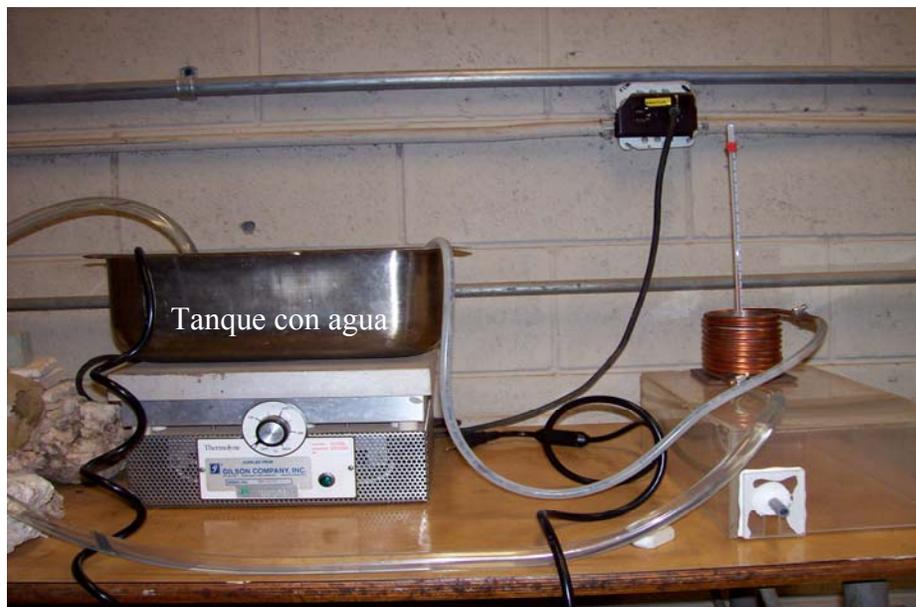
**Figura B- 4 Ensayo de compresibilidad a corto plazo, paso 4, aplicación de carga en el equipo de compresión**



**Figura B- 5 Esquema de diseño para el control de temperatura en el ensayo de compresibilidad a largo plazo**



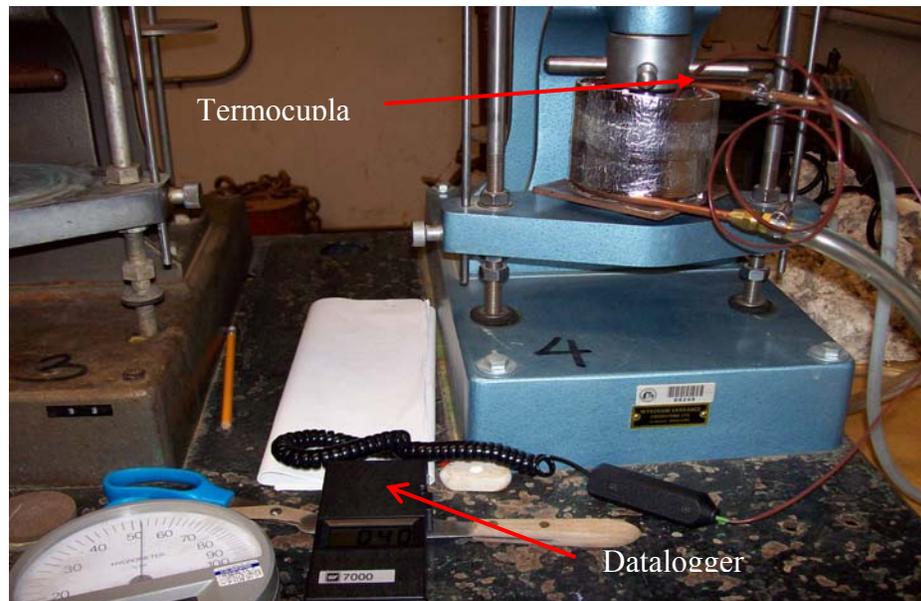
**Figura B- 6 Equipo de compresibilidad a largo plazo para temperatura constante**



**Figura B- 7 Mecanismo para control de temperatura**



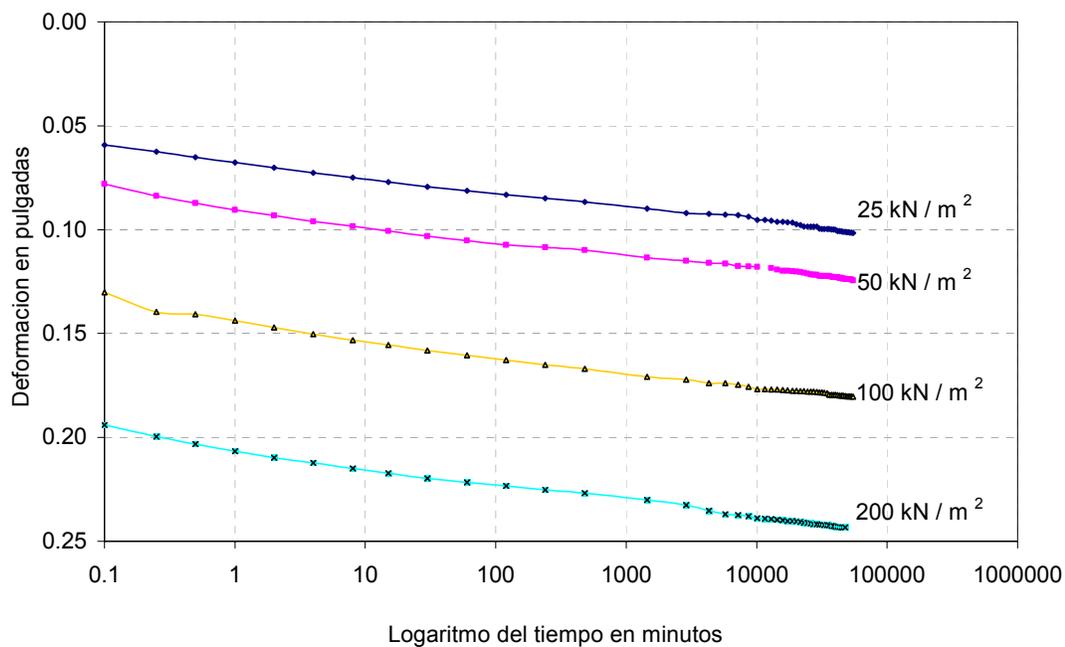
**Figura B- 8 Molde y muestra de ensayo**



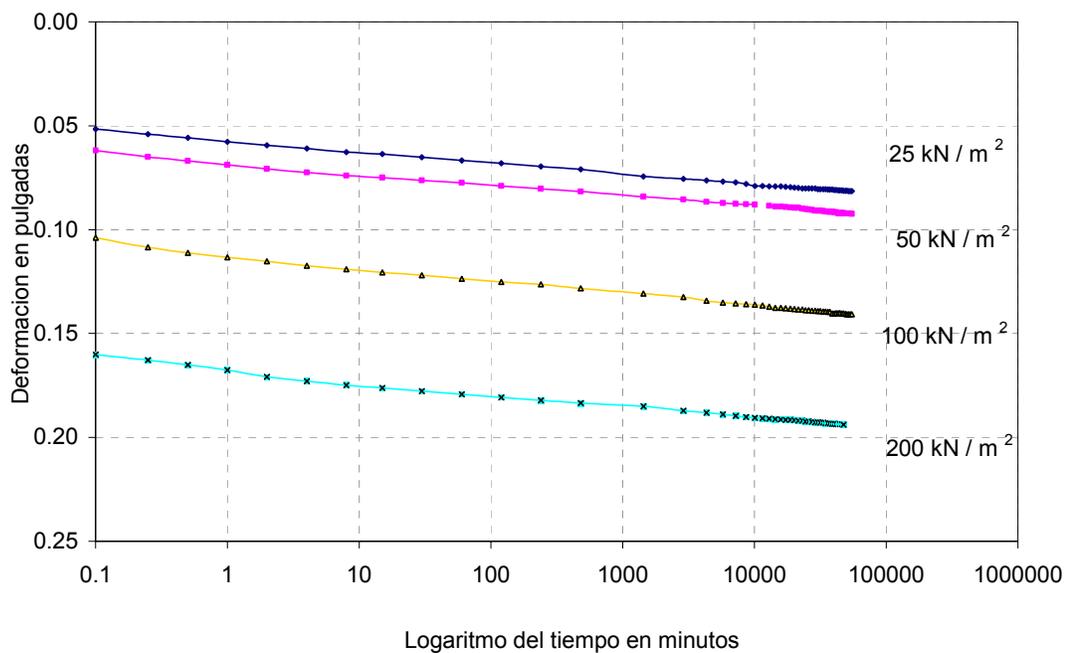
**Figura B- 9 Termocupla y datalogger**



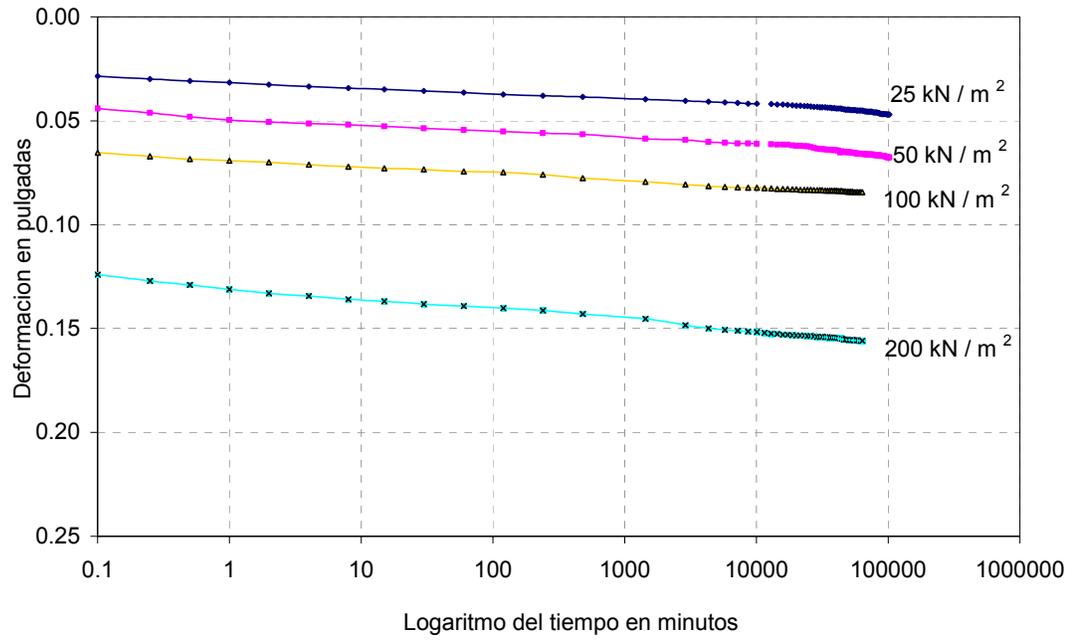
**Figura B- 10 Equipo utilizado para el ensayo de compresibilidad a largo plazo**



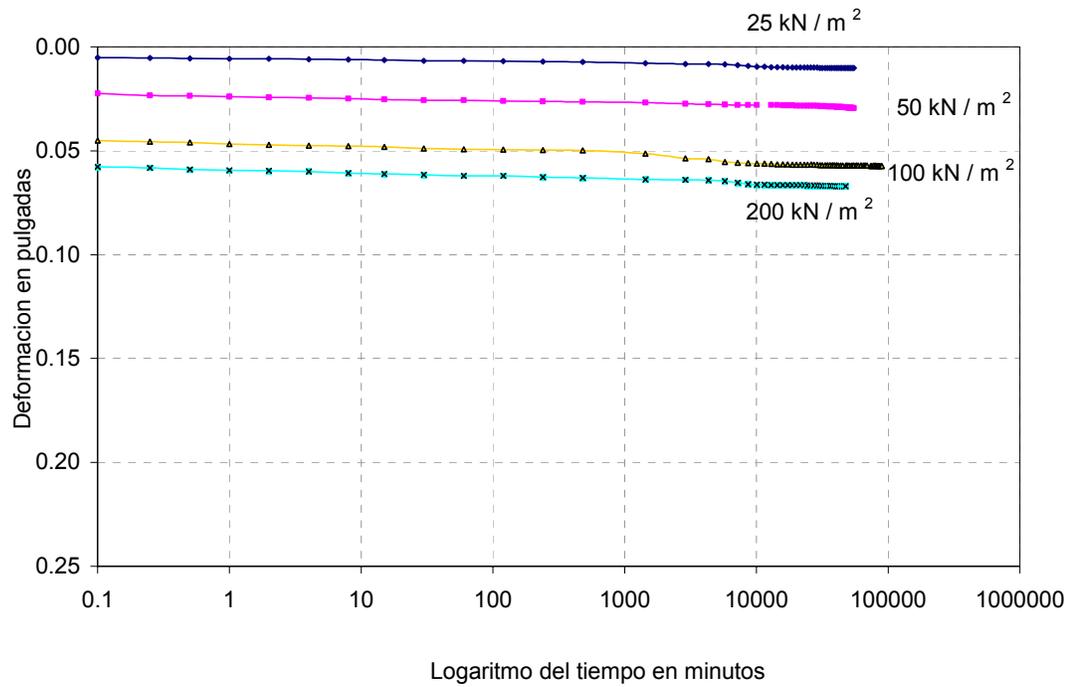
**Figura B- 11 Grafica de compresibilidad a largo plazo para 100% de goma triturada, con variación del esfuerzo axial aplicado.**



