

# **EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE MEZCLA DE GOMA TRITURADA Y ARENA OTTAWA**

Por

Luis Andrés Franco Nieves

Proyecto sometido en cumplimiento de los requisitos para el grado de

**MAESTRIA EN INGENIERÍA**  
en  
Ingeniería Civil

**UNIVERSIDAD DE PUERTO RICO**  
**RECINTO UNIVERSITARIO DE MAYAGÜEZ**

**JULIO 2012**

Aprobado por:

\_\_\_\_\_  
Beatriz I. Camacho Padrón, PhD  
Presidenta, Comité Graduado

\_\_\_\_\_  
Fecha

\_\_\_\_\_  
Ricardo Ramos Cabeza, PhD  
Miembro, Comité Graduado

\_\_\_\_\_  
Fecha

\_\_\_\_\_  
Luis E. Suárez Colche, PhD  
Miembro, Comité Graduado

\_\_\_\_\_  
Fecha

\_\_\_\_\_  
Nayda G. Santiago Santiago, PhD  
Representante de Escuela Graduada

\_\_\_\_\_  
Fecha

\_\_\_\_\_  
Ismael Pagán Trinidad, M.Sc.  
Director, Departamento de Ingeniería Civil y Agrimensura

\_\_\_\_\_  
Fecha

## ABSTRACT

During this investigation the effect on the mechanical properties of Ottawa sand when different percentages of shredded tires added to the sand specimens was studied. In addition, an alternative for recycling shredded tires as backfill material for retaining walls was analyzed. Shredded tires are considered a cost effective material that has the advantages of having a low unit weight and good drainage properties. As part of this investigation, different percentages of shredded tire was mixed with Ottawa sand to study the effect it has on the geotechnical properties of this sand such as particle size, unit weight, specific gravity, void ratio, permeability, cohesion, angle of internal friction, and initial tangent modulus. The geotechnical properties of a soil are fundamental for designing, modeling and solving a variety of engineering problems. Therefore, the results of this research were used to evaluate the behavior of a cantilever retaining wall and a mechanically stabilized earth wall.

It was observed that increasing the amount of shredded tires in Ottawa sand specimens causes a decrease in the sample's unit weight. The permeability of the Ottawa sand specimens, shredded tires specimens and specimens with different percentages of shredded tires were found to be very close and similar to values reported in the literature for granular material. The permeability varies between  $8.04 \times 10^{-2}$  and  $6.17 \times 10^{-2}$  cm/seg. Adding shredded tires to Ottawa sand specimens at 10% and 20% by volume increases the angle of internal friction of the sand specimens when failure is defined at large deformations ( $\epsilon_a = 20\%$ ) by as much as  $9^\circ$ , this increment leads to an increase in the soil resistance; while the effect of adding shredded tires in sand

specimens when failure is defined at low deformations ( $\epsilon_a < 4\%$ ) is to decrease the angle of internal friction of the Ottawa sand specimens.

The results for the analysis of the retaining structures were found to be favorable for the different percentages of shredded tires studied and the different conditions analyzed during this investigation. However, the results obtained suggest to limit the amount of shredded tires added to the Ottawa sand to percentages less than or equal to 20%.

## RESUMEN

Durante esta investigación se estudió el efecto que tiene en las propiedades mecánicas de la arena Ottawa el añadir diferentes porcentajes de goma triturada. En adición, se analizó una alternativa para el reciclaje de neumáticos triturados utilizando goma triturada como material de relleno en muros de contención. La goma triturada se considera un material costo efectivo y tiene la ventaja de ser un material de bajo peso unitario y buen drenaje. Como parte de esta investigación, la goma triturada fue mezclada a distintos porcentajes con arena Ottawa para ver el efecto que tiene en las propiedades geotécnicas de dicha arena tales como granulometría, peso unitario, gravedad específica, razón de vanos, permeabilidad, cohesión, ángulo de fricción interna y módulo tangente inicial. Las propiedades geotécnicas del suelo son fundamentales para poder diseñar, modelar y resolver problemas ingenieriles. Por tal motivo, los resultados de esta investigación se utilizaron para evaluar el comportamiento de muros de contención al voladizo y muros mecánicamente estabilizados utilizando mezcla de goma triturada con arena como material de relleno.

Se observó que aumentar el porcentaje de goma triturada en la muestra de arena Ottawa generó una disminución en el peso unitario. La permeabilidad de la goma triturada, la arena Ottawa y mezclas a distintas proporciones reportaron valores muy similares indicativo de materiales granulares, variando entre  $8.04 \times 10^{-2}$  y  $6.17 \times 10^{-2}$  cm/seg. Añadir goma triturada a la arena Ottawa a 10% y 20% por volumen genera un aumento en el ángulo de fricción interna del suelo cuando el análisis es realizado a grandes deformaciones ( $\epsilon=20\%$ ) de alrededor de  $9^\circ$ , lo cual se traduce a un incremento en resistencia, mientras que a bajas deformaciones ( $\epsilon < 4\%$ ) el efecto es disminuir la resistencia del material.

El análisis de muros de contención resultó ser favorable para los diferentes porcentajes de goma estudiados y para las condiciones analizadas en esta investigación. Sin embargo, los resultados obtenidos durante esta investigación sugieren limitar el porcentaje de goma a ser añadido a la arena Ottawa a valores menores o iguales al 20%.

A mi padre Francisco Franco  
quien me ayudó en cada etapa de este recorrido.  
A mi madre María Teresa y mis hermanos Jorge y Mauricio  
por brindarme su apoyo incondicional.

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a la Doctora Beatriz I. Camacho por ser mi consejera y trabajar conmigo a lo largo de esta investigación. Al señor Jaime Ramírez, técnico del laboratorio de suelos, quien colaboró a lo largo de toda la etapa experimental de ésta investigación y la transmisión de sus conocimientos ha permitido mi crecimiento profesional. Agradezco el apoyo económico obtenido mediante ayudantías ofrecidas por la Universidad de Puerto Rico. Finalmente deseo agradecer a toda mi familia por su apoyo incondicional.

# Tabla de Contenido

ABSTRACT .....	II
RESUMEN .....	IV
AGRADECIMIENTOS .....	VII
LISTA DE TABLAS.....	X
LISTA DE FIGURAS.....	XII
LISTA DE ACRÓNIMOS.....	XVII
<b>CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
1.1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.2 MOTIVACIÓN.....	2
1.3 OBJETIVOS .....	3
1.4 ORGANIZACIÓN.....	4
<b>CAPÍTULO 2. REVISIÓN DE LITERATURA .....</b>	<b>6</b>
2.1 INTRODUCCIÓN.....	6
2.2 PROPIEDADES MECÁNICAS DE ARENA, GOMA TRITURADA Y MEZCLA DE AMBOS COMPONENTES .....	6
2.3 PROPIEDADES DINÁMICAS DE MEZCLA DE GOMA TRITURADA Y ARENA OTTAWA .....	11
<b>CAPÍTULO 3. PROGRAMA EXPERIMENTAL.....</b>	<b>13</b>
3.1 INTRODUCCIÓN.....	13
3.2 FORMACIÓN DE MUESTRAS.....	14
3.3 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LOS MATERIALES UTILIZADOS EN LA INVESTIGACIÓN.....	17
3.3.1 <i>Arena Silíceo Ottawa</i> .....	17
3.3.2 <i>Miga de Goma</i> .....	18
3.4 DESCRIPCIÓN DE LAS PRUEBAS DE LABORATORIO.....	19
3.4.1 <i>Granulometría</i> .....	19
3.4.2 <i>Gravedad Específica</i> .....	20
3.4.3 <i>Peso Unitario Máximo y Mínimo</i> .....	21
3.4.4 <i>Permeabilidad</i> .....	23
3.4.5 <i>Corte Directo</i> .....	27
3.4.6 <i>Resistencia drenada del suelo</i> .....	31
3.4.7 <i>Módulo Tangente Inicial</i> .....	39
<b>CAPÍTULO 4. CONCEPTOS TEÓRICOS- MUROS DE CONTENCIÓN.....</b>	<b>41</b>
4.1 INTRODUCCIÓN.....	41
4.2 MURO DE CONTENCIÓN AL VOLADIZO.....	41
4.3 MURO DE CONTENCIÓN MECÁNICAMENTE ESTABILIZADO (MSE WALL) .....	42
4.4 ANÁLISIS DEL EMPUJE DE TIERRAS O PRESIÓN LATERAL.....	45
4.4.1 <i>(LRFD) Diseño por Factores de Carga y Resistencia</i> .....	50
4.5 ANÁLISIS DE MURO DE CONTENCIÓN MECÁNICAMENTE ESTABILIZADO (MSE WALL) .....	53
4.5.1 <i>Estabilidad Externa</i> .....	55
4.5.2 <i>Estabilidad Interna</i> .....	61
4.6 ANÁLISIS DE MURO EN VOLADIZO .....	71
<b>CAPÍTULO 5. RESULTADOS EXPERIMENTALES .....</b>	<b>75</b>
5.1 INTRODUCCIÓN.....	75
5.2 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO .....	76



5.3	GRAVEDAD ESPECÍFICA .....	77
5.4	PESO UNITARIO MÁXIMO Y MÍNIMO .....	78
5.5	CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA.....	80
5.6	PRUEBA DE CORTE DIRECTO .....	82
5.6.1	<i>Comportamiento Esfuerzo - Desplazamiento</i> .....	83
5.6.2	<i>Curvas Desplazamiento Vertical – Desplazamiento Horizontal</i> .....	90
5.6.3	<i>Parámetros de Resistencia al Corte</i> .....	93
5.7	PRUEBA TRIAXIAL .....	96
5.7.1	<i>Comportamiento Esfuerzo - Deformación</i> .....	98
5.7.2	<i>Parámetros de Resistencia al Corte</i> .....	105
5.8	MÓDULO TANGENTE INICIAL .....	112
5.9	COMPARACIÓN CON INVESTIGACIONES PREVIAS .....	113
<b>CAPÍTULO 6.</b>	<b>RESULTADOS ANALÍTICOS .....</b>	<b>117</b>
6.1	INTRODUCCIÓN .....	117
6.2	EJEMPLO DEL ANÁLISIS DE UN MURO DE CONTENCIÓN MSE .....	118
6.3	EJEMPLO DEL ANÁLISIS DE UN MURO EN VOLADIZO.....	130
<b>CAPÍTULO 7.</b>	<b>RESUMEN Y CONCLUSIONES.....</b>	<b>138</b>
7.1	INTRODUCCIÓN .....	138
7.2	RESUMEN .....	138
7.3	CONTRIBUCIONES.....	140
7.3.1	<i>Propiedades índices</i> .....	140
7.3.2	<i>Permeabilidad</i> .....	141
7.3.3	<i>Curvas esfuerzo deformación</i> .....	142
7.3.4	<i>Parámetros de resistencia</i> .....	143
7.3.5	<i>Muros de contención y muros mecánicamente estabilizados - LRFD</i> .....	144
7.4	RECOMENDACIONES PARA FUTURAS INVESTIGACIONES .....	145
<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>147</b>	
<b>APÉNDICE A – PROCEDIMIENTO DE SUB-COMPACTACIÓN.....</b>	<b>150</b>	
<b>APÉNDICE B – ANÁLISIS DE TAMICES .....</b>	<b>163</b>	
<b>APÉNDICE C - PESO UNITARIO MÍNIMO Y MÁXIMO .....</b>	<b>164</b>	
<b>APÉNDICE D – GRAVEDAD ESPECÍFICA .....</b>	<b>175</b>	
<b>APÉNDICE E – PERMEABILIDAD.....</b>	<b>178</b>	
<b>APÉNDICE F – SUB-COMPACTACION (PERMEABILIDAD, CORTE DIRECTO, TRIAXIAL).....</b>	<b>181</b>	
<b>APÉNDICE G – CORTE DIRECTO .....</b>	<b>182</b>	
<b>APÉNDICE H – TRIAXIAL .....</b>	<b>210</b>	

# Lista de Tablas

TABLA 2.1	ANÁLISIS ESTABILIDAD DEL MURO (CECICH ET AL. 1996) .....	7
TABLA 2.2	RESUMEN DE LOS DATOS DE RESISTENCIA Y ELASTICIDAD (WU ET AL. 1997) .....	7
TABLA 2.3	REPRESENTACIÓN ESTADÍSTICA DE LAS PROPIEDADES GEOTÉCNICAS DE GOMA TRITURADA (REDDY Y MARELLA, 2001) .....	9
TABLA 2.4	VALORES DE MÓDULO DE RIGIDEZ (G) Y RAZÓN AMORTIGUAMIENTO (D) PARA DISTINTOS PORCENTAJES DE MEZCLA DE GOMA TRITURADA Y ARENA OTTAWA (ZHENG Y SUTTER, 2000)).....	12
TABLA 4.1	FACTORES DE RESISTENCIA PARA LA ESTABILIDAD EXTERNA DE MUROS EN VOLADIZO Y MECÁNICAMENTE ESTABILIZADOS, $\phi$ (FHWA, 2009).....	52
TABLA 4.2	FACTORES DE CARGA PARA CARGAS PERMANENTES $\gamma_i$ (FHWA, 2009) .....	52
TABLA 4.3	FACTORES DE RESISTENCIA PARA LA ESTABILIDAD EXTERNA E INTERNA PARA MUROS MECÁNICAMENTE ESTABILIZADOS, $\phi$ (FHWA, 2009).....	55
TABLA 4.4	FACTORES DE CAPACIDAD DE CARGA (FHWA, 2009) .....	60
TABLA 5.1	VALORES DE GRAVEDAD ESPECÍFICA MEDIDA EN EL LABORATORIO A DISTINTOS PORCENTAJES DE GOMA TRITURADA.....	78
TABLA 5.2	RESUMEN DE LOS RESULTADOS DE RAZÓN DE VANOS MÁXIMA Y MÍNIMA Y PESO UNITARIO MÁXIMO Y MÍNIMO PARA DISTINTOS PORCENTAJES DE GOMA TRITURADA.....	80
TABLA 5.3	VALORES DE PERMEABILIDAD MEDIDOS EN EL LABORATORIO A DISTINTOS PORCENTAJES DE GOMA TRITURADA .....	82
TABLA 5.4	ESFUERZO CORTANTE Y DESPLAZAMIENTO DE FALLA OBTENIDOS DE PRUEBAS DE CORTE DIRECTO PARA MUESTRAS DE ARENA OTTAWA, GOMA TRITURADA Y MEZCLA DE AMBOS MATERIALES .....	83
TABLA 5.5	ESFUERZO CORTANTE MEDIDO EN EL LABORATORIO A BAJOS DESPLAZAMIENTOS (<0.06 PULG) MEDIANTE LA PRUEBA DE CORTE DIRECTO .....	87
TABLA 5.6	ESFUERZO CORTANTE MEDIDO EN EL LABORATORIO A GRANDES DESPLAZAMIENTOS (0.25 PULG) MEDIANTE LA PRUEBA DE CORTE DIRECTO .....	88
TABLA 5.7	PARÁMETROS DE RESISTENCIA AL CORTE OBTENIDOS DE LA PRUEBA DE CORTE DIRECTO A ALTOS DESPLAZAMIENTOS HORIZONTALES ( $\Delta H = 0.25$ PULG) .....	94
TABLA 5.8	PARÁMETROS DE RESISTENCIA AL CORTE OBTENIDOS DE LA PRUEBA DE CORTE DIRECTO A BAJOS DESPLAZAMIENTOS HORIZONTALES ( $\Delta H < 0.06$ PULG) .....	95

TABLA 5.9	ESFUERZO DESVIADOR Y DEFORMACIÓN AXIAL DE FALLA OBTENIDOS DE PRUEBAS TRIAXIALES TIPO CD PARA MUESTRAS DE ARENA OTTAWA, GOMA TRITURADA Y MEZCLA DE AMBOS MATERIALES A DIFERENTES PORCENTAJES .....	97
TABLA 5.10	COMPARACION DEL ESFUERZO DESVIADOR MEDIDO EN EL LABORATORIO A BAJAS DEFORMACIONES ( $E < 4$ ) MEDIANTE LA PRUEBA TRIAXIAL TIPO CD PARA MUESTRAS DE ARENA OTTAWA MEZCLADAS CON DIFERENTES PORCENTAJES .....	102
TABLA 5.11	COMPARACION DEL ESFUERZO DESVIADOR MEDIDO EN EL LABORATORIO A GRANDES DEFORMACIONES ( $E = 20\%$ ) MEDIANTE LA PRUEBA TRIAXIAL TIPO CD PARA MUESTRAS DE ARENA OTTAWA MEZCLADAS CON DIFERENTES PORCENTAJES .....	103
TABLA 5.12	PARÁMETROS DE RESISTENCIA AL CORTE OBTENIDOS DE LA PRUEBA TRIAXIAL A BAJAS DEFORMACIONES UNITARIAS ( $E = 4\%$ ).....	110
TABLA 5.13	PARÁMETROS DE RESISTENCIA AL CORTE OBTENIDOS DE LA PRUEBA TRIAXIAL A ALTAS DEFORMACIONES UNITARIAS ( $E = 20\%$ ).....	110
TABLA 5.14	MÓDULO TANGENTE INICIAL, $E_t$ , PARA MUESTRAS DE GOMA TRITURADA Y ARENA OTTAWA A DISTINTOS PORCENTAJES .....	112
TABLA 6.1	RESUMEN DE LOS VALORES DE LAS FUERZAS Y MOMENTOS QUE APLICAN EN EL EJEMPLO DEL MURO MECÁNICAMENTE ESTABILIZADO MSE.....	120
TABLA 6.2	RESUMEN DE LOS VALORES DE PESO UNITARIO, ÁNGULO DE FRICCIÓN INTERNA, COEFICIENTE DE PRESIÓN ACTIVA, EMPUJE DE TIERRA, EXCENTRICIDAD, CDR DESLIZAMIENTO, CDR CAPACIDAD PORTANTE PARA DISTINTOS PORCENTAJES DE GOMA TRITURADA PARA EL EJEMPLO DEL MURO MECÁNICAMENTE ESTABILIZADO (MSE) .....	127
TABLA 6.3	RESUMEN DE LOS VALORES DE LAS FUERZAS Y MOMENTOS QUE APLICAN EN EL EJEMPLO DEL MURO EN VOLADIZO .....	131
TABLA 6.4	RESUMEN DE LOS VALORES DE PESO UNITARIO, ÁNGULO DE FRICCIÓN INTERNA, COEFICIENTE DE PRESIÓN ACTIVA, EMPUJE DE TIERRA, EXCENTRICIDAD, CDR DESLIZAMIENTO, CDR CAPACIDAD PORTANTE PARA DISTINTOS PORCENTAJES DE GOMA TRITURADA PARA EL EJEMPLO DEL MURO EN VOLADIZO.....	135
TABLA 7.1	PROPIEDADES ÍNDICE Y MECÁNICAS DE LA ARENA SILÍCEA .....	139
TABLA 7.2	PROPIEDADES ÍNDICE Y MECÁNICAS DE LA GOMA TRITURADA .....	140

# Lista de Figuras

FIGURA 3.1	ESQUEMA DE SUB-COMPACTACIÓN SUGERIDO POR LADD (ADAPTADO DE LADD, 1978) .....	16
FIGURA 3.2	FOTOGRAFÍA DE LA ARENA OTTAWA UTILIZADA EN ESTA INVESTIGACIÓN .....	18
FIGURA 3.3	FOTOGRAFÍA DE LA GOMA TRITURADA UTILIZADA EN ESTA INVESTIGACIÓN.....	18
FIGURA 3.4	FOTOGRAFÍA DEL EQUIPO UTILIZADO PARA DETERMINAR LA GRAVEDAD ESPECÍFICA DE LOS MATERIALES ESTUDIADOS.....	20
FIGURA 3.5	FOTOGRAFÍA DE LA MESA VIBRATORIA UTILIZADA PARA LA DETERMINACIÓN DEL PESO UNITARIO MÁXIMO ( $\gamma_{\text{max}}$ ) .....	22
FIGURA 3.6	FOTOGRAFÍA DEL EQUIPO DE LABORATORIO PARA DETERMINAR LA PERMEABILIDAD DE UN SUELO BAJO CARGA CONSTANTE.....	25
FIGURA 3.7	DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DEL EQUIPO UTILIZADO EN EL LABORATORIO PARA MEDIR PERMEABILIDAD BAJO CARGA CONSTANTE.....	26
FIGURA 3.8	FOTOGRAFÍA DEL EQUIPO DE CORTE DIRECTO UTILIZADO DURANTE ESTA INVESTIGACIÓN.....	28
FIGURA 3.9	FOTOGRAFÍA DE LA CAJA DE CORTE CUADRADA UTILIZADA EN EL ENSAYO DE CORTE DIRECTO.....	29
FIGURA 3.10	FOTOGRAFÍA DEL FLEXÍMETRO UTILIZADO PARA MEDIR DEFORMACIONES EN LA PRUEBA DE CORTE DIRECTO Y TRIAXIAL .....	30
FIGURA 3.11	DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE LA CÁMARA TRIAXIAL.....	32
FIGURA 3.12	FOTOGRAFÍA DEL EQUIPO TRIAXIAL UTILIZADO PARA EL DESARROLLO DE PRUEBAS CONSOLIDADAS - DRENADAS (CD) (A) MÁQUINA TRIAXIAL TRITECH (B) CÁMARA TRIAXIAL ELE E.....	32
FIGURA 3.13	FOTOGRAFÍA DEL SISTEMA UTILIZADO PARA LA APLICACIÓN DE PRESIÓN DE CONFINAMIENTO (A) COMPRESOR DE AIRE AUTOMÁTICO CRAFTSMAN (B) PANEL DE CONTROL .....	33
FIGURA 3.14	ESQUEMÁTICO DE LAS ETAPAS DEL ENSAYO TRIAXIAL TIPO CD (A) ETAPA DE CONFINAMIENTO, (B) ETAPA DE CORTE .....	34
FIGURA 3.15	PREPARACIÓN DE LA MUESTRA PARA LA PRUEBA TRIAXIAL (A) PIEDRA POROSA EN EL PEDESTAL, (B) MEMBRANA DE LÁTEX, (C) PROCESO DE SUB-COMPACTACIÓN, (D) CILINDRO TRANSPARENTE JUNTO AL CABEZAL, (E) AJUSTE DEL CABEZAL UTILIZANDO “O-RINGS”, (F) MÁQUINA DE SUCCIÓN.....	35
FIGURA 3.16	ESQUEMÁTICO ENTRE EL DIAGRAMA DE MOHR Y EL DIAGRAMA P-Q Y SUS COMPONENTES .....	38
FIGURA 3.17	CILINDRO BAJO CARGA AXIAL UTILIZADO PARA REPRESENTAR PARÁMETROS IMPORTANTES EN EL CÓMPUTO DEL MÓDULO TANGENTE INICIAL.....	40

FIGURA 4.1	COMPONENTES DE UN MURO EN VOLADIZO (DAS, 2010).....	42
FIGURA 4.2	COMPONENTES DEL MURO MECÁNICAMENTE ESTABILIZADO (FHWA, 2009) .....	43
FIGURA 4.3	VISTA FRONTAL DE LOS PANELES PREFABRICADOS UTILIZADOS EN MUROS MECÁNICAMENTE ESTABILIZADOS (FHWA, 2009) .....	44
FIGURA 4.4	FOTOGRAFÍA DEL MURO MECÁNICAMENTE ESTABILIZADOS UBICADO EN EL AEROPUERTO SEATAC (FHWA, 2009) .....	44
FIGURA 4.5	FOTOGRAFÍAS DE MUROS MECÁNICAMENTE ESTABILIZADOS REFORZADOS CON GEOMALLAS .....	45
FIGURA 4.6	DIAGRAMA DE FUERZAS ACTUANDO EN UN MURO EN VOLADIZO (AASHTO,2010) .....	49
FIGURA 4.7	MECANISMOS DE FALLA EXTERNA PARA MUROS MECÁNICAMENTE ESTABILIZADOS (A) DESLIZAMIENTO (B) EXCENTRICIDAD (VUELCO) (C) CAPACIDAD DE CARGA (FHWA, 2009).....	53
FIGURA 4.8	MECANISMOS DE FALLA INTERNA (A) FALLA POR TENSIÓN Y (B) FALLA POR DESLIZAMIENTO (RIVERA, 2004) .....	54
FIGURA 4.9	APLICACIÓN DE LOS FACTORES DE CARGA PARA EL ANÁLISIS DE ESTABILIDAD EXTERNA PARA MUROS MECÁNICAMENTE ESTABILIZADOS (A) EXCENTRICIDAD Y DESLIZAMIENTO (B) CAPACIDAD DE CARGA (AASHTO, 2007).....	56
FIGURA 4.10	DIAGRAMA DE FUERZAS QUE ACTÚAN EN EL MURO MECÁNICAMENTE ESTABILIZADO (FHWA, 2009) .....	58
FIGURA 4.11	FOTOGRAFÍAS TIPOS DE REFUERZOS UTILIZADOS EN LOS MUROS MECÁNICAMENTE ESTABILIZADOS (A) REFUERZO INEXTENSIBLE, TIRA METALICA (B) REFUERZO EXTENSIBLE, GEOMALLAS.....	61
FIGURA 4.12	ESFUERZOS QUE SE DESARROLLAN EN LAS ARMADURAS, UBICACIÓN DEL LARGO EFECTIVO ( $L_e$ ), Y ZONA DE MÁXIMA TENSIÓN (FHWA, 2009).....	63
FIGURA 4.13	RELACIÓN ENTRE $K_r / K_A$ EN FUNCIÓN DE LA PROFUNDIDAD EN UN MURO MECÁNICAMENTE ESTABILIZADO (FHWA, 2009).....	64
FIGURA 4.14	ESPACIADO DE LOS REFUERZOS UTILIZADOS EN LOS MUROS MECÁNICAMENTE ESTABILIZADOS (A) TIRAS METÁLICAS Y (B) MALLAS DE BARRA (FHWA, 2009) .....	65
FIGURA 4.15	VALORES DEL FACTOR DE FRICCIÓN PARA EL ARRANCAMIENTO DE LOS REFUERZOS, $F^*$ (A) PARA TIRAS METÁLICAS (B) PARA GRILLAS DE ACERO (FHWA, 2009).....	68
FIGURA 4.16	MECANISMOS DE FALLA EXTERNA PARA MUROS EN VOLADIZO (A) DESLIZAMIENTO (B) EXCENTRICIDAD (VUELCO) (C) CAPACIDAD DE CARGA (FHWA, 2009) .....	71
FIGURA 4.17	APLICACIÓN DE LOS FACTORES DE CARGA PARA EL ANÁLISIS DE ESTABILIDAD EXTERNA EN MUROS EN VOLADIZO (A) EXCENTRICIDAD Y DESLIZAMIENTO (B) CAPACIDAD DE CARGA (AASHTO, 2007).....	72
FIGURA 4.18	CRITERIO PARA DETERMINAR LOS MOMENTOS QUE ACTÚAN EN EL MURO EN VOLADIZO (AASHTO, 2010) .....	74

FIGURA 5.1	DISTRIBUCIÓN GRANULOMÉTRICA PARA LA GOMA TRITURADA UTILIZADA PARA ESTA INVESTIGACIÓN .....	76
FIGURA 5.2	DISTRIBUCIÓN GRANULOMÉTRICA PARA LA ARENA OTTAWA UTILIZADA PARA ESTA INVESTIGACIÓN.....	77
FIGURA 5.3	VARIACIÓN DE GRAVEDAD ESPECÍFICA PARA DIFERENTES PORCENTAJES DE GOMA TRITURADA. ....	78
FIGURA 5.4	VARIACIÓN DE PESO UNITARIO SECO MÍNIMO PARA DIFERENTES PORCENTAJES DE GOMA MEDIDO MEDIANTE DOS MÉTODOS: (A) PORCENTAJE POR PESO (B) PORCENTAJE POR VOLUMEN .....	79
FIGURA 5.5	COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD MEDIDA A DIFERENTES PORCENTAJES DE GOMA TRITURADA .....	81
FIGURA 5.6	EFFECTO DE AÑADIR GOMA TRITURADA A DIFERENTES PORCENTAJES EN EL COMPORTAMIENTO ESFUERZO – DESPLAZAMIENTO PARA DISTINTAS MEZCLAS DE GOMA TRITURADA CON ARENA OTTAWA A UNA PRESIÓN DE CONFINAMIENTO DE 10 LBS/PULG <sup>2</sup> UTILIZANDO CORTE DIRECTO.....	85
FIGURA 5.7	EFFECTO DE AÑADIR GOMA TRITURADA A DIFERENTES PORCENTAJES EN EL COMPORTAMIENTO ESFUERZO – DESPLAZAMIENTO PARA DISTINTAS MEZCLAS DE GOMA TRITURADA CON ARENA OTTAWA A UNA PRESIÓN DE CONFINAMIENTO DE 20 LBS/PULG <sup>2</sup> UTILIZANDO CORTE DIRECTO.....	85
FIGURA 5.8	EFFECTO DE AÑADIR GOMA TRITURADA A DIFERENTES PORCENTAJES EN EL COMPORTAMIENTO ESFUERZO – DESPLAZAMIENTO PARA DISTINTAS MEZCLAS DE GOMA TRITURADA CON ARENA OTTAWA A UNA PRESIÓN DE CONFINAMIENTO DE 30 LBS/PULG <sup>2</sup> UTILIZANDO CORTE DIRECTO.....	86
FIGURA 5.9	EFFECTO DE ANADIR DIFERENTES PORCENTAJES DE GOMA TRITURADA EN EL ESFUERZO CORTANTE DE FALLA DEFINIDO A BAJOS DESPLAZAMIENTOS (<0.06 PULG) MEDIDO MEDIANTE PRUEBAS DE CORTE DIRECTO .....	89
FIGURA 5.10	EFFECTO DE AÑADIR DIFERENTES PORCENTAJES DE GOMA TRITURADA EN EL ESFUERZO CORTANTE DE FALLA DEFINIDO A BAJOS DESPLAZAMIENTOS (<0.06 PULG) MEDIDO MEDIANTE PRUEBAS DE CORTE DIRECTO .....	90
FIGURA 5.11	EFFECTO DE AÑADIR GOMA TRITURADA A DIFERENTES PORCENTAJES EN EL COMPORTAMIENTO DESPLAZAMIENTO HORIZONTAL – DESPLAZAMIENTO VERTICAL DE ARENA OTTAWA A UNA PRESIÓN DE CONFINAMIENTO DE 10 LBS/PULG <sup>2</sup> UTILIZANDO CORTE DIRECTO .....	91
FIGURA 5.12	EFFECTO DE AÑADIR GOMA TRITURADA A DIFERENTES PORCENTAJES EN EL COMPORTAMIENTO DESPLAZAMIENTO HORIZONTAL – DESPLAZAMIENTO VERTICAL DE ARENA OTTAWA A UNA PRESIÓN DE CONFINAMIENTO DE 20 LBS/PULG <sup>2</sup> UTILIZANDO CORTE DIRECTO .....	92
FIGURA 5.13	EFFECTO DE AÑADIR GOMA TRITURADA A DIFERENTES PORCENTAJES EN EL COMPORTAMIENTO DESPLAZAMIENTO HORIZONTAL – DESPLAZAMIENTO VERTICAL DE ARENA OTTAWA A UNA PRESIÓN DE CONFINAMIENTO DE 30 LBS/PULG <sup>2</sup> UTILIZANDO TRIAXIAL .....	92
FIGURA 5.14	VARIACIÓN DEL ÁNGULO DE FRICCIÓN INTERNA EN FUNCIÓN DEL PORCENTAJE DE GOMA TRITURADA A ALTOS Y BAJOS DESPLAZAMIENTOS HORIZONTALES MEDIDOS MEDIANTE PRUEBAS DE CORTE DIRECTO.....	95
FIGURA 5.15	VARIACIÓN DE LA COHESIÓN EN FUNCIÓN DEL PORCENTAJE DE GOMA TRITURADA A ALTOS Y BAJOS DESPLAZAMIENTOS HORIZONTALES MEDIDOS MEDIANTE PRUEBAS DE CORTE DIRECTO .....	96

FIGURA 5.16	EFFECTO DE AÑADIR GOMA TRITURADA A DIFERENTES PORCENTAJES EN EL COMPORTAMIENTO ESFUERZO – DEFORMACIÓN DE ARENA OTTAWA A UNA PRESIÓN DE CONFINAMIENTO DE 10 LBS/PULG <sup>2</sup> UTILIZANDO PRUEBA TRIAXIAL TIPO CD .....	98
FIGURA 5.17	EFFECTO DE AÑADIR GOMA TRITURADA A DIFERENTES PORCENTAJES EN EL COMPORTAMIENTO ESFUERZO – DEFORMACIÓN PARA DISTINTAS MEZCLAS DE GOMA TRITURADA CON ARENA OTTAWA A UNA PRESIÓN DE CONFINAMIENTO DE 20 LBS/PULG <sup>2</sup> UTILIZANDO PRUEBA TRIAXIAL TIPO CD .....	99
FIGURA 5.18	EFFECTO DE AÑADIR GOMA TRITURADA A DIFERENTES PORCENTAJES EN EL COMPORTAMIENTO ESFUERZO – DEFORMACIÓN PARA DISTINTAS MEZCLAS DE GOMA TRITURADA CON ARENA OTTAWA A UNA PRESIÓN DE CONFINAMIENTO DE 30 LBS/PULG <sup>2</sup> UTILIZANDO PRUEBA TRIAXIAL TIPO CD .....	99
FIGURA 5.19	EFFECTO DE AÑADIR DIFERENTES PORCENTAJES DE GOMA TRITURADA EN EL ESFUERZO DESVIADOR DEFINIDO A BAJAS DEFORMACIONES (E<4%) MEDIDO MEDIANTE PRUEBAS DE TRIAXIALES TIPO CD.....	104
FIGURA 5.20	EFFECTO DE AÑADIR DIFERENTES PORCENTAJES DE GOMA TRITURADA EN EL ESFUERZO DESVIADOR DEFINIDO A ALTAS DEFORMACIONES (E=20%) MEDIDO MEDIANTE PRUEBAS DE TRIAXIALES TIPO CD .....	104
FIGURA 5.21	TRAYECTORIA DE ESFUERZOS PARA LA MUESTRA DE ARENA OTTAWA A UN DENSIDAD RELATIVA DE 90%.....	105
FIGURA 5.22	TRAYECTORIA DE ESFUERZOS PARA LA MUESTRA DE 10% GOMA TRITURADA Y 90% DE ARENA OTTAWA A UN DENSIDAD RELATIVA DE 90% .....	106
FIGURA 5.23	TRAYECTORIA DE ESFUERZOS PARA LA MUESTRA DE 20% GOMA TRITURADA Y 80% DE ARENA OTTAWA A UN DENSIDAD RELATIVA DE 90% .....	106
FIGURA 5.24	TRAYECTORIA DE ESFUERZOS PARA LA MUESTRA DE 25% GOMA TRITURADA Y 75% DE ARENA OTTAWA A UN DENSIDAD RELATIVA DE 90% .....	107
FIGURA 5.25	TRAYECTORIA DE ESFUERZOS PARA LA MUESTRA DE 30% GOMA TRITURADA Y 70% DE ARENA OTTAWA A UN DENSIDAD RELATIVA DE 90% .....	107
FIGURA 5.26	TRAYECTORIA DE ESFUERZOS PARA LA MUESTRA DE 40% GOMA TRITURADA Y 60% DE ARENA OTTAWA A UN DENSIDAD RELATIVA DE 90% .....	108
FIGURA 5.27	TRAYECTORIA DE ESFUERZOS PARA LA MUESTRA DE 100% GOMA TRITURADA A UN DENSIDAD RELATIVA DE 90%.....	108
FIGURA 5.28	VARIACIÓN DEL ÁNGULO DE FRICCIÓN INTERNA EN FUNCIÓN DEL PORCENTAJE DE GOMA TRITURADA A ALTOS Y BAJOS DESPLAZAMIENTOS HORIZONTALES MEDIDOS MEDIANTE PRUEBAS TRIAXIALES TIPO CD....	111
FIGURA 5.29	VARIACIÓN DE LA COHESIÓN EN FUNCIÓN DEL PORCENTAJE DE GOMA TRITURADA A ALTOS Y BAJOS DESPLAZAMIENTOS HORIZONTALES MEDIDOS MEDIANTE PRUEBAS TRIAXIALES TIPO CD.....	111

FIGURA 5.30	VARIACIÓN DEL MÓDULO TANGENTE INICIAL CON LA PRESIÓN DE CONFINAMIENTO PARA DISTINTOS PORCENTAJES DE GOMA TRITURADA MEZCLADA CON ARENA OTTAWA BAJO PRUEBAS TRIAXIALES TIPOCD.....	113
FIGURA 5.31	PERMEABILIDAD EN FUNCIÓN DEL TAMAÑO MÁXIMO DE PARTÍCULA DE GOMA TRITURADA (ADAPTADO DE REDDY Y MARELLA, 2001) .....	114
FIGURA 5.32	ÁNGULO DE FRICCIÓN INTERNA EN FUNCIÓN DEL TAMAÑO MÁXIMO DE PARTÍCULA DE GOMA TRITURADA (ADAPTADO DE REDDY Y MARELLA, 2001) .....	115
FIGURA 5.33	COHESIÓN EN FUNCIÓN DEL TAMAÑO MÁXIMO DE PARTÍCULA DE GOMA TRITURADA (ADAPTADO DE REDDY Y MARELLA, 2001).....	116
FIGURA 6.1	DIAGRAMA DE CUERPO LIBRE UTILIZADO EN EL EJEMPLO DE MURO MECÁNICAMENTE ESTABILIZADO (MSE).....	119
FIGURA 6.2	DIAGRAMA DE CUERPO LIBRE UTILIZADO EN EL EJEMPLO DE MURO MECÁNICAMENTE AL VOLADIZO .....	130



## Lista de Acrónimos

<b>A</b>	Área de la muestra y/o espécimen
<b>A<sub>corregida</sub></b>	Área corregida de la muestra
<b>A<sub>c</sub></b>	Área de los refuerzos corregida por pérdidas debido a la corrosión del metal
<b>A<sub>o</sub></b>	Área inicial de la muestra
<b>AASHTO</b>	Asociación Americana de Autoridades Estatales de Carreteras y Transportes (por sus siglas en inglés)
<b>ASTM</b>	Sociedad Americana para el Ensayo de Materiales (por sus siglas en inglés)
<b>B</b>	Largo de la base del muro de contención al voladizo
<b>b</b>	Ancho unitario del refuerzo
<b>c</b>	Cohesión en términos de esfuerzos totales
<b>c'</b>	Cohesión en términos de esfuerzos efectivos
<b>C<sub>u</sub></b>	Coefficiente de gradación o curvatura
<b>C<sub>c</sub></b>	Coefficiente de uniformidad
<b>CL-ML</b>	Arcilla areno limosa
<b>CD</b>	Resistencia al corte consolidado – drenado
<b>CU</b>	Resistencia al corte consolidado – no drenado
<b>CDR</b>	Razón de capacidad a demanda (por sus siglas en inglés)
<b>D</b>	Amortiguamiento
<b>d</b>	Intercepto con el eje de q de la línea K <sub>f</sub>
<b>DC</b>	Peso propio de los elementos estructurales y accesorios no estructurales del muro de contención
<b>D<sub>max</sub></b>	Tamaño máximo de las partículas
<b>D<sub>10</sub></b>	Diámetro correspondiente al 10% pasando
<b>D<sub>30</sub></b>	Diámetro correspondiente al 30% pasando
<b>D<sub>50</sub></b>	Diámetro promedio de partículas en la muestra
<b>D<sub>60</sub></b>	Diámetro correspondiente al 60% pasando
<b>D<sub>75</sub></b>	Diámetro del refuerzo al finalizar 75 años de su vida útil
<b>D<sub>r</sub></b>	Densidad relativa
<b>e</b>	Excentricidad

<b><math>e_{max}</math></b>	Razón de vanos máxima
<b><math>e_{min}</math></b>	Razón de vanos mínima
<b>E</b>	Módulo de elasticidad
<b><math>E_c</math></b>	Espesor del refuerzo al final de su vida de servicio
<b><math>E_R</math></b>	Espesor de la armadura y/o refuerzo que se anticipa que se perderá debido a la corrosión
<b><math>E_n</math></b>	Espesor nominal de la armadura y/o refuerzo original
<b><math>E_i</math></b>	Módulo tangente inicial
<b>EH</b>	Empuje horizontal del suelo
<b>ES</b>	Sobrecarga del suelo
<b>EV</b>	Empuje vertical del suelo
<b>F</b>	Carga o fuerza axial aplicada a la muestra
<b><math>F_y</math></b>	Tensión mínima de fluencia del acero
<b><math>F_1</math></b>	Fuerza horizontal debido al peso del suelo reforzado
<b><math>F_2</math></b>	Fuerza horizontal debido a la sobrecarga
<b>FS</b>	Factor de seguridad
<b><math>F^*</math></b>	Factor de fricción contra el arrancamiento
<b>FHWA</b>	Administración federal de carreteras (por sus siglas en inglés)
<b>G</b>	Módulo cortante
<b><math>G_s</math></b>	Gravedad específica de los sólidos
<b>H</b>	Altura del muro de contención
<b><math>H'</math></b>	Altura corregida del muro de contención
<b>h</b>	Diferencia de carga hidráulica
<b><math>h_n</math></b>	Altura total desde el fondo del espécimen hasta la capa estudiada
<b><math>h_t</math></b>	Altura total del espécimen
<b>i</b>	Gradiente hidráulico
<b>K</b>	Coefficiente de empuje lateral de tierra
<b><math>K_o</math></b>	Coefficiente de empuje lateral de tierra en reposo
<b><math>K_a</math></b>	Coefficiente de empuje lateral de tierra activa
<b><math>K_f</math></b>	Regresión lineal entre los punto p-q
<b><math>K_p</math></b>	Coefficiente de empuje lateral de tierra pasiva

<b><math>K_r</math></b>	Coeficiente de tensión lateral de tierra
<b><math>k</math></b>	Coeficiente de permeabilidad
<b><math>L</math></b>	Largo de la muestra y/o espécimen
<b><math>L'</math></b>	Largo efectivo del muro de retención
<b><math>L_a</math></b>	Largo del refuerzo requerido en la zona activa
<b><math>L_e</math></b>	Largo del refuerzo requerido en la zona de soporte y/o anclaje
<b><math>L_r</math></b>	Largo del refuerzo requerido
<b>LRFD</b>	Diseño por factores de carga y resistencia (por sus siglas en inglés)
<b>MSE</b>	Muro mecánicamente estabilizado (por sus siglas en inglés)
<b><math>n</math></b>	El número de capa o capas en consideración
<b><math>n_t</math></b>	Número total de capas
<b><math>N_c</math></b>	Factor de capacidad de carga
<b><math>N_\gamma</math></b>	Factor de capacidad de carga
<b><math>P</math></b>	Empuje de tierra total
<b><math>P_a</math></b>	Empuje de tierra activo total
<b><math>P_{av}</math></b>	Componente vertical del empuje de tierra total
<b><math>P_{ah}</math></b>	Componente horizontal del empuje de tierra total
<b><math>P_r</math></b>	Resistencia última al arrancamiento y/o fuerza de fricción
<b><math>P</math> (%)</b>	Porcentaje de goma triturada
<b><math>P_d</math></b>	Componentes de las fuerzas resistentes que actúan en el muro de contención
<b><math>P_h</math></b>	Carga horizontal
<b><math>p</math></b>	Esfuerzo principal total menor
<b><math>q</math></b>	Esfuerzo desviador
<b><math>q_w</math></b>	Sobrecarga
<b><math>q_n</math></b>	Capacidad de carga del suelo de cimentación
<b><math>Q</math></b>	Caudal
<b><math>Q_i</math></b>	Cargas permanentes o transitorias
<b>RF</b>	Factor de reducción de la resistencia que considera el potencial a degradación, Daños por instalación y fluencia
<b>RF<sub>ID</sub></b>	Factor de reducción que considera los daños durante la instalación de los refuerzos

<b>RF<sub>CR</sub></b>	Factor de reducción que considera la fluencia a largo plazo de los refuerzos
<b>RF<sub>D</sub></b>	Factor de reducción que considera la degradación química y biológica de los refuerzos
<b>R<sub>n</sub></b>	Resistencia nominal
<b>REMA</b>	Rubber Recycling and Manufacturing Inc.
<b>SiO<sub>2</sub></b>	Dióxido de silicio
<b>S<sub>v</sub></b>	Espaciado vertical entre refuerzo
<b>SP</b>	Arena pobremente gradada
<b>t</b>	Tiempo promedio
<b>T<sub>all</sub></b>	Resistencia nominal de diseño de refuerzo a largo plazo
<b>T<sub>max</sub></b>	Tensión máxima generada por la armadura y/o refuerzo
<b>T</b>	Largo efectivo del muro de retención
<b>T<sub>ult</sub></b>	Valor mínimo promedio del rollo de la resistencia última a la tracción de los esfuerzos
<b>u</b>	Presión de poros
<b>U</b>	Porcentaje de compactación
<b>U<sub>ni</sub></b>	Porcentaje de sub-compactación para la primera capa
<b>U<sub>nt</sub></b>	Porcentaje de sub-compactación para la última capa
<b>USCS</b>	Sistema unificado de clasificación de suelos (por sus siglas en inglés)
<b>UU</b>	Resistencia al corte no consolidada – no drenada
<b>V</b>	Volumen del envase
<b>V<sub>1</sub></b>	Fuerza vertical debido al peso del suelo reforzado y/o relleno
<b>V<sub>2</sub></b>	Fuerza vertical debido al peso del suelo reforzado dado la pendiente del relleno
<b>V<sub>rec</sub></b>	Volumen de agua recolectado (prueba permeabilidad)
<b>V<sub>arena</sub></b>	Volumen de la arena seca
<b>V<sub>goma</sub></b>	Volumen de la goma triturada
<b>V<sub>s</sub></b>	Fuerza vertical debido a la sobrecarga
<b>X<sub>p</sub></b>	Porcentaje de goma triturada en la muestra por peso
<b>X<sub>v</sub></b>	Porcentaje de goma triturada en la muestra por volumen
<b>X<sub>ah</sub></b>	Distancia horizontal desde la punta del muro hasta la fuerza P <sub>ah</sub>
<b>X<sub>av</sub></b>	Distancia vertical desde la punta del muro hasta la fuerza P <sub>av</sub>

$X_{V1}$	Distancia vertical desde la punta del muro hasta la fuerza $V_1$
$X_{V2}$	Distancia vertical desde la punta del muro hasta la fuerza $V_2$
$W_1, W_2, W_3$	Fuerzas generadas debido al concreto del muro en voladizo
$W_{arena}$	Peso seco de la arena
$W_{goma}$	Peso de la goma triturada
$W_m$	Peso del muro de contención
$W_s$	Peso seco del material estudiado
$z$	Distancias desde el tope del muro de contención hasta las armaduras
$\beta$	Ángulo de inclinación del relleno en un muro de contención
$\alpha$	Factor de corrección
$\pi$	pi (3.14159265)
$\alpha'$	Ángulo de inclinación de $K_f$
$\gamma_d$	Peso unitario seco de la muestra
$\gamma_{d \max}$	Peso unitario seco máximo
$\gamma_{d \min}$	Peso unitario seco mínimo
$\gamma_f$	Peso unitario del suelo de cimentación del muro de contención
$\gamma_{LS}$	Factor de carga para sobrecarga
$\gamma_i$	Factor de carga
$\gamma_w$	Peso unitario del agua (62.4 lbs/pie <sup>3</sup> )
$\gamma_{EV-MIN}$	Factor de carga mínimo para fuerzas verticales
$\gamma_{EV-MAX}$	Factor de carga máximo para fuerzas verticales
$\gamma_{EH-MAX}$	Factor de carga máximo para fuerzas horizontales
$\Delta H$	Desplazamiento horizontal
$\Delta H_f$	Desplazamiento horizontal de falla
$\Delta V$	Desplazamiento vertical
$\Delta L$	Cambio en longitud debido a una fuerza aplicada
$\Delta \sigma$	Cambio en el esfuerzo normal
$\Delta \sigma_1$	Cambio en el esfuerzo principal mayor
$\Delta \sigma_3$	Cambio en el esfuerzo principal menor
$\sum M_R$	Sumatoria de los momentos de las fuerzas que tienden a resistir vuelco en el muro de contención

$\Sigma M_o$	Sumatoria de los momentos de las fuerzas que tienden a volcar el muro de contención
$\Sigma V$	Sumatoria de las fuerzas verticales
$\Sigma H$	Sumatoria de las fuerzas horizontales
$\varepsilon$	Deformación unitaria axial
$\theta$	Ángulo de la cara externa del muro con la horizontal
$\delta$	Ángulo de fricción suelo-muro
$\sigma$	Esfuerzo normal en el plano de falla en términos de esfuerzos totales
$\sigma'$	Esfuerzo normal en el plano de falla en términos de esfuerzos efectivos
$\sigma_f$	Esfuerzo normal máximo en el plano de falla
$\sigma_h$	Esfuerzo horizontal
$\sigma_v$	Esfuerzo vertical sobre la armadura debido al propio peso del relleno
$\sigma_{v \max}$	Presión vertical máxima en la base del muro mecánicamente estabilizado
$\sigma_1$	Esfuerzo principal mayor
$\sigma_3$	Esfuerzo de confinamiento
$\sigma_d$	Esfuerzo desviador
$\tau$	Esfuerzo cortante
$\phi$	Ángulo de fricción interna del material en términos de esfuerzo totales
$\phi'$	Ángulo de fricción interna del material en términos de esfuerzo efectivos
$\phi_b$	Factor de resistencia a la capacidad de carga
$\phi_s$	Factor de resistencia al deslizamiento
$\phi_p$	Factor de resistencia al arrancamiento
$\phi_t$	Factor de resistencia a la tracción
$\phi_f$	Ángulo de fricción interna del suelo de cimentación del muro de contención

# CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

---

## 1.1 Introducción

La isla de Puerto Rico produce alrededor de 4.5 millones de neumáticos por año (1 neumático/habitante/año) y más de la mitad de ellos son exportados a los Estados Unidos (Botero et al., 2005). Existen tres métodos a nivel mundial para la disposición de neumáticos: (1) depositarlos en vertederos; (2) reciclaje y/o re-uso para propósitos ingenieriles y (3) incineración para recuperación de energía. De estos tres métodos el más común es el uso de vertederos, donde alrededor del 70% del total de los neumáticos en los Estados Unidos son desechados de esta manera (Cecich et al., 1996). Según la ley 171 de 1996, implementada por la Autoridad de Desperdicios Sólidos, en Puerto Rico los neumáticos no pueden ser dispuestos en los vertederos. Debido a que la incineración genera residuos contaminantes al ambiente, tales como monóxido de carbono, dióxido de carbono, dióxido de azufre entre otros, la alternativa más viable es el reciclaje. Por tal motivo, hoy en día buscar alternativas para el uso de neumáticos con propósitos ingenieriles es de suma importancia para el país.

En la práctica varias alternativas han sido implementadas para el uso de la goma reciclada. Entre las más destacadas se encuentran: las barreras de sonido, concreto modificado, asfalto modificado, relleno para muros de retención, arrecifes artificiales, material de bajo peso (*lightweight fill*) para el uso en terraplenes y sistema de recolección de lixiviados en vertederos (Humphrey, 2004). Es por tal razón que el conocimiento de las propiedades mecánicas de la goma reciclada es fundamental y de suma importancia al momento de diseñar y construir con dicho material. En esta investigación se estudió el efecto que tiene la goma triturada en las

propiedades mecánicas de la arena Ottawa, material que puede ser utilizado como material para relleno en estructuras de retención. En adición, los resultados experimentales de esta investigación fueron utilizados para analizar el comportamiento de estructuras de retención (muros en voladizo y muros mecánicamente estabilizados-MSE walls) mediante el método de “Load Resistance Factor Design (LRFD, por sus siglas en inglés).

## **1.2 Motivación**

Disponer de grandes cantidades de neumáticos tiene implicaciones económicas al igual que ambientales. Los neumáticos sueltos representan dos amenazas importantes para el público: (1) tienen un alto riesgo de incendio cuando son expuestos a altas temperaturas y a su vez son difíciles de extinguir; (2) presentan un peligro para la salud, debido a que el agua retenida por los neumáticos atrae mosquitos y roedores que a su vez son portadores de enfermedades. Por consiguiente el re-uso de la goma sería la forma más sencilla y económica de disponer de dicho material. En los últimos años el uso de este producto está siendo estudiado experimentalmente para ser utilizados en una gran variedad de aplicaciones en el campo de la ingeniería.

Tanto la estabilidad como los asentamientos de terraplenes y/o muros de contención soportados en suelos blandos pueden ser mejorados mediante el uso de materiales de bajo peso, mejor conocidos como “lightweight fill” (Charlotte Clark et al., 1993). Materiales de bajo peso han sido utilizados en el pasado como reemplazo de materiales convencionales, tales como virutas de madera, serrín, cenizas, babote seco y/o concreto celular. Cada uno de estos materiales sufre de alguna desventaja; por ejemplo, la madera es biodegradable y por lo tanto carece de durabilidad, ciertas cenizas pueden contaminar el agua subterránea, y los materiales que son fabricados usualmente son de altos costos al igual que son fabricados en pequeñas



cantidades cual los hace menos atractivo para su uso específico en el campo de la ingeniería civil.

Los ingenieros e investigadores hoy en día tienen un gran interés en el desarrollo de materiales que sean ambientalmente aceptables, duraderos y económicos con el fin de estabilizar taludes, fundaciones y de reducir asentamientos en áreas con un alto nivel de dificultades o problemas. Es por tal razón que la goma triturada como material de relleno en muros de contención puede ser categorizado como un material reciclable, la cual puede contribuir con ciertos beneficios en el campo de la ingeniería civil. Como parte de esta investigación se analizó de forma experimental el efecto que tiene el uso de neumáticos en las propiedades mecánicas de muestras de arena Ottawa. Dicho material puede ser utilizado como relleno en muros de contención. Por tal motivo, se incluye un análisis sobre el efecto que tiene el uso de diferentes porcentajes de goma triturada en la estabilidad de muros en voladizo y mecánicamente estabilizados.

### **1.3 Objetivos**

Esta investigación tiene como objetivo principal el determinar en el laboratorio propiedades mecánicas para mezclas de arena y goma triturada tales como la permeabilidad ( $k$ ), el ángulo de fricción interna ( $\phi$ ), la cohesión ( $c$ ) y el módulo tangente inicial ( $E_i$ ). Estas propiedades serán medidas para mezclas de arena con diferentes porcentajes de goma triturada variando desde 0 hasta 100 por ciento por volumen. Las propiedades geotécnicas del suelo son fundamentales para poder diseñar, modelar y resolver problemas ingenieriles. Es por consiguiente que conocer dichas propiedades es de suma importancia. Por tal motivo, los resultados experimentales de esta investigación fueron utilizados para analizar el efecto que tienen el uso de goma triturada en el diseño de muros de contención al voladizo y muros en tierra

reforzada. Se analizó cómo varía el diseño de muro de contención al voladizo y de tierra reforzada (MSE) al utilizar mezclas de arena con goma triturada a diferentes proporciones como material para relleno. La herramienta utilizada para realizar este análisis fue EXCEL; donde se analizó el comportamiento de dichas estructuras de retención contra vuelco, deslizamiento y capacidad portante según el método de Load Resistance Factor Design (LRFD) para dos casos: (1) muros con relleno de arena y (2) muros con relleno de arena y goma triturada a diferentes proporciones.

La goma triturada obtenida para esta investigación fue provista por la empresa Rema Inc. ubicada en el municipio de Caguas y la arena fue obtenida del Laboratorio de Geotecnia de la Universidad de Puerto Rico. Esta arena se conoce comúnmente como arena silícea Ottawa.

#### **1.4 Organización**

Este proyecto se compone de 7 capítulos y 8 apéndices. El Capítulo 2 presenta un resumen literario acerca de las investigaciones geotécnicas realizadas a la goma triturada como material reciclable. Esta revisión de literatura se enfocó en investigaciones que presentaban metodologías similares a las utilizadas en este proyecto. El Capítulo 3 incluye el programa experimental llevado a cabo durante esta investigación. Se identifican los materiales y se describe el suelo mediante resultados de pruebas índices y de clasificación. En adición, se incluye la metodología utilizada en las diferentes pruebas realizadas, el procedimiento seguido para la preparación de muestras y la descripción del equipo utilizado. El Capítulo 4 contiene un breve resumen de conceptos teóricos relacionados al análisis y diseño de muros de contención según el método LRFD.

El Capítulo 5 contiene los resultados y análisis de los ensayos de laboratorio realizados durante la investigación. En el Capítulo 6 se muestra un ejemplo numérico del análisis de un

muro de contención mecánicamente estabilizado (MSE wall) y al voladizo utilizando los valores obtenidos en la investigación. El Capítulo 7 presenta un resumen de la investigación desarrollada, conclusiones y recomendaciones para trabajos futuros.

Por último, los apéndices A, B, C, D, E, F, G, y H detallan los resultados obtenidos para cada una de las pruebas realizadas durante esta investigación, al igual que un ejemplo de cálculos del proceso utilizado para la compactación de muestras conocido como subcompactación.

# CAPÍTULO 2. REVISIÓN DE LITERATURA

---

## 2.1 Introducción

En los últimos 15 años varios autores han estudiado el comportamiento de las propiedades mecánicas de la mezcla suelo-goma para diferentes densidades, tamaños de partículas, porcentaje de mezcla y distintas pruebas de laboratorio (Ahmed y Lovell 1993, Cecich et al., 1996, Wu et al., 1997, Yang et al. 2002). En adición, se encontró sólo una investigación relacionada a propiedades dinámicas de la mezcla suelo-goma realizada por Zheng y Sutter (2000). A continuación se muestra un resumen de varios estudios relacionados al comportamiento mecánico de muestras formadas con mezcla de goma triturada y arena.

## 2.2 Propiedades mecánicas de arena, goma triturada y mezcla de ambos componentes

Cecich et al. (1996) diseñaron tres muros de contención de 10, 20 y 30 pies de alto utilizando como relleno goma triturada y arena con el fin de determinar el factor de seguridad contra vuelco y deslizamiento. Es importante mencionar que estos diseños de muro fueron realizados utilizando el método de esfuerzos permisibles (Allowable Stress Design, ASD). También realizaron pruebas de laboratorio para determinar las propiedades ingenieriles de la goma triturada (100% goma), para ser utilizadas en el diseño de los muros. Realizaron la prueba de tamizado, la prueba del Proctor modificado, ensayos de permeabilidad y ensayos de corte directo a esfuerzos normales de 0.5, 2 y 4 lbs/pie<sup>2</sup>. La goma triturada utilizada por estos investigadores tenía un tamaño de partícula promedio ( $D_{50}$ ) de 7.0 mm y un peso unitario seco máximo de 38 lbs/pie<sup>3</sup>. La permeabilidad, la cohesión y el ángulo de fricción interna medido

para la densidad máxima fueron  $3.4 \times 10^{-2}$  cm/seg, 147 lbs/pie<sup>3</sup> y 27°, respectivamente. Cecich et al. (1996) concluyeron que el utilizar goma triturada como relleno para la construcción de un muro de contención refleja un ahorro en materiales de un 84% y un ahorro total de 52% en la construcción. En la Tabla 2.1 se muestra un resumen de los factores de seguridad (FS) calculados dependiendo de la altura del muro y del material utilizado como relleno.

Tabla 2.1 Análisis estabilidad del muro (Cecich et al., 1996)

Altura del muro (pie)	FS <sub>vuelco</sub> (100% arena)	FS <sub>vuelco</sub> (100% goma)	FS <sub>deslizamiento</sub> (arena)	FS <sub>deslizamiento</sub> (goma)
10	2.10	>20	4.15	>20
20	1.84	2.12	1.68	10.37
30	1.65	2.14	1.54	3.35

Wu et al. (1997) realizaron pruebas triaxiales a goma triturada con distintos tamaños, pesos unitarios, formas y gradación. Las pruebas fueron realizadas para presiones de confinamiento de 5 y 8 lbs/pie<sup>2</sup>. Un resumen de los resultados obtenidos por estos investigadores se muestra en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2 Resumen de los datos de resistencia y elasticidad (Wu et al., 1997)

Material	Forma	Tamaño Máximo (mm)	Peso Unitario (lbs/pie <sup>3</sup> )	Módulo de Elasticidad, E (lbs/pulg <sup>2</sup> )	Ángulo de Fricción, $\phi$ (grados)
1	Plana	38.0	37	84-100	57
2	Granular	19.0	35	62-84	54
3	Elongada	9.5	31	51-69	60
4	Granular	9.5	37	65-87	47
5	Pulverizada	2.0	33	55-119	45

Reddy y Marella (2001) resumen resultados de diferentes propiedades mecánicas para goma triturada obtenida por diferentes investigadores. En la Tabla 2.3 se muestra el peso unitario, la conductividad hidráulica, la compresibilidad y las propiedades de resistencia al corte de la goma triturada resumidas por estos investigadores. Las propiedades de resistencia al corte fueron obtenidas utilizando el equipo de corte directo; sólo dos autores de 19 utilizaron el equipo triaxial para determinar dichos parámetros. Los autores concluyen que la gran variación entre los valores reportados se debe a diferencias en cuanto al tamaño, la composición y el método utilizado para realizar dichas pruebas.

Yang et al. (2002) evaluaron las propiedades mecánicas de goma triturada, con tamaños entre 2 - 10 mm, gravedad específica de 1.15 y un peso unitario de 36 lbs/pie<sup>3</sup>, realizando una serie de ensayos de corte directo, compresión triaxial consolidada drenada (CD), ensayos de compresión confinada utilizando el odómetro y compresión confinada en la celda triaxial. De la prueba de corte directo obtuvieron datos de cohesión de 0 lbs/pie<sup>2</sup> y un ángulo de fricción interna de 32°, mientras que utilizando los resultados de las pruebas triaxiales generaron una fórmula útil para determinar el módulo de elasticidad de la goma triturada en función de la presión de confinamiento que está dada por la ecuación 2.1.

$$E = (13.2 \cdot \sigma_3) - (0.0191 \cdot \sigma_3^2) \quad (2.1)$$

donde:

$E$  = módulo de elasticidad, y

$\sigma_3$  = esfuerzo de confinamiento.

Tabla 2.3 Representación estadística de las propiedades geotécnicas de goma triturada (Reddy y Marella, 2001)

Propiedad		Unidades	Mínimo	Máximo	Media	Desviación Estándar	Referencias <sup>3</sup>
Peso Unitario		lbs/pie <sup>3</sup>	15.3	53	36.3	7.6	Humphrey y Machan
Conductividad hidráulica		cm/seg	0.01	59.3	6.8	12.6	Reddy y Bressette
Propiedades de resistencia al corte	c	lbs/pie <sup>2</sup>	0	818	255	284.0	Wu y Ahmed
	$\phi$	grados	14	85	33.7	15.0	Bresette y Edil
Compresibilidad		%	18	65	37.3	11.1	Humphrey y Reddy
Resistencia al corte en la interfaz con el suelo	$c_a^1$	lbs/pie <sup>2</sup>	0	43.8	17.5	17.9	Foose y Gebhardt
	$\delta^2$	grados	33	39	35.8	2.9	Gebhardt
Resistencia al corte en la interface con el geotextil	$c_a^1$	lbs/pie <sup>2</sup>	0	0	0	0	Bernal y Andrews
	$\delta^2$	grados	30	34	32	2.8	Cosgrove y Bernal
Resistencia al corte en la interfaz con geomembrana suave	$c_a^1$	lbs/pie <sup>2</sup>	6.5	12	9.8	2.9	Cosgrove y Bernal
	$\delta^2$	grados	15	21	18	3.0	Cosgorve
Resistencia al corte en la interfaz con geomembrana texturizada	$c_a^1$	lbs/pie <sup>2</sup>	11	21.5	15.2	5.6	Cosgorve
	$\delta^2$	grados	30	35	33	2.6	Cosgorve

$c_a^1$  = adhesión

$\delta^2$  = ángulo de fricción en la interface suelo, geotextil o geomembrana

Referencia<sup>3</sup> = obtenidos de la investigación de Reddy y Marella, 2001

Por su parte, Ahmed y Lovell (1993) realizaron pruebas mecánicas para mezclas de dos tipos de suelo (fino y granular) con goma triturada cuyo tamaño de partículas varía entre ¼ – 2 pulg. Los porcentajes de la mezcla del material que utilizaron variaba entre 0 – 100 % en proporción al peso. El suelo fino utilizado fue “Crosby till” el cual clasifica como CL-ML (arcilla areno limosa) según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (USCS) mientras que según el sistema AASHTO este suelo clasifica como A-4(0). En adición, utilizaron arena

Ottawa la cual es clasificada como arena pobremente gradada (SP) según el sistema USCS y como material A-3(0) según el sistema AASHTO.

Las pruebas de laboratorio realizadas por Ahmed y Lovell (1993) fueron pruebas de permeabilidad y pruebas de compresibilidad. En adición, midieron la densidad de los materiales utilizando una mesa vibratoria para la arena mientras que para la arcilla y la goma triturada, utilizaron el Proctor estándar, el Proctor modificado y 50% de la energía suministrada por el Proctor estándar. De la prueba de peso unitario concluyeron que el método más útil para compactar mezclas de arena con goma triturada es la mesa vibratoria mientras que el método de Proctor es más útil para formar muestras compactadas de goma triturada sola y para mezclas de goma con suelos finos. Otra conclusión a la que llegaron Ahmed y Lovell (1993) fue que el peso unitario de muestras formadas con suelo-goma no varía al aumentar el tamaño de las partículas de la goma triturada utilizada en la mezcla; sólo encontraron una leve variación en la densidad de las muestras cuando se utilizó el método vibratorio. El peso unitario de la goma triturada fue de 40 lbs/pie<sup>3</sup>.

De la prueba de compresión Ahmed y Lovell (1993) concluyen que existen tres mecanismos responsables de la compresión total generada en la goma triturada. Estos tres mecanismos son (1) acomodamiento de las partículas; (2) pandeo y (3) deformación elástica; siendo el pandeo de partículas el mecanismo que más aporta en la compresión de la goma.

Ghazavi y Sakhi (2005) utilizaron mezcla de arena y tiras de goma para determinar las propiedades de resistencia al corte mediante pruebas de corte directo. El contenido de neumático utilizado fue de 15, 30 y 50% por volumen. El ancho promedio de la tiras fue de 2, 3 y 4 cm. Los pesos unitarios obtenidos de las muestras oscilan entre 98 y 107 lbs/pie<sup>3</sup> dependiendo de cuál sea el método de compactación utilizado.



En su investigación Ghazavi y Sakhi (2005) midieron un ángulo de fricción interna de  $67^\circ$ , para un contenido de goma de 50%, utilizando dimensiones de 4x8 cm (espesor x largo) y un peso unitario de 107 lbs/pie<sup>3</sup>. Por su parte, el ángulo de fricción interna medido en muestras de arena fue de  $30^\circ$ . Como parte de los resultados encontraron que la resistencia al corte de la mezcla de arena y goma triturada aumenta al incrementar el contenido de goma triturada. El aumento en la resistencia al corte de la mezcla varía en función de: (1) el contenido de goma, (2) el ancho de la tira y, (3) el nivel de compactación de la muestra.

Humphrey (2004) presentó un estudio de un caso histórico en donde se utilizó neumático triturado como relleno de bajo peso para la construcción de un terraplén con una altura de 32 pies. El relleno fue construido sobre una fundación débil de arcilla marina con un espesor de 40 pies. Se utilizó neumático triturado con un tamaño máximo de 12 pulgadas. El terraplén fue instrumentado con sensores de temperatura debido a que en el pasado se han presentados problemas con el calentamientos de rellenos de neumáticos. Se determinó que la temperatura inicial varió entre 75 y 100 °F y con el pasar de dos años la temperatura disminuyó hasta valores de 55°F. Humphrey (2204) concluyó que el utilizar dicho material como relleno es viable para ser utilizados en terraplenes construidos sobre una fundación de arcilla débil y recomendó seguir ciertas especificaciones para la construcción de los mismos. Entre ellas están el utilizar tamaños de partículas mayores de un pie y limitar la cantidad de material fino.

### **2.3 Propiedades dinámicas de mezcla de goma triturada y arena Ottawa**

Zheng y Sutter (2000) determinaron las propiedades dinámicas (Módulo cortante, G y razón de amortiguamiento, D) de mezcla de arena Ottawa #20-30 con goma triturada utilizando una columna resonante torsional. La goma triturada utilizada por Zheng y Sutter (2000) en esta investigación tenía un tamaño promedio de 2 mm y una gravedad específica de 1.11. El método

de sub-compactación recomendado por Ladd (1978) fue utilizado para la preparación de muestras con porcentajes de arena iguales a 29, 49, 76 y 100% por volumen. El estudio concluye que a medida que el contenido de goma en la muestra aumenta, el módulo de rigidez G disminuye mientras que el amortiguamiento D incrementa. En la Tabla 2.4 se muestra un resumen de los valores de G y D obtenidos para diferentes porcentajes de goma triturada.

Tabla 2.4 Valores de módulo de rigidez (G) y razón de amortiguamiento (D) para distintos porcentajes de mezcla de goma triturada y arena Ottawa (Zheng y Sutter, 2000)

Porcentaje de goma por unidad de volumen	G (MPa)	D (%)
0	222	0.5
29	95	0.6
76	7	4.5

# CAPÍTULO 3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

---

## 3.1 Introducción

Para lograr los objetivos de esta investigación, se midieron las propiedades índices de la arena Ottawa y de la goma triturada tales como la granulometría, la gravedad específica, el peso unitario máximo y mínimo ( $\gamma_{\max}$ ,  $\gamma_{\min}$ ). Luego de determinar las propiedades índices se procedió a medir las propiedades mecánicas (permeabilidad y parámetros de resistencia) de mezclas de arena con diferentes porcentajes de goma. El procedimiento a seguir para medir estas propiedades fue el establecido en las normas ASTM (American Society for Testing Materials) por sus siglas en inglés. A continuación se muestra la codificación según el ASTM de cada una de las pruebas que se realizaron durante esta investigación:

- Granulometría (ASTM D 422)
- Gravedad específica (ASTM D 854)
- Peso unitario máximo (ASTM D 4253)
- Peso unitario mínimo (ASTM D 4254)
- Permeabilidad (ASTM D 2434)
- Corte directo (ASTM D 3080)
- Clasificación (ASTM D 2487)

Estas pruebas fueron realizadas en el laboratorio de Geotecnia del Departamento de Ingeniería Civil y Agrimensura de la Universidad de Puerto Rico en Mayagüez. Los especímenes utilizados para este estudio fueron formados en el laboratorio utilizando arena Ottawa mezclada con goma triturada. Tres tipos de muestras se consideraron en este estudio: (1)

muestras formadas con arena Ottawa; (2) muestras formadas con goma triturada y, (3) muestras formadas con mezclas de arena y goma triturada a diferentes proporciones. Los porcentajes de goma triturada pueden ser obtenidos tomando proporciones por volumen o por peso de los diferentes materiales (arena y goma triturada), como se muestra en las ecuaciones 3.1 y 3.2.

$$X_V = \frac{V_{goma}}{V_{goma} + V_{arena}} \quad (3.1)$$

$$X_P = \frac{W_{goma}}{W_{goma} + W_{arena}} \quad (3.2)$$

donde:

$X_{v,p}$  = porcentaje de goma triturada por volumen o por peso, respectivamente

$V_{goma}$  = volumen de la goma triturada,

$V_{arena}$  = volumen de la arena seca,

$W_{goma}$  = peso de la goma triturada, y

$W_{arena}$  = peso seco de la arena.

Durante esta investigación se utilizó porcentajes de goma triturada tomando proporciones por volumen según se explica en el Capítulo 5.

### 3.2 Formación de muestras

Con el fin de minimizar la segregación entre partículas, obtener especímenes con densidades relativas similares y a su vez parámetros comparables, los especímenes utilizados durante esta investigación fueron formados mediante el método de sub-compactación

(undercompaction) sugerido por Ladd (1978). Este método consiste en compactar el suelo en varias capas, cada una a diferentes grados de compactación, dentro de un cilindro con dimensiones conocidas utilizando un pisón, con el fin de obtener una muestra lo más homogénea posible. Este método es el más recomendado para la preparación de muestras granulares debido a que reduce la segregación entre partículas y se puede utilizar para compactar arenas con una amplia gama de densidades relativas (Mulilis et al., 1977; Ladd, 1978). El método de subcompactación recomienda que la densidad inicial de las capas inferiores sea menor, de tal modo que el peso de las capas superiores aumente la densidad de las capas inferiores formando así capas de densidades más uniformes a través de toda la muestra. Se recomienda utilizar menos energía de compactación en las capas inferiores, ajustando el número de golpes del pisón utilizado. La reducción en la densidad varía linealmente desde la capa inferior hasta la capa superior y se define en términos del porcentaje de sub-compactación ( $U_n$ ) según se define en la ecuación 3.3.

$$U = U_{ni} - \left( \frac{U_{ni} - U_{nt}}{n_t - 1} \right) \cdot (n - 1) \quad (3.3)$$

donde:

$U$  = porcentaje de compactación para la capa  $n$ ,

$U_{ni}$  = porcentaje de sub-compactación para la primera capa (5% recomendado por Ladd),

$U_{nt}$  = porcentaje de sub-compactación para la última capa (0% recomendado por Ladd),

$n_t$  = número total de capas, y

$n$  = el número de la capa o capas en consideración.

El porcentaje de sub-compactación promedio para las capas compactadas está dado por la ecuación 3.4, mientras que la ecuación 3.5 se utilizó para determinar la altura desde el fondo de la primera capa hasta la longitud total de la muestra como se ilustra en la Figura 3.1. La altura total de cada capa no puede exceder 25 milímetros de espesor según recomendado por Ladd (1978).

$$U_{n\text{-promedio}} = \frac{U}{n} \quad (3.4)$$

$$h_n = \frac{h_t}{n_t} \cdot \left[ (n-1) + \left( 1 + \frac{U_n}{100} \right) \right] \quad (3.5)$$

donde:

$h_n$  = altura total desde el fondo del espécimen hasta la capa estudiada (mm), y

$h_t$  = altura total del espécimen (mm).

Los demás parámetros fueron definidos anteriormente.

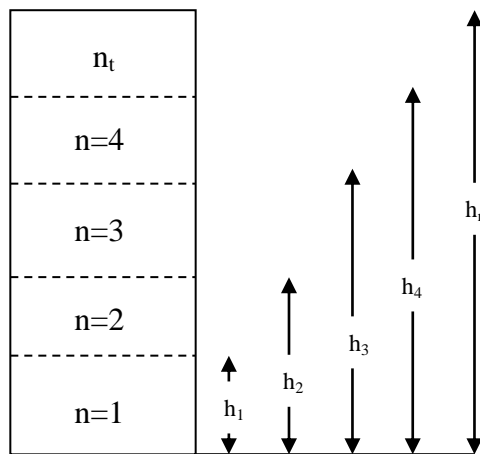


Figura 3.1 Esquema de sub-compactación sugerido por Ladd (adaptado de Ladd, 1978)

### **3.3 Descripción general de los materiales utilizados en la investigación**

En esta sección se presenta una descripción general de los materiales utilizados durante esta investigación. Se presenta una descripción física de la arena Ottawa y de la goma triturada.

#### **3.3.1 Arena Silíceea Ottawa**

Durante esta investigación se formaron muestras de arena utilizando arena Ottawa. La arena Ottawa mezclada con goma ha sido utilizada por varios investigadores en diversos campos de la ingeniería geotécnica (Ahmed and Lovell, 1993, Masad, et al., 1996, Lee, et al., 1999). La arena Ottawa tiene un tamaño de partícula promedio ( $D_{50}$ ) de 0.76 milímetros y sus características físicas indican que tiene granos finos de color blanco, cuyas partículas son redondas y relativamente uniformes. La Figura 3.2 muestra una fotografía representativa de la arena Ottawa. Esta arena tiene una composición química formada por un átomo de sílice y dos átomos de oxígeno ( $\text{SiO}_2$ ), además de que es insoluble en agua (Das, 2010). La distribución de tamaños de la arena Ottawa fue determinada mediante una prueba de tamizado (Capítulo 5). Según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (USCS, por sus siglas en inglés) esta arena se clasifica como una arena uniforme con pobre gradación (SP); mientras que el Asociación Americana de Autoridades Estatales de Carreteras y Transportes, (AASHTO) la clasifica como material A-3(0).



Figura 3.2 Fotografía de la arena Ottawa utilizada en esta investigación

### 3.3.2 Miga de Goma

La goma triturada utilizada en esta investigación fue obtenida de la empresa REMA Inc. ubicada en el municipio de Caguas en Puerto Rico. La distribución de tamaños de la goma triturada fue determinada mediante una prueba de tamizado (ASTM D 422-63) y se obtuvo un tamaño de partícula promedio ( $D_{50}$ ) de 1.37 mm. Según la terminología de la norma ASTM D-6270, dicho material es clasificado como “ground rubber” con tamaños de partículas que varían entre 450  $\mu\text{m}$  hasta aproximadamente 2 mm, libre de hilos de acero y nilón. La Figura 3.3 muestra una fotografía representativa de dicho material.



Figura 3.3 Fotografía de la goma triturada utilizada en esta investigación



### 3.4 Descripción de las pruebas de laboratorio

La sección 3.4 muestra los procedimientos utilizados en las diferentes pruebas de laboratorio realizados durante esta investigación. En adición se muestran fotografías de los diferentes equipos utilizados.

#### 3.4.1 Granulometría

Se realizó la prueba de tamizado siguiendo el procedimiento establecido por la norma ASTM D 422-63 con el propósito de crear una curva granulométrica, determinar los tamaños de partículas y la gradación de los materiales a ser estudiados. Se realizó un total de 2 pruebas por material para corroborar que los resultados fueran consistentes.

La secuencia de tamices que se utilizó para la arena Ottawa fue el siguiente # 16, 18, 20, 25, 30, 35 y bandeja, mientras que para la goma triturada los tamices utilizados fueron el #10, 14, 16, 18, 20, 25, 30 y la bandeja. A partir de los resultados obtenidos de la curva de distribución granulométrica se calculó el coeficiente de uniformidad ( $C_u$ ) y el coeficiente de gradación ( $C_c$ ), definidos según las ecuaciones 3.6 y 3.7

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (3.6)$$

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{60} \cdot D_{10}} \quad (3.7)$$

donde:

$D_{10}, D_{30}, D_{60}$  = diámetros correspondientes al 10, 30 y 60% pasando, respectivamente, en la curva de distribución granulométrica.

El coeficiente de uniformidad,  $C_u$ , representa la extensión de la curva granulométrica; a mayor extensión de la curva, se tendrá una mayor variedad de tamaños lo que representa un suelo bien gradado. Una arena con buena gradación tiene un valor de  $C_u > 6$ , mientras que las gravas tienen un  $C_u > 4$ . El coeficiente de curvatura,  $C_c$ , indica si una curva es constante, o sin escalonamientos. Para las arenas, esto ocurre cuando  $1 < C_c < 3$  (Das, 2010). Para que un material tenga una buena gradación debe cumplir con ambas especificaciones.

### 3.4.2 Gravedad Específica

La prueba de gravedad específica fue realizada conforme al procedimiento establecido por la norma ASTM D 854 – 02. Se utilizó un picnómetro con una capacidad de 500 ml según se ilustra en la Figura 3.4. La gravedad específica se determinó a muestras de mezclas de goma triturada y arena a distintos porcentajes por volumen (10, 20, 40, 60, 80 y 100%). Se realizaron un total de 2 pruebas por espécimen para corroborar que los resultados fueran consistentes.

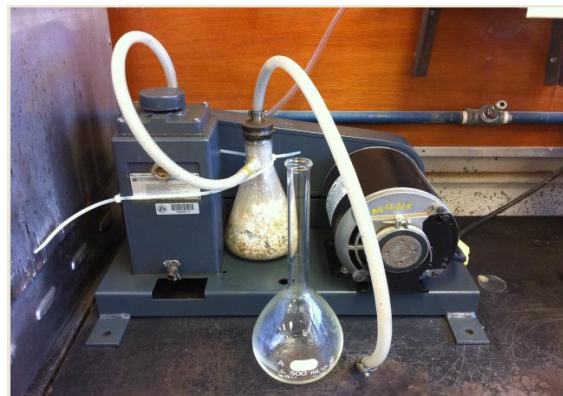


Figura 3.4 Fotografía del equipo utilizado para determinar la gravedad específica de los materiales estudiados

### 3.4.3 Peso Unitario Máximo y Mínimo

Se determinó el peso unitario mínimo ( $\gamma_{d \text{ min}}$ ) de la arena silíceo Ottawa, goma triturada y mezcla de ambos materiales según el procedimiento establecido por la norma ASTM D 4254-00. Este valor representa el peso unitario del material en su estado más suelto. Los porcentajes de goma triturada utilizados en esta prueba fueron de 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 y 100 por ciento por volumen y por peso.