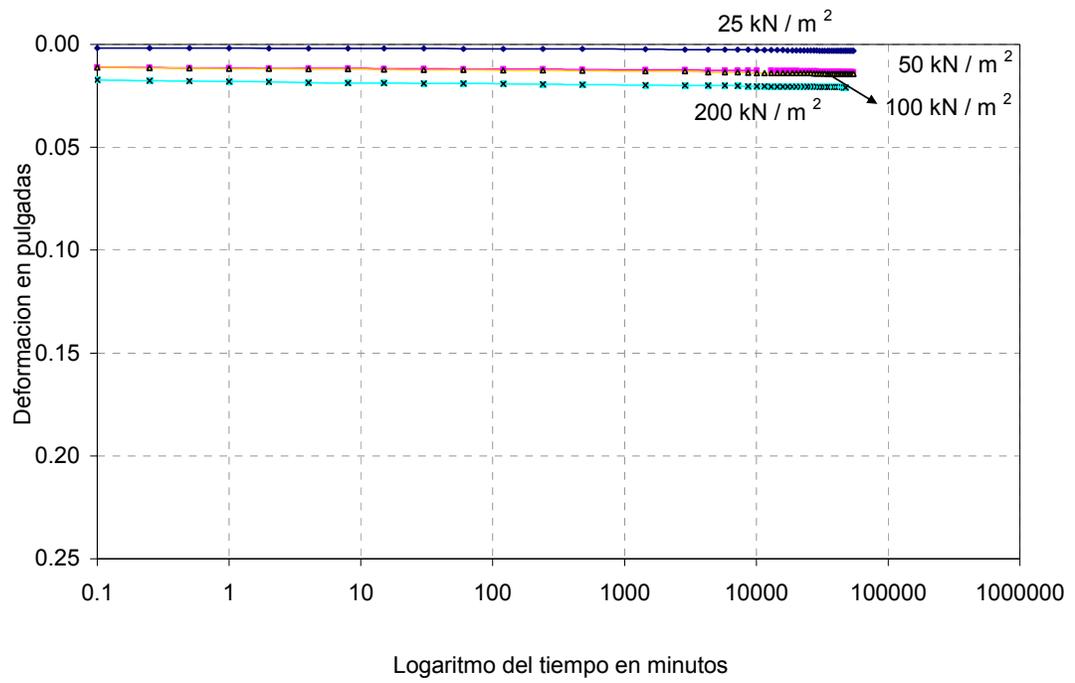
**Figura B- 12 Grafica de compresibilidad a largo plazo para 75% de goma triturada-25% de arena No 1, con variación del esfuerzo axial aplicado.**



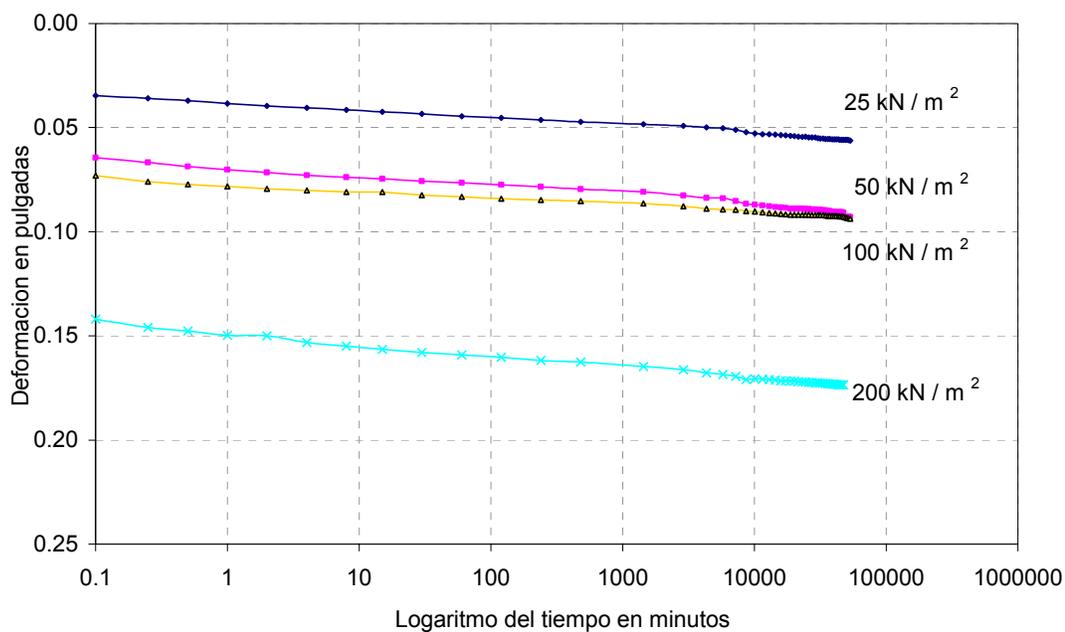
**Figura B- 13 Grafica de compresibilidad a largo plazo para 50% de goma triturada-50% de arena No 1, con variación del esfuerzo axial aplicado.**



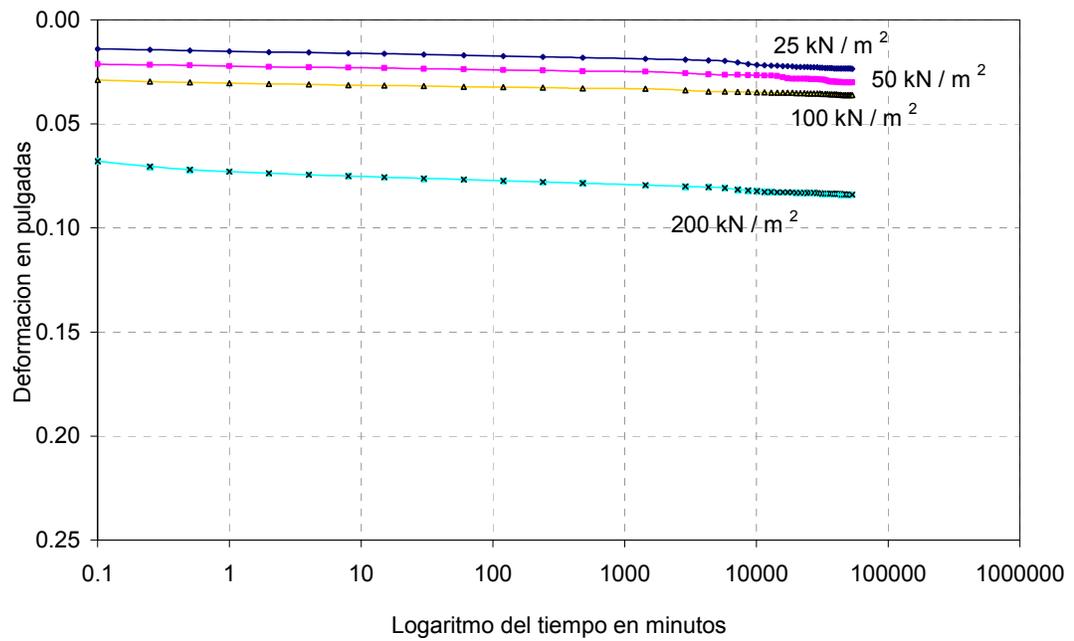
**Figura B- 14 Grafica de compresibilidad a largo plazo para 25% de goma triturada-75% de arena No 1, con variación del esfuerzo axial aplicado.**



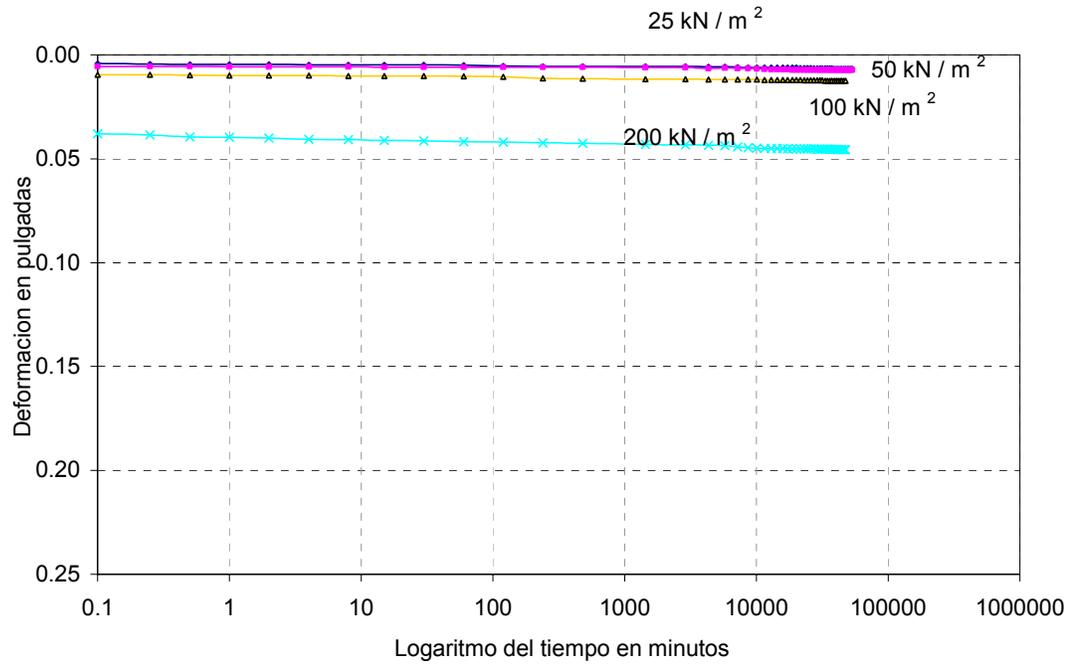
**Figura B- 15 Grafica de compresibilidad a largo plazo para 0% de goma triturada-100% de arena No 1, con variación del esfuerzo axial aplicado.**



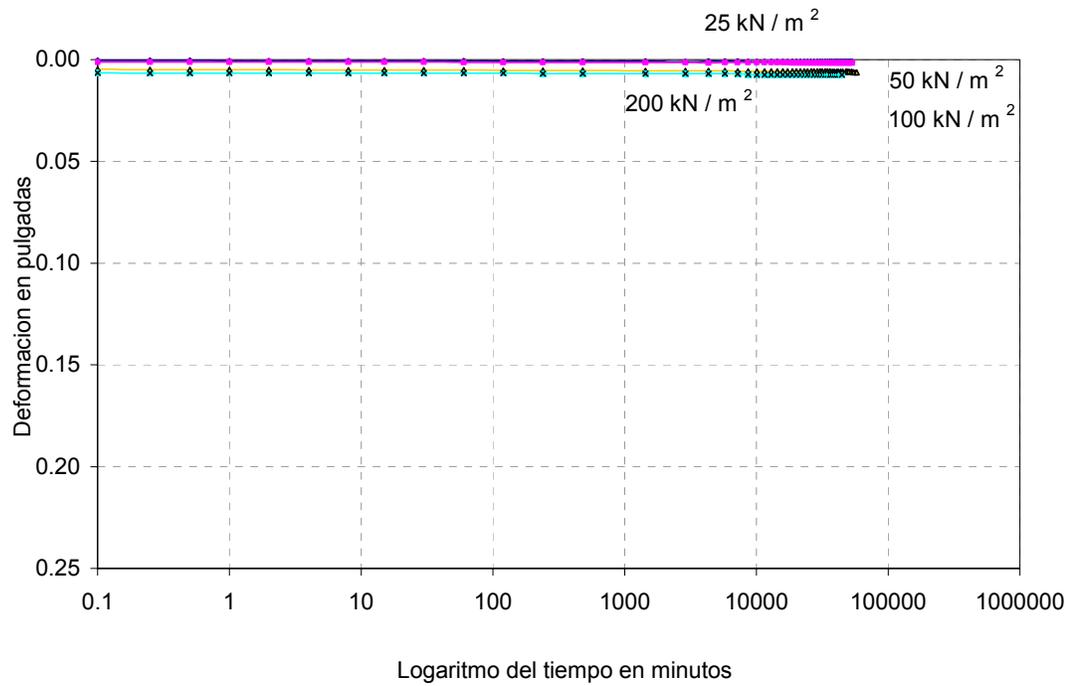
**Figura B- 16 Grafica de compresibilidad a largo plazo para 75% de goma triturada-25% de arena No 2, con variación del esfuerzo axial aplicado.**



**Figura B- 17 Grafica de compresibilidad a largo plazo para 50% de goma triturada-50% de arena No 2, con variación del esfuerzo axial aplicado.**



**Figura B- 18 Grafica de compresibilidad a largo plazo para 25% de goma triturada-75% de arena No 2, con variación del esfuerzo axial aplicado.**



**Figura B- 19 Grafica de compresibilidad a largo plazo para 0% de goma triturada-100% de arena No 2, con variación del esfuerzo axial aplicado.**

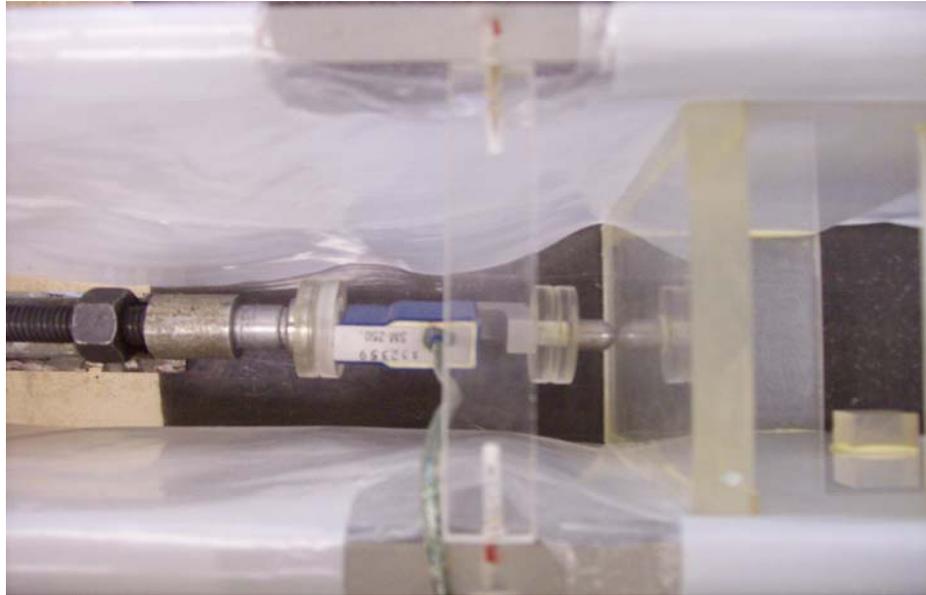
## **APÉNDICE C. Modelamiento del muro de contención**



**Figura C- 1 Configuración inicial de dispositivo para aplicación de carga en el muro de plexiglás**



**Figura C- 2 Configuración No 2 de dispositivo para aplicación de carga en el muro de plexiglás**



**Figura C- 3 Configuración final de dispositivo para aplicación de carga en el muro de plexiglás**

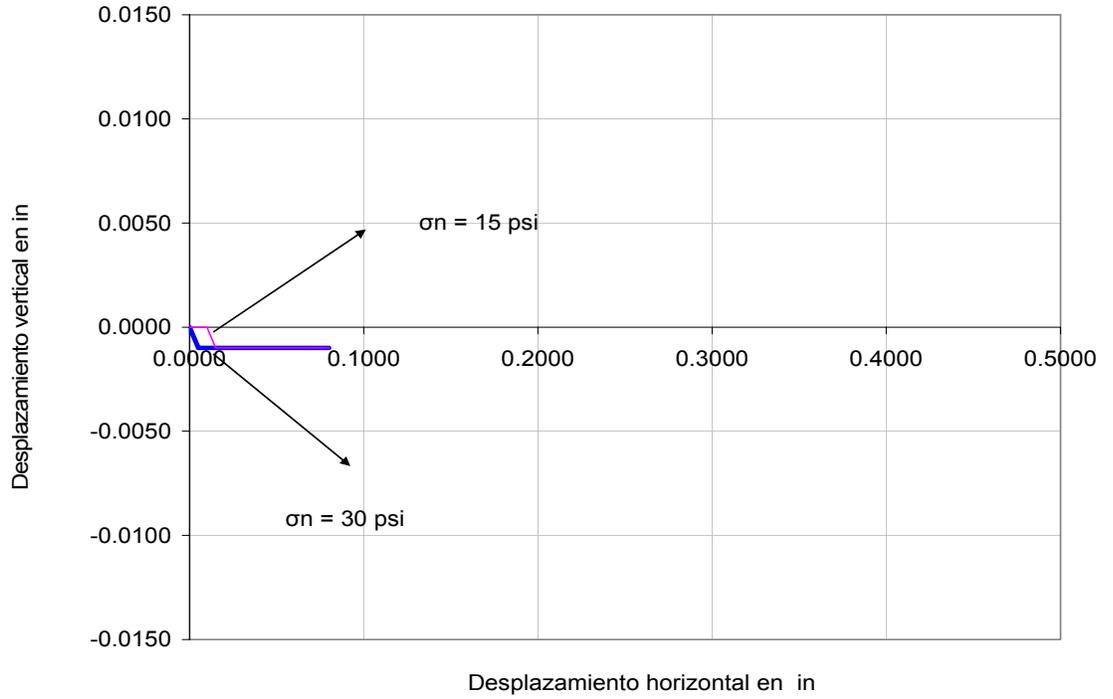
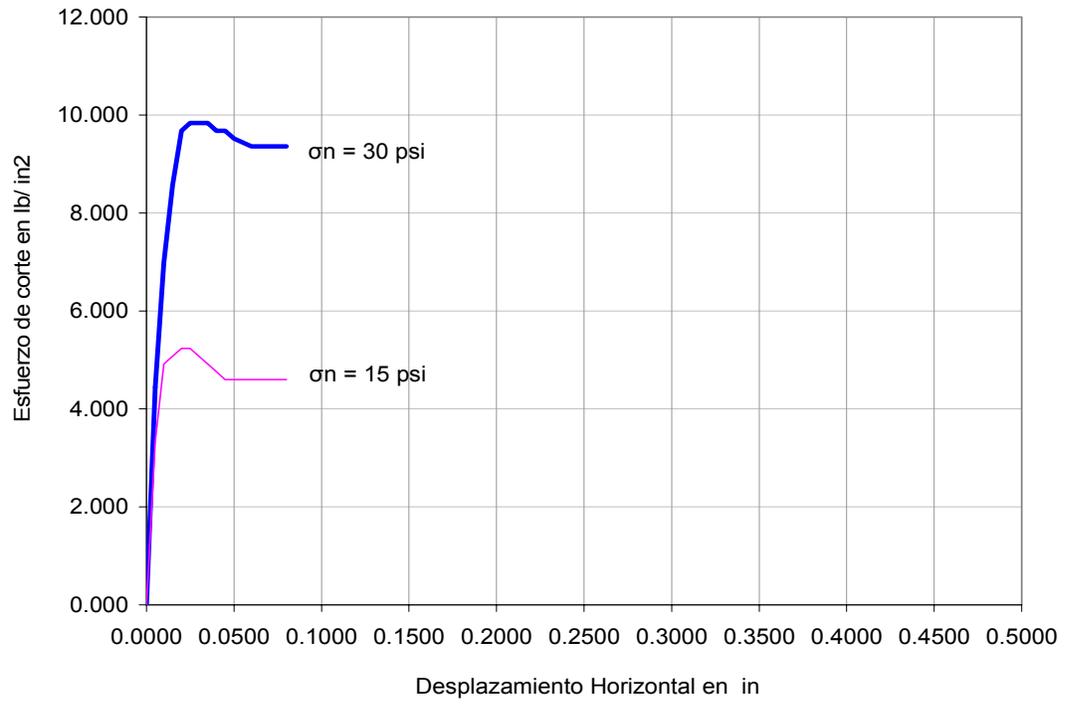


**Figura C- 4 Proceso de llenado del tanque de plexiglás**

**Tabla C- 1 Medición del ángulo de interfase ( $\delta$ ) entre la arena y el plexiglás, método de Fang, y otros (2003)**

**Material** Arena - Plexiglas **Diametro** 2.5 in  
**Peso arena:** 0.2 libras

<b>Esfuerzo lbs / in<sup>2</sup></b>	<b>Carga Aplicada (libras)</b>	<b>Area in<sup>2</sup></b>	<b>Angulo medido (Grados)</b>	<b>Promedio (Grados)</b>
0.072	0.355	4.91	23	22.83
			22.5	
			23	
0.078	0.385	4.91	22	22.17
			22.5	
			22	
0.225	1.105	4.91	20	20.23
			20.5	
			20.2	
0.427	2.095	4.91	18	18.33
			18	
			19	
			<b>PROMEDIO</b>	<b>20.89</b>



**Figura C- 5 Medición del ángulo de interfase ( $\delta$ ) entre el material analizado y las paredes del prototipo, ensayo de corte directo, arena-plexiglás.**

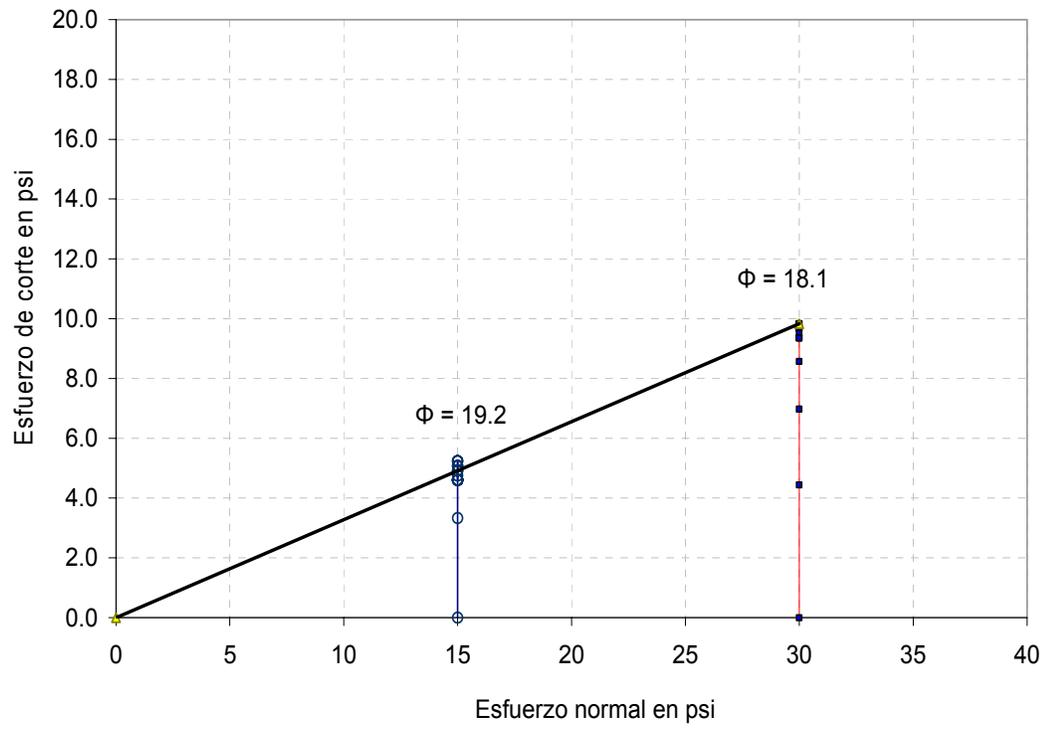
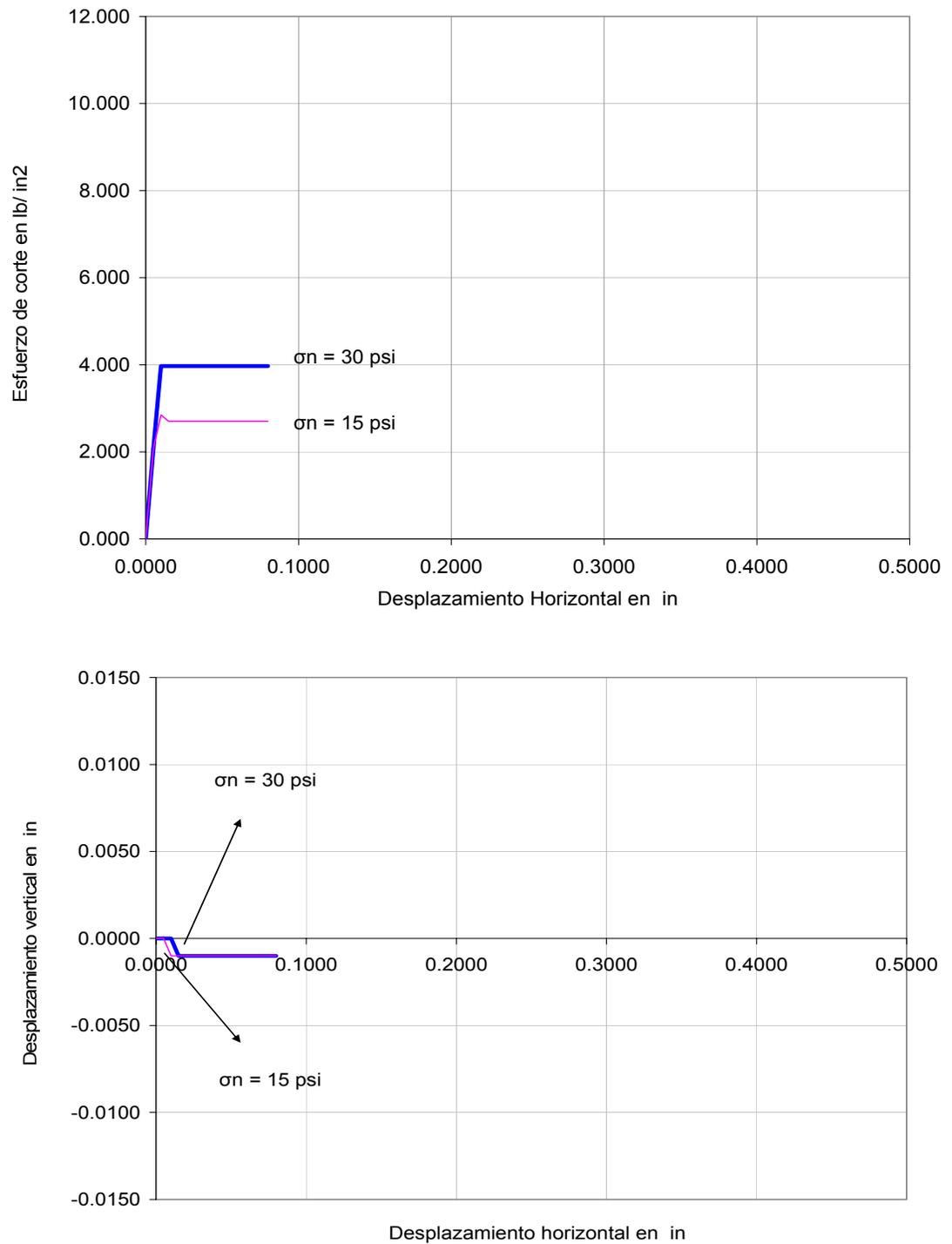


Figura C- 6 Envolvente de esfuerzos, ensayo de corte directo, arena-plexiglás.

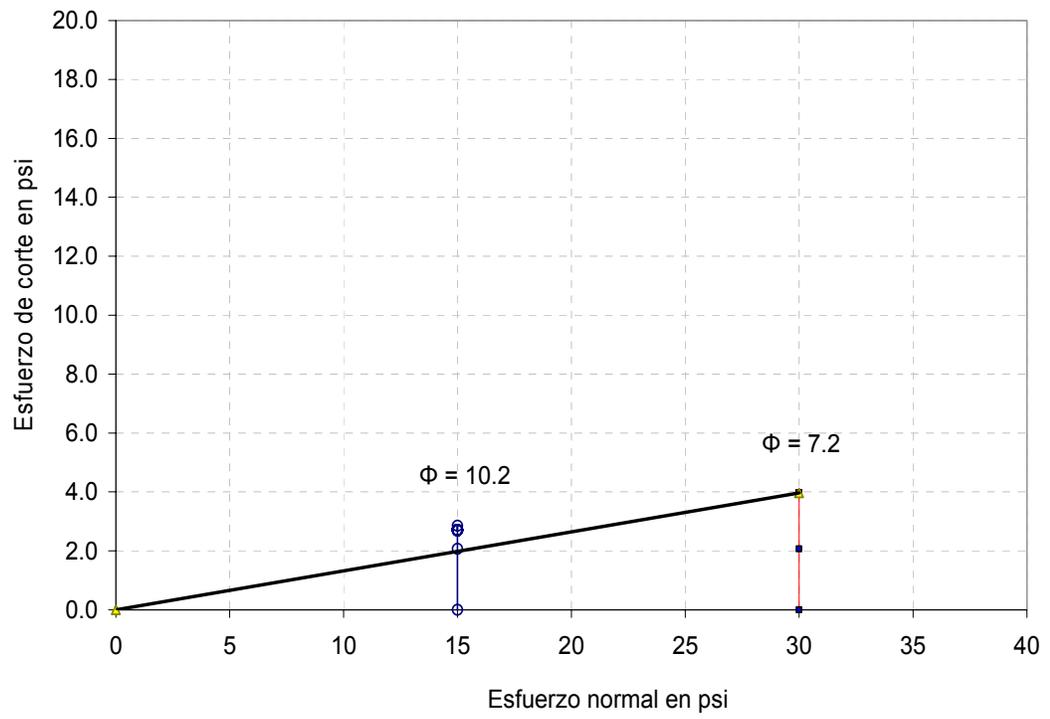
Tabla C- 2 Medición del ángulo de interfase ( $\delta$ ) entre la arena y el plástico, método de Fang, y otros (2003)