Para medir el peso unitario mínimo se utilizó un envase con un volumen de 233 cm<sup>3</sup> y una balanza con una precisión de 0.001gramos para pesar los materiales a ser evaluados. La preparación de las muestras para el llenado del envase fue por medio de caída libre utilizando un embudo colocado a una distancia no mayor de 1.5 pulgada de la muestra. Se utilizó la ecuación 3.8 para determinar el peso unitario seco del material. Es importante mencionar que para el análisis de peso unitario, las mezclas de goma triturada con arena Ottawa fueron realizadas tanto en proporción por peso como por volumen.

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V} \quad (3.8)$$

donde:

$\gamma_d$  = peso unitario seco de la muestra,

$W_s$  = peso seco del material (arena, goma triturada o mezcla de ambos), y

$V$  = volumen del envase.

En adición, se realizaron una serie de pruebas para determinar el peso unitario máximo ( $\gamma_{\text{max}}$ ) de la arena silíceo Ottawa y de la goma triturada según el procedimiento establecido por la norma ASTM D 4253 utilizando una mesa vibratoria marca Syntron modelo VR51A1 para compactar la muestra operando a una frecuencia de 60 Hz por 8 minutos. La Figura 3.5 muestra

una fotografía de la mesa vibratoria utilizada durante la investigación. Una vez medidos los valores de  $\gamma_{\max}$ ,  $\gamma_{\min}$  y  $G_s$  se calculó la razón de vanos máxima y mínima utilizando las ecuaciones 3.9 y 3.10.



Figura 3.5 Fotografía de la mesa vibratoria utilizada para la determinación del peso unitario máximo ( $\gamma_{\max}$ )

$$e_{\min} = \frac{\gamma_w \cdot G_s}{\gamma_{\max}} - 1 \quad (3.9)$$

$$e_{\max} = \frac{\gamma_w \cdot G_s}{\gamma_{\min}} - 1 \quad (3.10)$$

donde:

$e_{\min}$  = razón de vanos mínima,

$e_{\max}$  = razón de vanos máxima,

$\gamma_w$  = peso unitario del agua, 62.4 lbs/pie<sup>3</sup>,

$\gamma_{\max}$  = peso unitario máximo del material, y

$\gamma_{\min}$  = peso unitario mínimo del material.

### 3.4.4 Permeabilidad

La permeabilidad se representa como el caudal promedio de agua bajo un gradiente de presión por unidad de área que fluye a través de un medio poroso. Un suelo permeable es aquel que es capaz de ser penetrado por una sustancia, por lo general líquido (agua) y/o gas (Cedergren, 1989). Los estudios de permeabilidad son esenciales para la planificación y el diseño de proyectos como represas, rellenos sanitarios, muros de contención y vertederos, entre otros. El flujo de agua a través de medios porosos fue investigado por Darcy en 1856 y descubrió que el caudal puede ser expresado según la ecuación 3.11. Existen dos pruebas disponibles en el laboratorio para medir la permeabilidad del suelo: (1) la prueba de carga constante, y (2) la prueba de carga variable.

$$Q = \frac{\partial V}{\partial t} = k \cdot i \cdot A \quad (3.11)$$

donde:

$Q$  = caudal,

$\partial V$  = variación del volumen en un diferencial de tiempo,

$\partial t$  = diferencial de tiempo,

$k$  = coeficiente de permeabilidad,

$A$  = área transversal del suelo, e

$i$  = gradiente hidráulico.

Para suelos con menos de 10% de finos se recomienda el uso de la prueba de carga constante, mientras que suelos con un porcentaje de finos mayor de 10% se recomienda el uso de la prueba de carga variable (Das, 1992). Las muestras utilizadas en este estudio serán formadas con arena seca y goma triturada a una densidad relativa de 90%; es por tal razón que la

prueba de carga constante será utilizada para medir la permeabilidad del material. Se utilizó el método de sub-compactación sugerido por Ladd (1978) para la preparación de los especímenes. Las muestras fueron preparadas en doce (12) capas aumentando la energía de compactación en cada una de las diferentes capas. A cada capa se le aplicó una gota de agua utilizando un gotero para evitar segregación en la muestra y facilitar el método de compactación. Para compactar la muestra se utilizó un mortero con un peso de 164.4 gramos a una altura o caída de 10 cm de la muestra. En el caso de la muestra con arena Ottawa, la primera capa recibió un total de 30 golpes incrementando la cantidad de golpes a una razón de 30 golpes por capa, para un total de 360 golpes aplicados para compactar la última capa. El Apéndice A muestra los detalles de los golpes para cada capa y para cada prueba realizada durante esta investigación en forma tabulada. Se realizaron un total de 2 pruebas por espécimen para corroborar que los resultados fueran consistentes.

La Figura 3.6 muestra una fotografía del permeámetro utilizado durante la prueba de carga constante. Este permeámetro consiste de un cilindro de plástico rígido hermético con un diámetro de 2½” y una altura igual a 14 cm. En la parte superior e inferior de la muestra se colocan piedras porosas con el propósito de que el flujo de agua pase a través del permeámetro de forma uniforme. Para sellar el permeámetro y evitar filtraciones se colocan juntas de goma en la parte superior, intermedia e inferior del permeámetro según se puede observar en la Figura 3.6 (a).

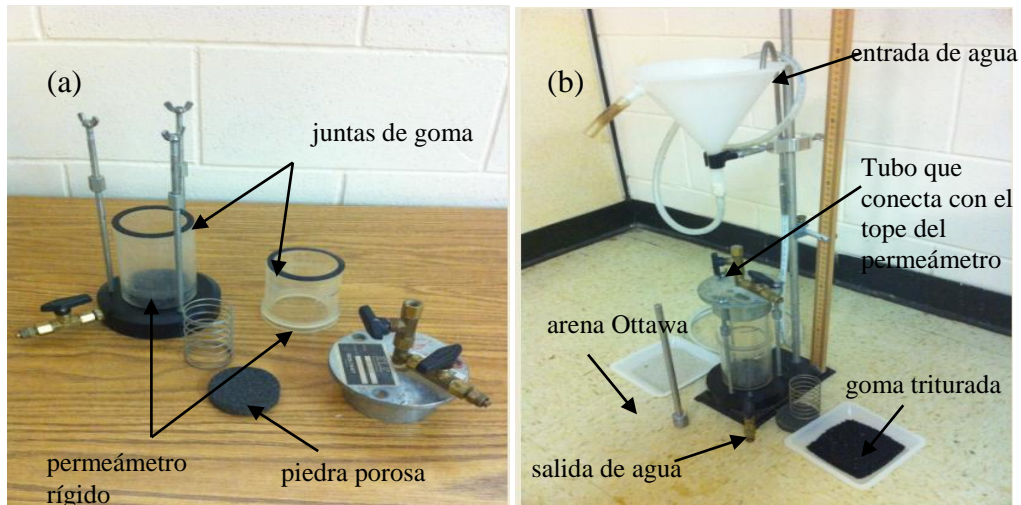


Figura 3.6 Fotografía del equipo de laboratorio para determinar la permeabilidad de un suelo bajo carga constante

La prueba de carga constante consiste en determinar el tiempo,  $t$ , necesario en recolectar 150 ml de agua en un cilindro graduado, bajo un gradiente de presión constante,  $h$ , según se especifica en la norma ASTM 2434. A su vez, se mide la longitud,  $L$ , y el diámetro de la muestra. La Figura 3.7 incluye un diagrama esquemático mostrando la dirección en la que fluye el agua y los parámetros utilizados para el cómputo del coeficiente de permeabilidad ( $k$ ) según la ecuación 3.12.

$$k = \frac{V_{rec} \cdot L}{A \cdot t \cdot h} \quad (3.12)$$

donde:

$V_{rec}$  = volumen de agua recolectado,  $150\text{cm}^3$  (constante),

$L$  = largo de la muestra,

$A$  = área seccional de la muestra ( $31.65\text{ cm}^2$ ),

$t$  = tiempo promedio para recolectar volumen de agua, y

$h$  = diferencia de carga hidráulica entre la entrada y la salida del agua, el cual se mantuvo constante durante la prueba.

Seis pruebas de conductividad hidráulica fueron realizadas durante esta investigación utilizando distintos porcentajes por volumen de goma triturada mezclada con arena, variando el porcentaje entre 0, 20, 40, 60, 80 y 100%. Las muestras fueron preparadas utilizando el método de sub-compactación en doce capas descrito en la sección 3.2. Un total de 2 pruebas por material fueron realizadas para corroborar que los resultados fueran consistentes.

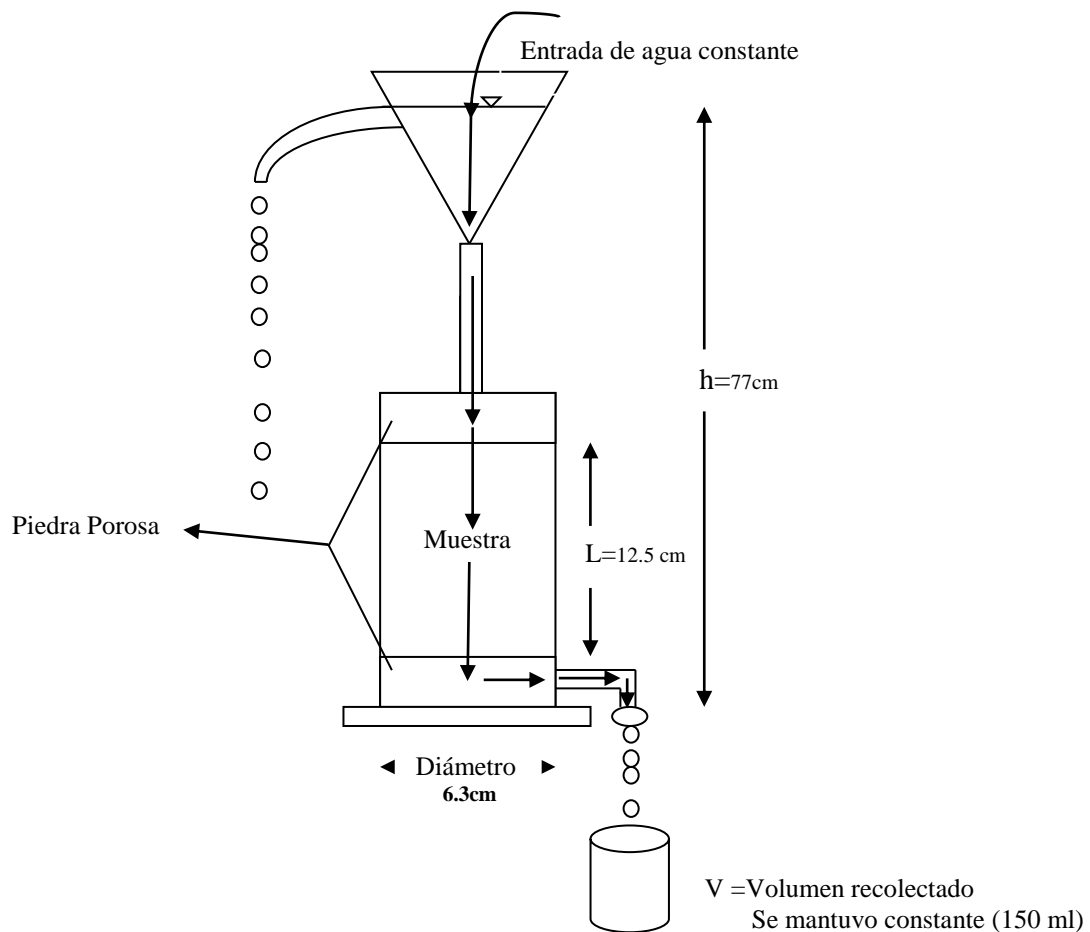


Figura 3.7 Diagrama esquemático del equipo utilizado en el laboratorio para medir permeabilidad bajo carga constante



### 3.4.5 Corte Directo

Se realizaron pruebas de corte directo para medir los parámetros de resistencia al corte del suelo tales como la cohesión ( $c'$ ) y el ángulo de fricción interna ( $\phi'$ ) en términos de esfuerzos efectivos en muestras de arena con diferentes porcentajes de goma triturada. Estas pruebas fueron realizadas siguiendo el procedimiento establecido en la norma ASTM D 3080. La Figura 3.8 muestra una fotografía del equipo de corte directo, marca Wykeham-Farrance modelo 25401, utilizado durante esta investigación; en la misma se muestran los componentes principales del equipo. Conocida la resistencia al corte del suelo se puede determinar el empuje de tierra sobre muros de contención, la capacidad portante o de soporte de una zapata, la estabilidad de taludes en cortes o terraplenes, efectuar el diseño y/o análisis de pilotes, entre otros análisis. Los parámetros  $c$  y  $\phi$  son utilizados para definir la resistencia al corte del suelo según la ecuación 3.13 definida por Coulomb en el año 1776.

$$\tau_f = c + \sigma \cdot \tan \phi \quad (3.13)$$

donde:

$\tau_f$  = resistencia al corte del suelo,

$c$  = cohesión del material,

$\sigma$  = esfuerzo normal en el plano de falla, y

$\phi$  = ángulo de fricción interna del material.

Cerca del año 1920 Terzaghi introduce el principio de esfuerzos efectivos e indica que en caso de que el suelo esté en una condición saturada, los esfuerzos internos que se originarán por la aplicación de la carga externa, serán una combinación de esfuerzos intergranulares y de

presiones de poros,  $u$ . Por lo tanto, se debe tener presente que la ecuación 3.13 se re-escribe en términos de esfuerzos efectivos, como se muestra en la ecuación 3.14

$$\tau_f = c' + (\sigma - u) \cdot \tan \phi' \quad (3.14)$$

donde:

$c'$  = cohesión del material en términos de esfuerzos efectivos,

$u$  = presión de poros, y

$\phi'$  = ángulo de fricción interna del material en términos de esfuerzos efectivos.

En arenas limpias donde no existe adhesión u otra forma de unión entre sus granos, la resistencia al corte del material,  $\tau_f$ , está dado simplemente por la fricción del material ( $\sigma' \cdot \tan \phi'$ )

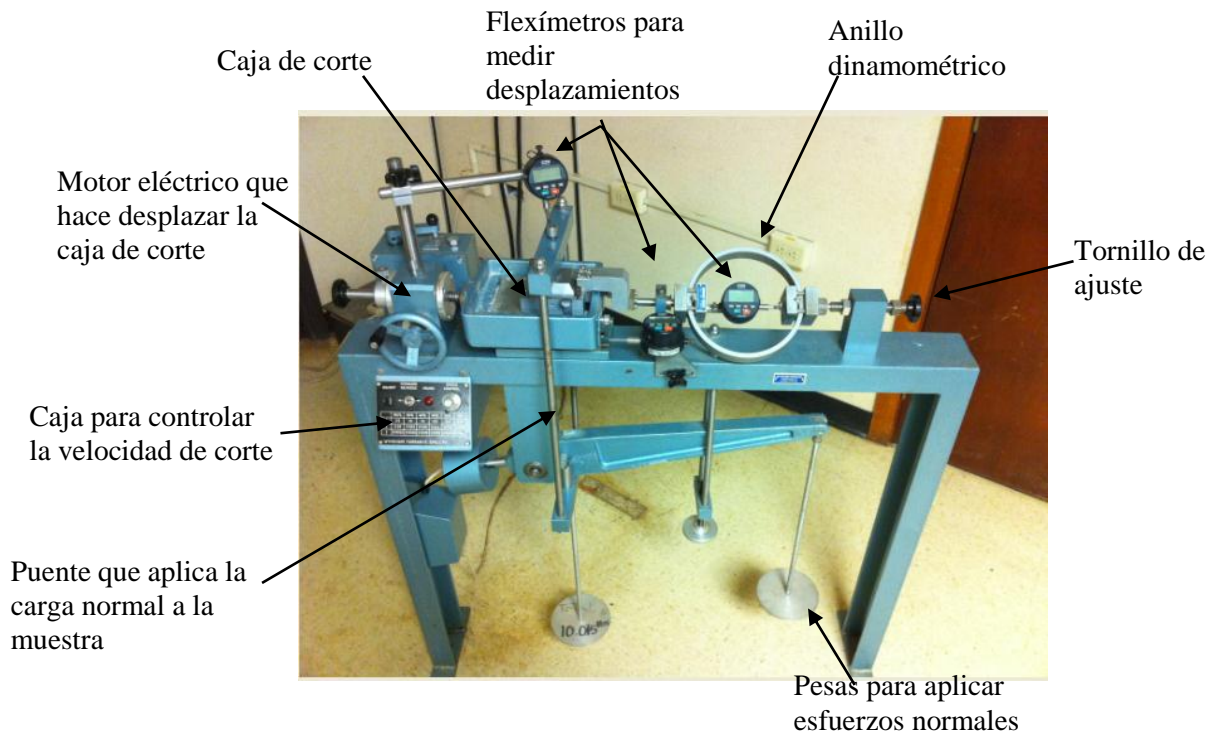


Figura 3.8 Fotografía del equipo de corte directo utilizado durante esta investigación

En el ensayo de corte directo se utilizó una muestra cuadrada con un ancho de 2.5 pulgadas, que lleva como nombre caja de corte, según se ilustra en la Figura 3.9. Las muestras fueron formadas en seco utilizando el método de sub compactación sugerido por Ladd (1978). Durante la compactación de las muestras se utilizó un total de cinco (5) capas. Los detalles de los golpes aplicados a cada capa se presentan en el Apéndice A. Se realizaron un total de 21 ensayos con distintos porcentajes por volumen de arena Ottawa mezclada con goma triturada (0, 10, 20, 25, 30, 40, 100%) cada una bajo esfuerzos normales variando entre 10 y 30 lbs/pulg<sup>2</sup>. Cabe mencionar que este rango de presiones simula los esfuerzos normales que experimentan típicamente los suelos utilizado como material de relleno en los muros de contención.

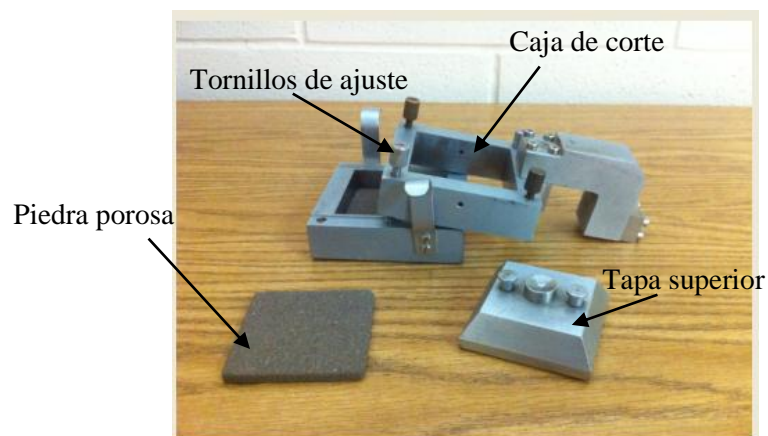


Figura 3.9 Fotografía de la caja de corte cuadrada utilizada en el ensayo de corte directo

En esta investigación se utilizó el ensayo de deformación controlada para determinar los parámetros de resistencia del material. Durante la ejecución de la prueba, la caja de corte fue desplazada a una velocidad constante de 0.8 mm/min y se tomaron lecturas de desplazamiento vertical, desplazamiento horizontal y el desplazamiento del anillo dinamométrico utilizando flexímetros CDI (Chicago Dial Indicator), modelo BG2110 ilustrado en la Figura 3.10. Los

flexímetros utilizados en esta investigación tienen la capacidad para medir deformaciones con una precisión de 0.0001 pulgadas.



Figura 3.10 Fotografía del flexímetro utilizado para medir deformaciones en la prueba de corte directo y triaxial

El esfuerzo cortante ( $\tau$ ) generado a través del plano de falla se calculó utilizando la ecuación 3.15.

$$\tau = \frac{F}{A_{\text{corregida}}} \quad (3.15)$$

donde:

$\tau$  = esfuerzo cortante,

$F$  = fuerza horizontal generada a través del plano de falla, y

$A_{\text{corregida}}$  = área corregida ajustada debido a la deformación horizontal ( $\Delta H$ ) de la muestra. Para una muestra cuadrada esta corrección se determina de la siguiente manera:  $A_{\text{corregida}} = 2.5 (2.5 - \Delta H)$

Gráficas de esfuerzo-desplazamiento fueron desarrolladas para definir la resistencia al corte de las muestras (mostrada en el Capítulo 5). Es importante mencionar que para esta investigación la resistencia al corte fue definida como el esfuerzo cortante máximo o el esfuerzo generado a un

desplazamiento horizontal igual a 10% del diámetro de la caja de corte o 0.25 pulgadas, según lo sugerido por el ASTM 3080.

### 3.4.6 Resistencia drenada del suelo

Las pruebas de compresión triaxial hoy en día son las más utilizadas para la determinación de los parámetros de resistencia de los suelos tales como la cohesión,  $c'$ , y el ángulo de fricción interna  $\phi'$ . La resistencia drenada de muestras de arena Ottawa mezcladas con diferentes porcentajes de goma fue medida en el laboratorio mediante ensayos triaxiales consolidada - drenada (tipo CD). La Figura 3.11 muestra un diagrama esquemático de la cámara triaxial ilustrando sus componentes principales. Se utilizó la máquina triaxial TRITECH Wykeham-Farrance modelo 10057, capaz de aplicar hasta un máximo de 11,240 lbs de carga axial a una razón de deformación que puede variar entre 0.00001 mm/min hasta 5.999999 mm/min. En adición, se utilizó una cámara triaxial ELE International, capaz de soportar una presión de confinamiento de hasta 250 lbs/pulg<sup>2</sup>. La Figura 3.12 muestra una fotografía de la máquina triaxial y la cámara triaxial utilizada durante esta investigación.

La presión de confinamiento aplicada al espécimen es controlada por un compresor de aire automático marca CRAFTSMAN (Figura 3(a)) que comunica con el panel de control de aire, capaz de aplicar una presión máxima de hasta 125 lbs/pulg<sup>2</sup>. El compresor trabaja con un motor de 1 caballo de fuerza y con una fuente de 120 voltios. El panel de control para regular la presión aplicada al espécimen es ilustrado en la Figura 3.13 (b). Finalmente, la magnitud de la carga axial aplicada en el espécimen se midió con un anillo dinamométrico, Wykeham-Ferrance (Serie 2897), el cual tiene una capacidad de soportar hasta 1,000 lbs. La deformación de la muestra,  $\Delta L$ , se midió utilizando flexímetros CDI (Chicago Dial Indicator), modelo BG2110 capaz de medir una precisión de hasta 0.0001 pulgadas.

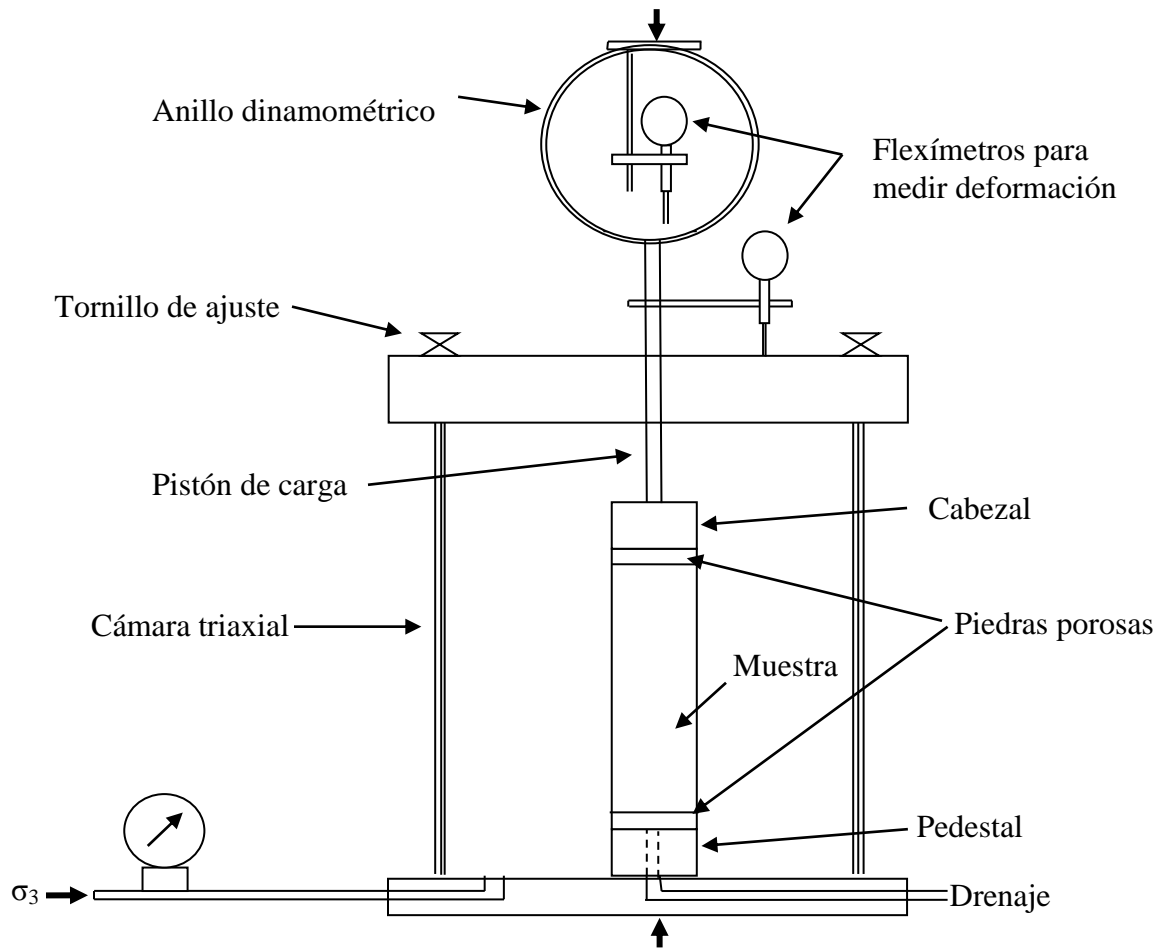


Figura 3.11 Diagrama esquemático de la cámara triaxial



(a)

(b)

Figura 3.12 Fotografía del equipo triaxial utilizado para el desarrollo de pruebas consolidadas - drenadas (CD) (a) máquina triaxial TRITECH (b) cámara triaxial ELE



(a)

(b)

Figura 3.13 Fotografía del sistema utilizado para la aplicación de presión de confinamiento (a) compresor de aire automático CRAFTSMAN (b) panel de control

Se realizaron un total de 21 ensayos a muestras de arena Ottawa mezclada con goma triturada en proporción por volumen a diferentes porcentajes (0, 10, 20, 25, 30, 40 y 100%), cada uno bajo un esfuerzo de confinamiento diferente,  $\sigma_3$ , (10, 20 y 30 lbs/pulg<sup>2</sup>) con el propósito de cubrir una rango de esfuerzos típicos a la cual una muestra de suelo sería sometido en un muro de retención de alrededor de 35 pies de altura. Debido a que la permeabilidad de la arena es alta, la razón de deformación puede ser bastante alta, para arenas típicamente se utiliza un valor que varía entre 0.50 y 1.27 mm/min. La razón de deformación utilizada durante esta investigación fue de 1.0 mm/min. Como criterio de falla se utilizó el esfuerzo cortante máximo alcanzado o el esfuerzo alcanzado a una deformación unitaria, ( $\epsilon$ ), igual al 20% (Bardet, 1997).

La prueba triaxial se divide en dos etapas principales. La primera etapa consiste en aplicar una presión hidrostática al espécimen en todas las direcciones mediante la inyección de

agua a presión dentro de la cámara triaxial. Esta presión aplicada alrededor de la muestra se mantiene constante durante la prueba y se le conoce como esfuerzo de confinamiento,  $\sigma_3$ . La segunda etapa consiste en aplicar un esfuerzo axial,  $\sigma_d$  (esfuerzo desviador) a la muestra a través del pistón de carga hasta causar la falla de corte en el espécimen. La Figura 3.14 muestra un esquemático de las dos etapas que ocurren en un ensayo triaxial.

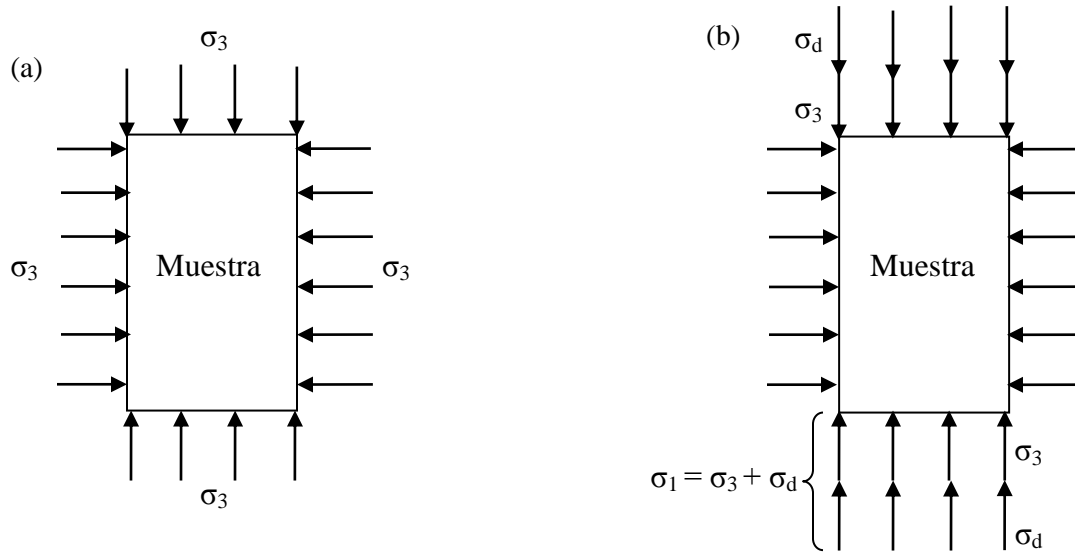


Figura 3.14 Esquemático de las etapas del ensayo triaxial tipo CD (a) etapa de confinamiento, (b) etapa de corte

La Figura 3.15 muestra una secuencia de imágenes a seguir para la preparación del espécimen. Durante la preparación de la muestra se colocó una piedra porosa sobre el pedestal y luego una membrana de látex cuyo espesor es de 0.4 milímetros que envuelve la muestra con el propósito de protegerla y aislarla del medio que la rodea. La membrana de látex se ajustó sobre el pedestal por medio de anillos de gomas, mejor conocidos como “O-rings”, con el propósito de crear un cierre hermético.



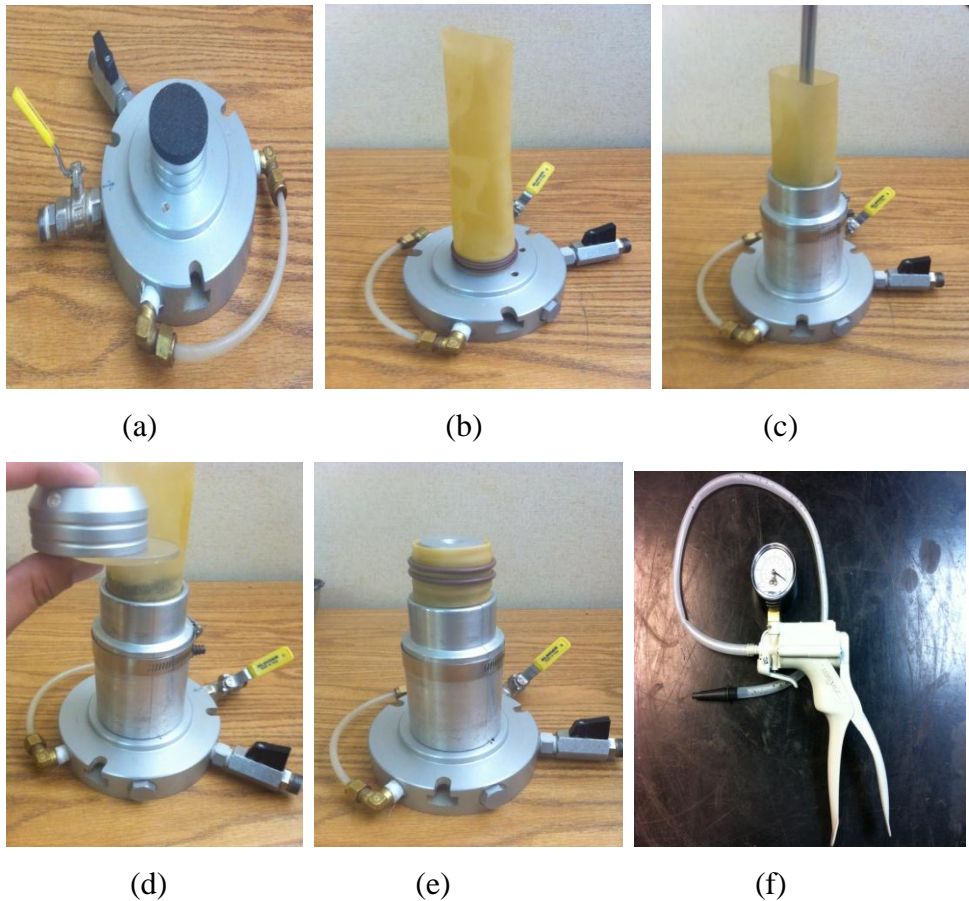


Figura 3.15 Preparación de la muestra para la prueba triaxial (a) piedra porosa en el pedestal, (b) membrana de látex, (c) proceso de sub-compactación, (d) cilindro transparente junto al cabezal, (e) ajuste del cabezal utilizando “O-rings”, (f) máquina de succión

Luego se procedió a compactar la muestra en 8 capas utilizando el proceso de sub-compactación sugerido por Ladd (1978); véase el apéndice para detalles de dicho proceso. Antes de compactar, cada capa es mezclada con una gota de agua y luego agitada por 30 segundos dentro de una tara, con el propósito de generar una cohesión aparente que facilite el proceso de compactación al igual que ayude a disminuir la segregación de la muestra.

Una vez llegada a la altura deseada se colocó un cilindro de acrílico transparente con un espesor de 3.20 milímetros, con el propósito de apoyar la tapa de la cámara en donde descansa el pistón que aplica la fuerza de corte, para que así pueda estar lo más nivelado posible. Para

finalizar, se le aplicó un vacío a la muestra de 0.4 lbs/pulg<sup>2</sup> recomendado por Bishop y Henkel (1957), con el fin de poder transportar la muestra a la máquina triaxial y poder tomar las medidas correspondientes del diámetro, altura y peso.

La deformación del aro dinamométrico y de la muestra ocurridas a consecuencia de la aplicación del esfuerzo desviador,  $\sigma_d$ , se midieron utilizando flexímetros con una precisión de 0.0001 pulgadas. Multiplicando la deformación del aro por la constante elástica dado por el fabricante (0.76969), se conoce la carga en libras,  $F$ , que se le aplica al aro igual que a la muestra. El esfuerzo desviador,  $\sigma_d$ , fue calculado utilizando la ecuación 3.16.

$$\sigma_d = \frac{F}{A_{\text{corregida}}} \quad (3.16)$$

donde:

$\sigma_d$  = esfuerzo desviador,

$F$  = fuerza axial aplicada a la muestra, y

$A_{\text{corregida}}$  = área corregida de la muestra.

El área corregida es definida a su vez por la ecuación 3.17.

$$A_{\text{corregida}} = \frac{A_o}{1 - \frac{\varepsilon}{100}} \quad (3.17)$$

donde:

$A_o$  = área inicial de la muestra, y

$\varepsilon$  = deformación unitaria expresado en porcentaje (adimensional).

La evaluación de los parámetros de resistencia al corte de los suelos se realiza dibujando los círculos de Mohr y trazando la envolvente de falla entre los círculos. Estos parámetros pueden ser evaluados trazando la trayectoria de esfuerzos, los cuales se obtienen por medio de la construcción de diagramas p-q. La trayectoria de esfuerzos es una forma más conveniente de seguir el proceso de la carga aplicada, respecto a la envolvente de falla. Para la construcción del los diagramas p-q es necesario utilizar las ecuaciones 3.18 y 3.19

$$p = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} ; p' = \frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2} \quad (3.18)$$

$$q = q' = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \quad (3.19)$$

donde:

$p$  = esfuerzo principal total menor,

$q$  = esfuerzo desviador,

$\sigma_1$  = esfuerzo axial de falla, y

$\sigma_3$  = esfuerzo de confinamiento.

Luego de realizar el diagrama p-q para los tres ensayos al momento de falla, se realizó una regresión lineal entre los puntos definida como la línea de rotura,  $K_f$ , cuyo ángulo de inclinación se denomina con la variable alfa  $\alpha$  y su intercepto con la ordenada corresponde al valor de “d”. Aplicando principios trigonométricos se obtiene una relación entre  $\alpha$  y “d” y los parámetros de resistencia al corte del suelo ( $c$  y  $\phi$ ), expresada en la ecuación 3.20 y 3.21. La

Figura 3.16 muestra un esquemático comparativo entre el círculo de Mohr y el diagrama p-q sugerido por Lambe.

$$\sin \phi' = \tan \alpha \quad (3.20)$$

$$c' = \frac{d}{\cos \alpha'} \quad (3.21)$$

donde:

$\alpha'$  = ángulo de inclinación de  $K_f$ ,

$d$  = intercepto con el eje de  $q$  de la línea  $K_f$ ,

$\phi'$  = ángulo de fricción interna del material en términos de esfuerzos efectivos, y

$c'$  = cohesión del material en término de esfuerzos efectivos.

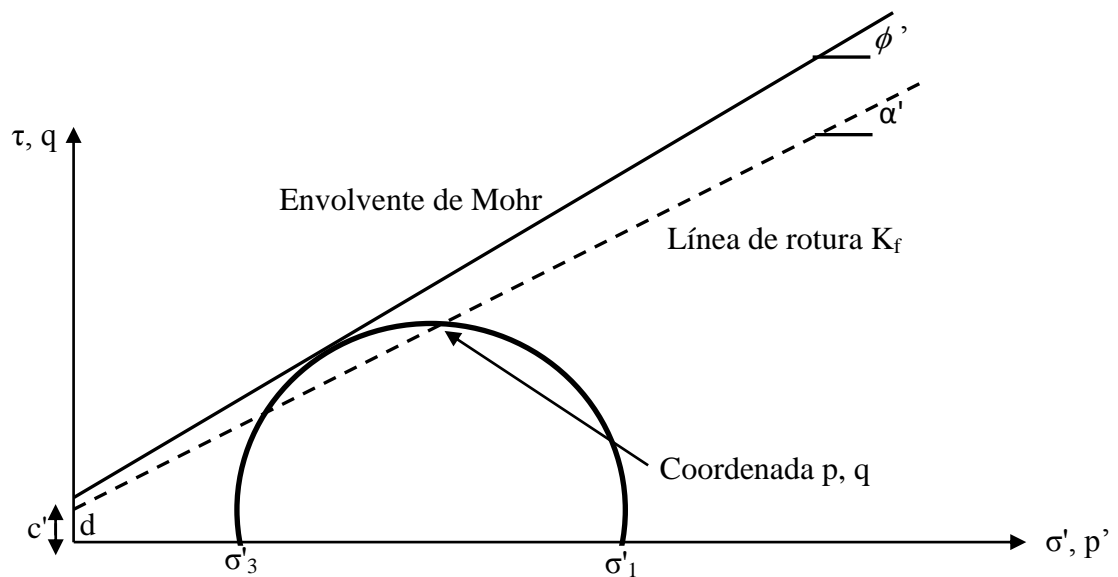


Figura 3.16 Esquemático entre el diagrama de Mohr y el diagrama p-q y sus componentes

### 3.4.7 Módulo Tangente Inicial

El módulo de elasticidad de un material,  $E_i$ , también conocido como módulo de Young, se obtiene como la pendiente de la curva de esfuerzo - deformación dentro de la zona del comportamiento elástico, la parte lineal de la curva. El módulo tangente inicial es un parámetro que mide la rigidez de un material y es obtenido de la prueba triaxial, expresado según la ecuación 3.22. La Figura 3.17 muestra un esquema de un cilindro bajo carga axial y las variables necesarias para la determinar  $E_i$ .

$$E_i = \frac{\text{Esfuerzo } (\sigma)}{\text{Deformacion Unitaria } (\varepsilon)} = \frac{F/A}{\Delta L/L} \quad (3.22)$$

donde:

$E_i$  = módulo tangente inicial,

$F$  = fuerza aplicada sobre el espécimen,

$A$  = área del espécimen,

$L$  = largo de la muestra,

$\Delta L$  = cambio en longitud debido a la fuerza aplicada sobre el espécimen, y

$\varepsilon$  = deformación unitaria.