**Material** Arena - Plastico **Diametro** 2.5 in  
**Peso arena:** 0.2 libras

Esfuerzo lbs / in <sup>2</sup>	Carga Aplicada (libras)	Area in <sup>2</sup>	Angulo medido (Grados)	Promedio (Grados)
0.072	0.355	4.91	13.2	13.00
			13	
			12.8	
0.078	0.385	4.91	13	13.00
			13	
			13	
0.225	1.105	4.91	11	11.67
			11	
			13	
0.427	2.095	4.91	12	12.67
			13	
			13	
			<b>PROMEDIO</b>	<b>12.58</b>



**Figura C- 7 Medición del ángulo de interfase ( $\delta$ ) entre el material analizado y las paredes del prototipo, ensayo de corte directo, arena-plástico.**

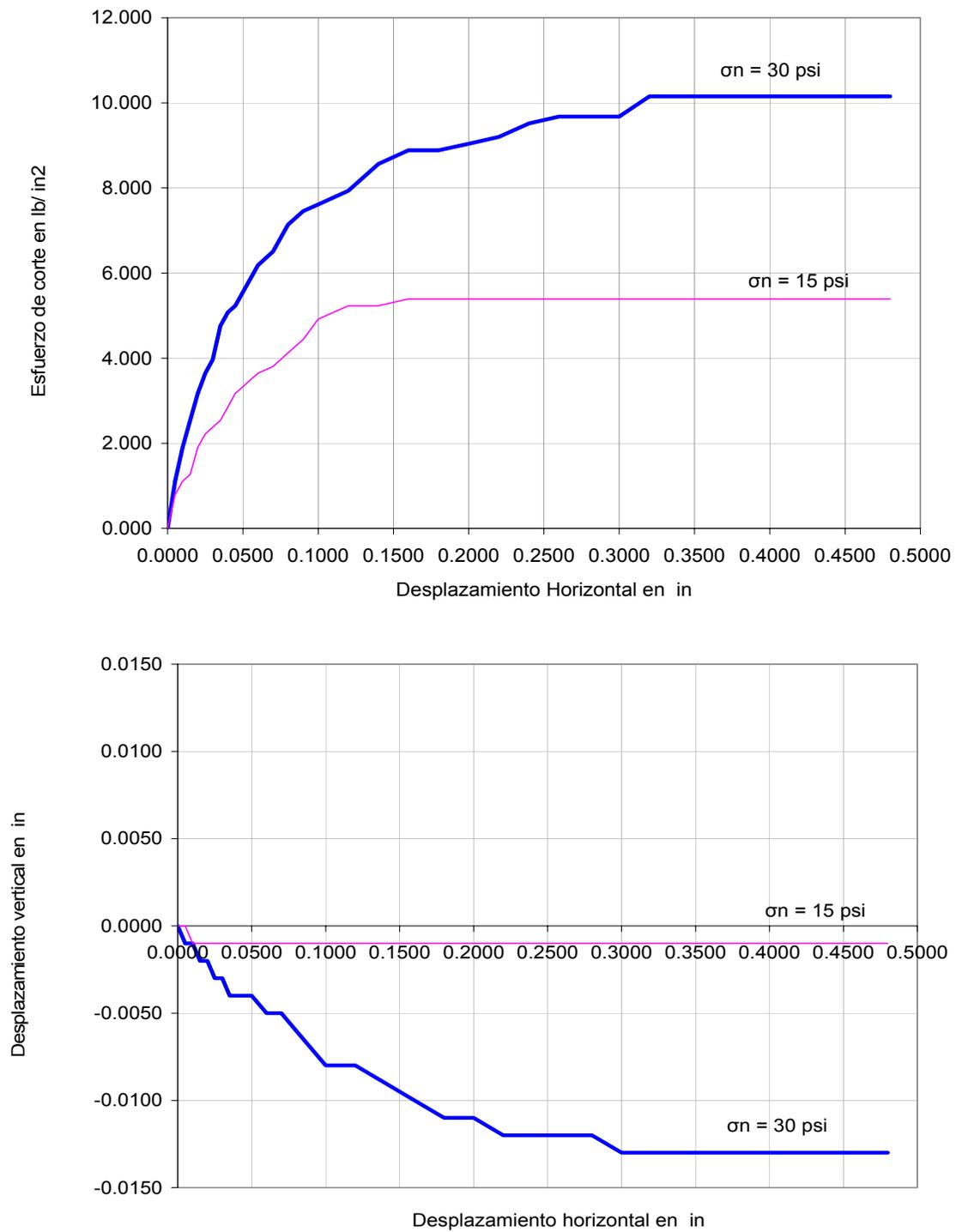


**Figura C- 8** Envolvente de esfuerzos, ensayo de corte directo, arena-plástico.

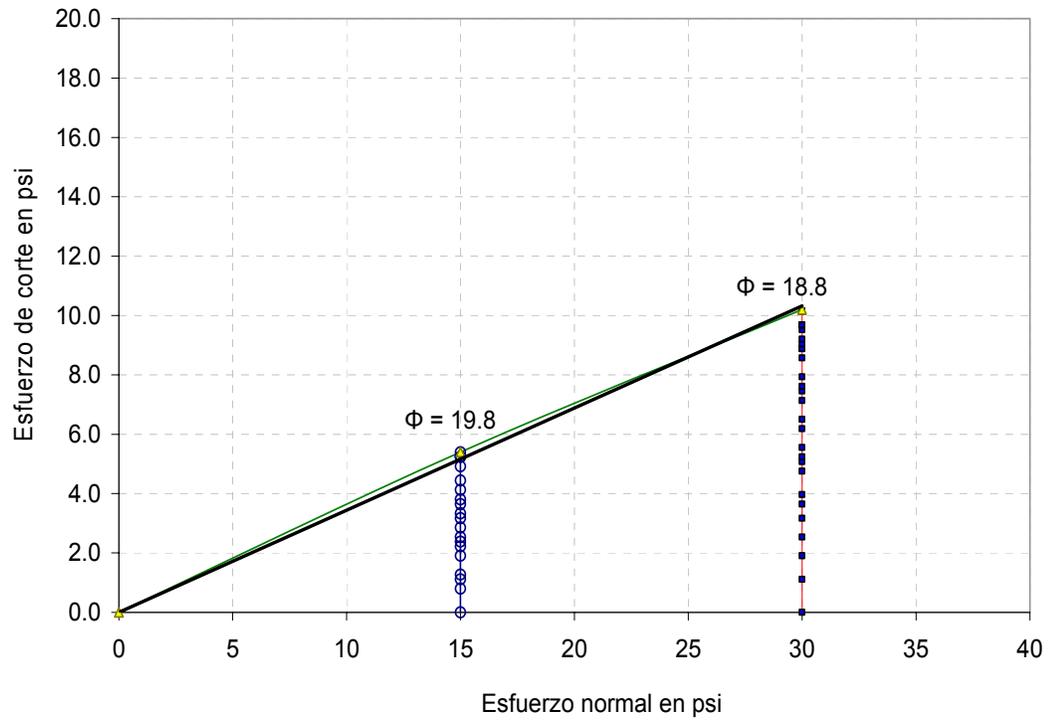
Tabla C- 3 Medición del ángulo de interfase ( $\delta$ ) entre la goma triturada y el plexiglás, método de Fang, y otros (2003)

**Material** Goma - Plexiglas **Diametro** 2.5 in  
**Peso arena:** 0.055 libras

Esfuerzo lbs / in <sup>2</sup>	Carga Aplicada (libras)	Area in <sup>2</sup>	Angulo medido (Grados)	Promedio (Grados)
0.043	0.21	4.91	34	33.67
			33	
			34	
0.049	0.24	4.91	30	30.33
			31	
			30	
0.196	0.96	4.91	29	29.67
			30	
			30	
0.397	1.95	4.91	29	29.17
			29.5	
			29	
			<b>PROMEDIO</b>	<b>30.71</b>



**Figura C- 9 Medición del ángulo de interfase ( $\delta$ ) entre el material analizado y las paredes del prototipo, ensayo de corte directo, goma -plexiglás.**

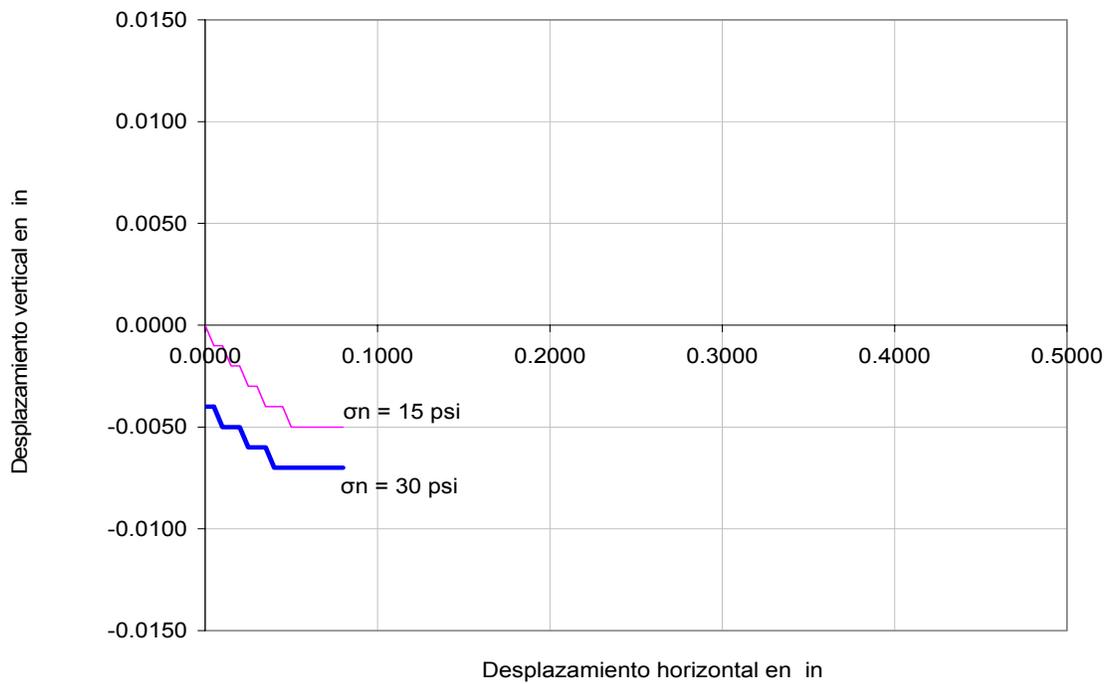
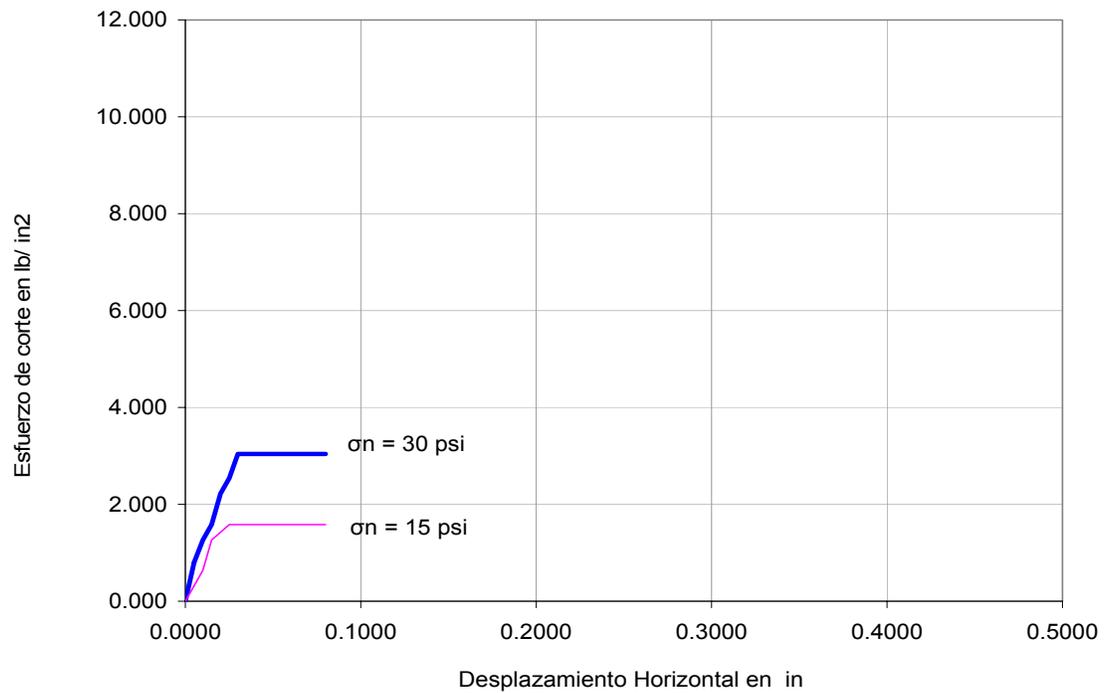


**Figura C- 10** Envolvente de esfuerzos, ensayo de corte directo, goma -plexiglás.

Tabla C- 4 Medición del ángulo de interfase ( $\delta$ ) entre la goma triturada y el plástico, método de Fang, y otros (2003)

**Material** Goma - Plastico      **Diametro** 2.5 in  
**Peso arena:** 0.055 libras

Esfuerzo lbs / in <sup>2</sup>	Carga Aplicada (libras)	Area in <sup>2</sup>	Angulo medido (Grados)	Promedio (Grados)
0.043	0.21	4.91	14	14.50
			15	
			14.5	
0.049	0.24	4.91	13	13.17
			13.5	
			13	
0.196	0.96	4.91	13	13.00
			13	
			13	
0.397	1.95	4.91	12	12.07
			12	
			12.2	
			<b>PROMEDIO</b>	<b>13.18</b>



**Figura C- 11 Medición del ángulo de interfase ( $\delta$ ) entre el material analizado y las paredes del prototipo, ensayo de corte directo, goma -plástico.**