Los suelos densos tienden a tener un módulo tangente inicial mayor que los suelos sueltos. Por lo tanto, tener dos tipos de suelos con el mismo peso unitario no necesariamente es indicativo de tener el mismo módulo de elasticidad debido a que el arreglo de partículas puede ser distinto. Es por tal razón, que a medida que aumentan los esfuerzos de confinamiento, ( $\sigma_3$ ), el módulo de elasticidad tiende a aumentar. Valores bajos de  $E_i$ , menores de 800 lbs/pulg<sup>2</sup>, son indicativos de materiales altamente compresibles (GeoSyntec, 2008).

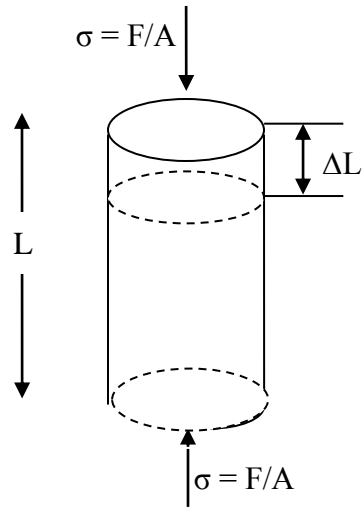


Figura 3.17 Cilindro bajo carga axial utilizado para representar parámetros importantes en el cómputo del módulo tangente inicial

# CAPÍTULO 4. CONCEPTOS TEÓRICOS- MUROS DE CONTENCIÓN

---

## 4.1 Introducción

A continuación se presenta un resumen teórico de los conceptos básicos de los análisis realizados a muros de contención al voladizo y mecánicamente estabilizados. Los datos experimentales medidos en el laboratorio durante esta investigación fueron utilizados para realizar una hoja de cálculo con la finalidad de diseñar según el método LRFD (Load Resistance Factor Design), muros de contención al voladizo utilizando goma triturada y/o arena como relleno verificando la estabilidad al volcamiento, al deslizamiento y las presiones de contacto originadas en la interfaz suelo-muro.

## 4.2 Muro de contención al voladizo

Un muro de contención al voladizo consiste de un tallo delgado (stem) y una losa de base donde se ubica la punta y el talón como se muestra en la Figura 4.1. Estos muros se construyen de hormigón reforzado y son económicos hasta una altura de 25 pies (Das, 2010). El uso de este tipo de muro trae ciertos problemas de costo, dificultad en la construcción, problemas de estética y problemas de comportamiento cuando son soportados sobre suelos compresibles. Es importante mencionar que dichos muros deben considerar medidas para controlar el drenaje interno para evitar la saturación del relleno e interceptar cualquier flujo superficial que contenga elementos agresivos (AASHTO, 2007).

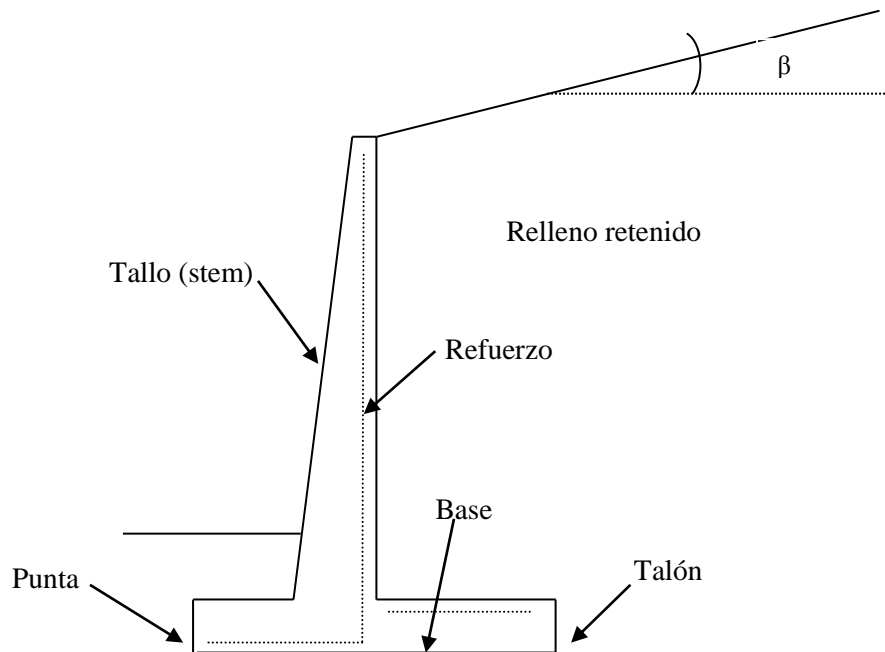


Figura 4.1 Componentes de un muro en voladizo (Das, 2010)

### 4.3 Muro de contención mecánicamente estabilizado (MSE Wall)

Los muros de contención mecánicamente estabilizados fueron desarrollados a principios del año 1960 por el ingeniero francés Henri Vidal quien investigó el comportamiento de terraplenes reforzados utilizando bandas y/o tiras metálicas como armadura con el objetivo de presentar soluciones alternas a los muros de hormigón reforzados tradicionales. El sistema se basa en el principio de incrementar la resistencia al esfuerzo cortante del suelo por medio de la fricción generada por las armaduras también conocidas como inclusiones. El largo mínimo de las armaduras o refuerzos deberá ser igual al 70 por ciento de la altura del muro medida desde la base. En casos donde existan condiciones tales como sismos y sobrecargas, el largo mínimo de refuerzo podría variar entre 80 y 110% de la altura del muro (FHWA, 2009). La configuración de un muro mecánicamente estabilizado y sus componentes se ilustra en la Figura 4.2



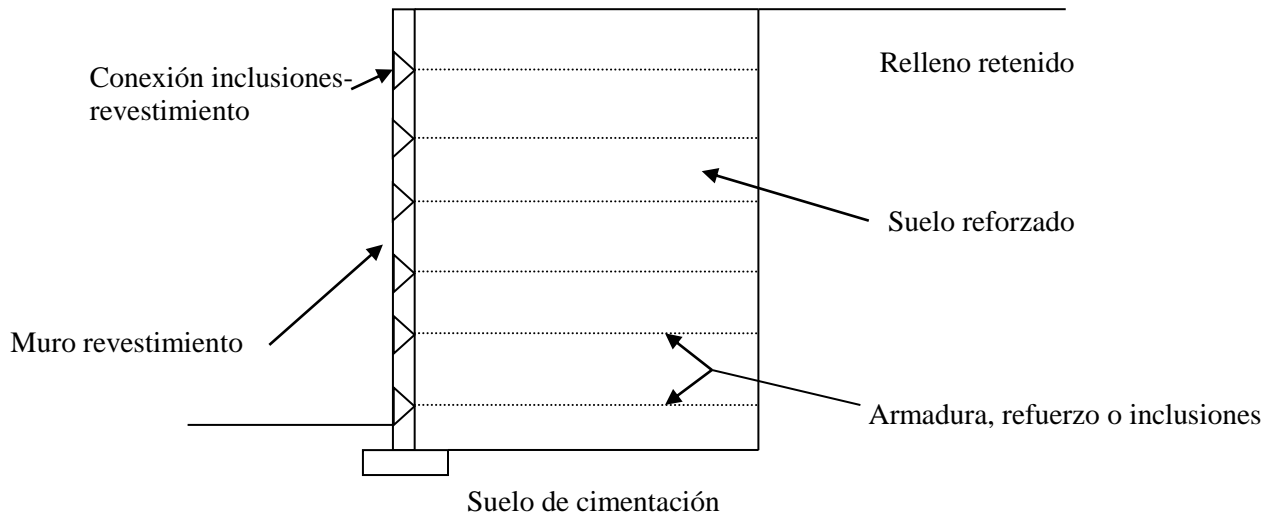


Figura 4.2 Componentes de un muro mecánicamente estabilizado (FHWA, 2009)

El material para la construcción del revestimiento controla la estética del muro y usualmente son construidos de paneles de concreto prefabricados, bloques, malla de alambre soldada y gaviones; siendo los paneles prefabricados y los bloques los más utilizados en la construcción. Los paneles prefabricados tienen un ancho mínimo de 5-½ pulgadas y usualmente tienen geometrías de tipo cuadrado, diamante, rectangular, hexagonal o cruciforme. Las dimensiones típicas de manufacturación de los paneles son de 5 a 10 pies de ancho y 5 pies de altura. La Figura 4.3 muestra una vista frontal de los paneles de revestimiento prefabricados con refuerzo metálico y geometría cruciforme. La pared más alta construida con paneles cruciforme tiene una altura de 138 pies, la cual fue construida con refuerzos metálicos y se encuentra ubicada en el aeropuerto SeaTac de la ciudad de Seattle, en el estado de Washington, la misma se ilustra en la Figura 4.4 (FHWA, 2009). La Figura 4.5 muestra un muro mecánicamente estabilizado hecho de bloques y geosintéticos como mecanismo de refuerzo, ubicado en el pueblo de Cabo Rojo, Puerto Rico.

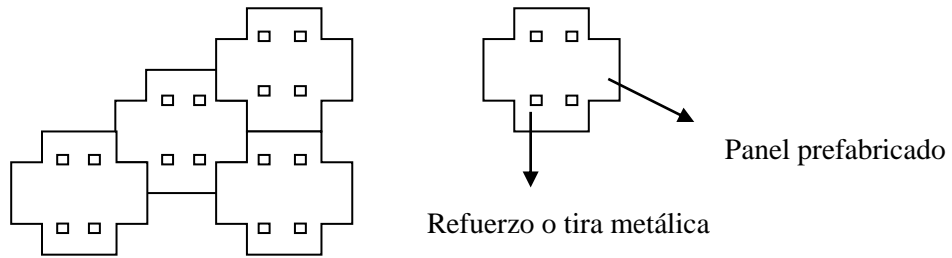


Figura 4.3 Vista frontal de los paneles prefabricados utilizados en muros mecánicamente estabilizados (FHWA, 2009)

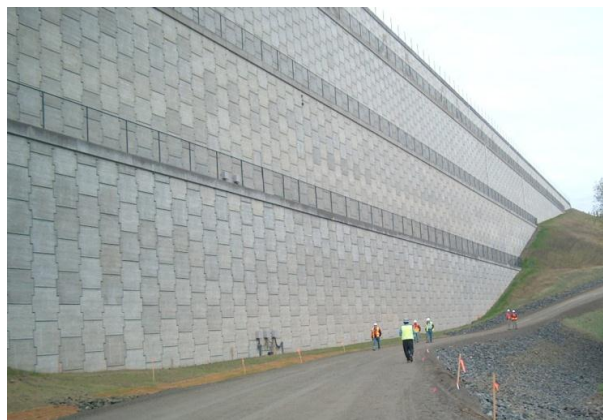


Figura 4.4 Fotografía del muro mecánicamente estabilizados ubicado en el aeropuerto SeaTac (FHWA,2009)

Las ventajas de utilizar los muros mecánicamente estabilizados sobre los de hormigón reforzado son las siguientes:

- costo efectividad,
- rápida construcción,
- durabilidad,
- se adapta a espacios restringidos y formas angulares,
- consideraciones estéticas,
- disminución de esfuerzos transmitidos al suelo lo que permite trabajar en terrenos con baja resistencia, y

- pueden tener un altura mayor de 100 pies.



Figura 4.5 Fotografías de muros mecánicamente estabilizados reforzados con geomallas

#### 4.4 Análisis del empuje de tierras o presión lateral

Los muros en voladizo y los muros mecánicamente estabilizados son estructuras cuyo propósito principal es el de servir de contención de terrenos naturales o rellenos artificiales en la mayoría de los casos. La presión del terreno sobre el muro está fundamentalmente restringida por la deformabilidad de éste. Para determinar la presión lateral o el empuje de tierra deben tomarse en cuenta ciertos factores tales como las propiedades del relleno, deformabilidad del muro, las condiciones de fricción suelo-muro, dimensiones del muro, entre otras (FHWA, 2009).

Es necesario conocer las propiedades índices y mecánicas del material para poder diseñar apropiadamente un muro de contención, tales como peso unitario, ángulo de fricción y cohesión, entre otros. Se recomienda que el material utilizado como relleno sea granular y de drenaje libre para evitar presiones hidrostáticas que generarían fuerzas no deseadas en la cara del muro. Conocidas las propiedades del material de relleno se determina la distribución de la presión lateral (empuje de tierra) dada por la ecuación 4.1 que tiene que ser considerada en el diseño.

$$P = \frac{1}{2} \cdot K \cdot H^2 \cdot \gamma \quad (4.1)$$

donde:

$P$  = empuje de tierra total,

$H$  = altura del muro de contención,

$K$  = coeficiente de empuje lateral de tierra, y

$\gamma$  = peso unitario del material del relleno.

Las presiones que el suelo ejerce sobre un muro se asumen que aumentan de forma lineal con la profundidad. El empuje depende de varios factores tales como el tipo de suelo, la altura del muro, la resistencia al corte del suelo, la posición del nivel freático si alguna, la topografía del suelo y el estado del suelo. Este último factor se refiere al estado en reposo ( $K_o$ ), al estado de falla activa ( $K_a$ ) o al estado de falla pasiva ( $K_p$ ).

La presión que el suelo ejerce sobre el muro de contención mantiene una relación directa con el desplazamiento del conjunto suelo-muro. En el estado natural si el muro no se mueve de posición entonces existe una condición en reposo; si el muro se mueve alejándose del suelo la presión lateral entonces disminuye hasta una condición mínima conocida como presión activa. Por el contrario, si el muro se desplaza contra el suelo la presión lateral aumenta a un valor máximo conocido como presión pasiva (Das, 2010).

Cuando el muro en voladizo está restringido en su movimiento lateral y es un sólido rígido, la presión estática es de reposo y se genera un empuje total conocido como  $P_o$ , aplicado a un tercio de la altura del muro ( $H/3$ ) medida desde la parte inferior del mismo. La ecuaciones 4.2 y 4.3 definen la relación utilizada para el cómputo de  $P_o$  y  $K_o$ , respectivamente.

$$P_o = \frac{1}{2} \cdot K_o \cdot H^2 \cdot \gamma \quad (4.2)$$

$$K_o = 1 - \text{sen}(\phi^1) \quad (4.3)$$

donde:

$K_o$  = coeficiente de presión lateral de tierra en reposo.

Cuando la parte superior del muro se mueve como para desarrollar un estado de equilibrio plástico, se produce una presión activa y genera un empuje de tierra total  $P_a$ , aplicado a un tercio de la altura ( $H/3$ ) medida desde la parte inferior del muro como se muestra en la Figura 4.6. La magnitud de este empuje de tierra se determina según la ecuación 4.4.

$$P_a = \frac{1}{2} \cdot K_a \cdot H^2 \cdot \gamma \quad (4.4)$$

donde:

$K_a$  = coeficiente de presión activa utilizando las teorías de Coulomb o Rankine.

La teoría de Coulomb (1776) considera las siguientes suposiciones para determinar el empuje de tierra lateral (Coduto, 2001):

- El suelo es una masa isotrópica, lo que significa que los valores de cohesión y del ángulo de fricción interna tienen el mismo valor en todas las direcciones en toda la masa de suelo.
- La cuña de falla se mueve a lo largo de la pared interna del muro, produciendo fricción entre el muro y el suelo. Al ángulo de fricción entre el suelo y el muros se le conoce

como  $\delta$ . Si no hay suficiente información sobre este parámetro se puede utilizar un valor de  $\delta = \frac{2}{3} \cdot \phi$ .

- La fuerza resultante está inclinada a un ángulo  $\phi$  perpendicular a la pared del muro.

Coulomb define el coeficiente de presión lateral activa mediante la ecuación 4.5

$$k_a (\text{Coulomb}) = \frac{\cos^2(\phi' - \theta)}{\cos^2 \theta \cdot \cos(\delta + \theta) \cdot \left[ 1 + \sqrt{\frac{\sin(\phi' + \delta) \cdot \sin(\phi' - \beta)}{\cos(\delta + \theta) \cdot \cos(\beta - \theta)}} \right]^2} \quad (4.5)$$

donde:

$\phi'$  = ángulo de fricción del material en términos de esfuerzos efectivos,

$\beta$  = ángulo de inclinación del relleno medido desde la horizontal,

$\theta$  = ángulo de la cara externa del muro con la horizontal, y

$\delta$  = ángulo de fricción suelo-muro.

En el diseño de muros mecánicamente estabilizados se asume que  $\beta$  es igual a  $\delta$  para el cálculo del coeficiente de presión activa.

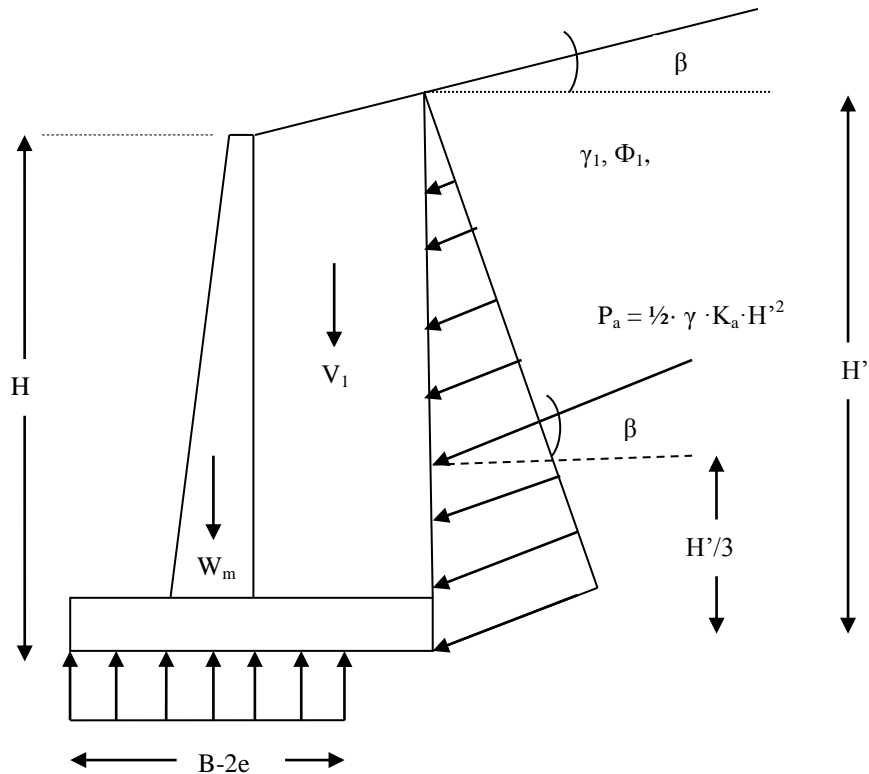


Figura 4.6 Diagrama de fuerzas actuando en un muro en voladizo (AASHTO, 2010)

Por su parte, la teoría de Rankine (1857) asume las siguientes suposiciones para determinar el empuje de tierra lateral:

- El suelo es una masa homogénea e isotrópica, lo que significa que los valores de cohesión y de ángulo de fricción interna tienen el mismo valor en todas las direcciones en un punto en específico.
- El muro se mueve lo suficiente para desarrollar la condición activa o pasiva.
- La superficie del suelo es un plano aunque puede ser inclinado.
- No existe fricción entre el suelo y el muro.
- La resultante del empuje de tierra actúa a un tercio de la altura ( $H/3$ ) medido desde la parte inferior del muro de contención.

- La resultante del empuje de tierra actúa paralelo a la inclinación de la superficie del terreno.

Según Rankine el coeficiente de presión lateral activa se calcula con la ecuación 4.6.

$$k_a (\text{Rankine}) = \cos \beta \cdot \frac{\cos \beta - \sqrt{\cos^2 \beta - \cos^2 \phi'}}{\cos \beta + \sqrt{\cos^2 \beta - \cos^2 \phi'}} \quad (4.6)$$

Cuando  $\beta = 0^\circ$ ,  $\alpha = 0^\circ$ ,  $\delta = 0^\circ$  en las ecuaciones 4.6 y 4.7, el coeficiente de presión activa y pasiva se define según la ecuación 4.7.

$$k_a = \frac{1 - \sin \phi'}{1 + \sin \phi'} = \tan^2 \left( 45 - \frac{\phi'}{2} \right); \quad k_p = \frac{1 + \sin \phi'}{1 - \sin \phi'} = \tan^2 \left( 45 + \frac{\phi'}{2} \right) \quad (4.7)$$

Para esta investigación utilizó la teoría de Coulomb ya que toma en consideración la fricción que existe entre el muro y el suelo, situación que ignora la teoría de Rankine. En adición, las especificaciones estándares del American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO, 2007) y las especificaciones del LRFD utilizan esta teoría para el diseño de muros de contención.

#### 4.4.1 (LRFD) Diseño por Factores de Carga y Resistencia

El Diseño por Factores de Carga y Resistencia (LRFD) se comenzó a utilizar a finales de los años 1970 y principio de los 1980 y se basa en los conceptos principales de los estados límites. El estado límite se utiliza para describir una condición en la cual una estructura deja de cumplir su pretendida función. Existen dos tipos de estados límites:



- estados límites últimos – de ser excedido este límite, la consecuencia podría ser el colapso de la estructura y provocar desgracias personales.
- estados límites de servicio - de ser excedido este límite, la consecuencia podría ser un deterioro en la estructura tales como deflexiones excesivas, agrietamientos, deslizamientos y vibraciones.

El método de LRFD también conocido como diseño de esfuerzos último, es un método en el cual se aumentan las cargas de diseño y se disminuyen las resistencias de diseño multiplicando ambos por factores mayores y menores, respectivamente. El método tiene como fin que las cargas de diseño aumentadas sean menores o iguales que las resistencias disminuidas. Las ecuaciones 4.8 y 4.9 constituyen la base de la metodología del diseño por factores de carga y resistencia (LRFD).

$$\sum \gamma_i \cdot Q_i + \gamma_i \cdot Q_i + \dots \leq \phi R_n \quad (4.8)$$

$$CDR = \frac{\phi \cdot R_n}{\sum \gamma_i \cdot Q_i + \gamma_i \cdot Q_i + \dots} \geq 1 \quad (4.9)$$

donde:

$\gamma_i$  = factor de carga, usualmente mayor que 1,

$Q_i$  = carga de un tipo particular (cargas permanentes o cargas transitorias),

CDR = razón de capacidad a demanda (“capacity demand ratio”),

$\phi$  = factor de resistencia, usualmente menor que 1, y

$R_n$  = resistencia nominal.

Las Tablas 4.1 y 4.2 muestran los factores de resistencia,  $\phi$ , y los factores de cargas,  $\gamma_i$ , utilizados en el análisis de estabilidad externa en los muros en voladizo y los muros mecánicamente estabilizados, según el método del LRFD.

Tabla 4.1 Factores de resistencia para la estabilidad externa de muros en voladizo y mecánicamente estabilizados (FHWA, 2009)

Condición	Factor de Resistencia
Capacidad de carga	$\phi_b = 0.65$
Deslizamiento	$\phi_s = 1.00$

Tabla 4.2 Factores de carga para cargas permanentes  $\gamma_i$  (FHWA, 2009)

Tipo de Carga	Factor de carga máximo	Factor de carga mínimo
DC: Elemento y accesorios	1.25	0.90
EH: Empuje horizontal del suelo (activo)	1.50	0.90
EV: Empuje vertical del suelo (muros)	1.35	1.00
ES: Sobrecarga de suelo	1.50	0.75

donde:

DC = peso propio de los componentes estructurales y accesorios no estructurales,

EV = empuje vertical del suelo,

EH = empuje horizontal del suelo, y

ES = sobrecarga del suelo.

#### 4.5 Análisis de Muro de Contención Mecánicamente Estabilizado (MSE Wall)

El análisis del muro de contención mecánicamente estabilizado “MSE” consiste de dos estudios principales: la estabilidad externa y la estabilidad interna.

- Para la estabilidad externa en muros de contención al voladizo se debe analizar la estabilidad contra deslizamiento, excentricidad (vuelco) y falla por capacidad de carga. La Figura 4.7 ilustra los distintos mecanismos de fallas externas para los muros mecánicamente estabilizados.

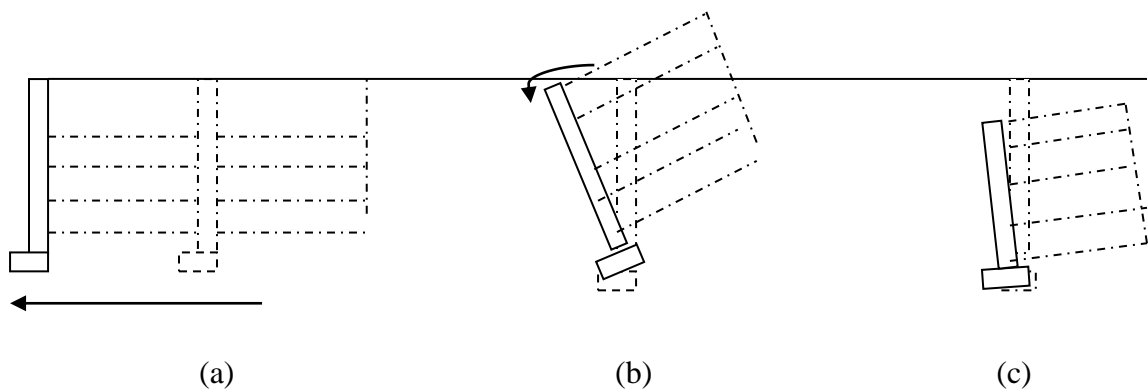


Figura 4.7 Mecanismos de falla externa para muros mecánicamente estabilizados (a) deslizamiento (b) excentricidad (vuelco) (c) capacidad de carga (FHWA, 2009)

Con respecto al diseño interno de muros tipos MSEW es importante cumplir con los siguientes criterios (Rivera, 2004):

- Que la armadura (refuerzo) sea lo suficientemente resistente para evitar que estos fallen por tensión al tratar de contrarrestar el empuje lateral que actúa sobre el muro prefabricado (Figura 4.8 a).

- Que la armadura (refuerzo) tenga una longitud y un ancho suficiente a través de la zona de anclaje para evitar que estos se deslicen y se salgan de dicha zona (Figura 4.8 b).

La Tabla 4.3 muestra los factores de resistencia a ser utilizados en el análisis de la estabilidad interna y externa para muros mecánicamente estabilizados.

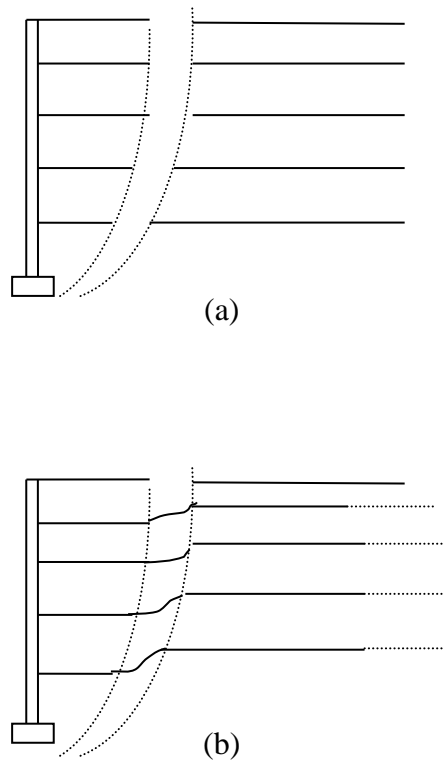


Figura 4.8 Mecanismos de falla interna (a) falla por tensión y (b) falla por deslizamiento (Rivera, 2004)

Tabla 4.3 Factores de resistencia para la estabilidad externa e interna para muros mecánicamente estabilizados,  $\phi$  (FHWA, 2009)

Condición	Factor de resistencia ( $\phi$ )
Capacidad de carga	$\phi_b = 0.65$
Deslizamiento	$\phi_s = 1.00$
Resistencia al arrancamiento (Pullout resistance)	$\phi_p = 0.90$
Resistencia a la tracción (Tensile resistance)	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• refuerzo inextensible                             <ul style="list-style-type: none"> <li>○ tiras metálicas</li> <li>○ grillas metálicas</li> </ul> </li> <li>• refuerzo extensible                             <ul style="list-style-type: none"> <li>○ geosintéticos</li> </ul> </li> </ul>	$\phi_t = 0.75$ $\phi_t = 0.65$ $\phi_t = 0.90$

#### 4.5.1 Estabilidad Externa

La Figura 4.9 ilustra los factores de carga que se aplican típicamente para producir situaciones extremas durante la evaluación del análisis de estabilidad externa utilizando el método de factores de carga y resistencia (LRFD). Para el análisis contra deslizamiento y excentricidad, las cargas verticales, horizontales y de sobrecarga serán multiplicadas por los factores denominados como  $\gamma_{EV-MIN}$ ,  $\gamma_{EH-MAX}$  y  $\gamma_{LS}$ , respectivamente.

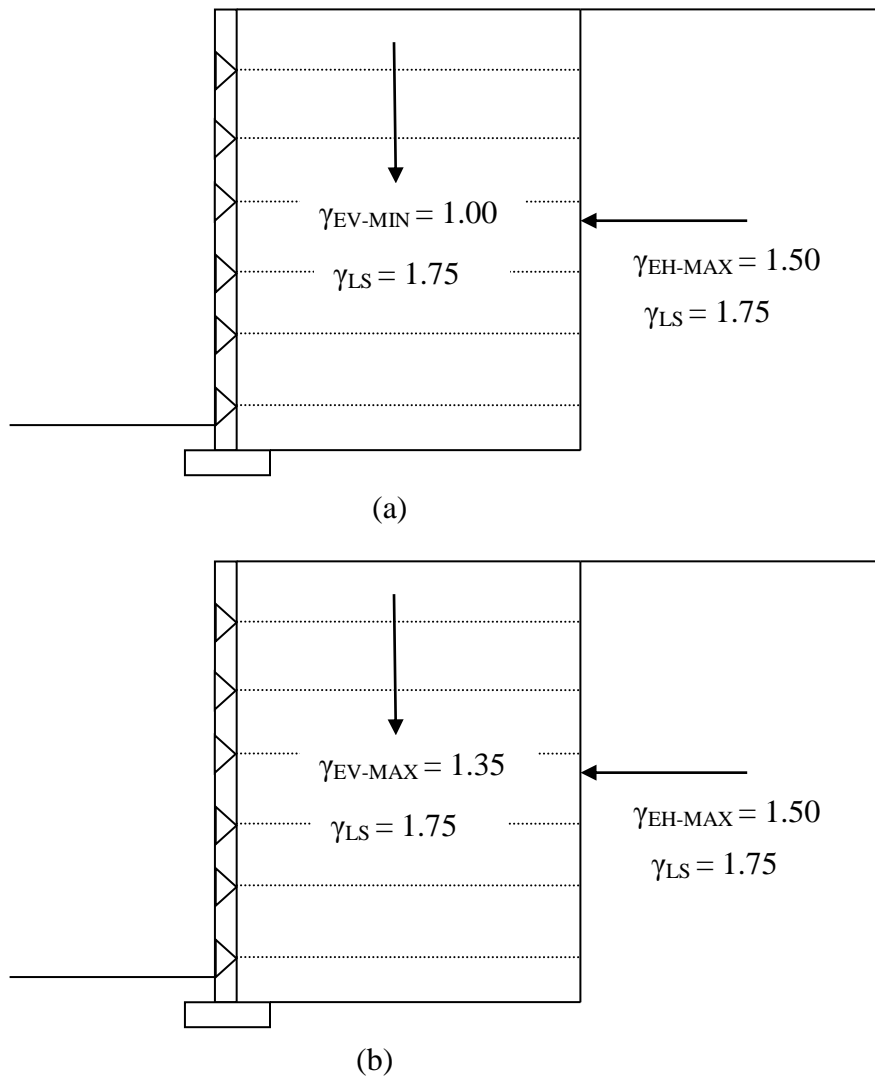


Figura 4.9 Aplicación de los factores de carga para el análisis de estabilidad externa para muros mecánicamente estabilizados (a) excentricidad y deslizamiento (b) capacidad de carga (AASHTO, 2007)

donde:

$\gamma_{EV-MIN}$  = es el factor de carga mínimo para fuerzas verticales, y

$\gamma_{EH-MAX}$  = es el factor de carga máximo para fuerzas horizontales.

El propósito del análisis de la estabilidad contra vuelco es evaluar que la excentricidad en la base del muro esté dentro del límite requerido. La excentricidad de la fuerza resultante

medida respecto al centro de la base,  $e$ , debe ser menor que  $L_r/4$  ( $e < L_r/4$ ). El cómputo de la excentricidad se realiza utilizando la ecuación 4.10.

$$excentricidad(e) = \frac{L_r}{2} - \frac{\Sigma M_R - \Sigma M_O}{\Sigma V} \quad (4.10)$$

donde:

$\Sigma M_R$  = sumatoria de los momentos de las fuerzas que tienden a resistir vuelco respecto a la punta del muro de contención,

$\Sigma M_O$  = sumatoria de los momentos de las fuerzas que tienden a volcar la estructura respecto a la punta del muro de contención,

$\Sigma V$  = sumatoria de fuerzas verticales ( $V_1 \cdot \gamma_{EV-MIN} + V_s \cdot \gamma_{LV}$ ), y

$L_r$  = largo del refuerzo requerido.

Para determinar los momentos que tienden a resistir y a volcar la estructura que se ilustra en la Figura 4.10 se utilizan las ecuaciones 4.11 y 4.12, respectivamente.

$$\Sigma M_R = V_1 \cdot \gamma_{EV-MIN} \cdot \left(\frac{L_r}{2}\right) + V_s \cdot \gamma_{LS} \cdot \left(\frac{L_r}{2}\right) \quad (4.11)$$

$$\Sigma M_O = F_1 \cdot \gamma_{EH-MAX} \cdot \left(\frac{H}{3}\right) + F_2 \cdot \gamma_{LS} \cdot \left(\frac{H}{2}\right) \quad (4.12)$$

donde:

$V_1$  = fuerza vertical debido el peso del suelo reforzado,

$F_1$  = fuerza horizontal debido el peso del suelo reforzado,

$F_2$  = fuerza horizontal debido a la sobrecarga,

$V_s$  = fuerza vertical debido a la sobrecarga (usualmente carga viva de tráfico), y

$H$  = altura del muro mecánicamente estabilizado.

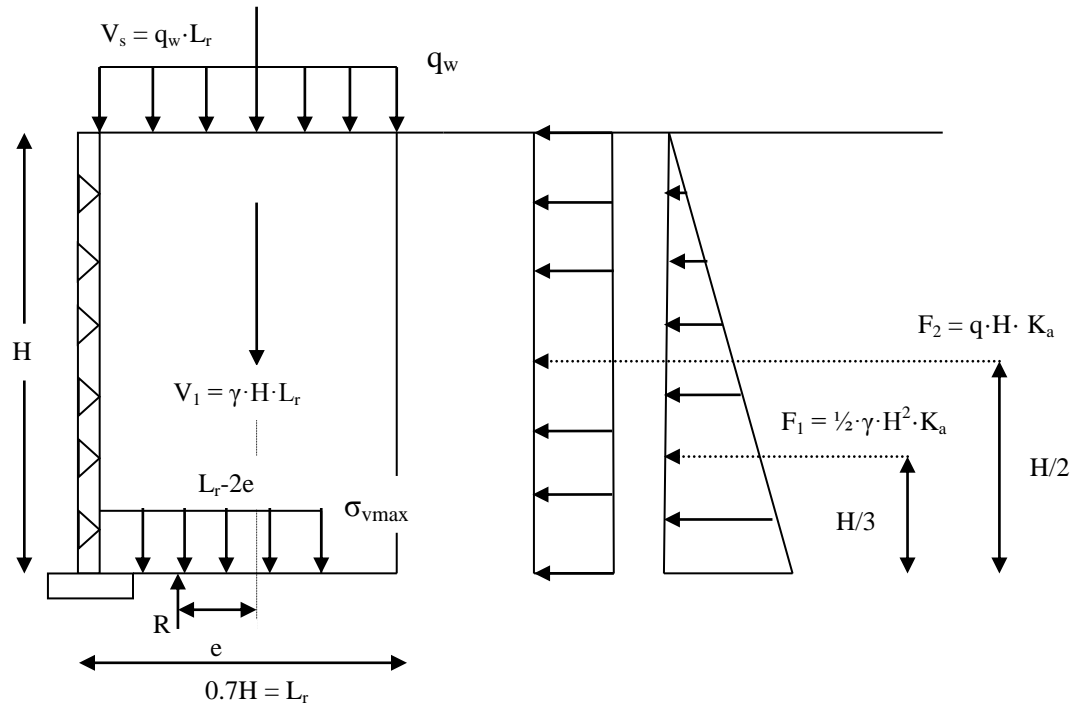


Figura 4.10 Diagrama de fuerzas que actúan en el muro mecánicamente estabilizado (FHWA, 2009)

Para análisis de capacidad de carga se supone una zapata cuyo ancho es igual a la longitud de los refuerzos del muro mecánicamente estabilizado. Para que un muro sea satisfactorio y cumpla con el análisis de la estabilidad por capacidad de carga, la razón de capacidad a demanda, CDR, (ecuación 4.13) debe ser igual o mayor que uno.

$$CDR = \frac{\phi_b \cdot q_n}{\sigma_{vmax}} \geq 1 \quad (4.13)$$

donde:

$\phi_b$  = factor de resistencia para análisis de capacidad de carga ( $\phi_b = 0.65$ ),

$\sigma_{vmax}$  = presión vertical máxima en la base del muro mecánicamente estabilizado, y

$q_n$  = capacidad de carga del suelo de cimentación.



En caso de muros de tierra mecánicamente estabilizada se asume que la presión de contacto  $\sigma_{vmax}$  se encuentra uniformemente distribuida sobre un área a través de la base del muro que se extiende una distancia igual a  $L_r - (2 \cdot e)$ , medida desde el interior del muro de revestimiento, según indicado por Meyerhof (1953). La presión vertical  $\sigma_{vmax}$  está dada por la ecuación 4.14.

$$\sigma_{vmax} = \frac{\Sigma V}{L_r - 2e} \quad (4.14)$$

El siguiente criterio debe ser tomado en consideración al momento del análisis:

- la excentricidad,  $e$ , de la fuerza resultante medida respecto al centro de la base del muro debe ser menor que  $L_r/4$  ( $e < L_r/4$ )

La capacidad de carga del suelo de cimentación está dada por la ecuación 4.15.

$$q_n = c \cdot N_c + 0.5 \cdot \gamma_f \cdot L' \cdot N_\gamma \quad (4.15)$$

donde:

$c$  = cohesión del suelo de cimentación,

$\gamma_f$  = peso unitario del suelo de cimentación,

$N_c$  = factor de capacidad de carga (adimensional) de la Tabla 4.4,

$N_\gamma$  = factor de capacidad de carga (adimensional) de la Tabla 4.4, y

$L'$  = largo efectivo =  $(L_r - 2e)$ .