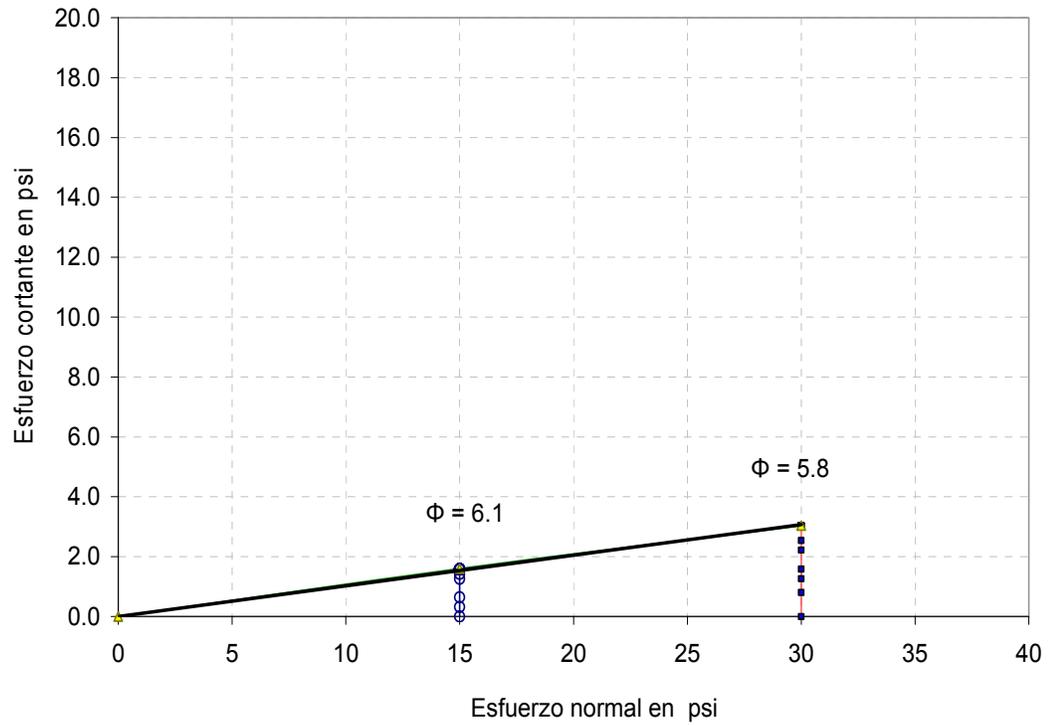
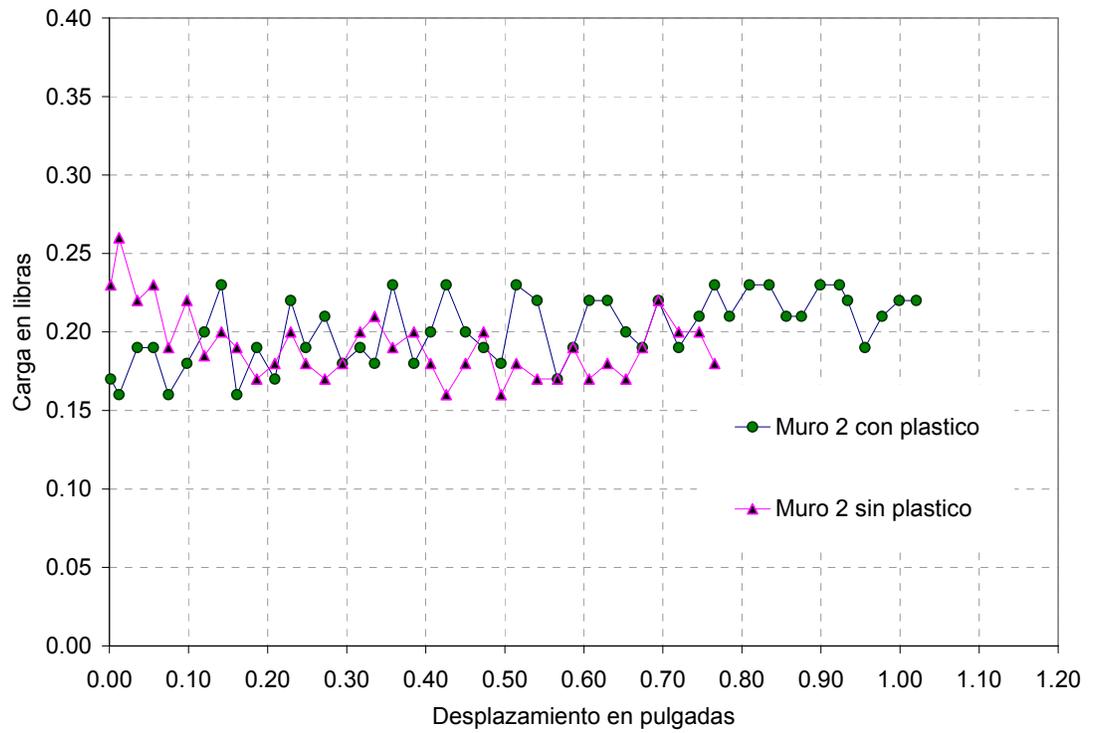


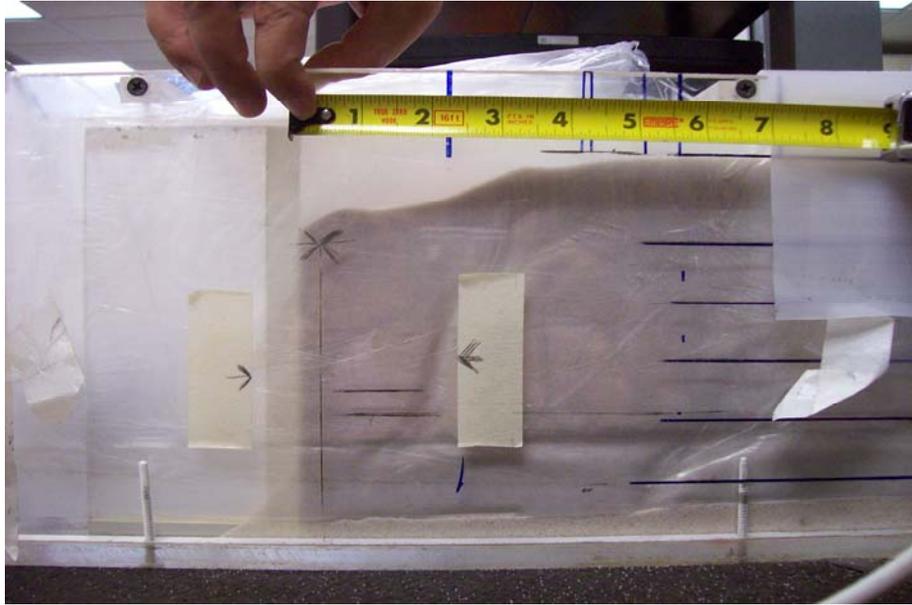
Figura C- 12 Envolvente de esfuerzos, ensayo de corte directo, goma -plástico.



**Figura C- 13 Medición de la fricción del prototipo de muro con la caja de plexiglás**

**Tabla C- 5 Cálculo de la fuerza de fricción generada entre la arena de Ottawa y las paredes del plexiglás cubiertas con plástico, en el ensayo activo.**

<b>Material Analizado</b>	Arena de Ottawa	<b>UNIDADES</b>
<b>Ensayo</b>	Activo	
<b>Datos tomados del ensayo No</b>	Promedio	
<b>Estado del material</b>	Suelto	
<b>CALCULO DEL ESFUERZO HORIZONTAL</b>		
Angulo de friccion	32	
Ko	0.5	
Peso unitario de la arena	0.0584	<b>lb /in<sup>3</sup></b>
	101.00	<b>lb /ft<sup>3</sup></b>
Altura de la arena	6.563	<b>in</b>
<b>ESFUERZO HORIZONTAL EFECTIVO de la arena</b>	0.090	<b>lb /in<sup>2</sup></b>
Longitud final del area de falla	7.00	<b>in</b>
Area A1 activa	22.97	<b>in<sup>2</sup></b>
No de lados	2.00	
Area total	45.94	
<b>CALCULO DE FRICCION</b>		
$\delta$ medido	13	<b>Grados</b>
Tangente $\delta$	0.231	
<b>Fuerza de friccion total</b>	1	<b>libras</b>



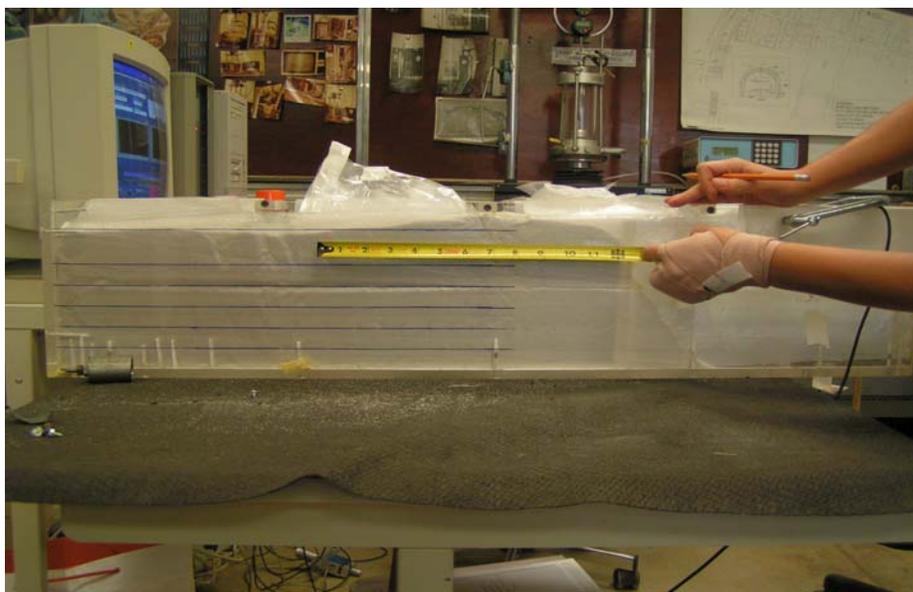
**Figura C- 14 Fotografía de la arena, al final del ensayo activo**

**Tabla C- 6 Corrección por fricción para la arena No 2, ensayo activo**

<b>Corrección</b>	<b>Valor</b>
Fricción de las paredes	1
Fricción del muro	0.2
Total corrección por fricción	+ 1.20

**Tabla C- 7 Cálculo de la fuerza de fricción generada entre la arena de Ottawa y las paredes del plexiglás cubiertas con plástico, en el ensayo pasivo.**

<b>Material Analizado</b>	Arena de Ottawa	<b>UNIDADES</b>
<b>Ensayo</b>	Pasivo	
<b>Datos tomados del ensayo No</b>	Promedio	
<b>Estado del material</b>	Suelto	
<b>CALCULO DEL ESFUERZO HORIZONTAL</b>		
Angulo de friccion	32	
Ko	0.5	
Peso unitario de la arena	0.0584	<b>lb /in<sup>3</sup></b>
	101.00	<b>lb /ft<sup>3</sup></b>
Altura de la arena	6.563	<b>in</b>
<b>ESFUERZO HORIZONTAL EFECTIVO de la arena</b>	0.090	<b>lb /in<sup>2</sup></b>
Longitud final del area de falla	13.50	<b>in</b>
Area A1 pasiva	88.59	<b>in<sup>2</sup></b>
No de lados	2.00	
Area total	177.19	
<b>CALCULO DE FRICCION</b>		
$\delta$ medido	13	<b>Grados</b>
Tangente $\delta$	0.231	
<b>Fuerza de friccion total</b>	4	<b>libras</b>



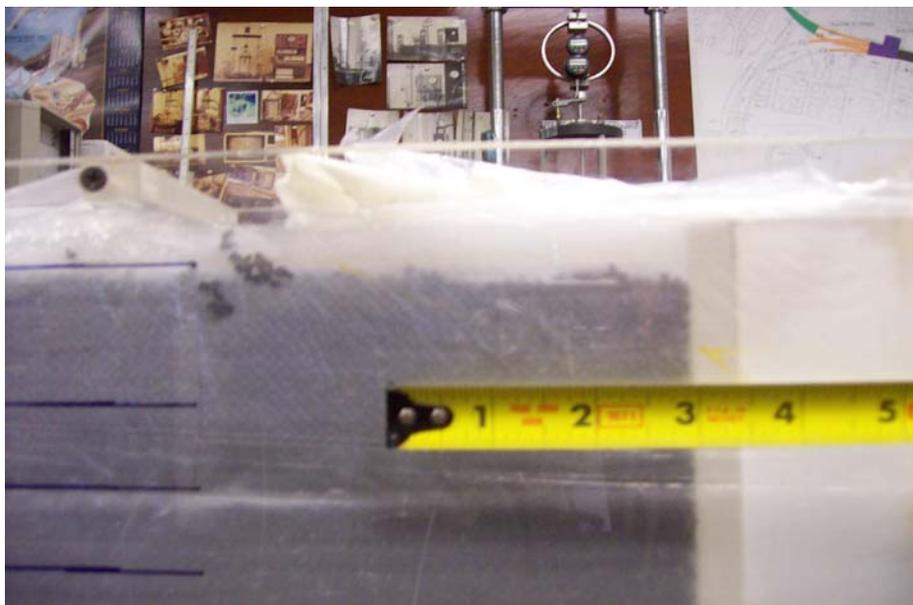
**Figura C- 15 Fotografía de la arena, al final del ensayo pasivo**

**Tabla C- 8 Corrección por fricción para la arena No 2, ensayo pasivo**

<b>Corrección</b>	<b>Valor</b>
Fricción de las paredes	4
Fricción del muro	0.2
Total corrección por fricción	- 4.2

**Tabla C- 9 Cálculo de la fuerza de fricción generada entre la goma triturada y las paredes del plexiglás cubiertas con plástico, en el ensayo activo.**