Tabla 4.4 Factores de capacidad de carga (FHWA, 2009)

$\phi$	Nc	N $\gamma$	$\phi$	Nc	N $\gamma$	$\phi$	Nc	N $\gamma$
0	5.14	0	15	11	2.7	30	30.1	22.4
1	5.4	0.1	16	11.6	3.1	31	32.7	25.9
2	5.6	0.2	17	12.3	3.5	32	35.5	30.2
3	5.9	0.2	18	13.1	4.1	33	38.6	35.2
4	6.2	0.3	19	13.9	4.7	34	42.2	41.1
5	6.5	0.5	20	14.8	5.4	35	46.1	48
6	6.8	0.6	21	15.8	6.2	36	50.6	56.3
7	7.2	0.7	22	16.9	7.1	37	55.6	66.2
8	7.5	0.9	23	18.1	8.2	38	61.4	78
9	7.9	1	24	19.3	9.4	39	37.9	92.3
10	8.4	1.2	25	20.7	10.9	40	75.3	109.4
11	8.8	1.4	26	22.3	12.5	41	83.9	130.2
12	9.3	1.7	27	23.9	14.5	42	93.7	155.6
13	9.8	2	28	25.8	16.7	43	105.1	186.5
14	10.4	2.3	29	27.9	19.3	44	118.4	224.6

La relación entre las fuerzas resistentes y las actuantes se define mediante la razón de capacidad a demanda (CDR). Para que el muro cumpla con el análisis de deslizamiento, la demanda a capacidad debe ser mayor que 1 y a su vez es obtenida por la ecuación 4.16.

$$CDR = \frac{\text{Fuerzas Resistentes (verticales)}}{\text{Fuerzas Deslizantes (horizontales)}} = \frac{R_r}{P_d} = \frac{\phi_s \cdot (\Sigma V \cdot \tan \phi_f)}{\Sigma H} \quad (4.16)$$

donde:

$R_r$  = componente de las fuerzas resistentes que actúan en el muro,

$P_d$  = componente de las fuerzas deslizantes que actúan en el muro,

$\phi_s$  = factor de resistencia para análisis de deslizamiento ( $\phi_s = 1.00$ ),

$\Sigma V$  = sumatoria de las fuerzas verticales ( $V_1 \cdot \gamma_{EV-MIN}$ ),

$\Sigma H$  = sumatoria de las fuerzas horizontales ( $F_1 \cdot \gamma_{EH-MAX}$ ), y

$\phi_f$  = ángulo de fricción del suelo de la fundación.

## 4.5.2 Estabilidad Interna

En el estudio de la estabilidad interna se diseñó la distribución de los refuerzos para que resistan los esfuerzos en tensión; en adición, se verificó su longitud de adherencia para evitar cualquier tipo de deslizamiento. El refuerzo que se utiliza en la implementación de la construcción de los muros mecánicamente estabilizados se divide en dos categorías:

- inextensible (de metal usualmente galvanizado, Figura 4.11 a)
  - tiras metálicas – tamaño típico de 2”- 4” de ancho y de 1/8” - 5/32” pulgadas de espesor.
  - mallas, grillas y/o parillas de alambre soldadas
- extensible (no metálicos, geosintéticos, Figura 4.11 b)
  - geotextiles, geomallas (no corrosible), entre otros.



(a)



(b)

Figura 4.11 Fotografías de tipos de refuerzos utilizados en los muros mecánicamente estabilizados (a) refuerzo inextensible, tira metálica (b) refuerzo extensible, geomallas

La mayoría de los muros mecánicamente estabilizados construidos hasta el momento son de armaduras inextensibles galvanizadas (FHWA, 2009). Parte del acero del refuerzo se ve afectado por la corrosión durante la vida útil del muro y por lo tanto se debe tomar en consideración en el diseño. Es por tal razón, que se requiere un mínimo de 3.4 mils (1 mil = 0.001 pulgadas) de espesor de recubrimiento galvanizado (cinc) para proteger el refuerzo contra la corrosión. Tiras de refuerzo con un ancho mayor de ¼ pulgadas requieren un espesor mayor de 3.9 mils de recubrimiento galvanizado.

Los geosintéticos son telas o fibras artificiales porosas y flexibles, los cuales son típicamente fabricados con polipropileno, polietileno y poliéster. Las propiedades físicas que más interesan de estos materiales son la resistencia en tensión, la deformación, la interacción suelo-geotextil, y la durabilidad del material (Rivera, 2004). Los tipos de geosintéticos más comúnmente utilizados en la construcción de muros de contención mecánicamente estabilizados son los geotextiles, las mallas y las geogrillas. Los agentes que más afectan la calidad del refuerzo extensible son los rayos ultravioletas del sol, la temperatura, la humedad del medio ambiente y el proceso de instalación.

La localización de las tensiones máximas está definida en la Figura 4.12 por la línea entrecortada localizada a una distancia igual a  $0.3 H$  medida desde la parte superior del muro, la cual se extiende hasta la mitad del muro ( $H/2$ ). Desde el inferior del muro aumenta a un ángulo igual a  $45^\circ + \phi/2$  hasta la mitad del muro. Para cualquier nivel de refuerzo ( $z$ ), la tensión es igual al esfuerzo horizontal ( $\sigma_h$ ) generado a la profundidad  $z$  y se obtiene de la de la ecuación 4.17.

$$\sigma_h = K_r \cdot \sigma_v \cdot \gamma_{EV-MAX} \quad (4.17)$$

donde:

$K_r$  = coeficiente de tensión lateral de tierra para cada nivel de refuerzo (adimensional), y

$\sigma_v$  = esfuerzo vertical sobre la armadura debido al peso propio del suelo reforzado. Si

existe una sobrecarga actuando en el muro, ésta debe ser incluida como parte del esfuerzo vertical.

El valor de  $K_r$  varía con la profundidad,  $z$ , medida desde el tope o coronamiento del muro como se ilustra en la Figura 4.13. El coeficiente de tensión,  $K_r$ , disminuye gradualmente con la profundidad,  $z$ , dependiendo de cuál sea el tipo de refuerzo utilizado. En caso de que se utilicen geosintéticos el valor de  $K_r$  es igual a uno (1) y se mantiene constante a lo largo de todo el muro.

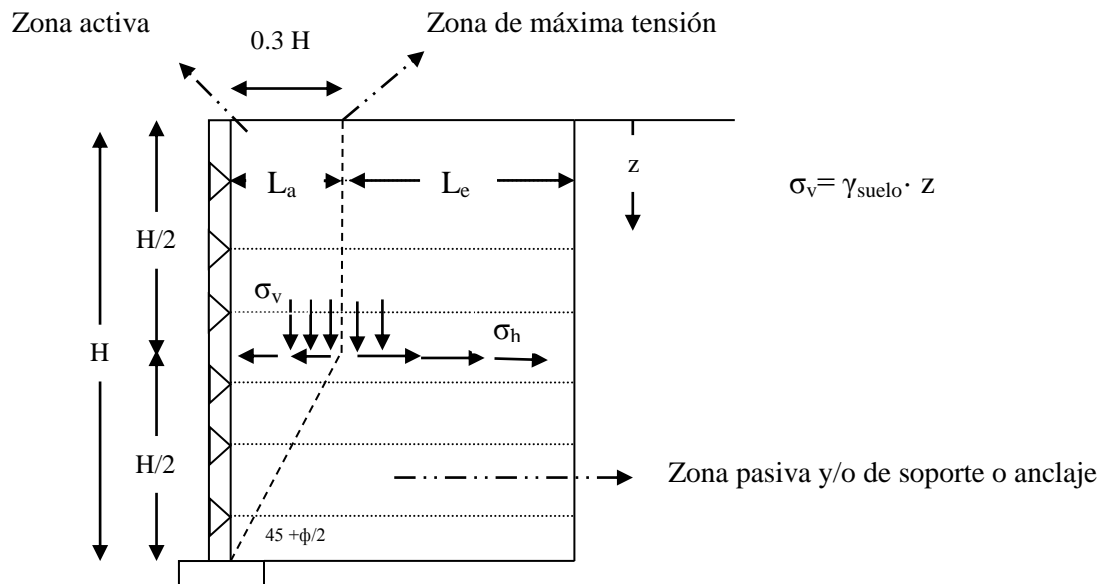


Figura 4.12 Esfuerzos que se desarrollan en las armaduras, ubicación del largo efectivo ( $L_e$ ), y zona de máxima tensión (FHWA, 2009)

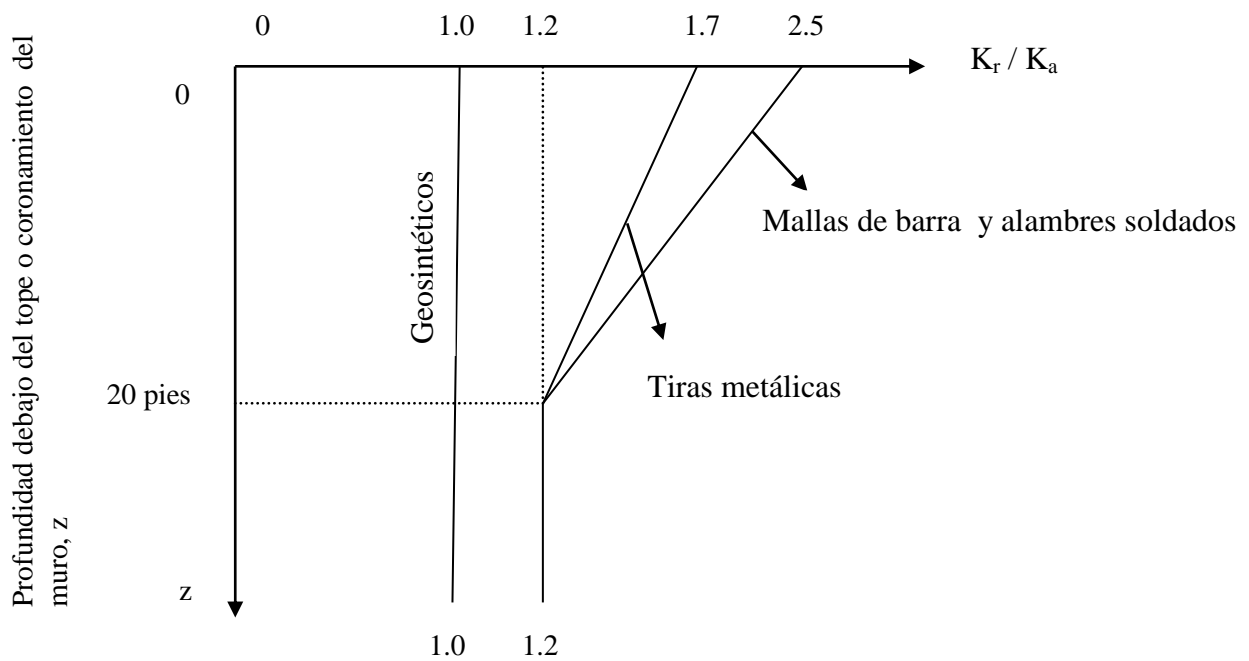


Figura 4.13 Relación entre  $K_r / K_a$  en función de la profundidad para un muro mecánicamente estabilizado (FHWA, 2009)

- Para tiras metálicas  $K_r$  se define dependiendo de la profundidad  $z$

- Cuando  $0 \leq z \leq 20$  pies se utiliza la ecuación 4.18

$$K_r = 1.2K_a + \frac{(20 - z) \cdot (1.7K_a - 1.2K_a)}{20} \quad (4.18)$$

- Mientras que para casos donde  $z > 20$  pies  $K_r$  se obtiene con la ecuación 4.19

$$K_r = 1.2K_a \quad (4.19)$$

- Por su parte si analizamos mallas de barra y alambres soldados las ecuaciones varían de la siguiente forma:

- La ecuación 4.20 define  $K_r$  cuando  $0 \leq z \leq 20$  pies

$$K_r = 1.2K_a + \frac{(20 - z) \cdot (2.5K_a - 1.2K_a)}{20} \quad (4.20)$$

- En casos donde  $z > 20$  pies se utiliza la misma ecuación utilizada para tiras metálicas (ecuación 4.19)

La magnitud de la tensión máxima que se genera a la profundidad de cada refuerzo se encuentra en el límite de la cuña activa y la zona pasiva y la misma está definida por la fórmula 4.21.

$$T_{\max} = \sigma_h \cdot S_v \quad (4.21)$$

donde:

$S_v$  = espaciado vertical entre refuerzo mostrado en la Figura 4.14.

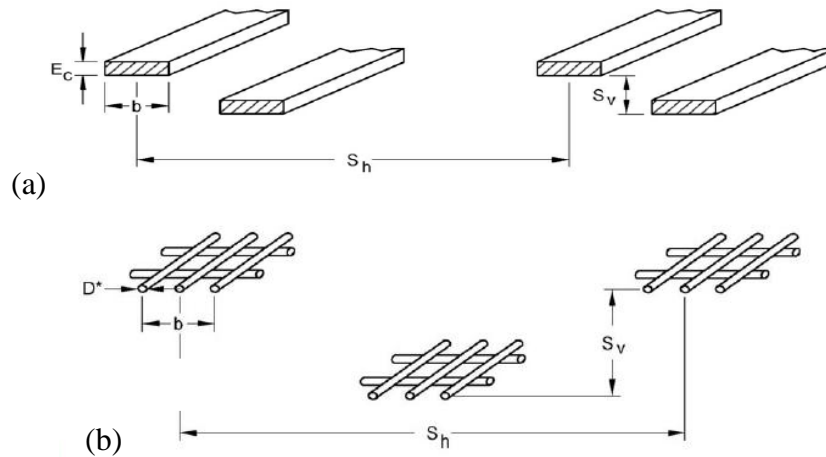


Figura 4.14 Espaciado de los refuerzos utilizados en los muros mecánicamente estabilizados (a) tiras metálicas y (b) mallas de barra (FHWA, 2009)

La tensión máxima ( $T_{\max}$ ) actuando en cualquier nivel de la armadura no debe sobrepasar la resistencia nominal del refuerzo según se muestra en la ecuación 4.22.

$$T_{\max} \leq \phi_t \cdot T_{al} \quad (4.22)$$

donde:

$T_{al}$  = resistencia nominal de diseño del refuerzo a largo plazo, y

$\phi_t$  = factor de resistencia para el refuerzo ( $\phi_t = 0.75$  para refuerzos inextensibles y  $\phi_t = 0.65$  para refuerzos extensibles) (adimensional).

La resistencia nominal de los refuerzos inextensibles (metálicos) a largo plazo es obtenida de la ecuación 4.23.

$$T_{al} = \frac{A_c \cdot F_y}{b} \quad (4.23)$$

donde:

$A_c$  = área del refuerzo corregida por pérdidas debido a la corrosión del metal ( $A_c = E_c \cdot b$ ),

$b$  = ancho unitario del refuerzo, y

$F_y$  = tensión mínima de fluencia del acero.

El diseño interno de los refuerzos debe ser realizado según la ecuación 4.24.

$$E_c = E_n - E_R \quad (4.24)$$

donde:

$E_c$  = espesor del refuerzo al final de su vida de servicio,

$E_n$  = espesor nominal del refuerzo original, y

$E_R$  = espesor que se anticipa que se perderá debido a la corrosión del metal durante la vida de servicio del muro.



La pérdida de galvanizado durante los primeros dos años es aproximadamente igual a 0.58 mils/año mientras que durante los años siguientes será igual 0.16 mils/año. La pérdida de acero al carbono (material utilizado en los refuerzos inextensible) es de 0.47 mils/año una vez se haya agotado el cinc. Por lo tanto, el galvanizado de los refuerzos tiene una vida útil alrededor de 16 años utilizando los valores anteriormente mencionados.

Por su parte, la resistencia nominal de los refuerzos extensibles (geosintéticos) a largo plazo,  $T_{al}$  es obtenida de la ecuación 4.25.

$$T_{al} = \frac{T_{ult}}{RF} = \frac{T_{ult}}{RF_{ID} \cdot RF_{CR} \cdot RF_D} \quad (4.25)$$

donde:

$T_{ult}$  = valor mínimo promedio del rollo (MARV: minimum average roll value) de la resistencia última a la tracción de los esfuerzos,

$RF$  = factor de reducción de la resistencia que considera el potencial a degradación, daños por instalación y fluencia (adimensional),

$RF_{ID}$  = factor de reducción que considera los daños durante la instalación del refuerzo (adimensional),

$RF_{CR}$  = factor de reducción que considera la fluencia a largo plazo del refuerzo (adimensional), y

$RF_D$  = factor de reducción que considera la degradación química y biológica del refuerzo (adimensional).

La resistencia última al arrancamiento,  $P_r$ , para cada nivel de refuerzo en la zona pasiva (zona de soporte) está dada por la ecuación 4.26.

$$P_r = 2 \cdot F^* \cdot \alpha \cdot L_e \cdot \sigma_v \quad (4.26)$$

donde:

$F^*$  = factor de fricción contra el arrancamiento obtenido de la Figura 4.15,

$L_e$  = largo del refuerzo que se encuentra en la zona de soporte,

$\alpha$  = factor de corrección (para refuerzos inextensibles  $\alpha=1$  y para refuerzos extensibles  $\alpha$  varía entre 0.6-1.0), y

$\sigma_v$  = esfuerzo vertical sobre la armadura debido al peso propio del suelo reforzado sin incluir la sobrecarga, de existir alguna.

Para evitar que ocurra una falla de los refuerzos por deslizamiento en un muro mecánicamente estabilizado, la siguiente expresión debe ser cumplida:

$$T_{\max} \leq \phi_p P_r \quad (4.27)$$

donde:

$\phi_p$  = factor de resistencia para análisis de resistencia a la tracción ( $\phi_p = 0.90$ )

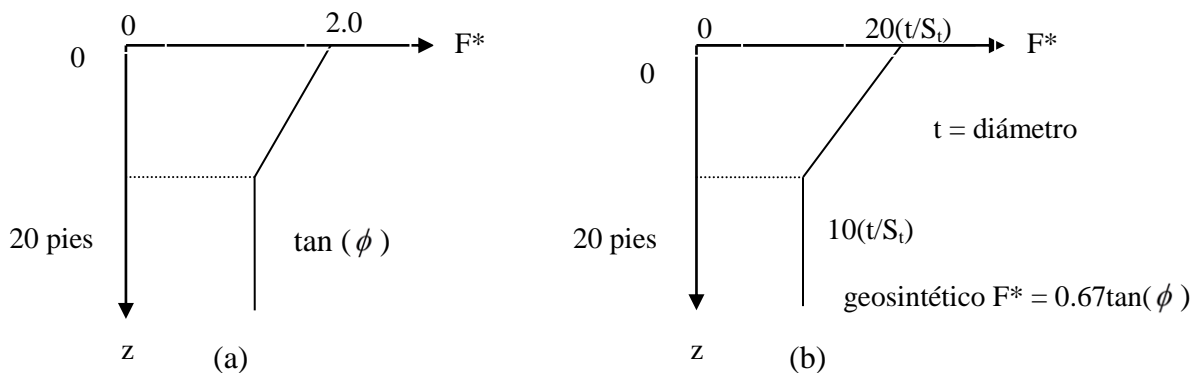


Figura 4.15 Valores del factor de fricción para el arrancamiento de los refuerzos,  $F^*$  (a) para tiras metálicas (b) para grillas de acero (FHWA, 2009)

La variación del factor de fricción ( $F^*$ ) depende de la profundidad ( $z$ ) y es definido matemáticamente con la ecuaciones 4.28 y 4.29, para tiras metálicas mientras que el refuerzo está formado por grillas de acero se deben usar las ecuaciones 4.30 y 4.31, según se muestra a continuación.

- Para tiras metálicas

- Cuando  $0 \leq z \leq 20$  pies

$$F^* = \tan(\phi) + \frac{(20 - z) \cdot (2 - \tan(\phi))}{20} \quad (4.28)$$

- En casos donde  $z > 20$  pies

$$F^* = \tan(\phi) \quad (4.29)$$

- Para grillas de acero

- Cuando  $0 \leq z \leq 20$  pies

$$F^* = 10 \left( \frac{t}{S_t} \right) + \frac{(20 - z) \cdot \left( 20 \left( \frac{t}{S_t} \right) - 10 \left( \frac{t}{S_t} \right) \right)}{20} \quad (4.30)$$

- En casos donde  $z > 20$  pies

$$F^* = 10 \left( \frac{t}{S_t} \right) \quad (4.31)$$

donde:

$S_t$  = distancia transversal entre malla de barra, y

$t$  = diámetro de la malla de barra de refuerzo.

El largo efectivo,  $L_e$ , representa el largo del refuerzo que se encuentra en la zona de soporte para cualquier nivel de refuerzo y está dado por la ecuación 4.32.

$$L_r = L_a + L_e \quad (4.32)$$

donde:

$L_r$  = largo de refuerzo requerido ( $\geq 0.7 \cdot H$ ),

$L_e$  = largo de refuerzo requerido en la zona de soporte (o zona de anclaje), y

$L_a$  = largo de refuerzo requerido en la zona activa.

- Para refuerzo inextensible el largo de refuerzo en la zona activa se define mediante las ecuaciones 4.33 y 4.44

- Para  $0 \leq z \leq H/2$

$$L_a = 0.3H \quad (4.33)$$

- En el caso donde la profundidad está entre  $H/2 < z \leq H$

$$L_a = 0.6 \cdot (H - z) \quad (4.34)$$

- Si el refuerzo es extensible se utiliza la ecuación 4.35

- Para  $0 \leq z \leq H$

$$L_a = (H - z) \cdot \tan\left(45 - \frac{\phi}{2}\right) \quad (4.35)$$

donde;

$z$  = distancia vertical medida desde el tope del muro hasta el refuerzo.

## 4.6 Análisis de Muro en voladizo

El análisis de muros de contención al voladizo consiste en determinar las fuerzas que actúan por encima de la base de la fundación, con el fin de verificar su estabilidad contra deslizamiento, vuelco y capacidad de carga debido a las presiones de contacto originadas en la interfaz suelo-muro, según se ilustra en la Figura 4.16. Las fuerzas que se toman en consideración son el empuje lateral de tierra  $P_a$ , el peso generado por el relleno y las sobrecargas actuando sobre el muro. En caso de que el diseño muro de contención no sea satisfactorio (no cumpla con la estabilidad), se modifican las dimensiones y se calcula nuevamente la estabilidad según las condiciones establecidas. El peso propio del muro en voladizo actúa en el centro de gravedad y puede calcularse subdividiendo la sección del muro en áreas geométricas conocidas.

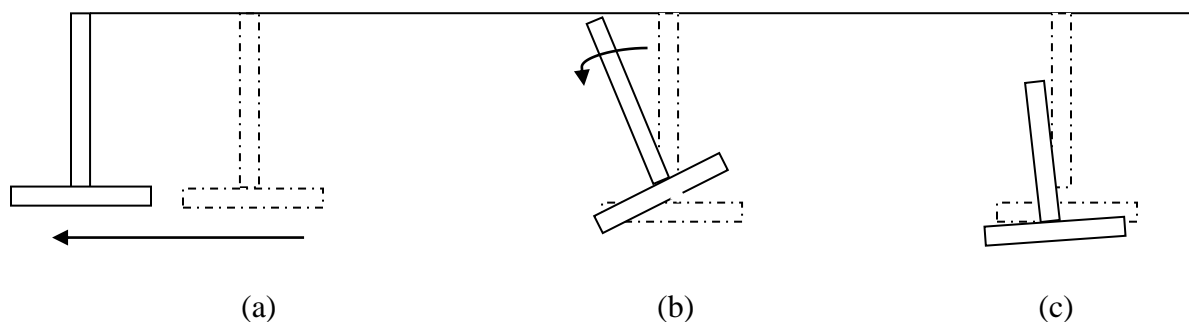
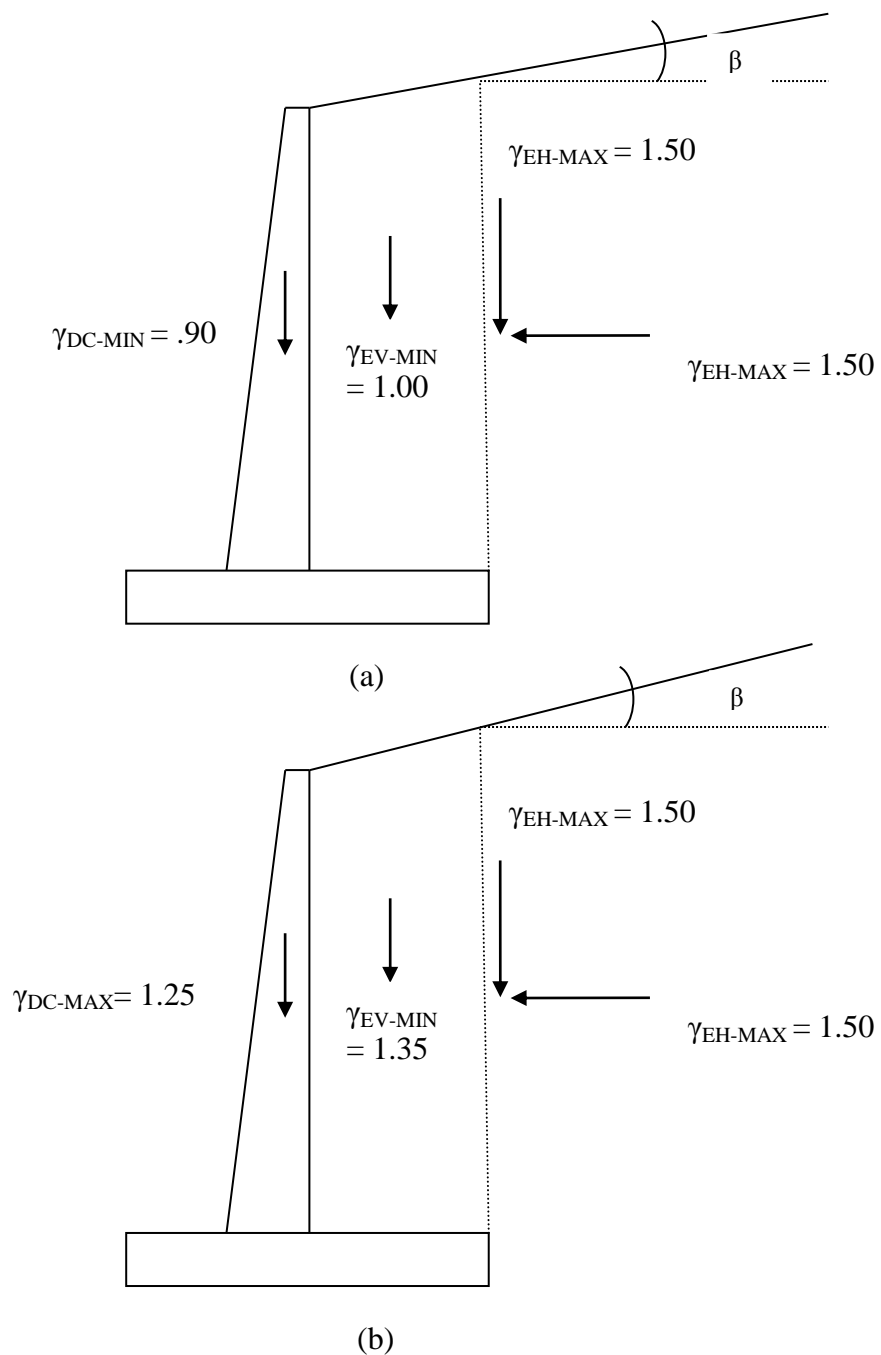


Figura 4.16 Mecanismos de falla externa para muros en voladizo (a) deslizamiento (b) excentricidad (vuelco) (c) capacidad de carga (FHWA, 2009)

La Figura 4.17 ilustra los factores de cargas que se aplican típicamente para producir situaciones extremas en la evaluación de la estabilidad externa de muros en voladizo utilizando el método de factores de carga y resistencia (LRFD). Para el análisis contra deslizamiento, excentricidad y capacidad portante las cargas verticales y horizontales serán multiplicadas por los factores denominados como  $\gamma_{EV}$  y  $\gamma_{EH}$ .



$\gamma_{DC-MIN}$  = es el factor de carga mínimo para la fuerza generada debido al peso propio del muro, y

$\gamma_{DC-MAX}$  = es el factor de carga máximo para la fuerza generada debido al peso propio del muro

Figura 4.17 Aplicación de los factores de carga para el análisis de estabilidad externa en muros en voladizo (a) excentricidad y deslizamiento (b) capacidad de carga (AASHTO, 2007)

El propósito del análisis de la estabilidad contra vuelco es evaluar que la excentricidad en la base del muro esté dentro de un límite requerido. La excentricidad de la fuerza resultante medida respecto al centro de la base,  $e$ , debe ser menor que  $B/4$  ( $e < B/4$ ). La excentricidad de la fuerza resultante se define mediante la ecuación 4.36.

$$excentricidad(e) = \frac{B}{2} - \frac{\Sigma M_R - \Sigma M_o}{\Sigma V} \quad (4.36)$$

donde:

$B$  = ancho de la base del muro de contención al voladizo.

La Figura 4.18 muestra las fuerzas típicas que actúan en un muro en voladizo y las distancias horizontales desde la fuerza actuante hasta el punto C debido a que los momentos resultantes son obtenidos respecto a dicho punto. Las fuerzas verticales que actúan en el muro son  $V_1$ ,  $V_2$ ,  $W_1$ ,  $W_2$ , y  $P_{av}$  mientras que la única fuerza horizontal que actúa es  $P_{ah}$ . Los momentos que resisten y los momentos que tienden a volcar el muro son obtenidos de las ecuaciones 4.37 y 4.38, respectivamente.

$$\Sigma M_R = (V_1 \cdot \gamma_{EV-MIN} \cdot X_{V1}) + (V_2 \cdot \gamma_{EV-MIN} \cdot X_{V2}) + (W_1 \cdot \gamma_{DC-MIN} \cdot X_{W1}) + (W_2 \cdot \gamma_{DC-MIN} \cdot X_{W2}) + (P_{av} \cdot \gamma_{EH-MAX} \cdot X_{Pa}) \quad (4.37)$$

$$\Sigma M_o = (P_{ah} \cdot \gamma_{EH-MAX} \cdot X_{Pa}) \quad (4.38)$$

donde:

$V_1$  y  $V_2$  = fuerzas generadas debido al peso del suelo utilizado como relleno,

$X_{V1}$  y  $X_{V2}$  = distancia horizontal desde la punta del muro hasta las fuerzas  $V_1$  y  $V_2$ ,

$W_1$  y  $W_2$  = fuerzas generadas debido peso del muro en voladizo,

$X_{W1}$  y  $X_{W2}$  = distancia vertical desde la punta del muro hasta las fuerzas  $W_1$  y  $W_2$ ,

- $P_{av}$  y  $P_{ah}$  = componente vertical y horizontal del empuje de tierra total,  $P_a$ ,
- $X_{av}$  = distancia horizontal desde la punta del muro hasta la fuerza  $P_{av}$ , y
- $X_{ah}$  = distancia vertical desde la punta del muro hasta la fuerza  $P_{ah}$ ,  $X_{ah}=H'/3$ .

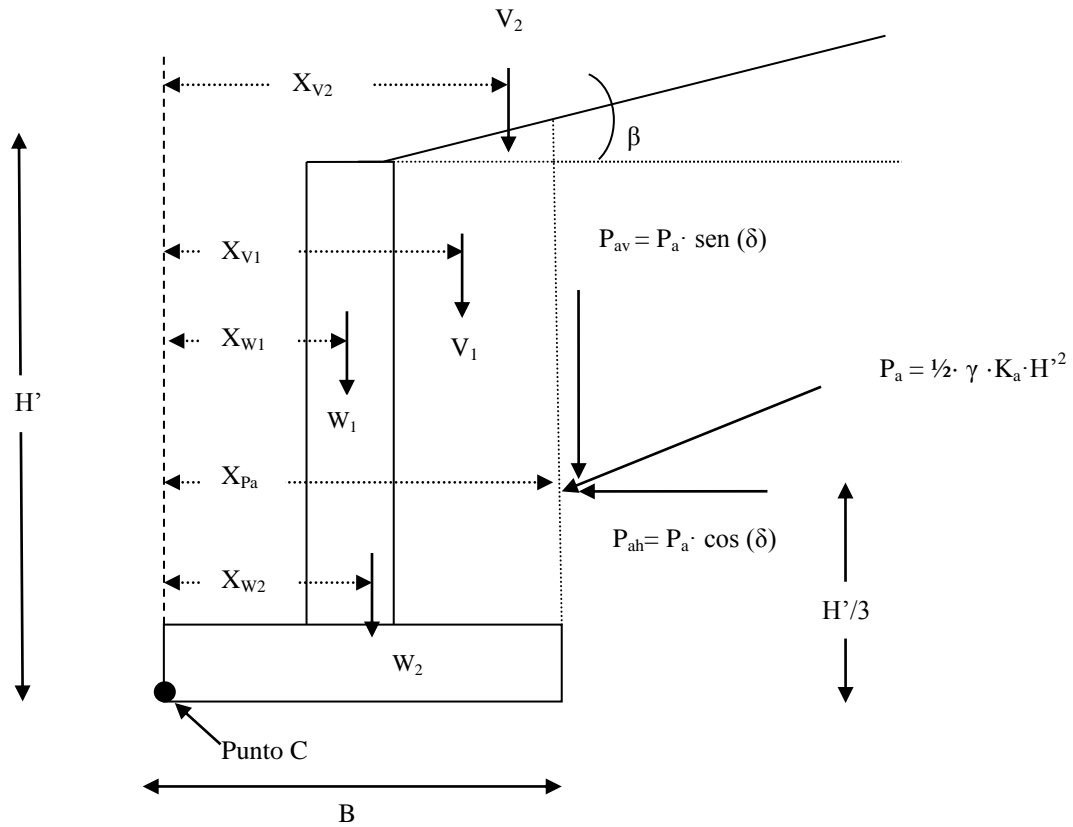


Figura 4.18 Criterio para determinar los momentos que actúan en el muro en voladizo (AASHTO, 2010)

La estabilidad por deslizamiento y capacidad de carga se verificó de la misma forma que en muros mecánicamente estabilizados (ver sección 4.5.1)



# CAPÍTULO 5. RESULTADOS EXPERIMENTALES

---

## 5.1 Introducción

Este capítulo presenta los resultados experimentales obtenidos de las pruebas de laboratorio para la arena Ottawa, la goma triturada y para mezclas de arena/goma a diferentes proporciones. La distribución de partículas para la arena y la goma triturada se determinó por medio de una serie de pruebas de tamizado, mientras que la permeabilidad de las muestras se determinó utilizando el método de carga constante, utilizado para suelos granulares. Como parte de esta investigación se obtuvo el valor del peso unitario máximo y mínimo, al igual que la gravedad específica (Gs) de los materiales estudiados.

Los parámetros de resistencia al corte, tales como cohesión ( $c'$ ) y ángulo de fricción interna ( $\phi'$ ) en términos de esfuerzos efectivos, fueron evaluadas mediante pruebas triaxiales consolidadas – drenadas (CD) y mediante pruebas de corte directo. Con el propósito de simular los esfuerzos que experimentan los suelos durante la construcción de muros de retención se utilizaron tres presiones de confinamiento: 10 lbs/pulg<sup>2</sup>, 20 lbs/pulg<sup>2</sup> y 30 lbs/pulg<sup>2</sup>. Es importante mencionar que las muestras fueron compactadas utilizando el método de subcompactación sugerido por Ladd (ver Apéndice A para un ejemplo de cálculos). A cada capa se le aplicó una gota de agua para facilitar el proceso de compactación. Utilizando las curvas de esfuerzo - deformación obtenidas de la prueba triaxial, se determinó el módulo tangente inicial ( $E_i$ ). Para finalizar, los resultados obtenidos durante esta investigación fueron comparados con resultados encontrados en la literatura.

## 5.2 Análisis Granulométrico

La distribución de partículas para la goma triturada y la arena Ottawa se muestra en las Figuras 5.1 y 5.2, respectivamente. Para la goma triturada se encontró que el tamaño de partículas varía entre 2.00 mm ( $D_{max}$ ) y 0.61 mm ( $D_{min}$ ) resultando en un diámetro promedio ( $D_{50}$ ) de 1.37 mm, mientras que el diámetro efectivo ( $D_{10}$ ) es de 0.97 mm. En adición, el  $D_{30}$  y  $D_{60}$  son de 1.20 mm y 1.40 mm, respectivamente. Con estos valores se determinó que el coeficiente de uniformidad ( $C_u$ ) es de 1.44 y el coeficiente de curvatura ( $C_c$ ) es de 1.06. Por otra parte, para la arena Ottawa la variación de tamaño de partículas esta entre 1.18 ( $D_{max}$ ) y 0.50 ( $D_{min}$ ) para un diámetro promedio ( $D_{50}$ ) de la arena es de 0.76 mm, mientras que el diámetro efectivo ( $D_{10}$ ) es de 0.67 mm. En adición, el  $D_{30}$  y  $D_{60}$  son de 0.74 mm y 0.79 mm, respectivamente. Con estos valores se determinó que el coeficiente de uniformidad ( $C_u$ ) es de 1.17 y el coeficiente de curvatura de ( $C_c$ ) es de 1.03. De los gráficos se observa que ambos materiales estudiados tienen un rango pequeño de partículas por lo que se concluye que ambos materiales son pobremente gradados. Finalmente, se corroboró la gradación de ambos materiales partiendo de los valores de  $C_u$  y  $C_c$ , (ver sección 3.4.1).

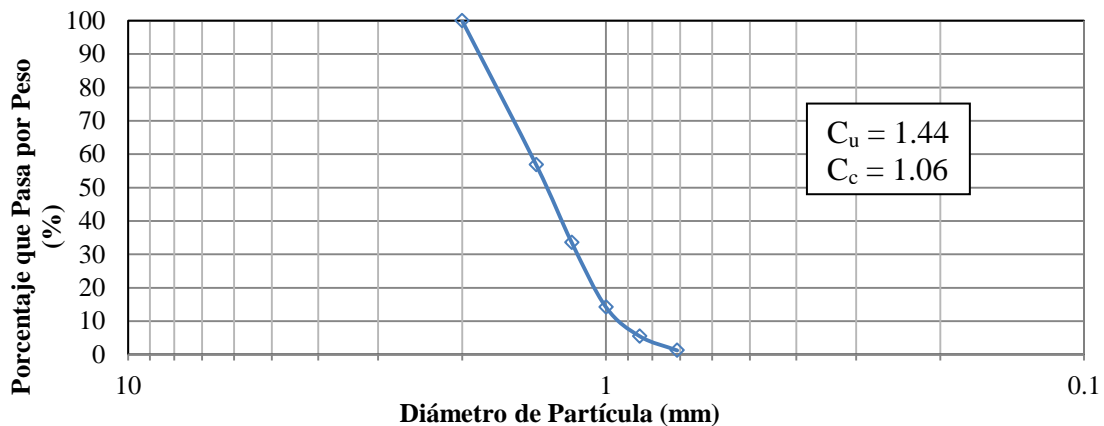


Figura 5.1 Distribución granulométrica para la goma triturada utilizada para esta investigación

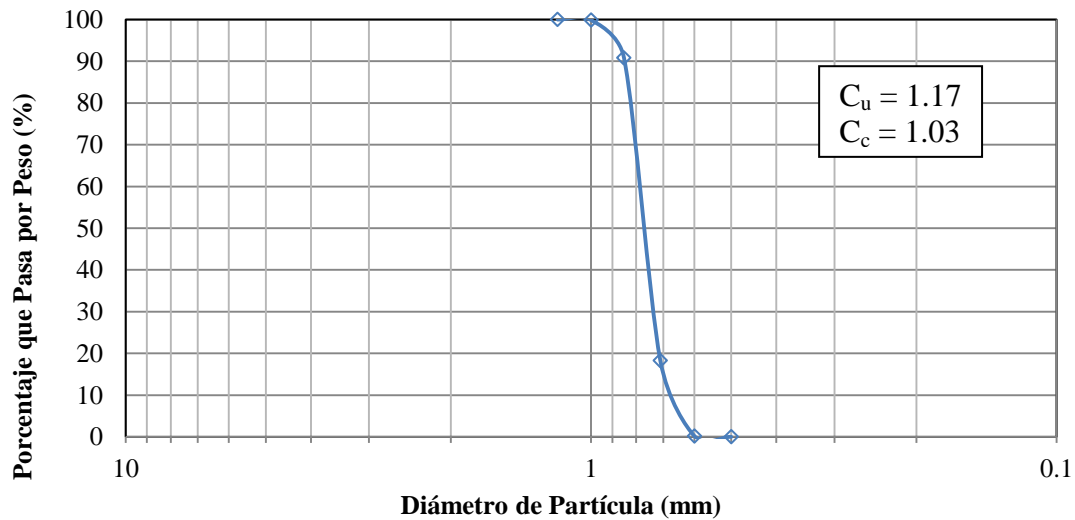


Figura 5.2 Distribución granulométrica para la arena Ottawa utilizada para esta investigación

### 5.3 Gravedad Específica

La Tabla 5.1 muestra los valores de gravedad específica (Gs) medidos para la arena Ottawa, para la goma triturada y para mezclas de arena con 20, 40, 60, y 80 por ciento por volumen de goma triturada. Comparando el valor de Gs entre la arena Ottawa (2.64) y la goma triturada (1.11), se observó que la gravedad específica de la arena Ottawa es poco más del doble que el valor de Gs medido para la goma triturada. Por lo tanto, se esperaría que el peso unitario de las muestras vaya a ser reducido a medida que se incrementa el porcentaje de goma en la arena. La Figura 5.3 muestra un gráfico de gravedad específica – porcentaje de goma con el propósito de mostrar gráficamente la tendencia de la gravedad específica a medida que el porcentaje de goma triturada aumenta en la muestra.