<b>Material Analizado</b>	Goma triturada	<b>UNIDADES</b>
<b>Ensayo</b>	Activo	
<b>Datos tomados del ensayo No</b>	Promedio	
<b>Estado del material</b>	Suelto	
<b>CALCULO DEL ESFUERZO HORIZONTAL</b>		
Angulo de friccion	11.3	
Ko	0.47	
Peso unitario del material	0.0185	<b>lb /in<sup>3</sup></b>
	32.00	<b>lb /ft<sup>3</sup></b>
Altura del material	6.563	<b>in</b>
<b>ESFUERZO HORIZONTAL EFECTIVO de la goma</b>	0.029	<b>lb /in<sup>2</sup></b>
Longitud final del area de falla	3.00	<b>in</b>
Area A1 activa	9.84	<b>in<sup>2</sup></b>
No de lados	2.00	
Area total	19.69	
<b>CALCULO DE FRICCION</b>		
δ medido	13	<b>Grados</b>
Tangente δ	0.234	
<b>Fuerza de friccion total</b>	0.13	<b>libras</b>



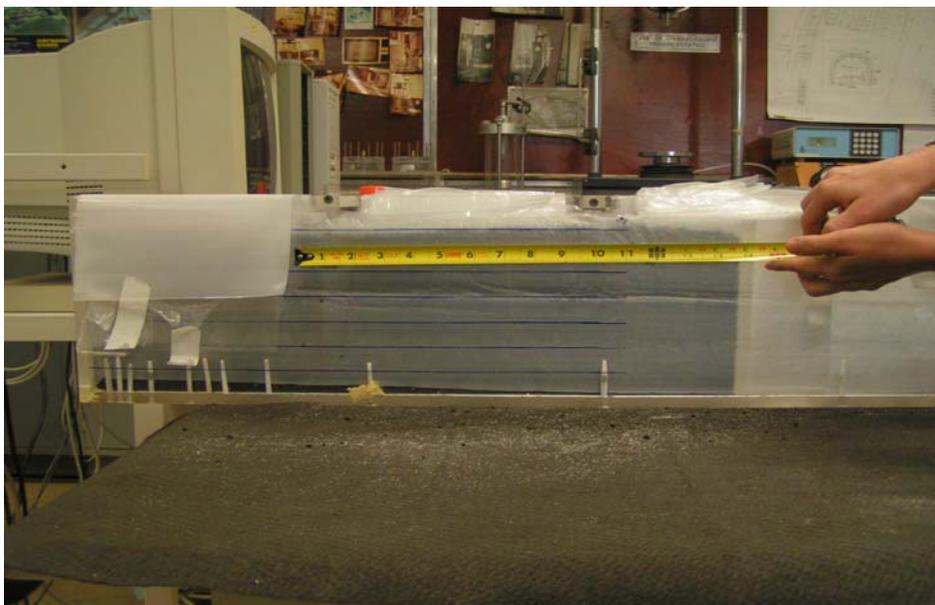
**Figura C- 16 Fotografía de la goma triturada, al final del ensayo activo**

**Tabla C- 10 Corrección por fricción para la goma triturada, ensayo activo**

<b>Corrección</b>	<b>Valor</b>
Fricción de las paredes	0.13
Fricción del muro	0.2
Total corrección por fricción	+ 0.33

**Tabla C- 11 Cálculo de la fuerza de fricción generada entre la goma triturada y las paredes del plexiglás cubiertas con plástico, en el ensayo pasivo.**

<b>Material Analizado</b>	Goma triturada	<b>UNIDADES</b>
<b>Ensayo</b>	Pasivo	
<b>Datos tomados del ensayo No</b>	Promedio	
<b>Estado del material</b>	Suelto	
<b>CALCULO DEL ESFUERZO HORIZONTAL</b>		
Angulo de friccion	11.3	
Ko	0.47	
Peso unitario del material	0.0185	<b>lb /in<sup>3</sup></b>
	32.00	<b>lb /ft<sup>3</sup></b>
Altura del material	6.563	<b>in</b>
<b>ESFUERZO HORIZONTAL EFECTIVO de la goma</b>	0.029	<b>lb /in<sup>2</sup></b>
Longitud final del area de falla	8.00	<b>in</b>
Area A1 pasiva	52.50	<b>in<sup>2</sup></b>
No de lados	2.00	
Area total	105.00	
<b>CALCULO DE FRICCION</b>		
$\delta$ medido	13.00	<b>Grados</b>
Tangente $\delta$	0.231	
<b>Fuerza de friccion total</b>	0.69	<b>libras</b>



**Figura C- 17 Fotografía de la goma triturada, al final del ensayo pasivo**

**Tabla C- 12 Corrección por fricción para la goma triturada, ensayo pasivo**

<b>Corrección</b>	<b>Valor</b>
Fricción de las paredes	0.69
Fricción del muro	0.2
Total corrección por fricción	- 0.89

**Tabla C- 13 Corrección por fricción para la mezcla 50% goma triturada -50% arena No 2,  
ensayo activo**

<b>Corrección</b>	<b>Valor</b>
Fricción de las paredes	0.54
Fricción del muro	0.2
Total corrección por fricción	+ 0.74

**Tabla C- 14 Corrección por fricción para la mezcla 50% goma triturada -50% arena No 2,  
ensayo pasivo**

<b>Corrección</b>	<b>Valor</b>
Fricción de las paredes	2.19
Fricción del muro	0.2
Total corrección por fricción	- 2.39

## **APÉNDICE D. Información suplementaria sobre el modelamiento del muro de contención**



**Figura D- 1 Fotografía antes de la prueba pasiva en la arena**



**Figura D- 2 Fotografía después de la prueba pasiva en la arena**



**Figura D- 3 Fotografía antes de la prueba pasiva en la goma triturada**



**Figura D- 4 Fotografía después de la prueba pasiva en la goma triturada**

## **APÉNDICE E. Diseño estructural muro de contención**

A continuación se presentan detalles sobre el diseño estructural de los muros de contención propuestos en el Capítulo 7, inicialmente se presenta el caso en el cual el relleno es un material granular convencional, luego se realiza el mismo análisis para un relleno con goma triturada 100% y finalmente se presenta el diseño para la mezcla 50% goma-50% arena. Las figuras que ilustran este análisis se encuentran consignadas en el Capítulo 7.

### **Ejemplo de calculo para muro con relleno granular convencional**

#### **Calculo de refuerzo para el cuerpo del muro**

1. Calculo de la presión lateral activa por medio de la siguiente ecuación.

$$P = \frac{1}{2} K * \gamma * H^2$$

Donde el peso unitario del suelo ( $\gamma$ ) es 98.5 lb/pie<sup>3</sup>, la altura del cuerpo del muro (H) corresponde a 11 pies, y la presión lateral de suelo (K) es igual a 0.321, reemplazando estos valores se obtiene una presión lateral activa de:

$$P = 1913 \text{ lb/pie o } P = 1.91 \text{ kips/pie}$$

2. Calculo de cuantía mínima ( $\rho b$ ).

$$\rho = 0.40 * \rho b$$

Donde:

$$\rho b = \frac{0.85 * B_1 * f'_c}{f_y} * \left( \frac{87000}{87000 + f_y} \right)$$

Reemplazando en la ecuación  $f'c = 3000$  psi,  $f_y = 60000$  psi y  $B_1 = 0.85$  se obtiene un valor de  $\rho b = 0.0214$  y de  $\rho = 0.0086$ .

3. Calculo de  $R_n$  inicial (control deflexión).

$$R_n = \rho * f_y \left(1 - \frac{1}{2}\right) * \rho * m$$

$$m = \frac{f_y}{0.85 f' c}$$

Con  $f'c = 3000$  psi,  $f_y = 60000$  psi se obtiene un valor de  $m = 23.53$  y  $R_n = 511$  psi.

4. Calculo de momento último del cuerpo del muro ( $M_u$ ).

$$M_u = 1.6 * (M_y)$$

$$M_y = 7.014 \text{ Kips-pie}$$

$$M_u = 11.2 \text{ Kips-pie}$$

5. Calculo de nuevo  $d$  requerido, reemplazando momento ultimo del cuerpo del muro ( $M_u = 11.2$  Kips-pie), coeficiente de reducción ( $\phi = 0.9$ ),  $R_n = 511$ , y profundidad del muro ( $b = 12$  pulgadas) en la siguiente ecuación:

$$R_n = \frac{M_u * (12000)}{\phi * b * d^2}$$

Se obtiene un valor  $d = 5$  pulgadas, con el cual se calcula el espesor de muro requerido ( $e$ ), para un cover de 2 pulgadas y varilla de 0.25 pulgadas.

$$e = d + \text{cover} + (\text{diámetro de la varilla})$$

$$e = 7.25 \text{ pulgadas}$$

Para este diseño se había propuesto inicialmente un espesor de muro ( $e = 10$  pulgadas) el cual estaría cumpliendo con lo requerido en el cálculo.

6. Cálculo de nuevo  $d$  requerido.

$$d = e - \text{cover} - (\text{diámetro de la varilla})$$

$$d = 7.75 \text{ pulgadas}$$

7. Cálculo de nueva cuantía, por medio de la cuantía original ( $\rho = 0.0086$ ),  $R_n$  original = 511 psi y  $R_n$  revisado = 208 psi.

$$\rho = \rho_{original} \frac{R_n \text{ revisado}}{R_n \text{ original}}$$

$$\rho = 0.0035$$

La cuantía mínima es el valor menor entre  $\rho = 0.005$  y  $1.33 * \rho_{calculado} = 0.0046$ .

8. El acero longitudinal del cuerpo del muro se calcula por medio de la siguiente fórmula:

$$A_s = \rho * b * d$$

$$A_s = 0.43 \text{ pulgada}^2$$

9. Calculo de longitud de desarrollo del refuerzo con gancho y espaciado.

$$L_d = \frac{0.02 * \psi_e * \lambda * f_y}{\sqrt{f'c}} * d_b$$

$$L_d = 13.4 \text{ pulgadas}$$

Altura de zapata requerida =  $L_d + \text{cover} + (\text{diámetro de la varilla})$

$$\text{Altura de zapata requerida} = 16.89 \text{ pulgadas} = 1.41 \text{ pie}$$

$$\text{Longitud de la barra} = 12.41 \text{ pie}$$

$$\text{Espaciado (s)} = \frac{\text{Area barra}}{A_s}$$

$$\text{Espaciado (s)} = 5.58 \text{ pulgadas} = 0.465 \text{ pie}$$

$$\text{Numero de barras} = 3.1 \text{ varillas por pie}$$

10. Chequeo por cortante

$$\phi * V_c = \phi * (2\sqrt{f'c}) * b * d$$

Reemplazando en la ecuación  $\phi = 0.85$ ,  $f'c = 3000 \text{ psi}$ ,  $b = 12 \text{ pulgadas}$ ,  $d = 7.5 \text{ pulgadas}$  se obtiene un valor de:

$$\phi V_c = 8.38 \text{ (cortante del material)}$$

Calculo de cortante generado:

$$V_u = \text{Factor de carga lateral} * P_a = 1.6 * 1.91 = 3.06 \text{ kips}$$

$$\phi V_c > V_u \quad \text{Cumple por cortante}$$

### Calculo de refuerzo para zapata trasera del muro

1. Calculo de momento último (Mu).

$$\text{Peso ultimo (Wu)} = 1.2 (\text{Peso del suelo} + \text{Peso de la zapata})$$

$$W_u = 1.54 \text{ Kips/ pie}$$

$$M_u = \frac{1}{2} * (W_u) * L^2$$

$$M_u = 27.7 \text{ Kips-pie}$$

2. Calculo de Rn, reemplazando momento ultimo (Mu = 27.7 Kips-pie), coeficiente de reducción ( $\phi = 0.9$ ), y profundidad del muro (b = 12 pulgadas) en la siguiente ecuación:

$$R_n = \frac{M_u * (12000)}{\phi * b * d^2}$$

$$R_n = 171.39 \text{ psi}$$

3. Calculo de nueva cuantía, con  $R_n = 171.39$  psi,  $f'_c = 3000$  psi,  $f_y = 60000$  psi.

$$\rho = \frac{1}{m} \left[ 1 - \sqrt{1 - \frac{2mR_n}{f_y}} \right]$$

$$m = \frac{f_y}{0.85 f'_c}$$

$$\rho = 0.0030$$

La cuantía mínima es el valor menor entre  $\rho = 0.005$  y  $1.33 * \rho_{\text{calculado}} = 0.0039$ .

4. El acero se calcula por medio de la siguiente formula:

$$A_s = \rho * b * d$$

$$A_s = 0.63 \text{ pulgadas}^2$$

5. Calculo de longitud de desarrollo del refuerzo sin gancho y espaciado.

$$L_d = \frac{3}{40} * \frac{f_y}{\sqrt{f'_c}} \frac{\psi_t * \psi_e * \psi_s * \lambda}{\left( \frac{c_b + K_{tr}}{d_b} \right)} * d_b * \eta$$

$$L_d = 18.1 \text{ pulgadas} = 1.5 \text{ pies}$$

$$\text{Longitud de la barra} = 7.34 \text{ pies}$$

$$Espaciado (s) = \frac{\text{Area barra}}{A_s}$$

$$Espaciado (s) = 3.8 \text{ pulgadas} = 0.316 \text{ pies}$$

$$\text{Numero de barras} = 4.2 \text{ varillas por pie}$$

#### 6. Chequeo por cortante

$$\phi * V_c = \phi * (2\sqrt{f'c}) * b * d$$

Reemplazando en la ecuación  $\phi = 0.75$ ,  $f'c = 3000$  psi,  $b = 12$  pulgadas,  $d = 13.4$  pulgadas se obtiene un valor de:

$$\phi V_c = 13.21 \text{ (cortante del material)}$$

Calculo de cortante generado:

$$V_u = \text{Peso ultimo} * L = 1.54 * 5.83 = 8.97 \text{ kips}$$

$$\phi V_c > V_u \quad \text{Cumple por cortante}$$

### Calculo de refuerzo parte delantera de zapata

#### 1. Calculo de momento último ( $M_u$ ).

$$Mu = 1.28 \text{ Kips-pie}$$

2. Calculo de  $R_n$ , reemplazando momento ultimo ( $Mu = 1.28 \text{ Kips-pie}$ ), coeficiente de reducción ( $\phi = 0.9$ ), y profundidad del muro ( $b = 12 \text{ pulgadas}$ ) en la siguiente ecuación:

$$R_n = \frac{Mu * (12000)}{\phi * b * d^2}$$

$$R_n = 7.94 \text{ psi}$$

3. Calculo de nueva cuantía, con  $R_n = 7.94 \text{ psi}$ ,  $f'_c = 3000 \text{ psi}$ ,  $f_y = 60000 \text{ psi}$ .

$$\rho = \frac{1}{m} \left[ 1 - \sqrt{1 - \frac{2mR_n}{f_y}} \right]$$

$$m = \frac{f_y}{0.85 f'_c}$$

$$\rho = 0.0001$$

La cuantía mínima es el valor menor entre  $\rho = 0.005$  y  $1.33 * \rho_{\text{calculado}} = 0.0002$ .

4. El acero se calcula por medio de la siguiente formula:

$$As = \rho * b * d$$

$$As = 0.03 \text{ pulgadas}^2$$

5. Calculo de longitud de desarrollo del refuerzo sin gancho y espaciado.

$$L_d = \frac{3}{40} * \frac{f_y}{\sqrt{f'c}} \frac{\psi_t * \psi_e * \psi_s * \lambda}{\left(\frac{cb + Ktr}{db}\right)} * db * \eta$$

$$L_d = 18.1 \text{ pulgadas} = 1.5 \text{ pies}$$

$$\text{Longitud de la barra} = 3.34 \text{ pies}$$

$$\text{Espaciado (s)} = \frac{\text{Area barra}}{A_s}$$

$$\text{Espaciado (s)} = 85 \text{ pulgadas} = 7.05 \text{ pies}$$

$$\text{Espaciado mínimo} = 18 \text{ pulgadas} = 1.5 \text{ pies}$$

$$\text{Numero de barras} = 1.7 \text{ varillas por pie}$$

6. Chequeo por cortante

$$\phi * V_c = \phi * \left(2\sqrt{f'c}\right) * b * d$$

Reemplazando en la ecuación  $\phi = 0.85$ ,  $f'c = 3000$  psi,  $b = 12$  pulgadas,  $d = 13.4$  pulgadas se obtiene un valor de:

$$\phi V_c = 14.97 \text{ (cortante del material)}$$

Calculo de cortante generado:

$$V_u = 3.24 \text{ kips}$$

$$\phi V_c > V_u \quad \text{Cumple por cortante}$$

### **Calculo de refuerzo por temperatura**

#### **Acero vertical por temperatura**

$$A_s = \rho * b * h$$

Cuantía mínima ( $\rho$ ) = 0.0015

Profundidad del muro (b) = 12 pulgadas

Espesor del muro (h) = 10 pulgadas

$$A_s = 0.18 \text{ pulgadas}^2$$

Espaciado (s) = 13 pulgadas = 1.11 pies

Numero de barras = 1.9 varillas por pie

#### **Acero transversal cuerpo de muro por temperatura**

$$A_s = \rho * b * h$$

Cuantía mínima ( $\rho$ ) = 0.0025

Profundidad del muro (b) = 12 pulgadas

Espesor del muro (h) = 10 pulgadas

$$A_s = 0.30 \text{ pulgadas}^2 \text{ (total)}$$

$$A_s = 0.20 \text{ pulgadas}^2 \text{ (adelante del muro)}$$

$$\text{Espaciado (s)} = 12 \text{ pulgadas} = 1 \text{ pies}$$

$$\text{Numero de barras} = 12 \text{ varillas por pie}$$

$$A_s = 0.10 \text{ pulgadas}^2 \text{ (atrás del muro)}$$

$$\text{Espaciado (s)} = 24 \text{ pulgadas} = 2 \text{ pies}$$

$$\text{Numero de barras} = 6 \text{ varillas por pie}$$

### **Acero transversal en zapata por temperatura**

$$A_s = \rho * b * h$$

$$\text{Cuantía mínima } (\rho) = 0.0025$$

$$\text{Profundidad del muro (b)} = 12 \text{ pulgadas}$$

$$\text{Altura zapata (h)} = 15.9 \text{ pulgadas}$$

$$A_s = 0.48 \text{ pulgadas}^2 \text{ (total)}$$

$$A_s = 0.32 \text{ pulgadas}^2 \text{ (arriba zapata)}$$

$$\text{Espaciado (s)} = 8 \text{ pulgadas} = 0.63 \text{ pies}$$

$$\text{Numero de barras} = 13.2 \text{ varillas por pie}$$

$$A_s = 0.16 \text{ pulgadas}^2 \text{ (abajo zapata)}$$

$$\text{Espaciado (s)} = 15 \text{ pulgadas} = 1.3 \text{ pies}$$

$$\text{Numero de barras} = 3.5 \text{ varillas por pie}$$

### Ejemplo de calculo para muro con relleno de goma triturada

#### Calculo de refuerzo para el cuerpo del muro

1. Calculo de la presión lateral activa por medio de la siguiente ecuación.

$$P = \frac{1}{2} K * \gamma * H^2$$

Donde el peso unitario de la goma ( $\gamma$ ) es 30 lb/pie<sup>3</sup>, la altura del cuerpo del muro (H) corresponde a 11 pies, y la presión lateral de suelo (K) es igual a 0.231, reemplazando estos valores se obtiene una presión lateral activa de:

$$P = 0.42 \text{ kips/pie}$$

2. Calculo de cuantía mínima ( $\rho b$ ).

$$\rho = 0.40 * \rho b$$

Donde:

$$\rho b = \frac{0.85 * B_1 * f'_c}{f_y} * \left( \frac{87000}{87000 + f_y} \right)$$

Reemplazando en la ecuación  $f'_c = 3000$  psi,  $f_y = 60000$  psi y  $B_1 = 0.85$  se obtiene un valor de  $\rho b = 0.0214$  y de  $\rho = 0.0086$ .

3. Calculo de Rn inicial (control deflexión).

$$R_n = \rho * f_y \left(1 - \frac{1}{2}\right) * \rho * m$$

$$m = \frac{f_y}{0.85 f' c}$$

Con  $f'c = 3000$  psi,  $f_y = 60000$  psi se obtiene un valor de  $m = 23.53$  y  $R_n = 511$  psi.

4. Calculo de momento último del cuerpo del muro ( $M_u$ ).

$$M_u = 1.6 * (M_y)$$

$$M_y = 1.54 \text{ Kips-pie}$$

$$M_u = 2.46 \text{ Kips-pie}$$

5. Calculo de nuevo  $d$  requerido, reemplazando momento ultimo del cuerpo del muro ( $M_u = 2.46$  Kips-pie), coeficiente de reducción ( $\phi = 0.9$ ),  $R_n = 511$ , y profundidad del muro ( $b = 12$  pulgadas) en la siguiente ecuación:

$$R_n = \frac{M_u * (12000)}{\phi * b * d^2}$$

Se obtiene un valor  $d = 2.31$  pulgadas, con el cual se calcula el espesor de muro requerido ( $e$ ), para un cover de 2 pulgadas y varilla de 0.25 pulgadas.

$$e = d + \text{cover} + (\text{diámetro de la varilla})$$

$$e = 4.6 \text{ pulgadas}$$

Para este diseño se había propuesto inicialmente un espesor de muro ( $e = 8$  pulgadas) el cual estaría cumpliendo con lo requerido en el calculo.

6. Calculo de nuevo d requerido.

$$d = e - \text{cover} - (\text{diámetro de la varilla})$$

$$d = 5.8 \text{ pulgadas}$$

7. Calculo de nueva cuantía, por medio de la cuantía original ( $\rho = 0.0086$ ),  $R_n$  original = 511 psi y  $R_n$  revisado = 82.66 psi.

$$\rho = \rho_{original} \frac{R_n \text{ revisado}}{R_n \text{ original}}$$

$$\rho = 0.0014$$

La cuantía mínima es el valor menor entre  $\rho = 0.005$  y  $1.33 * \rho_{calculado} = 0.0018$ .

8. El acero longitudinal del cuerpo del muro se calcula por medio de la siguiente formula:

$$A_s = \rho * b * d$$

$$A_s = 0.13 \text{ pulgada}^2$$

9. Calculo de longitud de desarrollo del refuerzo con gancho y espaciado.

$$L_d = \frac{0.02 * \psi_e * \lambda * f_y}{\sqrt{f'_c}} * db$$

$$L_d = 13.4 \text{ pulgadas}$$

Altura de zapata requerida =  $L_d + \text{cover} + (\text{diámetro de la varilla})$

$$\text{Altura de zapata requerida} = 16.89 \text{ pulgadas} = 1.41 \text{ pie}$$

$$\text{Longitud de la barra} = 12.41 \text{ pie}$$

$$\text{Espaciado (s)} = \frac{\text{Area barra}}{A_s}$$

$$\text{Espaciado (s)} = 18.9 \text{ pulgadas} = 1.6 \text{ pies}$$

$$\text{Espaciado mínimo} = 18 \text{ pulgadas} = 1.5 \text{ pies}$$

$$\text{Numero de barras} = 1.7 \text{ varillas por pies}$$

#### 10. Chequeo por cortante

$$\phi * V_c = \phi * (2\sqrt{f'c}) * b * d$$

Reemplazando en la ecuación  $\phi = 0.85$ ,  $f'c = 3000$  psi,  $b = 12$  pulgadas,  $d = 5.8$  pulgadas se obtiene un valor de:

$$\phi V_c = 6.42 \text{ (cortante del material)}$$

Calculo de cortante generado:

$$V_u = \text{Factor de carga lateral} * P_a = 1.6 * 0.42 = 1.98 \text{ kips}$$

$$\phi V_c > V_u \quad \text{Cumple por cortante}$$

**Calculo de refuerzo para zapata trasera del muro**

1. Calculo de momento último (Mu).

$$\text{Peso ultimo (Wu)} = 1.2 (\text{Peso del suelo} + \text{Peso de la zapata})$$

$$W_u = 0.63 \text{ Kips/ pie}$$

$$M_u = \frac{1}{2} * (W_u) * L^2$$

$$M_u = 6 \text{ Kips-pie}$$

2. Calculo de Rn, reemplazando momento ultimo (Mu = 6 Kips-pie), coeficiente de reducción ( $\phi = 0.9$ ), y profundidad del muro (b = 12 pulgadas) en la siguiente ecuación:

$$R_n = \frac{M_u * (12000)}{\phi * b * d^2}$$

$$R_n = 37 \text{ psi}$$

3. Calculo de nueva cuantía, con Rn = 37 psi, f'c = 3000 psi, fy = 60000 psi.

$$\rho = \frac{1}{m} \left[ 1 - \sqrt{1 - \frac{2mR_n}{f_y}} \right]$$

$$m = \frac{f_y}{0.85 f' c}$$

$$\rho = 0.0006$$

La cuantía mínima es el valor menor entre  $\rho = 0.005$  y  $1.33 * \rho_{\text{calculado}} = 0.0008$ .

4. El acero se calcula por medio de la siguiente formula:

$$A_s = \rho * b * d$$

$$A_s = 0.13 \text{ pulgadas}^2$$

5. Calculo de longitud de desarrollo del refuerzo sin gancho y espaciado.

$$L_d = \frac{3}{40} * \frac{f_y}{\sqrt{f' c}} \frac{\psi_t * \psi_e * \psi_s * \lambda}{\left( \frac{c_b + K_{tr}}{d_b} \right)} * d_b * \eta$$

$$L_d = 18.1 \text{ pulgadas} = 1.5 \text{ pies}$$

$$\text{Longitud de la barra} = 5.7 \text{ pies}$$

$$\text{Espaciado (s)} = \frac{\text{Area barra}}{A_s}$$

$$\text{Espaciado (s)} = 18.1 \text{ pulgadas} = 1.5 \text{ pies}$$

Espaciado mínimo = 18 pulgadas = 1.5 pies

Numero de barras = 1.7 varillas por pie

#### 6. Chequeo por cortante

$$\phi * V_c = \phi * (2\sqrt{f'c}) * b * d$$

Reemplazando en la ecuación  $\phi = 0.75$ ,  $f'c = 3000$  psi,  $b = 12$  pulgadas,  $d = 13.4$  pulgadas se obtiene un valor de:

$$\phi V_c = 13.21 \text{ (cortante del material)}$$

Calculo de cortante generado:

$$V_u = \text{Peso ultimo} * L = 0.63 * 4.2 = 2.7 \text{ kips}$$

$$\phi V_c > V_u \quad \text{Cumple por cortante}$$

#### Calculo de refuerzo parte delantera de zapata

1. Calculo de momento último ( $M_u$ ).

$$M_u = 0.4 \text{ Kips-pie}$$

2. Calculo de  $R_n$ , reemplazando momento ultimo ( $M_u = 0.4$  Kips-pie), coeficiente de reducción ( $\phi = 0.9$ ), y profundidad del muro ( $b = 12$  pulgadas) en la siguiente ecuación:

$$R_n = \frac{M_u * (12000)}{\phi * b * d^2}$$

$$R_n = 2.49 \text{ psi}$$

3. Calculo de nueva cuantía, con  $R_n = 2.49 \text{ psi}$ ,  $f'_c = 3000 \text{ psi}$ ,  $f_y = 60000 \text{ psi}$ .

$$\rho = \frac{1}{m} \left[ 1 - \sqrt{1 - \frac{2mR_n}{f_y}} \right]$$

$$m = \frac{f_y}{0.85 f'_c}$$

$$\rho = 0.00004$$

La cuantía mínima es el valor menor entre  $\rho = 0.005$  y  $1.33 * \rho_{\text{calculado}} = 0.00006$ .