Tabla 5.1 Valores de gravedad específica medidos en el laboratorio a distintos porcentajes de goma triturada

Porcentaje de Goma Triturada	Gravedad Específica
0	2.64
20	2.50
40	2.25
60	1.96
80	1.51
100	1.11

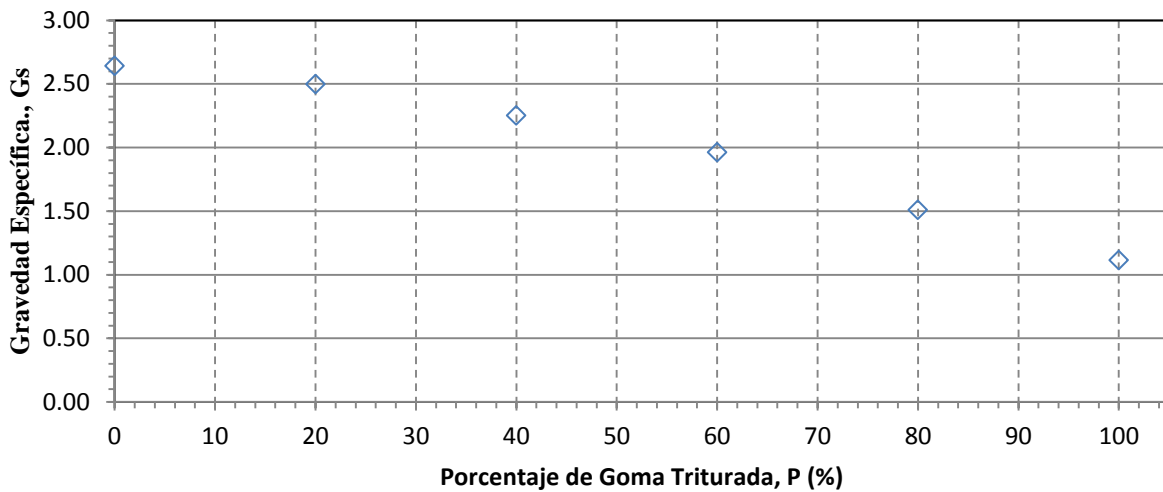


Figura 5.3 Variación de gravedad específica para diferentes porcentajes de goma triturada

#### 5.4 Peso Unitario Máximo y Mínimo

La Figura 5.4 presenta los valores de peso unitario seco mínimo obtenidos durante esta investigación para las muestras de arena Ottawa mezclada con diferentes porcentajes de goma triturada. De los resultados obtenidos se observó que el peso unitario mínimo de la arena Ottawa es de 111 lbs/pie<sup>3</sup> mientras que para la goma triturada se encontró un valor de 33 lbs/pie<sup>3</sup>. El peso de la goma triturada se acerca a un tercio del peso de la arena Ottawa, por consecuencia este material es considerado un material de bajo peso (*light weight*) útil para la construcción de

terraplenes y muros de contención. El valor del peso unitario de la goma triturada se encuentra dentro del rango presentado por Reddy y Marella en el 2001 (15 – 53 lbs/pie<sup>3</sup>), mientras que el valor de la arena Ottawa se asimila al valor obtenido por Ahmed y Lovell, (1993) (118 lbs/pie<sup>3</sup>).

Del gráfico se observa que a medida que el contenido de goma es incrementado, el peso unitario de la muestra disminuye según era de esperarse. Finalmente, se observa la razón a la cual el peso unitario de la muestra varía dependiendo de si la proporción de la muestra fue definida en porcentajes por peso o por volumen. Los resultados muestran una variación lineal cuando el porcentaje es medido en términos de volumen, mientras que según los datos medidos esta variación dejó de ser lineal cuando el porcentaje se definió en términos de peso.

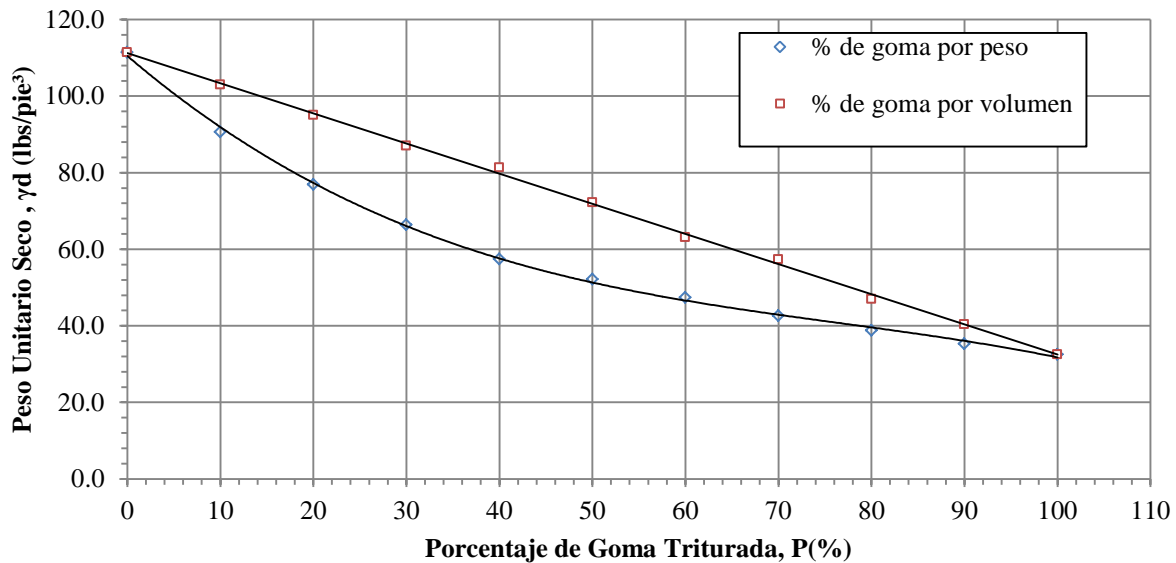


Figura 5.4 Variación de peso unitario seco mínimo para diferentes porcentajes de goma medido mediante dos métodos: (a) porcentaje por peso (b) porcentaje por volumen

La selección de medir el porcentaje por peso o por volumen queda a discreción y juicio del ingeniero o investigador. Sin embargo, debido a que la curva que representa el % de goma por volumen tiene una pendiente más constante, se utilizó dicha proporción durante esta

investigación. La Tabla 5.2 muestra un resumen de los valores de peso unitario máximo ( $\gamma_{\max}$ ), peso unitario mínimo ( $\gamma_{\min}$ ), razón de vanos máxima ( $e_{\max}$ ) y razón de vanos mínima ( $e_{\min}$ ) medidos en el laboratorio para la arena Ottawa, la goma triturada y mezcla de ambos materiales a distintos porcentajes en proporción por volumen.

Tabla 5.2 Resumen de los resultados de razón de vanos máxima y mínima y peso unitario máximo y mínimo para distintos porcentajes de goma triturada.

Propiedad	Arena Ottawa	20% Goma Triturada	40% Goma Triturada	60% Goma Triturada	80% Goma Triturada	Goma Triturada
$\gamma_{\max}$ (lbs/pie <sup>3</sup> )	120	103	86	70	53	36
$\gamma_{\min}$ (lbs/pie <sup>3</sup> )	111	95	81	63	47	33
$e_{\max}$	0.48	0.64	0.73	0.94	1.0	1.10
$e_{\min}$	0.37	0.51	0.63	0.76	0.78	0.92

## 5.5 Conductividad Hidráulica

La Figura 5.5 presenta el efecto que tiene en la permeabilidad ( $k$ ) de la arena Ottawa el añadirle distintos porcentajes de goma triturada. De los resultados se determinó que la permeabilidad máxima fue de  $8.04 \times 10^{-2}$  cm/seg para la muestra formada con un 100 % mientras que la permeabilidad mínima fue de  $6.17 \times 10^{-2}$  cm/seg para la muestra formada con arena Ottawa. El añadir goma triturada al suelo a distintas proporciones, genera un pequeño incremento en la permeabilidad de la muestra. En este caso, parte del volumen de arena es sustituido por goma triturada lo cual posee partículas mayores generando así un posible incremento en la razón de vanos; de esta manera la permeabilidad incrementa a valores un poco mayores que el valor de la

arena. Sin embargo, es importante mencionar que las diferencias en permeabilidad medidas en el laboratorio entre las diferentes muestras es muy pequeña ya que todas se encuentran dentro del mismo orden de magnitud ( $1 \times 10^{-2}$  cm/seg). Cabe mencionar que el porcentaje de diferencia entre la permeabilidad de la arena Ottawa y la permeabilidad de la goma triturada es de 23%. La permeabilidad de las muestras formadas para esta investigación corresponden, según Das (2010), a una arena gruesa, debido a que los valores medidos están dentro del rango de 1.0 – 0.01 cm/seg. Materiales de alta permeabilidad pueden ser útiles para la construcción de muros de contención entre otras aplicaciones. La Tabla 5.3 presenta un resumen tabulado de la permeabilidad de los materiales investigados para distintos porcentajes de goma triturada (0, 20, 40, 60, 80 y 100%).

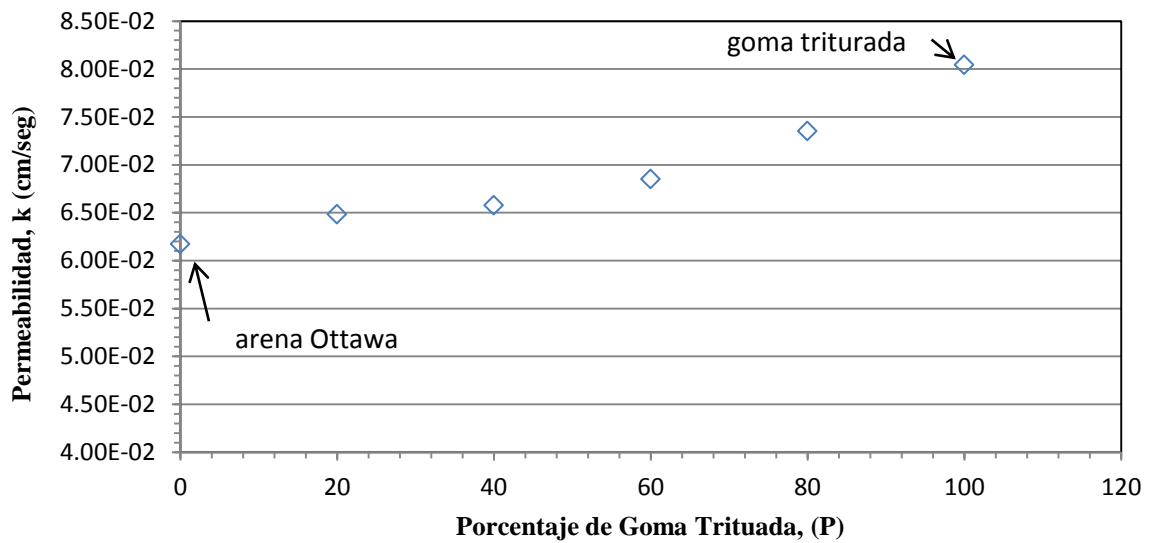


Figura 5.5 Coeficiente de permeabilidad medida a diferentes porcentajes de goma triturada

Tabla 5.3 Valores de permeabilidad medidos en el laboratorio a distintos porcentajes de goma triturada

Porcentaje de Goma Triturada	Permeabilidad, k (cm/seg)
0	$6.17 \times 10^{-2}$
20	$6.48 \times 10^{-2}$
40	$6.58 \times 10^{-2}$
60	$6.85 \times 10^{-2}$
80	$7.35 \times 10^{-2}$
100	$8.04 \times 10^{-2}$

## 5.6 Prueba de Corte Directo

Se realizaron una series de pruebas de corte directo a la arena Ottawa mezclada con goma triturada a distintos porcentajes (0, 10, 20, 25, 30, 40 y 100% por volumen) con el fin de determinar el efecto de añadir goma triturada en la resistencia al corte de la arena. La Tabla 5.4 presenta un resumen tabulado del esfuerzo cortante de falla de cada una de las muestras investigadas al igual que el largo, diámetro, peso unitario, esfuerzo normal y desplazamiento horizontal al cual ocurrió la falla.



Tabla 5.4 Esfuerzo cortante y desplazamiento de falla obtenidos de pruebas de corte directo para muestras de arena Ottawa, goma triturada y mezcla de ambos materiales

% Goma Triturada	Gs	Razón de Vanos	Largo de Muestra	Diámetro de la Muestra	Peso de la Muestra	Peso Unitario Seco	Esfuerzo Normal	Desplazamiento Horizontal de Falla	Esfuerzo Cortante
			mm	mm	lbs	lbs/pie <sup>3</sup>	lbs/pulg <sup>2</sup>	pulg	lbs/pulg <sup>2</sup>
0	2.64	0.39	27.6	63.5	.466	118.7	10	.04	9.8
	2.64	0.38	27.5	63.5	.466	119.0	20	.06	15.6
	2.64	0.39	27.5	63.5	.466	119.0	30	.05	25.3
10	2.58	0.46	27.6	63.5	.434	110.6	10	.25	10.22
	2.58	0.46	27.6	63.5	.434	110.6	20	.25	20.27
	2.58	0.46	27.6	63.5	.434	110.6	30	.25	29.61
20	2.50	0.52	27.4	63.5	.401	102.7	10	.25	9.52
	2.50	0.52	27.5	63.5	.401	102.4	20	.25	19.21
	2.50	0.52	27.4	63.5	.401	102.7	30	.25	27.14
25	2.43	0.54	27.5	63.5	.385	98.3	10	.25	8.64
	2.43	0.53	27.5	63.5	.385	98.8	20	.25	17.10
	2.43	0.53	27.5	63.5	.385	98.8	30	.25	24.67
30	2.36	0.57	27.4	63.5	.367	94.1	10	.25	8.11
	2.36	0.56	27.4	63.5	.367	94.2	20	.25	16.21
	2.36	0.57	27.4	63.5	.367	94.0	30	.25	22.91
40	2.25	0.64	27.6	63.5	.335	85.4	10	.25	8.4
	2.25	0.64	27.5	63.5	.335	85.6	20	.25	15.51
	2.25	0.64	27.5	63.5	.335	85.6	30	.25	21.68
100	1.11	0.95	27.5	63.5	.140	35.4	10	.25	5.82
	1.11	0.95	27.6	63.5	.140	35.6	20	.25	11.10
	1.11	0.95	27.4	63.5	.140	35.9	30	.25	14.45

### 5.6.1 Comportamiento Esfuerzo - Desplazamiento

Las Figuras 5.6 a 5.8 muestran las curvas de esfuerzo - desplazamiento horizontal ( $\Delta H$ ) para los distintos materiales investigados. Los resultados presentados en las figuras muestran que la arena Ottawa tiene un comportamiento similar al de un material quebradizo “brittle” donde el material a medida que comienza a deformarse moviliza un esfuerzo cortante máximo el cual desciende rápidamente a medida que incrementa el desplazamiento horizontal. Este comportamiento es típico de las arenas densas cuyas densidades relativas ( $D_r$ ) son mayores al 70% (Bardet, 1997). Cabe mencionar que la densidad relativa de todas las muestras formadas en

esta investigación fue de 90%. El desplazamiento horizontal de falla,  $\Delta H_f$ , para la arena Ottawa fue de 0.04, 0.06, 0.05 pulgadas, cuando las muestras fueron sometidas a esfuerzos normales de 10, 20 y 30 lbs/pulg<sup>2</sup>, respectivamente. A diferencia de las muestras de arena, los especímenes formados con un 100% de goma triturada presentaron un comportamiento dúctil donde la resistencia del material continua incrementando a medida que el desplazamiento de la caja es incrementado. Por tal motivo, para esta investigación se utilizaron dos criterios de fallas para definir la resistencia al corte de las muestras: (1) a bajas deformaciones y (2) a grandes deformaciones. Se definió como baja deformación el desplazamiento de la caja requerido para generar el esfuerzo máximo en muestras de arena Ottawa. Para las presiones de confinamiento utilizadas en esta investigación (10, 20 y 30 lbs/pulg<sup>2</sup>) esta deformación estuvo entre 0.04 y 0.06 pulgadas. Sin embargo, para definir la falla a grandes deformaciones se utilizó un desplazamiento horizontal igual a 0.25 pulgadas.

Las muestras de arena Ottawa alcanzaron esfuerzos cortantes máximos de 9.8, 15.6 y 25.3 lbs/pulg<sup>2</sup> a desplazamientos horizontales menores de 0.06 pulg (según se ilustra en la Tabla 5.4) al ser sometida a esfuerzos normales de 10, 20 y 30 lbs/pulg<sup>2</sup>, respectivamente. Mientras que a desplazamientos horizontales de 0.25 pulg la arena alcanzó esfuerzos cortantes iguales a 5.8, 10.4 y 20.4 lbs/pulg<sup>2</sup> bajo los mismos esfuerzos normales.

Sin embargo, para las muestras formadas con un 100% de goma triturada los esfuerzos cortantes máximos fueron 5.8, 11.1, 14.5 lbs/pulg<sup>2</sup> a desplazamientos horizontales de 0.25 pulg. (altos desplazamientos) utilizando esfuerzos normales iguales a 10, 20 y 30 lbs/pulg<sup>2</sup>, respectivamente. Mientras que los esfuerzos cortantes a bajos desplazamientos (< 0.06 pulg.) fueron de 2.26, 5.04 y 5.99 lbs/pulg<sup>2</sup>, para los mismos esfuerzos normales antes mencionados (10, 20 y 30 y lbs/pulg<sup>2</sup>).

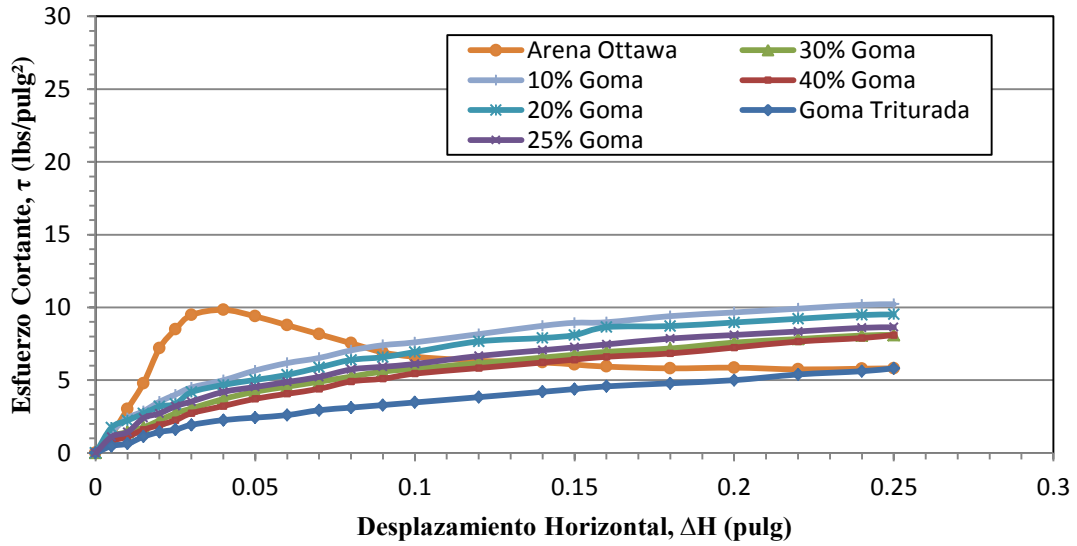


Figura 5.6 Efecto de añadir goma triturada a diferentes porcentajes en el comportamiento esfuerzo – desplazamiento para distintas mezclas de goma triturada con arena Ottawa a una presión de confinamiento de 10 lbs/pulg<sup>2</sup> utilizando corte directo

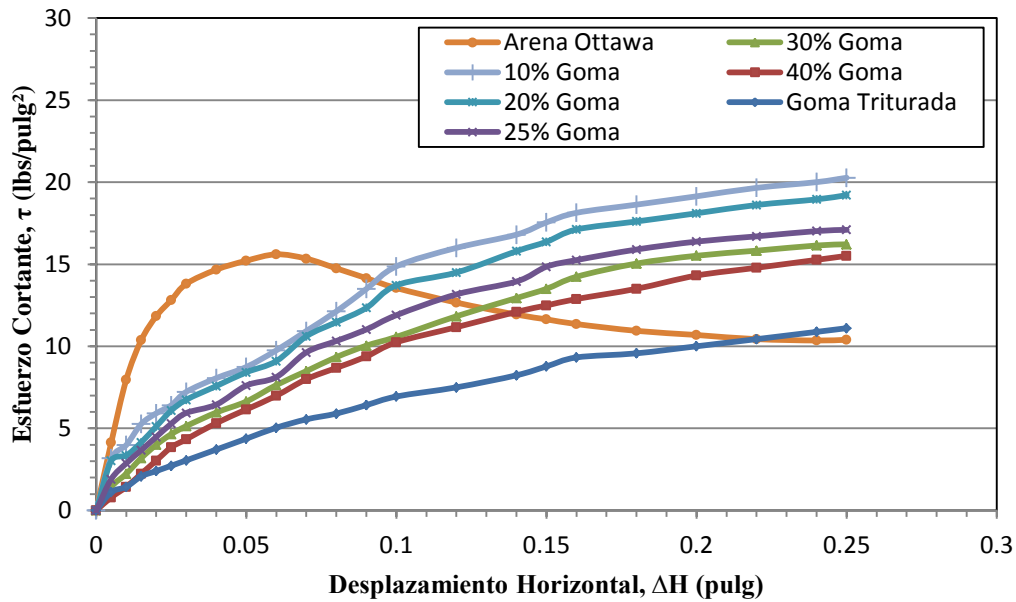


Figura 5.7 Efecto de añadir goma triturada a diferentes porcentajes en el comportamiento esfuerzo – desplazamiento para distintas mezclas de goma triturada con arena Ottawa a una presión de confinamiento de 20 lbs/pulg<sup>2</sup> utilizando corte directo

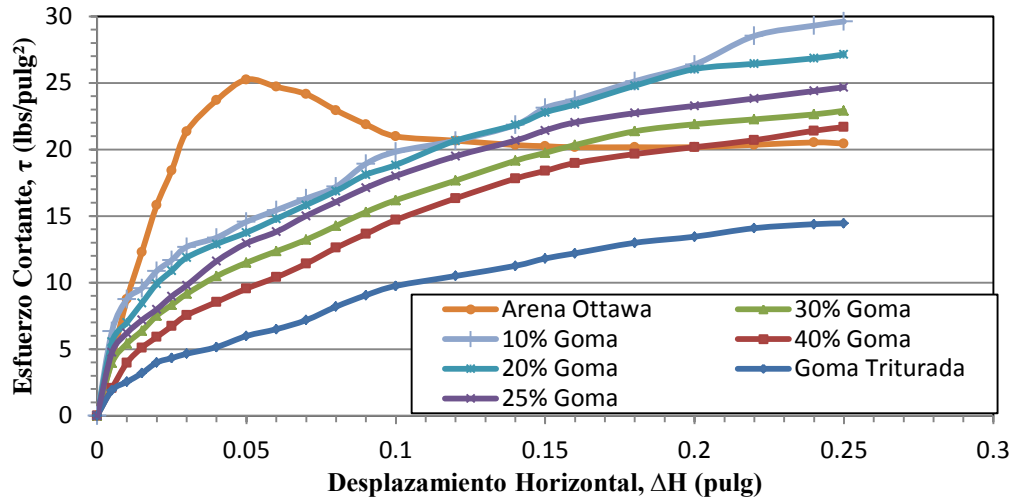


Figura 5.8 Efecto de añadir goma triturada a diferentes porcentajes en el comportamiento esfuerzo – desplazamiento para distintas mezclas de goma triturada con arena Ottawa a una presión de confinamiento de 30 lbs/pulg<sup>2</sup> utilizando corte directo

La Tabla 5.5 presenta los valores de esfuerzo cortante medidos durante esta investigación a bajos desplazamientos (< 0.06 pulgadas) mientras que la Tabla 5.6 muestra el esfuerzo cortante medido a grandes deformaciones (0.25 pulgadas) para muestras de arena mezclada con diferentes porcentajes de goma.

Tabla 5.5 Esfuerzo cortante medido en el laboratorio a bajos desplazamientos (<0.06 pulg) mediante la prueba de corte directo

% Goma Triturada	Peso Unitario Seco	Esfuerzo Normal	Desplazamiento Horizontal de Falla	Esfuerzo Cortante
	lbs/pie <sup>3</sup>	lbs/pulg <sup>2</sup>	pulg	lbs/pulg <sup>2</sup>
0	118.7	10	.04	9.8
	119.0	20	.06	15.6
	119.0	30	.05	25.3
10	110.6	10	.04	5.0
	110.6	20	.06	9.8
	110.6	30	.05	14.6
20	102.7	10	.04	4.7
	102.4	20	.06	9.1
	102.7	30	.05	13.8
25	98.3	10	.04	4.4
	98.8	20	.06	8.1
	98.8	30	.05	13.0
30	94.1	10	.04	3.7
	94.2	20	.06	7.6
	94.0	30	.05	11.5
40	85.4	10	.04	3.2
	85.6	20	.06	7.0
	85.6	30	.05	9.6
100	35.4	10	.04	2.3
	35.6	20	.06	5.0
	35.9	30	.05	6.0

Tabla 5.6 Esfuerzo cortante medido en el laboratorio a grandes desplazamientos (0.25 pulg) mediante la prueba de corte directo

% Goma Triturada	Peso Unitario Seco	Esfuerzo Normal	Desplazamiento Horizontal de Falla	Esfuerzo Cortante
	lbs/pie <sup>3</sup>	lbs/pulg <sup>2</sup>	pulg	lbs/pulg <sup>2</sup>
0	118.7	10	.25	5.8
	119.0	20	.25	10.4
	119.0	30	.25	20.4
10	110.6	10	.25	10.2
	110.6	20	.25	20.3
	110.6	30	.25	29.6
20	102.7	10	.25	9.5
	102.4	20	.25	19.4
	102.7	30	.25	27.1
25	98.3	10	.25	8.6
	98.8	20	.25	17.1
	98.8	30	.25	25.8
30	94.1	10	.25	8.1
	94.2	20	.25	16.2
	94.0	30	.25	22.9
40	85.4	10	.25	8.1
	85.6	20	.25	15.5
	85.6	30	.25	21.7
100	35.4	10	.25	5.8
	35.6	20	.25	11.1
	35.9	30	.25	14.5

Si comparamos los resultados de las muestras formadas con un 100% de goma triturada y las muestras de arena Ottawa podemos observar que las muestras de goma a bajos desplazamientos (< 0.06 pulgadas) presentan una reducción en el esfuerzo cortante de hasta un 76% dependiendo del esfuerzo normal aplicado. Esto se traduciría a una reducción en la resistencia del material. Sin embargo, cuando analizamos los esfuerzos cortantes a grandes desplazamientos la reducción es mucho menor (29% cuando es aplicado un esfuerzo normal de

30 lbs/pulg<sup>2</sup>) y en ocasiones tiende a incrementar levemente (6.7% de incremento para 20 lbs/pulg<sup>2</sup>).

Las Figuras 5.9 y 5.10 muestran una comparación gráfica de la variación del esfuerzo cortante a medida que se le añaden diferentes porcentajes de goma a las muestras de arena para bajos desplazamientos y grandes desplazamientos, respectivamente. Según los resultados mostrados en la Figura 5.10 podemos observar que a bajos desplazamientos el añadir goma triturada a las muestras de arena Ottawa tiende a reducir el esfuerzo cortante de falla; esta tendencia es observada para las tres presiones de confinamiento utilizadas en esta investigación. Sin embargo, cuando consideramos grandes desplazamientos (> 0.2 pulgadas) añadir goma triturada tiende a incrementar los esfuerzos cortantes de falla. Este incremento se ve reducido a medida que se incrementa el porcentaje de goma en las muestras.

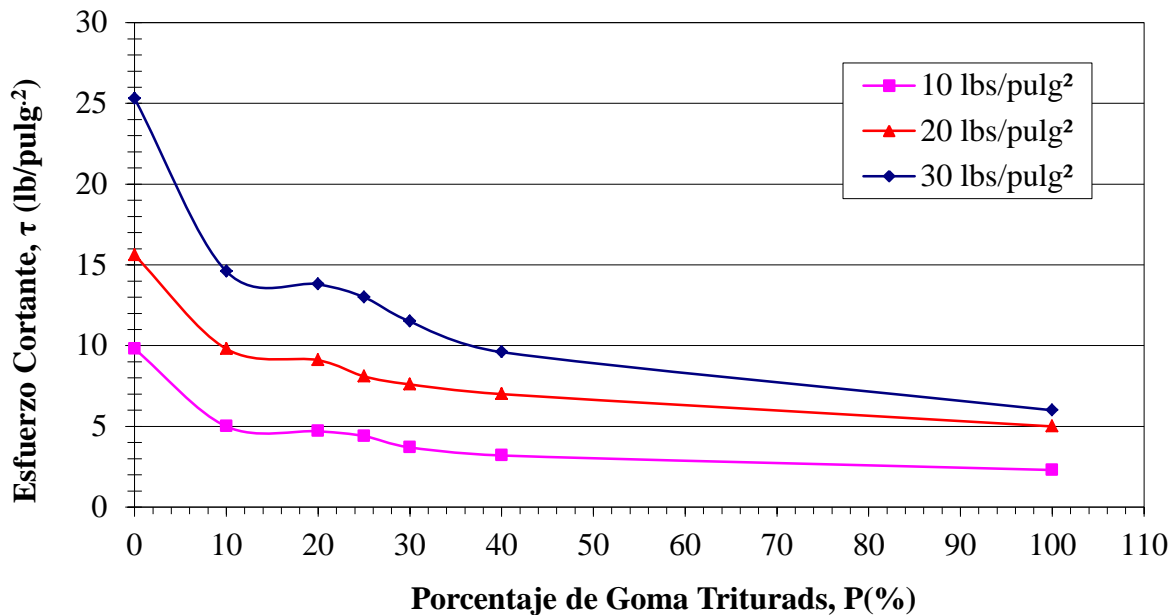


Figura 5.9 Efecto de añadir diferentes porcentajes de goma en el esfuerzo cortante de falla definido a bajos desplazamientos (< 0.06 pulg) medido mediante pruebas de corte directo

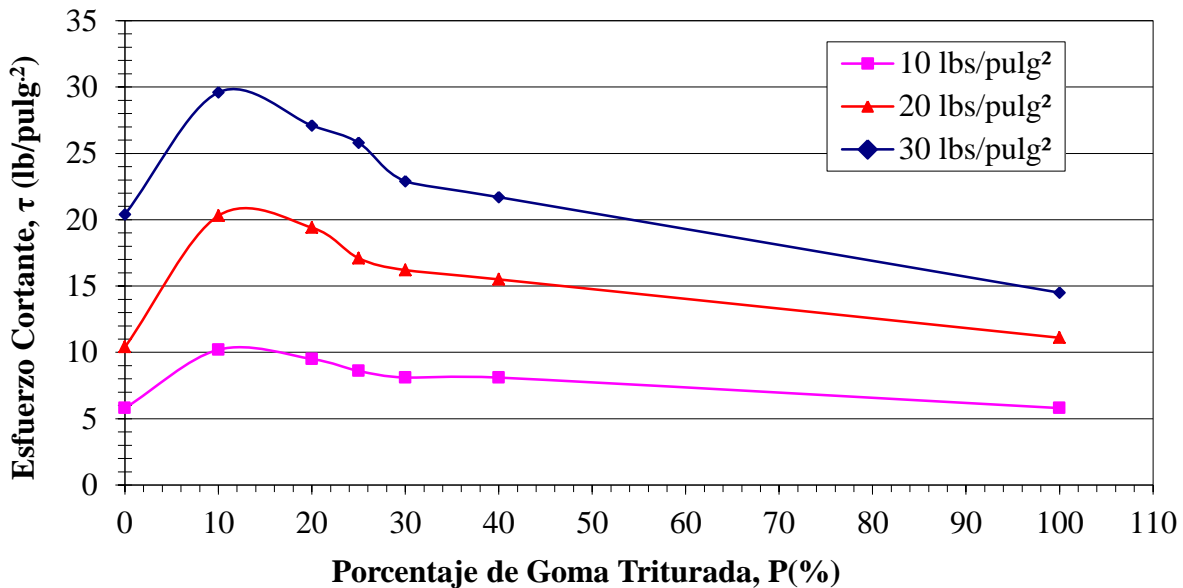


Figura 5.10 Efecto de añadir diferentes porcentajes de goma en el esfuerzo cortante de falla definido a grandes desplazamientos (0.25 pulg) medido mediante pruebas de corte directo

### 5.6.2 Curvas Desplazamiento Vertical – Desplazamiento Horizontal

Las Figuras 5.11 a la 5.13 muestran las curvas desplazamiento vertical ( $\Delta V$ ) versus desplazamiento horizontal ( $\Delta H$ ) para la muestras estudiadas durante esta investigación. Se observó que la arena Ottawa tiene un comportamiento dilatante, es decir, se crea un efecto de trabazón de los granos entre sí, debido al alto peso unitario y compacidad del material. Los granos que originalmente estaban bien acomodados, se mueven sobre sus vecinos para que pueda ocurrir el desplazamiento de la caja, produciendo una estructura más suelta que la original y a su vez un aumento en el volumen de la muestra.

Las muestras preparadas con goma triturada y mezclas con arena Ottawa experimentaron un comportamiento contractivo al aplicar el esfuerzo cortante. Este comportamiento se le podría atribuir a la alta compresibilidad que tiene la goma triturada debido a sus características elásticas.



Las muestras que experimentaron la mayor contracción fueron las muestras formadas con un 100% de goma triturada donde podemos observar en la Figura 5.12 que este espécimen alcanzó una desplazamiento vertical de  $30.0 \times 10^{-4}$  pulgadas.

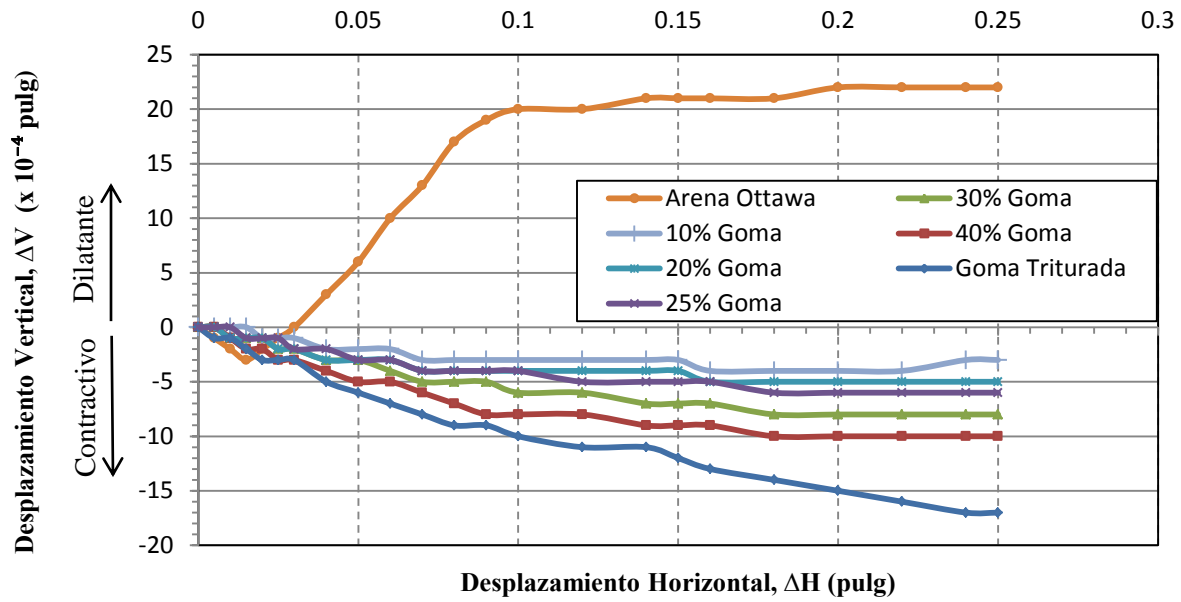


Figura 5.11 Efecto de añadir goma triturada a diferentes porcentajes en el comportamiento desplazamiento horizontal – desplazamiento vertical de arena Ottawa a una presión de confinamiento de  $10 \text{ lbs/pulg}^2$  utilizando corte directo

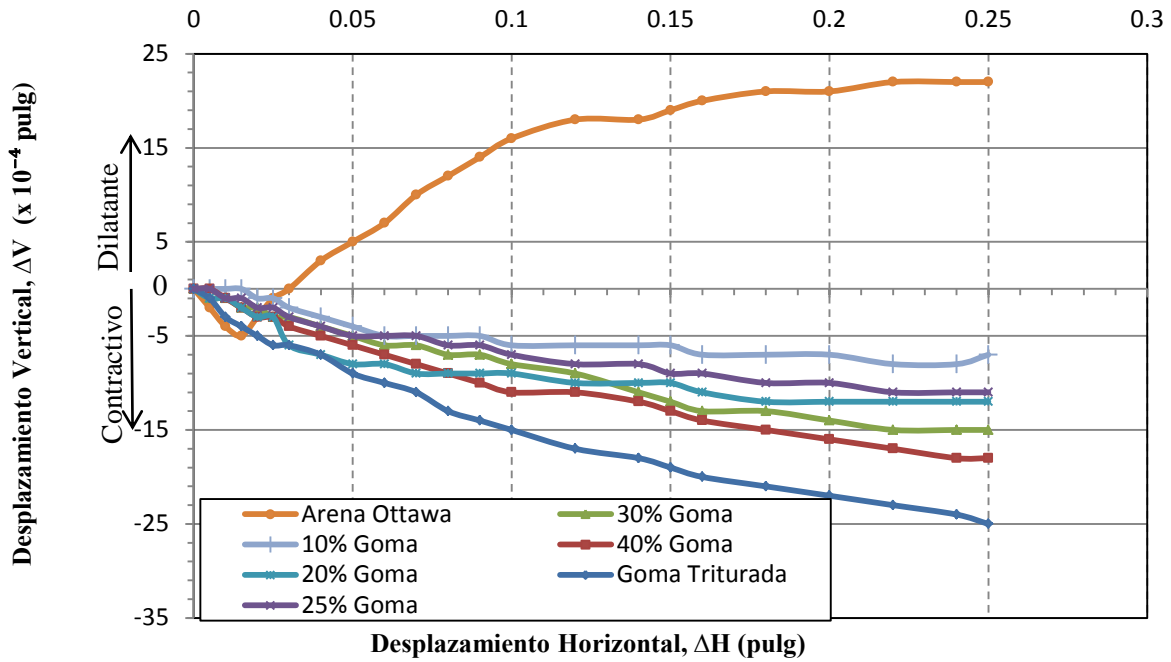


Figura 5.12 Efecto de añadir goma triturada a diferentes porcentajes en el comportamiento desplazamiento horizontal – desplazamiento vertical de arena Ottawa a una presión de confinamiento de 20 lbs/pulg<sup>2</sup> utilizando corte directo

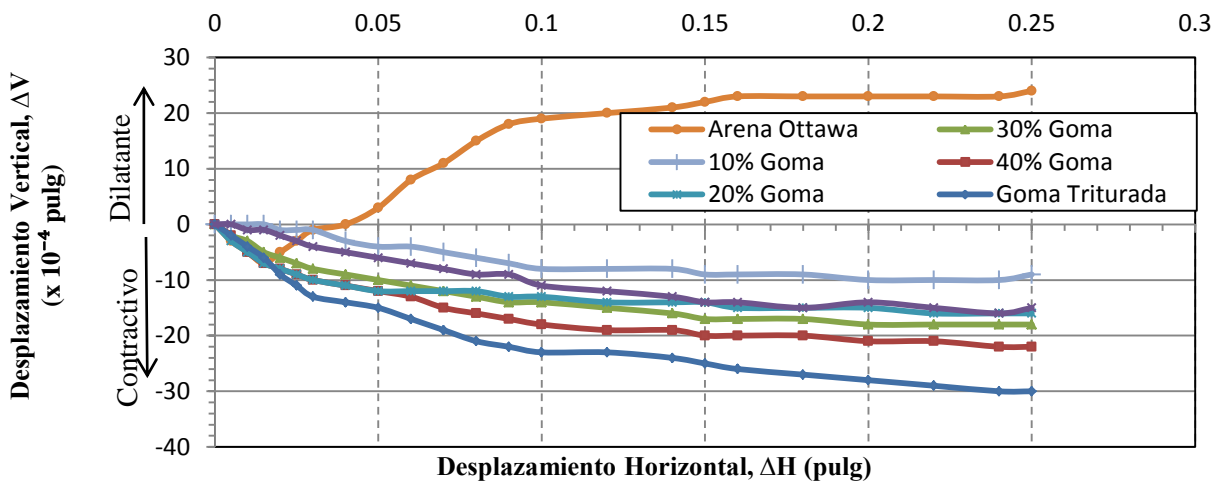


Figura 5.13 Efecto de añadir goma triturada a diferentes porcentajes en el comportamiento desplazamiento horizontal – desplazamiento vertical de arena Ottawa a una presión de confinamiento de 30 lbs/pulg<sup>2</sup> utilizando corte directo

### 5.6.3 Parámetros de Resistencia al Corte

Para el análisis de la goma triturada y de las muestras creadas con mezclas de goma y arena, se midió el ángulo de fricción interna y el ángulo de fricción interna equivalente, es decir, obligando a la envolvente de falla a que pase por el origen ( $c = 0$ ). Las Tablas 5.7 y 5.8 muestran un resumen los parámetros de resistencia al corte obtenidos de la prueba de corte directo tales como el ángulo de fricción interna ( $\phi'$ ) y la cohesión ( $c'$ ) en términos de esfuerzos efectivos para los materiales estudiados a distintas proporciones (0, 10, 20, 25, 30, 40 y 100% de goma triturada) a bajos y altos desplazamientos horizontales, respectivamente. Los valores de la cohesión, ( $c'$ ), obtenidos oscilan entre 32 y 172 lbs/pie<sup>2</sup> a desplazamientos  $< 0.06$  pulgadas, mientras que a desplazamientos de 0.25 pulgadas la cohesión varía entre 93 y 262 lbs/pie<sup>2</sup>.

Se encontró que a bajos desplazamientos el  $\phi'$  en términos de esfuerzos efectivos para la arena Ottawa fue de 40° mientras que para muestras de 100% el valor medido fue de 11°, este representa una disminución de 29%. A grandes desplazamientos se encontró un valor de  $\phi$  igual a 32° para la arena Ottawa y de 24° para muestras formadas con un 100% de goma, en este caso la reducción fue de 25%. Sin embargo, en el caso de mezclas de arena Ottawa con 10% y 20% de goma triturada hubo un aumento de 13° y 11° en el ángulo de fricción interna, respectivamente, al ser comparado con la arena Ottawa, lo cual se reflejó en un aumento en la resistencia del material cuando se analizó a grandes desplazamientos. Mientras que a bajas desplazamientos ( $\Delta H < 0.06$  pulg) el efecto es disminuir la resistencia del material.

La Figura 5.14 muestra de forma gráfica cómo varía el ángulo de fricción interna a medida que se aumenta el porcentaje de goma triturada a bajos y altos desplazamientos horizontales mientras que la Figura 5.15 muestra la variación en la cohesión del material. De la Figura 5.14 podemos observar que al añadir goma triturada a muestras de arena Ottawa

incrementa el ángulo de fricción interna cuando la falla es definida a grandes desplazamientos. Sin embargo, cuando la falla es definida a bajos desplazamientos el ángulo de fricción interna muestra una disminución para los porcentajes de goma estudiados en esta investigación.

De la Figura 5.15 podemos observar que al añadir goma triturada a muestras de arena Ottawa incrementa levemente la cohesión del material. Sin embargo, a medida que se incrementa el porcentaje de goma la cohesión muestra una tendencia a disminuir cuando la falla es definida a bajos desplazamientos, mientras que a grandes desplazamientos los resultados muestran que la cohesión tiende a incrementar. Es importante mencionar que los valores de cohesión medidos en esta investigación fueron muy bajos por lo que se recomienda realizar un análisis más cuidadoso de este parámetro.

Tabla 5.7 Parámetros de resistencia al corte obtenidos de la prueba de corte directo a bajos desplazamientos horizontales ( $\Delta H < 0.06$  pulg)

Material	Cohesión (lbs/pie <sup>2</sup> )	Ángulo de Fricción Interna	Ángulo de Fricción Interna Equivalente (c=0)
Arena Ottawa	0	40°	40°
10% Goma	172	25°	27°
20% Goma	46	25°	26°
25% Goma	32	24°	24°
30% Goma	55	21°	22°
40% Goma	113	18°	19°
100% Goma	117	11°	13°

Tabla 5.8 Parámetros de resistencia al corte obtenidos de la prueba de corte directo a altos desplazamientos horizontales ( $\Delta H = 0.25$  pulg)

Material	Cohesión (lbs/pie <sup>2</sup> )	Ángulo de Fricción Interna	Ángulo de Fricción Interna Equivalente (c=0)
Arena Ottawa	0	32°	32°
10% Goma	93	45°	45°
20% Goma	152	43°	43°
25% Goma	110	39°	40°
30% Goma	135	36°	38°
40% Goma	220	33°	37°
100% Goma	262	24°	27°

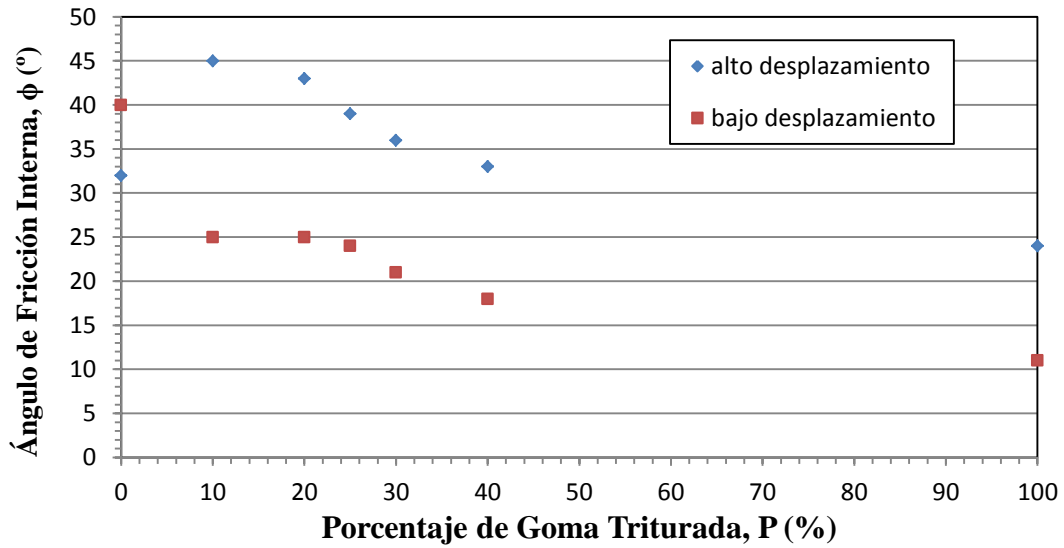


Figura 5.14 Variación del ángulo de fricción interna en función del porcentaje de goma triturada a altos y bajos desplazamientos horizontales medidos mediante prueba de corte directo

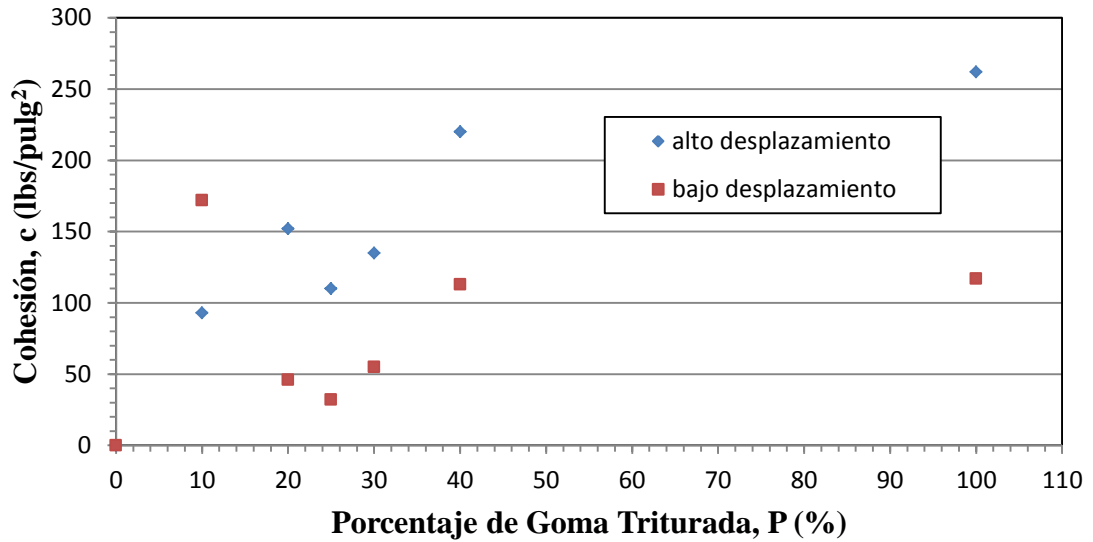


Figura 5.15 Variación de la cohesión en función del porcentaje de goma triturada a altos y bajos desplazamientos medidos mediante prueba de corte directo

## 5.7 Prueba Triaxial

Teniendo en consideración, que los suelos granulares presentan permeabilidades altas y que en general se utilizan en un estado de densificación alta, la resistencia drenada resulta ser la de mayor interés y en consecuencia será la analizada durante esta investigación. Se realizaron una series de pruebas de compresión triaxial tipo consolidada – drenada (CD) a la arena Ottawa mezclada con goma triturada a distintos porcentajes (0, 10, 20, 25, 30, 40 y 100% por volumen). Las variables que se manipularon durante la prueba fueron el porcentaje de goma triturada utilizado en las diferentes muestras formadas y la presión de confinamiento aplicada a cada muestra. Durante la aplicación de la presión de confinamiento y en la etapa de corte la válvula de drenaje se mantuvo abierta para cumplir con la condición consolidada – drenada (CD). La Tabla 5.9 presenta un resumen tabulado del esfuerzo desviador, presión de confinamiento y deformación unitaria a la cual ocurrió la falla. Se incluye además información de las muestras

tales como el largo, diámetro y peso unitario al inicio de la prueba. El rango de peso unitario seco de las muestras estudiadas estuvo entre 34.8 lbs/pie<sup>3</sup> y 119.7 lbs/pie<sup>3</sup> mientras que la razón de vanos inicial fue variando entre 0.38 y 0.99. Sin embargo, es importante recalcar que todas las muestras fueron formadas para una misma densidad relativa ( $D_r = 90\%$ ).

Tabla 5.9 Esfuerzo desviador y deformación axial de falla obtenidos de pruebas triaxiales tipo CD para muestras de arena Ottawa, goma triturada y mezcla de ambos materiales a diferentes porcentajes

% Goma Triturada	Gs	Razón de Vanos	Largo de Muestra	Diámetro de la Muestra	Peso de la Muestra	Peso Unitario Seco	Presión de Confinamiento $\sigma_3$	Deformación Unitaria de Falla, $\epsilon_f$	Esfuerzo Desviador Máximo
0	2.64	0.38	123.5	50.3	1.032	119.2	10	4.0	35.5
	2.64	0.38	121.7	50.5	1.032	119.7	20	3.5	68.4
	2.64	0.38	124.7	50.0	1.032	119.2	30	3.5	108.4
10	2.58	0.46	108.5	50.0	0.828	109.9	10	20.0	48.5
	2.58	0.45	107.4	50.0	0.828	111.0	20	20.0	92.3
	2.58	0.46	109.5	49.8	0.828	110.0	30	20.0	121.8
20	2.50	0.52	108.7	49.8	0.768	102.8	10	20.0	42.7
	2.50	0.53	107.7	50.3	0.768	101.7	20	20.0	86.2
	2.50	0.53	109.5	49.8	0.768	102.1	30	20.0	111.2
25	2.43	0.54	105.9	49.8	0.718	98.6	10	20.0	40.2
	2.43	0.53	107.7	49.5	0.718	98.0	20	20.0	75.7
	2.43	0.53	107.4	49.8	0.718	97.2	30	20.0	100.0
30	2.36	0.57	105.9	49.3	0.668	93.6	10	20.0	35.4
	2.36	0.56	105.2	49.3	0.668	94.3	20	20.0	66.7
	2.36	0.56	107.4	48.8	0.668	94.3	30	20.0	92.2
40	2.25	0.64	106.1	48.8	0.598	85.4	10	20.0	31.2
	2.25	0.64	106.7	48.5	0.598	85.9	20	20.0	59.1
	2.25	0.63	106.1	48.5	0.598	86.3	30	20.0	79.7
100	1.11	0.95	107.1	47.5	0.238	35.5	10	20.0	19.1
	1.11	0.98	107.7	47.8	0.238	34.9	20	20.0	33.7
	1.11	0.99	105.0	48.5	0.238	34.8	30	20.0	45.1

### 5.7.1 Comportamiento Esfuerzo - Deformación

Las Figuras 5.16 a la 5.18 muestran el comportamiento de esfuerzo - deformación obtenidos de las pruebas triaxiales tipo CD para las diferentes muestras estudiadas durante esta investigación (muestras de arena Ottawa y muestras de arena mezclada con goma triturada a distintos porcentajes compactados utilizando el método de sub-compactación).

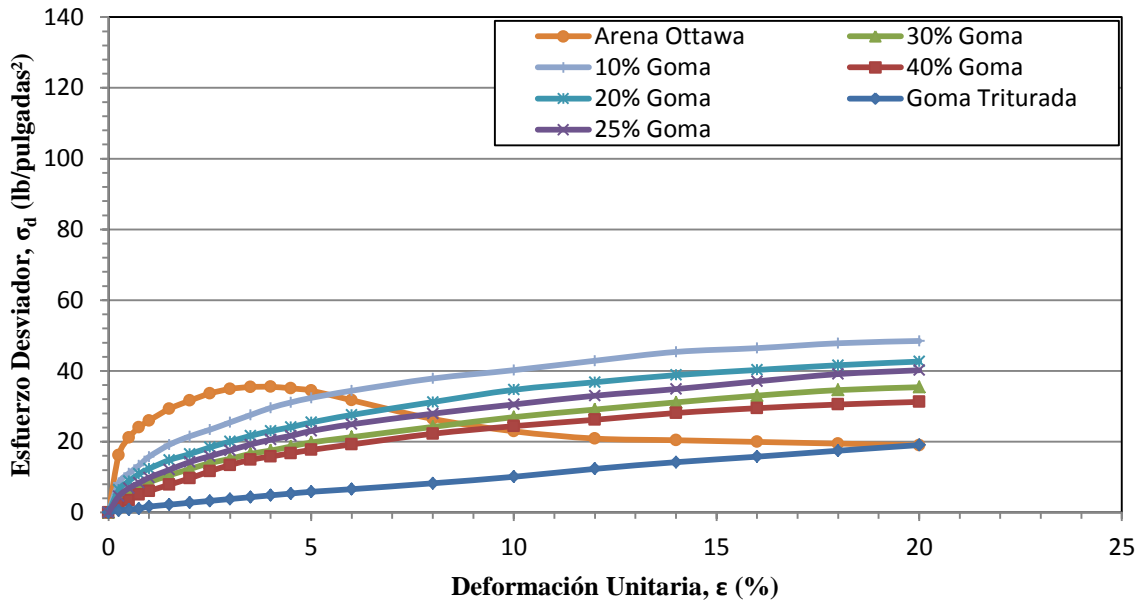


Figura 5.16 Efecto de añadir goma triturada a diferentes porcentajes en el comportamiento esfuerzo – deformación para distintas mezclas de goma triturada con arena Ottawa a una presión de confinamiento de 10 lbs/pulg<sup>2</sup> utilizando prueba triaxial tipo CD



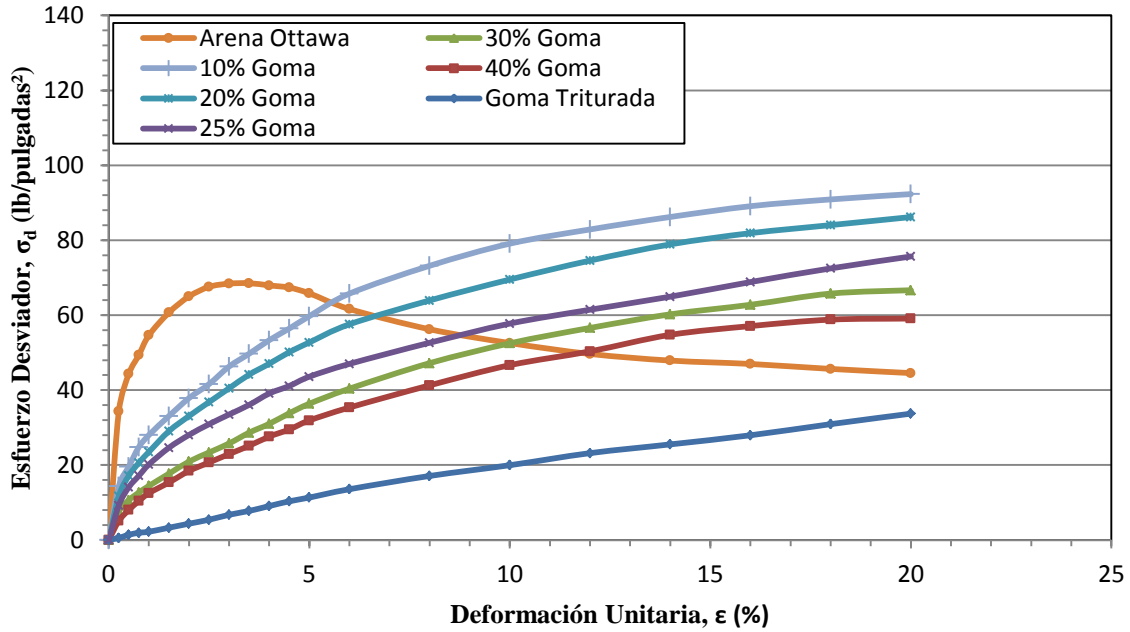


Figura 5.17 Efecto de añadir goma triturada a diferentes porcentajes en el comportamiento esfuerzo – deformación para distintas mezclas de goma triturada con arena Ottawa a una presión de confinamiento de 20 lbs/pulg<sup>2</sup> utilizando prueba triaxial tipo CD

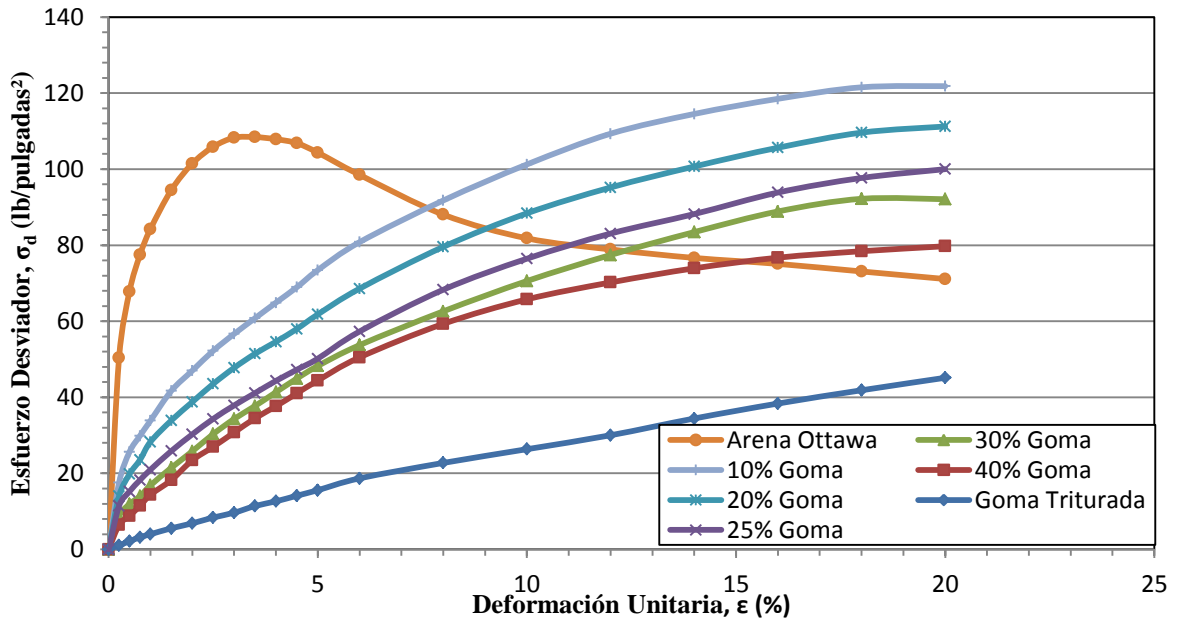


Figura 5.18 Efecto de añadir goma triturada a diferentes porcentajes en el comportamiento esfuerzo – deformación para distintas mezclas de goma triturada con arena Ottawa a una presión de confinamiento de 30 lbs/pulg<sup>2</sup> utilizando prueba triaxial tipo CD

Se observó de las curvas de esfuerzo – deformación que las muestras de arena Ottawa se comportan como un material quebradizo, es decir, que cuando el esfuerzo llega a un valor máximo, éste tiende a descender a medida que aumenta la deformación axial unitaria. Este comportamiento es típico de arenas densas con densidades relativas mayores de 70% (Bardet, 1997). La deformación unitaria de falla, ( $\epsilon_f$ ), para la arena Ottawa fue de 4% para una presión de confinamiento de 10 lbs/pulg<sup>2</sup>, mientras que para presiones de confinamiento de 20 y 30 lbs/pulg<sup>2</sup> la deformación unitaria de falla fue de 3.5% (según se puede observar en las Figuras 5.17 a 5.19). A diferencia, las muestras formadas con 100% goma triturada tienen un comportamiento más lineal por lo que su resistencia continúa incrementando a medida que las muestras exceden deformaciones unitarias de 5%.

Las muestras de arena alcanzaron esfuerzos máximos de 35.5, 68.4 y 108.4 lbs/pulg<sup>2</sup> al ser sometidas a presiones de confinamiento de 10, 20 y 30 lbs/pulg<sup>2</sup>, respectivamente; mientras que las muestras formadas con un 100% de goma triturada experimentaron esfuerzos máximos de 19.1, 33.7, 45.1 lbs/pulg<sup>2</sup> bajo las mismas presiones de confinamiento. Es importante mencionar que estos valores de esfuerzo desviador máximo ocurren a deformaciones diferentes. Por lo tanto, se decidió comparar el efecto que tiene añadir diferentes porcentajes de goma en la resistencia al corte de muestras de arena Ottawa a bajas y altas deformaciones. Las Tablas 5.10 y 5.11 presentan los valores de esfuerzo desviador obtenidos a bajas deformaciones ( $\epsilon < 4\%$ ) y a altas deformaciones ( $\epsilon = 20\%$ ), respectivamente.

Las Figuras 5.19 y 5.20 muestran una comparación gráfica del esfuerzo desviador a diferentes porcentajes de goma cuando la falla se define a bajas deformaciones y altas deformaciones, respectivamente. De la Figura 5.19 podemos observar que para bajas deformaciones un incremento en el porcentaje de goma resulta en una disminución en el esfuerzo

desviador de hasta un 89% dependiendo de la presión de confinamiento aplicada y el porcentaje de goma. El porcentaje de diferencia entre las muestras de arena Ottawa y las muestras con diferentes porcentajes de goma varían entre 18 y 162%; lo cual se traduce a una reducción en la resistencia del suelo lo cual puede ser significativa a medida que se incrementa el porcentaje de goma en la muestra. Sin embargo, analizando los resultados mostrados en la Figura 5.20 vemos que a grandes deformaciones el esfuerzo desviador incrementa para porcentajes de goma menores de 40%. Es importante mencionar que al añadir porcentajes de goma entre un 10% y 20% casi duplica el esfuerzo desviador lo cual se traduce a un incremento en la resistencia del material. Sin embargo, este incremento es menor para otros porcentajes considerados.

Tabla 5.10 Comparación del esfuerzo desviador medido en el laboratorio a bajas deformaciones ( $\epsilon < 4\%$ ) mediante la prueba triaxial tipo CD para muestras de arena Ottawa mezclada con diferentes porcentajes de goma

% Goma Triturada	Peso Unitario Seco	Presión de Confinamiento	Deformación Axial	Esfuerzo Desviador	% Diferencia
	lbs/pie <sup>3</sup>	lbs/pulg <sup>2</sup>	pulg	lbs/pulg <sup>2</sup>	(%)
0	118.7	10	4.0	35.5	-
	119.0	20	3.5	68.5	-
	119.0	30	3.5	108.4	-
10	110.6	10	4.0	29.5	18
	110.6	20	3.5	49.7	32
	110.6	30	3.5	60.8	56
20	102.7	10	4.0	23.0	43
	102.4	20	3.5	44.1	43
	102.7	30	3.5	51.5	71
25	98.3	10	4.0	20.6	53
	98.8	20	3.5	36.0	62
	98.8	30	3.5	41.1	90
30	94.1	10	4.0	17.5	68
	94.2	20	3.5	28.7	82
	94.0	30	3.5	37.7	97
40	85.4	10	4.0	15.8	77
	85.6	20	3.5	25.6	91
	85.6	30	3.5	34.5	103
100	35.4	10	4.0	4.8	152
	35.6	20	3.5	7.8	159
	35.9	30	3.5	11.4	162

Tabla 5.11 Comparación del esfuerzo desviador medido en el laboratorio a grandes deformaciones ( $\epsilon = 20\%$ ) mediante la prueba triaxial tipo CD para muestras de arena Ottawa mezclada con diferentes porcentajes de goma

% Goma Triturada	Peso Unitario Seco	Presión de Confinamiento	Deformación Axial	Esfuerzo Desviador	% Diferencia
	lbs/pie <sup>3</sup>	lbs/pulg <sup>2</sup>	pulg	lbs/pulg <sup>2</sup>	(%)
0	118.7	10	4.0	19.0	-
	119.0	20	3.5	44.5	-
	119.0	30	3.5	71.1	-
10	110.6	10	4.0	48.5	87
	110.6	20	3.5	92.3	70
	110.6	30	3.5	121.8	53
20	102.7	10	4.0	42.7	77
	102.4	20	3.5	86.2	64
	102.7	30	3.5	111.2	44
25	98.3	10	4.0	40.2	72
	98.8	20	3.5	75.7	52
	98.8	30	3.5	100.0	34
30	94.1	10	4.0	35.4	60
	94.2	20	3.5	66.7	40
	94.0	30	3.5	92.1	26
40	85.4	10	4.0	31.3	49
	85.6	20	3.5	59.1	28
	85.6	30	3.5	79.8	12
100	35.4	10	4.0	19.1	1
	35.6	20	3.5	33.7	28
	35.9	30	3.5	45.1	45

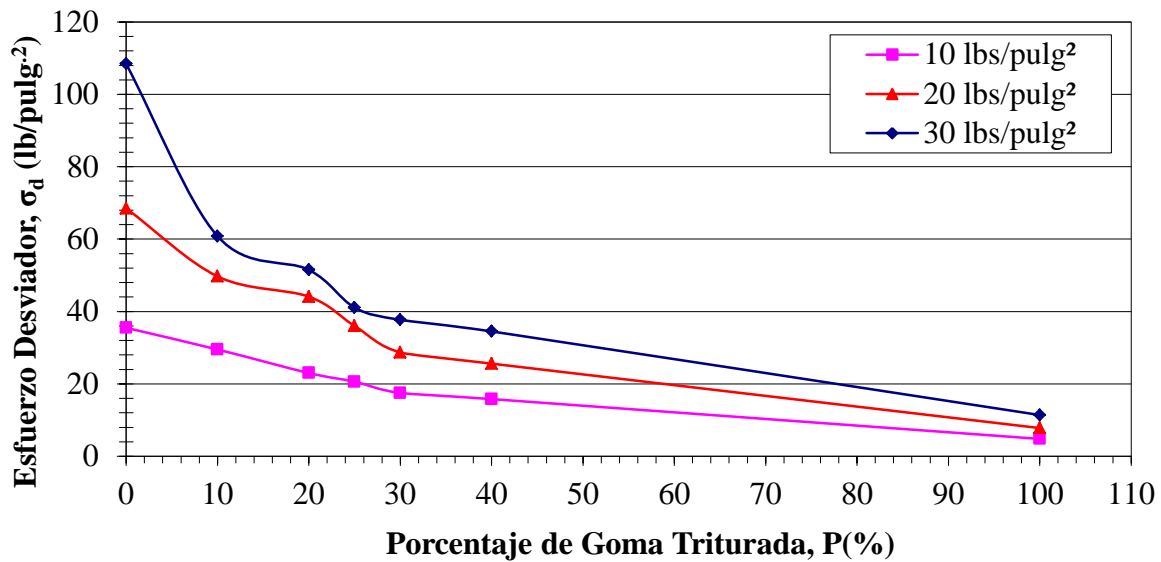


Figura 5.19 Efecto de añadir diferentes porcentajes de goma en el esfuerzo desviador definido a bajas deformaciones ( $\epsilon < 4\%$ ) medido mediante pruebas de triaxiales tipo CD.

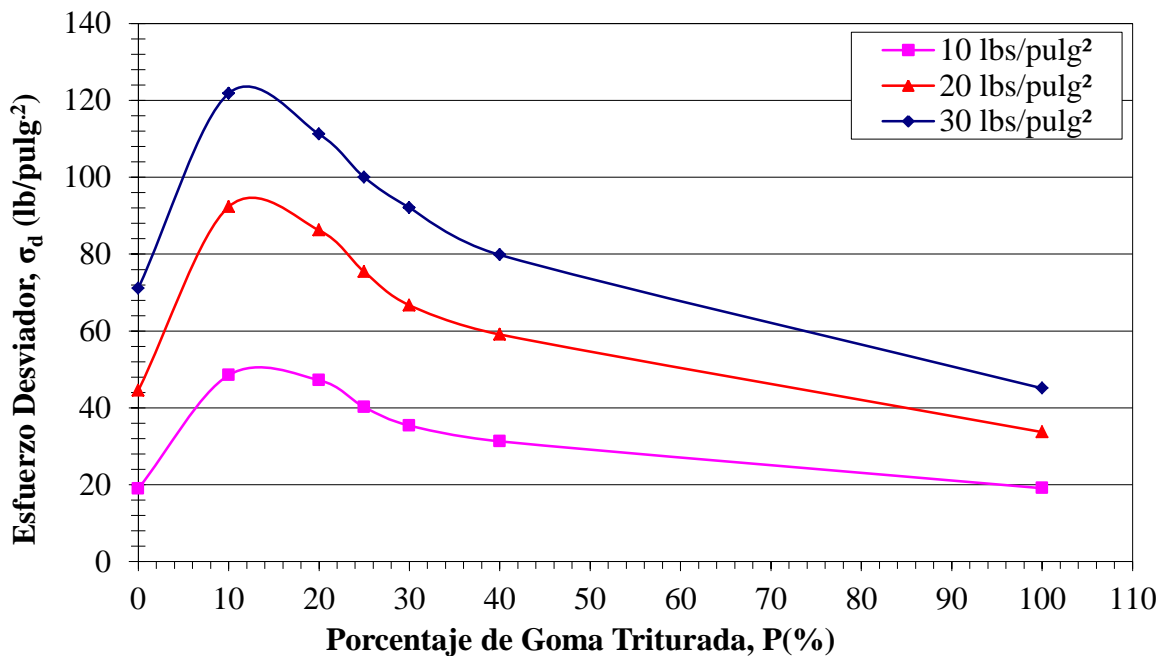


Figura 5.20 Efecto de añadir diferentes porcentajes de goma en el esfuerzo desviador definido a altas deformaciones ( $\epsilon = 20\%$ ) medido mediante pruebas de triaxiales tipo CD

### 5.7.2 Parámetros de Resistencia al Corte

Las Figuras 5.21 a 5.27 muestran la trayectoria de esfuerzos generadas para las muestras de arena Ottawa, goma triturada y mezclas de goma triturada con arena Ottawa, compactadas a una densidad relativa de 90% utilizando el método de sub-compactación. Para el análisis de la goma triturada y de las muestras creadas con mezclas de goma y arena, se determinó el valor de ángulo de fricción interna y el ángulo de fricción interna equivalente, es decir, obligando a la envolvente de falla a que pase por el origen ( $c'=0$ ). Estos resultados fueron obtenidos basados en los parámetros  $\alpha$  y  $d$  mostrados en la Figuras 5.22 a la 5.28 según las ecuaciones presentadas en la sección 3.4.6.

Los resultados presentados en las gráficas muestran una variación en el parámetro  $\alpha$  entre  $33^\circ$  y  $23^\circ$ , dependiendo del porcentaje de goma utilizado, mientras que el parámetro “ $d$ ” varía entre  $0 \text{ lbs/pie}^2$  y  $342 \text{ lbs/pie}^2$ . Debemos recordar que el parámetro  $\alpha$  se correlaciona con el ángulo de fricción interna ( $\phi$ ), mientras que el parámetro “ $d$ ” se correlaciona con la cohesión ( $c$ ) del material.

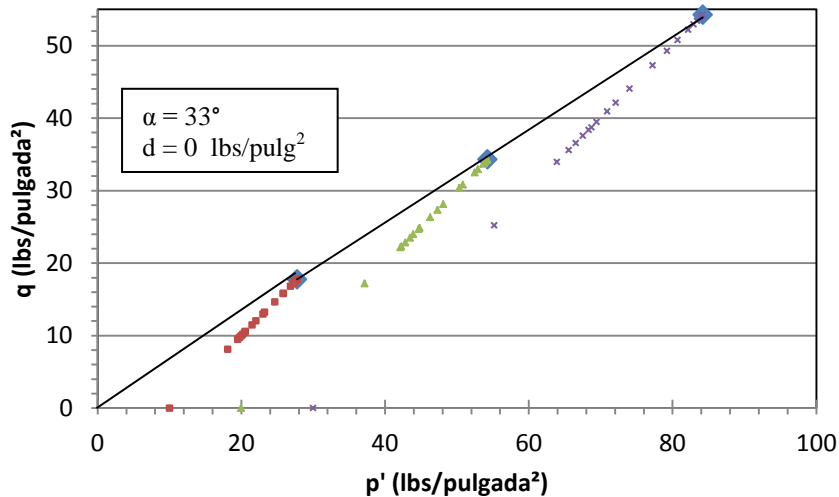


Figura 5.21 Trayectoria de esfuerzos para la muestra de arena Ottawa a un densidad relativa de 90%

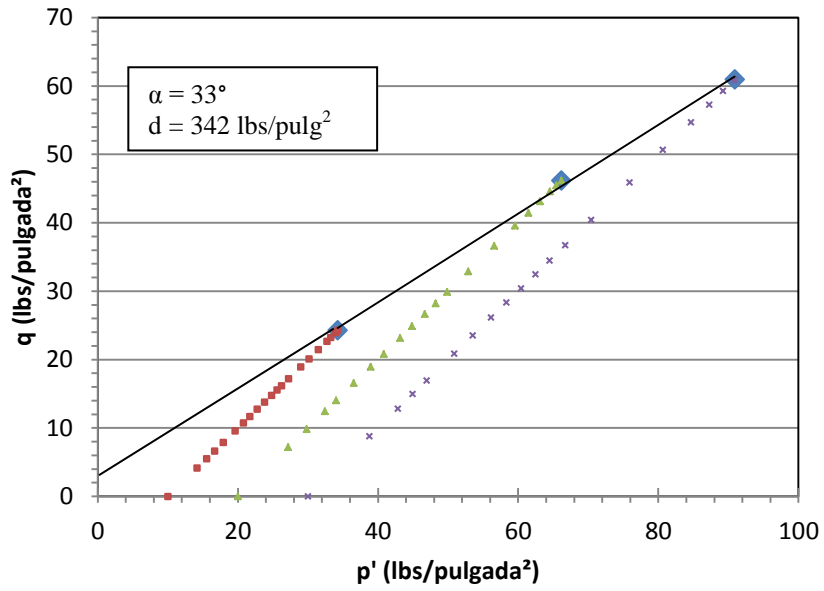


Figura 5.22 Trayectoria de esfuerzos para la muestra de 10% goma triturada y 90% de arena Ottawa a un densidad relativa de 90%

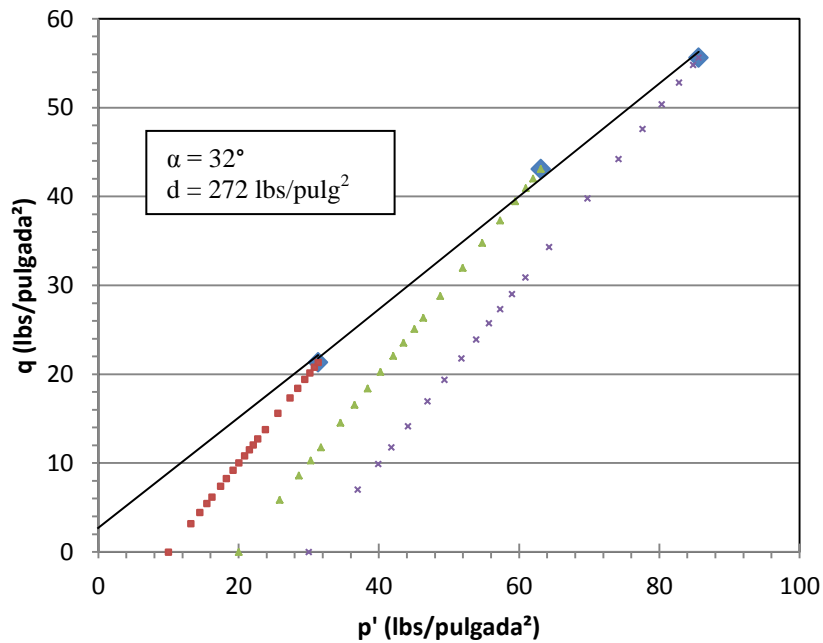


Figura 5.23 Trayectoria de esfuerzos para la muestra de 20% goma triturada y 80% de arena Ottawa a un densidad relativa de 90%



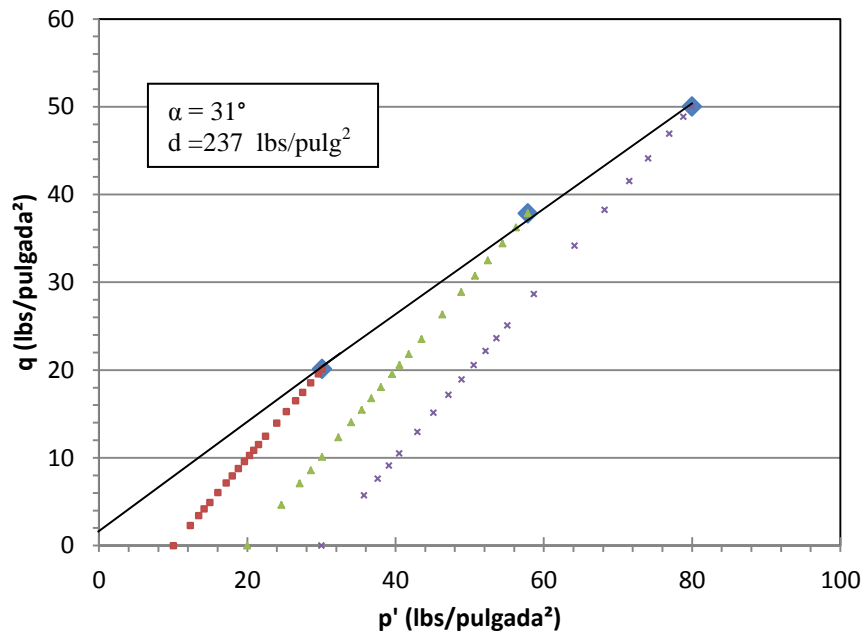


Figura 5.24 Trayectoria de esfuerzos para la muestra de 25% goma triturada y 75% de arena Ottawa a un densidad relativa de 90%