4. El acero se calcula por medio de la siguiente formula:

$$A_s = \rho * b * d$$

$$A_s = 0.01 \text{ pulgadas}^2$$

5. Calculo de longitud de desarrollo del refuerzo sin gancho y espaciado.

$$L_d = \frac{3}{40} * \frac{f_y}{\sqrt{f'c}} \frac{\psi_t * \psi_e * \psi_s * \lambda}{\left(\frac{cb + Ktr}{db}\right)} * db * \eta$$

$$L_d = 18.1 \text{ pulgadas} = 1.5 \text{ pies}$$

$$\text{Longitud de la barra} = 3.17 \text{ pies}$$

$$\text{Espaciado (s)} = \frac{\text{Area barra}}{A_s}$$

$$\text{Espaciado (s)} = 270 \text{ pulgadas} = 22.5 \text{ pies}$$

$$\text{Espaciado m\u00ednimo} = 18 \text{ pulgadas} = 1.5 \text{ pies}$$

$$\text{Numero de barras} = 1.7 \text{ varillas por pie}$$

#### 6. Chequeo por cortante

$$\phi * V_c = \phi * \left(2\sqrt{f'c}\right) * b * d$$

Reemplazando en la ecuaci\u00f3n  $\phi = 0.85$ ,  $f'c = 3000$  psi,  $b = 12$  pulgadas,  $d = 13.4$  pulgadas se obtiene un valor de:

$$\phi V_c = 14.97 \text{ (cortante del material)}$$

Calculo de cortante generado:

$$V_u = 1.05 \text{ kips}$$

$\phi V_c > V_u$  Cumple por cortante

### **Calculo de refuerzo por temperatura**

#### **Acero vertical por temperatura**

$$A_s = \rho * b * h$$

Cuantía mínima ( $\rho$ ) = 0.0015

Profundidad del muro (b) = 12 pulgadas

Espesor del muro (h) = 8 pulgadas

$$A_s = 0.14 \text{ pulgadas}^2$$

Espaciado (s) = 17 pulgadas = 1.4 pies

Numero de barras = 1.7 varillas por pie

#### **Acero transversal cuerpo de muro por temperatura**

$$A_s = \rho * b * h$$

Cuantía mínima ( $\rho$ ) = 0.0025

Profundidad del muro (b) = 12 pulgadas

Espesor del muro (h) = 8 pulgadas

$$A_s = 0.24 \text{ pulgadas}^2 \text{ (total)}$$

$A_s = 0.16$  pulgadas<sup>2</sup> (adelante del muro)

Espaciado (s) = 15 pulgadas = 1.25 pies

Numero de barras = 10 varillas por pie

$A_s = 0.08$  pulgadas<sup>2</sup> (atrás del muro)

Espaciado (s) = 30 pulgadas = 2.5 pies

Numero de barras = 5.4 varillas por pie

### **Acero transversal en zapata por temperatura**

$$A_s = \rho * b * h$$

Cuantía mínima ( $\rho$ ) = 0.0025

Profundidad del muro (b) = 12 pulgadas

Altura zapata (h) = 15.9 pulgadas

$$A_s = 0.48 \text{ pulgadas}^2 \text{ (total)}$$

$A_s = 0.32$  pulgadas<sup>2</sup> (arriba zapata)

Espaciado (s) = 8 pulgadas = 0.63 pies

Numero de barras = 10.3 varillas por pie

$A_s = 0.16$  pulgadas<sup>2</sup> (abajo zapata)

Espaciado (s) = 15 pulgadas = 1.3 pies

Numero de barras = 3.5 varillas por pie

**Ejemplo de calculo para muro con relleno de mezcla 50% goma-50% arena**

**Calculo de refuerzo para el cuerpo del muro**

1. Calculo de la presión lateral activa por medio de la siguiente ecuación.

$$P = \frac{1}{2} K * \gamma * H^2$$

Donde el peso unitario del suelo ( $\gamma$ ) es 90.5 lb/pie<sup>3</sup>, la altura del cuerpo del muro (H) corresponde a 11 pies, y la presión lateral de suelo (K) es igual a 0.28, reemplazando estos valores se obtiene una presión lateral activa de:

$$P = 1533 \text{ lb/pie o } P = 1.53 \text{ kips/pie}$$

2. Calculo de cuantía mínima ( $\rho b$ ).

$$\rho = 0.40 * \rho b$$

Donde: 
$$\rho b = \frac{0.85 * B_1 * f'_c}{f_y} * \left( \frac{87000}{87000 + f_y} \right)$$

Reemplazando en la ecuación  $f'_c = 3000$  psi,  $f_y = 60000$  psi y  $B_1 = 0.85$  se obtiene un valor de  $\rho b = 0.0214$  y de  $\rho = 0.0086$ .

3. Calculo de  $R_n$  inicial (control deflexión).

$$R_n = \rho * f_y \left( 1 - \frac{1}{2} \right) * \rho * m$$

$$m = \frac{f_y}{0.85 f'_c}$$

Con  $f'_c = 3000$  psi,  $f_y = 60000$  psi se obtiene un valor de  $m = 23.53$  y  $R_n = 511$  psi.

4. Calculo de momento último del cuerpo del muro ( $M_u$ ).

$$M_u = 1.6 * (M_y)$$

$$M_y = 5.62 \text{ Kips-pie}$$

$$M_u = 8.99 \text{ Kips-pie}$$

5. Calculo de nuevo  $d$  requerido, reemplazando momento ultimo del cuerpo del muro ( $M_u = 8.99$  Kips-pie), coeficiente de reducción ( $\phi = 0.9$ ),  $R_n = 511$ , y profundidad del muro ( $b = 12$  pulgadas) en la siguiente ecuación:

$$R_n = \frac{M_u * (12000)}{\phi * b * d^2}$$

Se obtiene un valor  $d = 4.42$  pulgadas, con el cual se calcula el espesor de muro requerido ( $e$ ), para un cover de 2 pulgadas y varilla de 0.25 pulgadas.

$$e = d + \text{cover} + (\text{diámetro de la varilla})$$

$$e = 6.7 \text{ pulgadas}$$

Para este diseño se había propuesto inicialmente un espesor de muro ( $e = 10$  pulgadas) el cual estaría cumpliendo con lo requerido en el calculo.

6. Calculo de nuevo d requerido.

$$d = e - \text{cover} - (\text{diámetro de la varilla})$$

$$d = 7.75 \text{ pulgadas}$$

7. Calculo de nueva cuantía, por medio de la cuantía original ( $\rho = 0.0086$ ), Rn original = 511 psi y Rn revisado = 166.38 psi.

$$\rho = \rho_{original} \frac{Rn \text{ revisado}}{Rn \text{ original}}$$

$$\rho = 0.0028$$

La cuantía mínima es el valor menor entre  $\rho = 0.005$  y  $1.33 * \rho_{calculado} = 0.0037$ .

8. El acero longitudinal del cuerpo del muro se calcula por medio de la siguiente formula:

$$As = \rho * b * d$$

$$As = 0.34 \text{ pulgada}^2$$

9. Calculo de longitud de desarrollo del refuerzo con gancho y espaciado.

$$Ld = \frac{0.02 * \psi_e * \lambda * f_y}{\sqrt{f'_c}} * db$$

$$Ld = 13.4 \text{ pulgadas}$$

Altura de zapata requerida =  $L_d + \text{cover} + (\text{diámetro de la varilla})$

Altura de zapata requerida = 16.89 pulgadas = 1.41 pie

Longitud de la barra = 12.41 pie

$$\text{Espaciado (s)} = \frac{\text{Area barra}}{A_s}$$

Espaciado (s) = 6.97 pulgadas = 0.58 pie

Numero de barras = 2.7 varillas por pie

#### 10. Chequeo por cortante

$$\phi * V_c = \phi * (2\sqrt{f'c}) * b * d$$

Reemplazando en la ecuación  $\phi = 0.85$ ,  $f'c = 3000$  psi,  $b = 12$  pulgadas,  $d = 7.75$  pulgadas se obtiene un valor de:

$$\phi V_c = 8.66 \text{ (cortante del material)}$$

Calculo de cortante generado:

$$V_u = \text{Factor de carga lateral} * P_a = 1.6 * 1.53 = 2.45 \text{ kips}$$

$$\phi V_c > V_u \quad \text{Cumple por cortante}$$

**Calculo de refuerzo para zapata trasera del muro**

1. Calculo de momento último (Mu).

$$\text{Peso ultimo (Wu)} = 1.2 (\text{Peso del suelo} + \text{Peso de la zapata})$$

$$Wu = 1.43 \text{ Kips/ pie}$$

$$Mu = \frac{1}{2} * (Wu) * L^2$$

$$Mu = 25.8 \text{ Kips-pie}$$

2. Calculo de Rn, reemplazando momento ultimo (Mu = 25.8 Kips-pie), coeficiente de reducción ( $\phi = 0.9$ ), y profundidad del muro (b = 12 pulgadas) en la siguiente ecuación:

$$Rn = \frac{Mu * (12000)}{\phi * b * d^2}$$

$$Rn = 159.62 \text{ psi}$$

3. Calculo de nueva cuantía, con Rn = 159.62 psi, f'c = 3000 psi, fy = 60000 psi.

$$\rho = \frac{1}{m} \left[ 1 - \sqrt{1 - \frac{2mRn}{fy}} \right]$$

$$m = \frac{f_y}{0.85 f' c}$$

$$\rho = 0.0027$$

La cuantía mínima es el valor menor entre  $\rho = 0.005$  y  $1.33 * \rho_{\text{calculado}} = 0.0037$ .

4. El acero se calcula por medio de la siguiente formula:

$$A_s = \rho * b * d$$

$$A_s = 0.59 \text{ pulgadas}^2$$

5. Calculo de longitud de desarrollo del refuerzo sin gancho y espaciado.

$$L_d = \frac{3}{40} * \frac{f_y}{\sqrt{f' c}} \frac{\psi_t * \psi_e * \psi_s * \lambda}{\left( \frac{c_b + K_{tr}}{d_b} \right)} * d_b * \eta$$

$$L_d = 18.1 \text{ pulgadas} = 1.5 \text{ pies}$$

$$\text{Longitud de la barra} = 7.34 \text{ pies}$$

$$\text{Espaciado (s)} = \frac{\text{Area barra}}{A_s}$$

$$\text{Espaciado (s)} = 4.1 \text{ pulgadas} = 0.34 \text{ pies}$$

Numero de barras = 3.9 varillas por pie

6. Chequeo por cortante

$$\phi * V_c = \phi * (2\sqrt{f'c}) * b * d$$

Reemplazando en la ecuación  $\phi = 0.75$ ,  $f'c = 3000$  psi,  $b = 12$  pulgadas,  $d = 13.4$  pulgadas se obtiene un valor de:

$$\phi V_c = 13.21 \text{ (cortante del material)}$$

Calculo de cortante generado:

$$V_u = \text{Peso ultimo} * L = 1.43 * 5.83 = 8.35 \text{ kips}$$

$$\phi V_c > V_u \quad \text{Cumple por cortante}$$

### **Calculo de refuerzo parte delantera de zapata**

1. Calculo de momento último ( $M_u$ ).

$$M_u = 1.09 \text{ Kips-pie}$$

2. Calculo de  $R_n$ , reemplazando momento ultimo ( $M_u = 1.09$  Kips-pie), coeficiente de reducción ( $\phi = 0.9$ ), y profundidad del muro ( $b = 12$  pulgadas) en la siguiente ecuación:

$$R_n = \frac{M_u * (12000)}{\phi * b * d^2}$$

$$R_n = 6.75 \text{ psi}$$

3. Calculo de nueva cuantía, con  $R_n = 6.75 \text{ psi}$ ,  $f'_c = 3000 \text{ psi}$ ,  $f_y = 60000 \text{ psi}$ .

$$\rho = \frac{1}{m} \left[ 1 - \sqrt{1 - \frac{2mR_n}{f_y}} \right]$$

$$m = \frac{f_y}{0.85 f'_c}$$

$$\rho = 0.0001$$

La cuantía mínima es el valor menor entre  $\rho = 0.005$  y  $1.33 * \rho_{\text{calculado}} = 0.00015$ .

4. El acero se calcula por medio de la siguiente formula:

$$A_s = \rho * b * d$$

$$A_s = 0.02 \text{ pulgadas}^2$$

5. Calculo de longitud de desarrollo del refuerzo sin gancho y espaciado.

$$L_d = \frac{3}{40} * \frac{f_y}{\sqrt{f'c}} \frac{\psi_t * \psi_e * \psi_s * \lambda}{\left(\frac{cb + Ktr}{db}\right)} * db * \eta$$

$$L_d = 18.1 \text{ pulgadas} = 1.5 \text{ pies}$$

$$\text{Longitud de la barra} = 3.34 \text{ pies}$$

$$\text{Espaciado (s)} = \frac{\text{Area barra}}{A_s}$$

$$\text{Espaciado (s)} = 100 \text{ pulgadas} = 8.305 \text{ pies}$$

$$\text{Espaciado m\u00ednimo} = 18 \text{ pulgadas} = 1.5 \text{ pies}$$

$$\text{Numero de barras} = 1.7 \text{ varillas por pie}$$

#### 6. Chequeo por cortante

$$\phi * V_c = \phi * (2\sqrt{f'c}) * b * d$$

Reemplazando en la ecuaci\u00f3n  $\phi = 0.85$ ,  $f'c = 3000$  psi,  $b = 12$  pulgadas,  $d = 13.4$  pulgadas se obtiene un valor de:

$$\phi V_c = 14.97 \text{ (cortante del material)}$$

Calculo de cortante generado:

$$V_u = 2.85 \text{ kips}$$

$$\phi V_c > V_u \quad \text{Cumple por cortante}$$

### Calculo de refuerzo por temperatura

#### Acero vertical por temperatura

$$A_s = \rho * b * h$$

Cuantía mínima ( $\rho$ ) = 0.0015

Profundidad del muro (b) = 12 pulgadas

Espesor del muro (h) = 10 pulgadas

$$A_s = 0.18 \text{ pulgadas}^2$$

Espaciado (s) = 13 pulgadas = 1.11 pies

Numero de barras = 1.9 varillas por pie

#### Acero transversal cuerpo de muro por temperatura

$$A_s = \rho * b * h$$

Cuantía mínima ( $\rho$ ) = 0.0025

Profundidad del muro (b) = 12 pulgadas

Espesor del muro (h) = 10 pulgadas

$$A_s = 0.30 \text{ pulgadas}^2 \text{ (total)}$$

$A_s = 0.20$  pulgadas<sup>2</sup> (adelante del muro)

Espaciado (s) = 12 pulgadas = 1 pies

Numero de barras = 12 varillas por pie

$A_s = 0.10$  pulgadas<sup>2</sup> (atrás del muro)

Espaciado (s) = 24 pulgadas = 2 pies

Numero de barras = 6 varillas por pie

### **Acero transversal en zapata por temperatura**

$$A_s = \rho * b * h$$

Cuantía mínima ( $\rho$ ) = 0.0025

Profundidad del muro (b) = 12 pulgadas

Altura zapata (h) = 15.9 pulgadas

$$A_s = 0.48 \text{ pulgadas}^2 \text{ (total)}$$

$A_s = 0.32$  pulgadas<sup>2</sup> (arriba zapata)

Espaciado (s) = 8 pulgadas = 0.63 pies

Numero de barras = 13.2 varillas por pie

$A_s = 0.16$  pulgadas<sup>2</sup> (abajo zapata)

Espaciado (s) = 15 pulgadas = 1.3 pies

Numero de barras = 3.5 varillas por pie