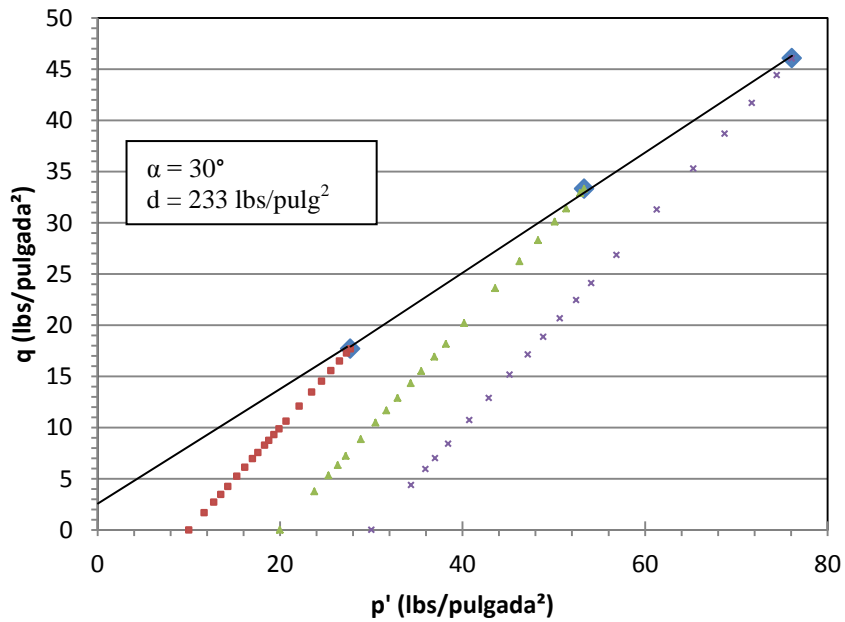


Figura 5.25 Trayectoria de esfuerzos para la muestra de 30% goma triturada y 70% de arena Ottawa a un densidad relativa de 90%

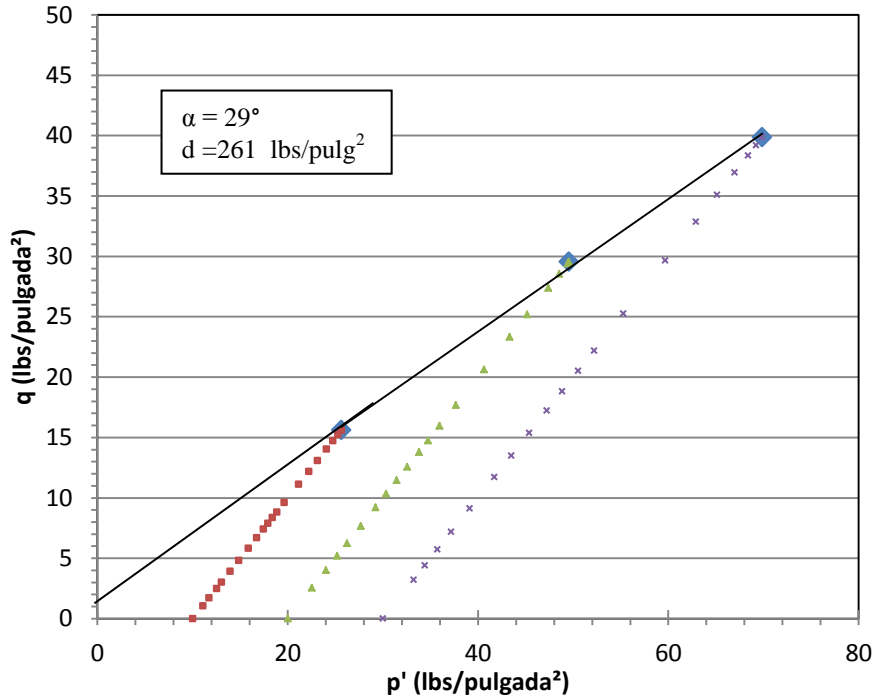


Figura 5.26 Trayectoria de esfuerzos para la muestra de 40% goma triturada y 60% de arena Ottawa a un densidad relativa de 90%

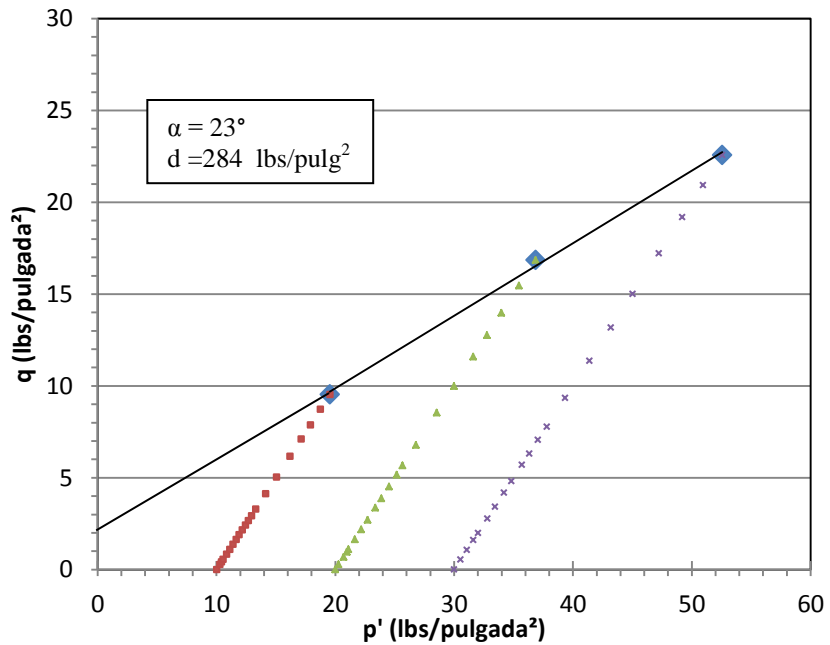


Figura 5.27 Trayectoria de esfuerzos para la muestra de 100% goma triturada a un densidad relativa de 90%

Las Tablas 5.12 y 5.13 muestran un resumen de los parámetros de resistencia al corte obtenidos de la prueba triaxial tales como ángulo de fricción interna y cohesión en términos de esfuerzos efectivos para los materiales estudiados a distintas proporciones (0, 10, 20, 25, 30, 40 y 100% de goma triturada) para bajas y altas deformaciones axiales, respectivamente. Los valores de cohesión obtenidos durante esta investigación oscilan entre 271-409 lbs/pie<sup>2</sup> cuando son analizados a altas deformaciones, mientras que a bajas deformaciones los valores oscilan entre 63-561 lbs/pie<sup>2</sup>

Sin embargo, cuando se analizó el ángulo de fricción interna equivalente, se generó un aumento leve en el valor de  $\phi'$ . El aumento en el ángulo de fricción interna equivalente en comparación con el ángulo de fricción interna se debe a que la pendiente de la envolvente de rotura,  $K_f$ , tiende a ser mayor cuando obligamos a que pase por el origen. Las Figuras 5.28 y 5.29 muestran un gráfico que presenta cómo varía el ángulo de fricción interna y la cohesión a medida que se aumenta el porcentaje de goma triturada a bajas y altas deformaciones unitarias, respectivamente.

En la Figura 5.28 podemos observar nuevamente cómo a medida que se añade goma a la arena Ottawa el ángulo de fricción interna tiende a disminuir cuando analizamos a bajas deformaciones. Sin embargo, para altas deformaciones añadir goma triturada incrementa el ángulo de fricción interna para porcentajes de goma menores de 40%. Este incremento se maximiza al añadir un 10% de goma al material (aumenta de 32° a 41°), mientras que para un 20% de goma el ángulo de fricción interna incrementa de 32° a 39°.

De la Figura 5.29 observamos que la cohesión del material incrementa inicialmente de cero a 561 lbs/pie<sup>2</sup> para bajas deformaciones y de cero a 409 lbs/pie<sup>2</sup> para altas deformaciones. Sin embargo, la tendencia de los resultados muestran una reducción en la cohesión del material a

medida que se incrementa el porcentaje de goma, esta tendencia fue observada tanto a bajas como a grandes deformaciones.

Tabla 5.12 Parámetros de resistencia al corte obtenidos de la prueba triaxial a bajas deformaciones unitarias ( $\varepsilon = 4\%$ )

Material	Cohesión (lbs/pie <sup>2</sup> )	Ángulo de Fricción Interna ( $\phi'$ )	Ángulo de Fricción Interna Equivalente (c=0)
Arena Ottawa	0	40°	40°
10% Goma	561	28	33
20% Goma	375	27	30
25% Goma	475	22	27
30% Goma	291	22	25
40% Goma	255	21	23
100% Goma	63	9	10

Tabla 5.13 Parámetros de resistencia al corte obtenidos de la prueba triaxial a altas deformaciones unitarias ( $\varepsilon = 20\%$ )

Material	Cohesión (lbs/pie <sup>2</sup> )	Ángulo de Fricción Interna ( $\phi'$ )	Ángulo de Fricción Interna Equivalente (c=0)
Arena Ottawa	0	32°	32°
10% Goma	409	41°	43°
20% Goma	324	39°	42°
25% Goma	393	37°	40°
30% Goma	271	36°	38°
40% Goma	297	33°	36°
100% Goma	304	23°	26°

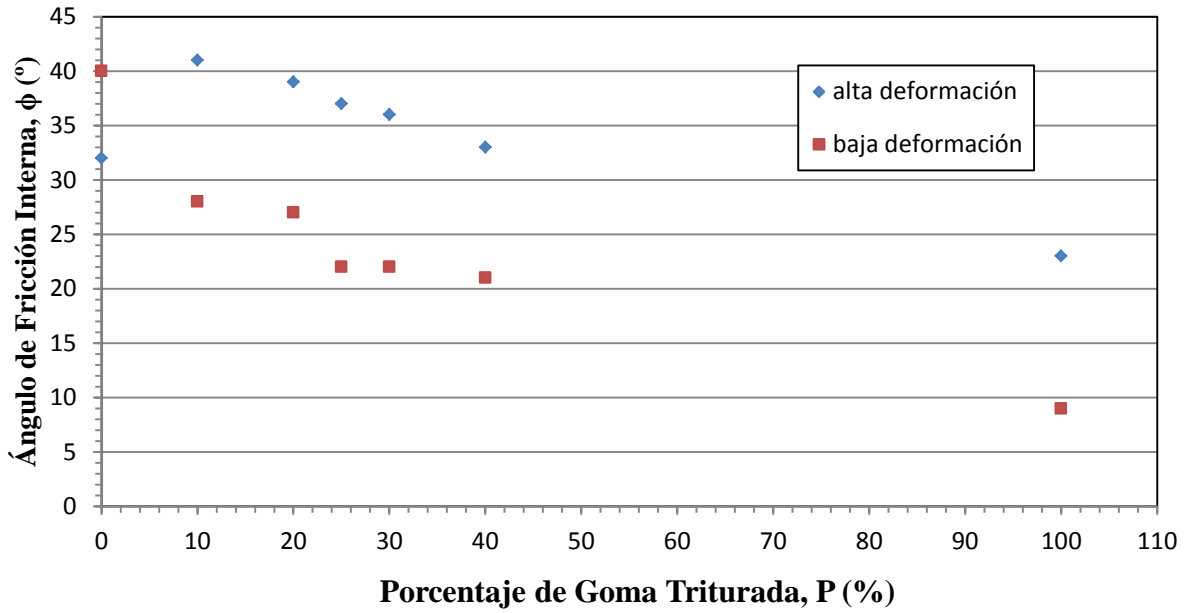


Figura 5.28 Variación del ángulo de fricción interna en función del porcentaje de goma triturada a altas y bajas deformaciones axiales medidas mediante pruebas triaxiales tipo CD

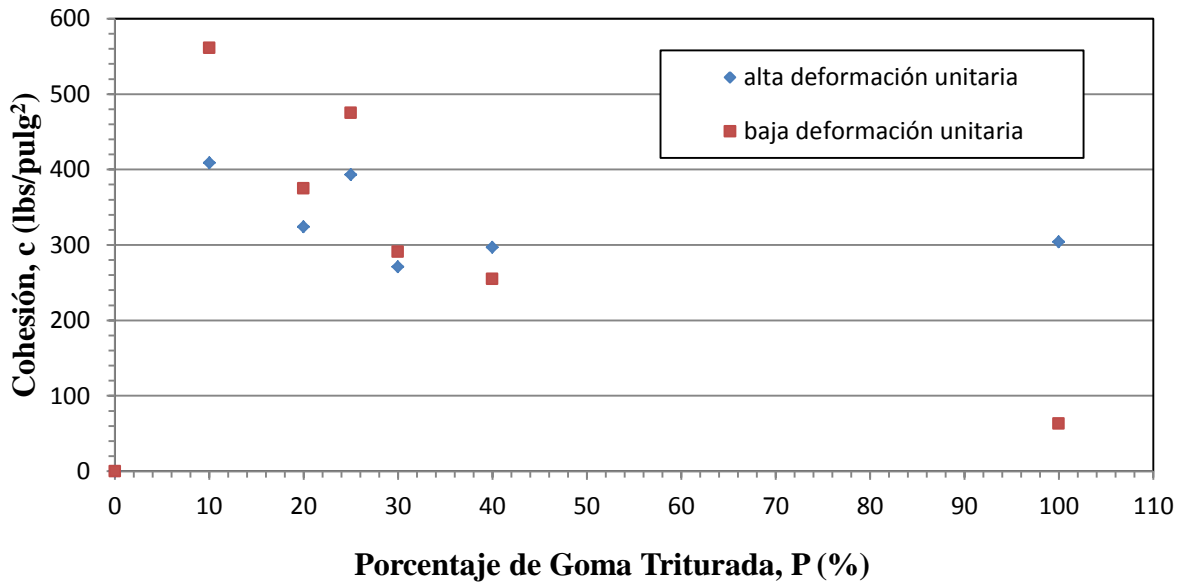


Figura 5.29 Variación de la cohesión en función del porcentaje de goma triturada a altas y bajas deformaciones axiales medidas mediante pruebas triaxiales tipo CD

## 5.8 Módulo Tangente Inicial

Tomando en cuenta las curvas de esfuerzo – deformación obtenidas durante esta investigación se estimó el módulo tangente inicial ( $E_i$ ) para las 21 muestras que se formaron durante el desarrollo de las pruebas triaxiales tipo CD. Dicho módulo se define como la pendiente de la línea tangente en la parte inicial de la curva de esfuerzo – deformación obtenida de una prueba triaxial. La Tabla 5.14 y la Figura 5.30 muestran la variación en el módulo tangente inicial obtenidos para muestras de goma triturada mezclada con arena Ottawa a distintos porcentajes (0, 10, 20, 25, 30, 40 y 100%). El módulo tangente inicial de las muestras formadas con arena Ottawa corresponden según Das (2010) a una arena en condición densa, debido a que los valores medidos están dentro del rango de 5,000 - 10,000 lbs/pulg<sup>2</sup>. El módulo tangente inicial de las muestras formadas con 100% goma triturada varía entre 127 - 321 lbs/pulg<sup>2</sup>, dependiendo de la presión de confinamiento, lo cual es indicativo de que es un material altamente compresible.

Tabla 5.14 Módulo tangente inicial,  $E_i$ , para muestras de goma triturada y arena Ottawa a distintos porcentajes

Porcentaje de goma triturada	Módulo Tangente Inicial $E_i$ (lbs/pulg <sup>2</sup> )		
	Presión de Confinamiento, $\sigma_3$ , 10 lbs/pulg <sup>2</sup>	Presión de Confinamiento, $\sigma_3$ , 20 lbs/pulg <sup>2</sup>	Presión de Confinamiento, $\sigma_3$ , 30 lbs/pulg <sup>2</sup>
0	2,598	5,463	8,425
10	1,575	2,800	3,384
20	1,237	2,351	2,829
25	985	2,016	2,096
30	851	1,444	1,684
40	605	1,250	1,436
100	127	224	321

De la Figura 5.30 se puede observar que el módulo tangente inicial aumenta a medida que se incrementa la presión de confinamiento. En adición, añadir goma triturada a muestras de arena Ottawa resulta en una disminución sustancial en el valor de  $E_i$ . A presiones de

confinamiento bajas, (10 lbs/pie<sup>2</sup>) la diferencia no es tan notable, sin embargo, a medida que la presión de confinamiento incrementa (20 y 30 lbs/pulg<sup>2</sup>) este efecto es más pronunciado. Podemos observar que el porcentaje de diferencia entre la muestra de arena Ottawa y la muestra de 100% de goma para una presión de confinamiento de 30 lbs/pulg<sup>2</sup> es de 185% mientras que para una presión de confinamiento de 10 lbs/pulg<sup>2</sup> el porcentaje de diferencia es de 181%

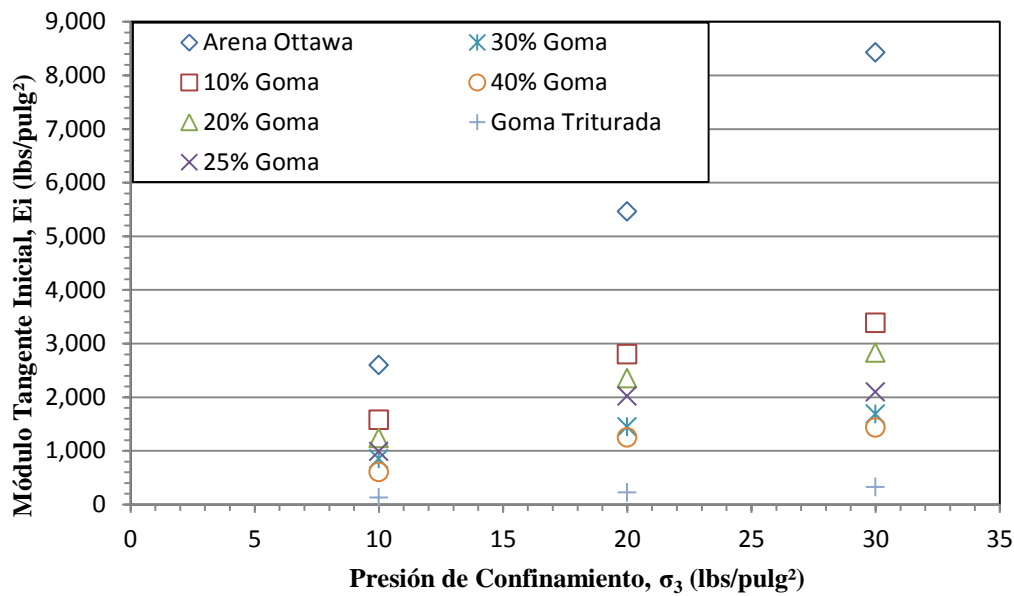


Figura 5.30 Variación del módulo tangente inicial con la presión de confinamiento para distintos porcentajes de goma triturada mezclada con arena Ottawa bajo pruebas triaxiales tipo CD

## 5.9 Comparación con Investigaciones Previas

Diferentes autores han estudiado experimentalmente las propiedades mecánicas e índices de la goma triturada para diferentes tamaños, densidades, equipos, presiones de confinamiento, criterios de falla, forma y alineamiento. Los resultados obtenidos durante esta investigación se comparan con resultados publicados por distintos autores en la literatura. Wu et al. (1997) obtuvieron un peso unitario mínimo y gravedad específica de 33 lbs/pie<sup>3</sup> y 1.12, valores que se asimilan a los obtenidos en esta investigación. La permeabilidad obtenida por Cecich et

al.(1996), utilizando el equipo de carga constante, fue de 0.034 cm/seg, lo cual también presenta valores similares a los obtenidos durante esta investigación (0.080 cm/seg).

La Figura 5.31 muestra los datos experimentales obtenidos durante esta investigación para muestras de 100% goma triturada junto con los datos reportados por Reddy y Marella (2001) para distintos tamaños de partículas. El valor obtenido durante esta investigación fue menor a los reportados por Reddy y Marella (2001), debido a que los tamaños de partículas reportados por Reddy y Marella (2001) alcanzan un tamaño máximo que varía entre 0.18 y 16.0 pulgadas mientras que el tamaño máximo de la goma triturada utilizada en esta investigación fue de 0.08 pulgadas. Por consiguiente, la razón de vanos para las muestras formadas durante esta investigación va a ser menor resultando en valores menores de permeabilidad.

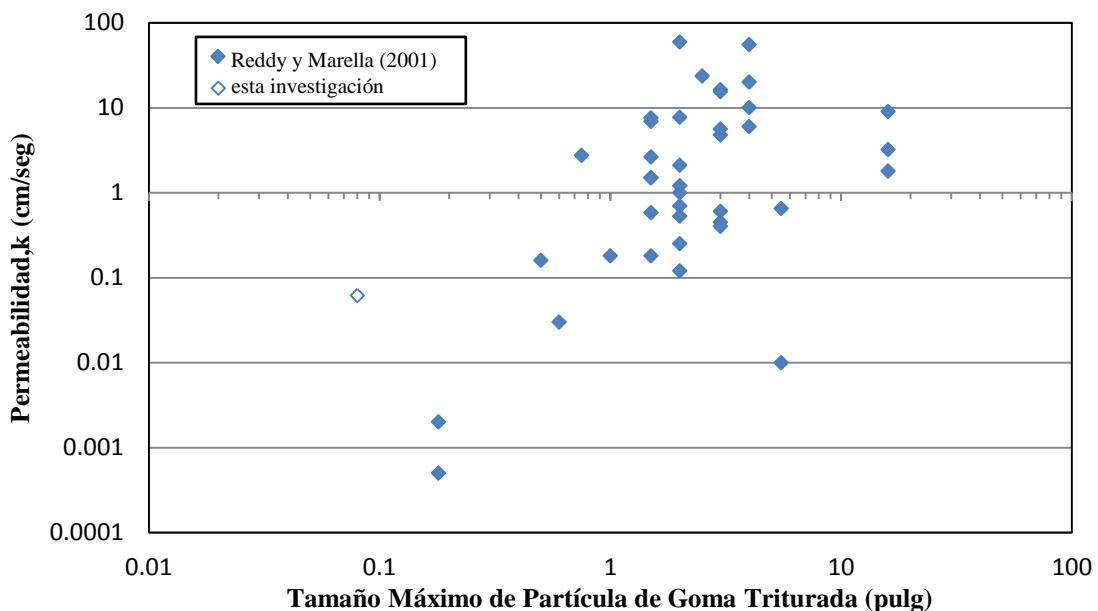


Figura 5.31 Permeabilidad en función del tamaño máximo de partícula de goma triturada (adaptado de Reddy y Marella, 2001)

Es importante mencionar que existe una gran variación en la literatura sobre los parámetros de resistencia al corte para muestras de arena con goma triturada. Los valores de



ángulo de fricción interna encontrados en la literatura varían entre  $6^\circ$  (Masad et al., 1996) y  $85^\circ$  (Edil y Bosscher, 1994). La gran diferencia se puede atribuir al criterio de falla utilizado por los diferentes autores y a la variabilidad en los tamaños de partículas de goma triturada utilizada. Diversos autores han utilizado como criterio de falla una deformación unitaria ( $\epsilon$ ) que varía entre 5 y 30% para la prueba triaxial. Según se observó en los resultados obtenidos en esta investigación, la resistencia de la goma triturada aumenta a medida que la deformación de la muestra incrementa.

Los parámetros de resistencia al corte obtenidos durante esta investigación para muestras formadas con un 100% de goma se encuentran dentro del rango presentado por los autores Reddy y Marella (2001). Las Figuras 5.32 y 5.33 muestran el ángulo de fricción interna y la cohesión medidos durante esta investigación para muestras con un 100% de goma triturada junto con los datos reportados por dichos investigadores para distintos tamaños de partículas.

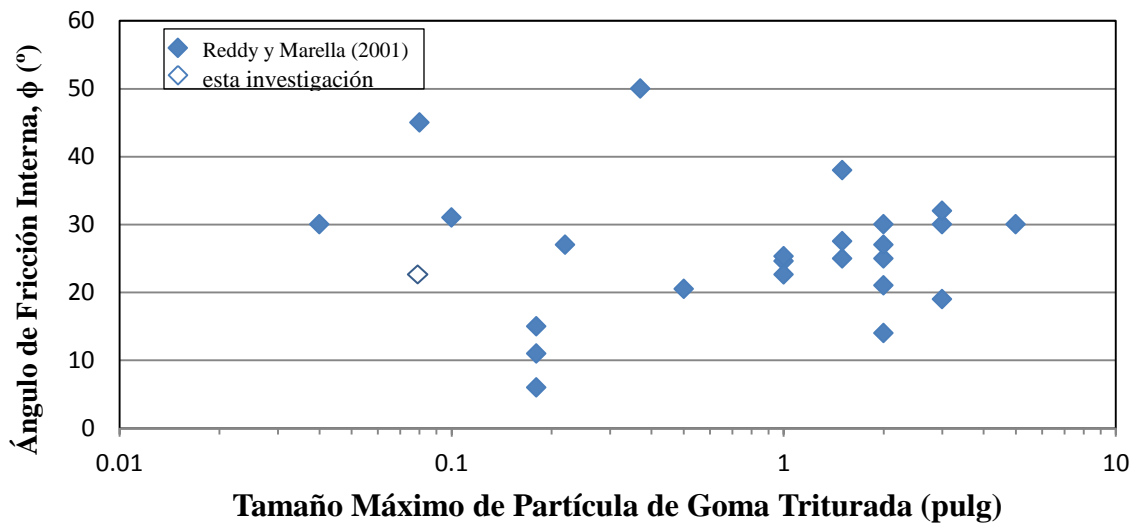


Figura 5.32 Ángulo de fricción interna en función del tamaño máximo de partícula de goma triturada (adaptado de Reddy y Marella, 2001)

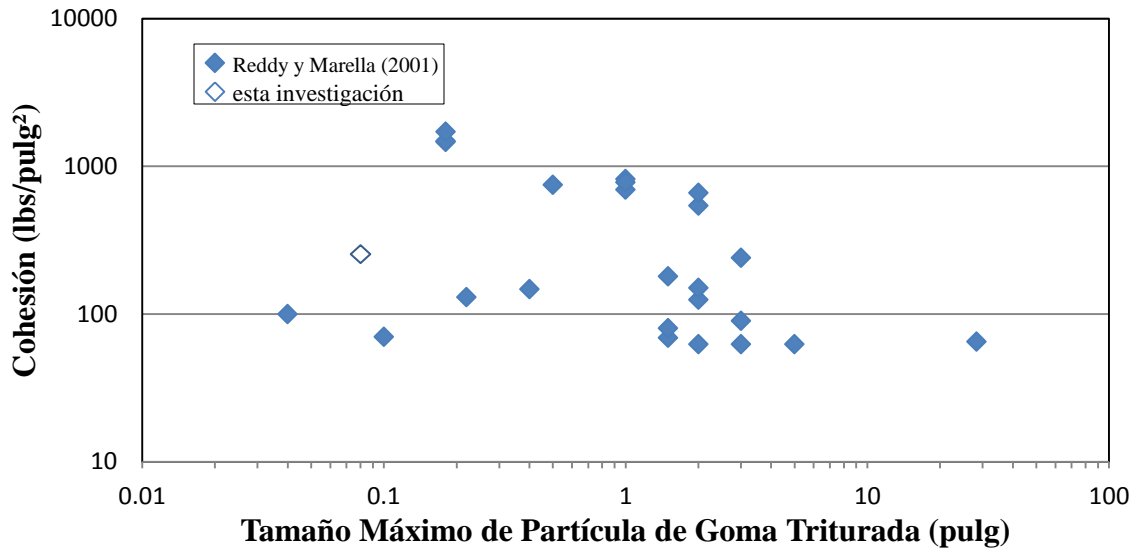


Figura 5.33 Cohesión en función del tamaño máximo de partícula de goma triturada (adaptado de Reddy y Marella, 2001)

# CAPÍTULO 6. RESULTADOS ANALÍTICOS

---

## 6.1 Introducción

La posibilidad de utilizar diferentes porcentajes de goma triturada mezclada con arena como relleno para muros de contención, se consideró utilizando los resultados obtenidos en el Capítulo 5, donde se encontró que en comparación con la arena Ottawa, el ángulo de fricción interna aumenta al utilizar mezclas de 10% y 20% de goma triturada y arena en proporción por volumen. Los datos experimentales medidos en el laboratorio durante esta investigación fueron utilizados para realizar una hoja de cálculo con la finalidad de analizar según el método LRFD (Load Resistance Factor Design), el comportamiento muros de contención al voladizo y mecánicamente estabilizados utilizando arena mezclada con goma triturada como relleno. Se realizaron análisis de estabilidad contra vuelco y deslizamiento así como las presiones de contacto originadas en la interfaz suelo-muro. Es importante mencionar que en este análisis no se tomó en consideración la deformación lateral del muro que se pudiera generar debido a alta compresibilidad de la goma.

Según la teoría de Rankine, la fuerza resultante debido a los empujes actuando sobre un muro es directamente proporcional al peso unitario del relleno. Es decir que el uso de goma triturada como material de relleno en muros resultaría en una disminución de las presiones laterales actuando en la cara del muro. Sin embargo, dentro del análisis fue importante evaluar el efecto del ángulo de fricción interna en el empuje lateral ( $K$ ) para la goma triturada. Esto es debido a que la goma triturada tiene un ángulo de fricción interna efectivo menor que la arena Ottawa, lo que resultaría en un aumento en el coeficiente de presión activa y en consecuencia un posible aumento en las presiones laterales actuando sobre el muro. Este análisis parecería indicar que utilizar goma triturada podría ser una alternativa útil para ser utilizado cómo

material de relleno en muros de contención. A continuación, se presenta un análisis hipotético con el fin de observar como varía el comportamiento de los mismos en función de la capacidad portante, el deslizamiento y la excentricidad al añadir goma triturada al 10, 20, 25, 30, 40 y 100% en proporción por volumen.

## **6.2 Ejemplo del Análisis de un Muro de Contención MSE**

Se realizó el análisis interno y externo de un muro mecánicamente estabilizado MSEW hipotético con una altura de 26 pies. Se utilizaron los valores de las pruebas triaxial para los valores del ángulo de fricción interna equivalente en términos de esfuerzos efectivos debido a que es la prueba que mejor representa el comportamiento de los suelos en el campo. El muro tiene un largo aproximado de 500 pies y una vida útil de diseño de aproximadamente 75 años. Se utilizaron paneles de hormigón prefabricados con una altura y ancho de 5 pies. El refuerzo que se utilizó para reforzar el suelo detrás del muro fueron grillas metálicas W15 con una tensión mínima de fluencia del acero,  $F_y$ , de 65,000 lbs/pulg<sup>2</sup>, con un diámetro,  $b$ , de 0.437 pulgada y galvanizadas con un espesor de cinc de alrededor de 3.386 mils o 86  $\mu\text{m}$ . La pérdida de cinc es de 0.58 mil para los primeros dos años y 0.16 mil para los años subsiguientes. La pérdida de metal debido a la corrosión es de 0.16 mil por año por lado según el artículo 11.10.6.4.2a del manual de AASHTO (2007).

Los refuerzos serán instalados a una distancia vertical,  $S_v$ , de 2.50 pies medidos desde la parte inferior del muro. El suelo reforzado tendrá un ángulo de fricción interna de 40° y un peso unitario de 120 lbs/pie<sup>3</sup>. El suelo de fundación corresponde a una arena compacta con un peso unitario de 115 lbs/pie<sup>3</sup> y un ángulo de fricción interna de 34°. El largo de refuerzo,  $L_r$ , será asumido como un 70 por ciento de la altura total del muro ó 18.2 pies de largo. Se asumirá que

el largo del refuerzo será el mismo a través de toda la altura del muro mecánicamente estabilizado.

Dado a que se asume que la pendiente en el suelo no existe,  $\beta = \delta = 0^\circ$ , el coeficiente de presión activa del suelo reforzado,  $K_a$ , se determina utilizando la ecuación 4.7.

$$K_a = \frac{1 - \sin \phi}{1 + \sin \phi} = \frac{1 - \sin (40^\circ)}{1 + \sin (40^\circ)} = 0.217 \quad (6.1)$$

La Figura 6.1 ilustra el diagrama de cuerpo libre donde se muestran todas las fuerzas externas a utilizarse para el análisis del problema. Las Tablas 6.1 y 6.2 muestran un resumen de los valores obtenidos durante el análisis del muro mecánicamente estabilizado.

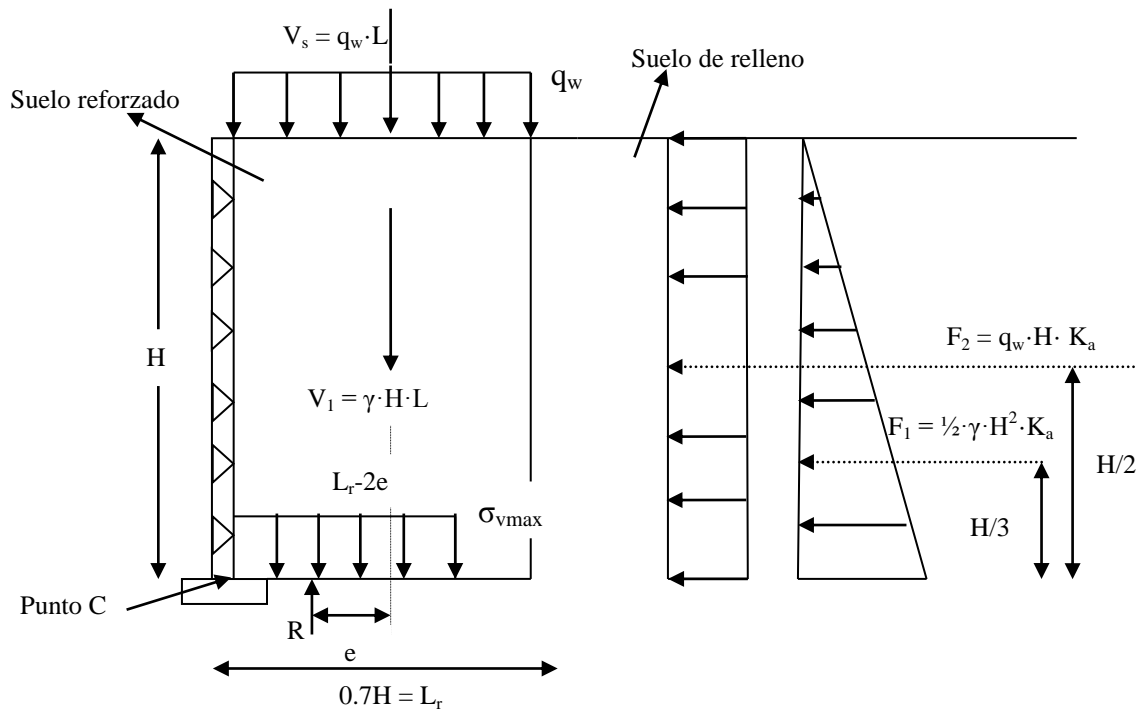


Figura 6.1 Diagrama de cuerpo libre utilizado en el ejemplo de muro mecánicamente estabilizado (MSE)

Tabla 6.1 Resumen de los valores de las fuerzas y momentos que aplican en el ejemplo del muro mecánicamente estabilizado MSE

Fuerza considerada	Valor (lbs/pie)	Tipo de Fuerza	Brazo @ punto C	Valor del brazo (pie)	Momento (lbs·pie)
$V_1 = 120 \frac{lbs}{pie^3} \cdot 26 \text{ pies} \cdot 18.2 \text{ pies}$	56,784	EV	L/2	9.10	516,734
$V_s = 250 \frac{lbs}{pie^2} \cdot 18.2 \text{ pies}$	4,550	LL	L/2	9.10	41,405
$F_1 = \frac{1}{2} \cdot 120 \frac{lbs}{pie^3} \cdot (26 \text{ pies})^2 \cdot 0.217$	8,802	EH	H/3	8.67	76,313
$F_2 = 250 \frac{lbs}{pie^2} \cdot 26 \text{ pies} \cdot 0.217$	1,411	LL	H/2	13.00	18,343

El propósito del análisis de la estabilidad al vuelco es evaluar que la excentricidad en la base del muro esté dentro del límite requerido. Primero, se determinaron los momentos que tienden a resistir y a volcar la estructura como se ilustra en la Figura 6.1 y luego se calculó la excentricidad utilizando las siguientes ecuaciones.

$$\Sigma M_R = V_1 \cdot \gamma_{EV-MIN} \cdot \left(\frac{L_r}{2}\right) + V_s \cdot \gamma_{LS} \cdot \left(\frac{L_r}{2}\right) \quad (6.2)$$

$$\Sigma M_R = (56,784 \frac{lbs}{pie} \cdot 1.00 \cdot \frac{18.2 \text{ pies}}{2}) + (4,550 \frac{lbs}{pie} \cdot 1.75 \cdot \frac{18.2 \text{ pies}}{2}) = 589,193 \text{ lbs} \cdot \text{pie}$$

$$\Sigma M_O = F_1 \cdot \gamma_{EH-MAX} \cdot \left(\frac{H}{3}\right) + F_2 \cdot \gamma_{LS} \cdot \left(\frac{H}{2}\right) \quad (6.3)$$

$$\Sigma M_O = (8,802 \frac{lbs}{pie} \cdot 1.50 \cdot \frac{26 \text{ pies}}{3}) + (1,411 \frac{lbs}{pie} \cdot 1.75 \cdot \frac{26 \text{ pies}}{2}) = 146,526 \text{ lbs} \cdot \text{pie}$$

La excentricidad de la fuerza resultante medida respecto al centro de la base, e, debe ser menor que  $L_r/4$ .

$$excentricidad(e) = \frac{L}{2} - \frac{\Sigma M_R - \Sigma M_O}{\Sigma V} \quad (6.4)$$

$$excentricidad(e) = \frac{18.2 \text{ pies}}{2} - \frac{589,193 \text{ lbs} \cdot \text{pie} - 146,526 \text{ lbs} \cdot \text{pie}}{(56,784 \text{ lbs} \cdot 1.00) + (4,550 \cdot 1.75)} = 2.26 \text{ pies}$$

$$excentricidad(e) < L/4$$

$$2.26 < 4.55 \therefore OK$$

Para que el muro cumpla por el análisis de deslizamiento, la razón demanda por capacidad, CDR debe ser igual o mayor que 1.

$$CDR = \frac{\text{Fuerzas Resistentes (verticales)}}{\text{Fuerzas Deslizantes (horizontales)}} = \frac{R_r}{P_d} = \frac{\phi_s \cdot (\Sigma V \cdot \tan \phi_f)}{\Sigma H} \quad (6.5)$$

$$CDR = \frac{1.00 \cdot ((56,784 \text{ lbs} \cdot 1.00) + (4,550 \text{ lbs} \cdot 1.75) \cdot \tan(34^\circ))}{(8,802 \text{ lbs} \cdot 1.50) + (1,411 \text{ lbs} \cdot 1.75)} = 2.79 \Rightarrow CDR > 1 \therefore OK$$

Para que un muro sea satisfactorio y/o cumpla con el análisis de la estabilidad por capacidad de carga, la razón de capacidad a, o sobre demanda, CDR, “capacity demand ratio” debe ser igual o mayor que uno.

$$CDR = \frac{\phi_b \cdot q_n}{\sigma_{v \max}} \geq 1 \quad (6.6)$$

La presión vertical  $\sigma_{v\max}$  y la capacidad de carga del suelo de cimentación,  $q_n$ , están dados por las ecuaciones 4.14 y 4.15, respectivamente. Se re-calcula le excentricidad debido a que los factores de carga cambian para el análisis de capacidad de carga. La excentricidad re-calculada fue de 1.73 pies.

$$\sigma_{v\max} = \frac{\Sigma V}{L - 2e} \quad (6.7)$$

$$q_n = c \cdot N_c + 0.5 \cdot \gamma_f \cdot L \cdot N_\gamma \quad (6.8)$$

$$\sigma_{v\max} = \frac{\Sigma V}{L - 2e} = \frac{(56,784 \frac{lbs}{pie} \cdot 1.35) + (4,550 \frac{lbs}{pie} \cdot 1.75)}{18.2 pie - (2 \cdot 1.73 pie)} = 5,741 \frac{lbs}{pie^2}$$

$$q_n = c \cdot N_c + 0.5 \cdot \gamma_f \cdot L \cdot N_\gamma \quad (6.9)$$

$$q_n = 0 + (0.5 \cdot 115 \frac{lbs}{pie^3} \cdot \{[18.2 pie - (2 \cdot 1.73 pie)] \cdot 41.1\}) = 28,312 \frac{lbs}{pie^2}$$

$$CDR = \frac{\phi_b \cdot q_n}{\sigma_{v\max}} = \frac{0.65 \cdot 28,312}{5,741} = 3.94 \Rightarrow CDR \geq 1 \therefore OK$$



Luego se determina la estabilidad interna del muro para cada refuerzo. En este caso solo se analizó el segundo nivel que está localizado a una distancia de 5 pies de altura desde la parte superior del muro.

$$\sigma_h = (K_r \cdot \sigma_v \cdot \gamma_{EV-MAX}) + (K_r \cdot q \cdot \gamma_{LS}) \quad (6.10)$$

$$\sigma_v = \gamma \cdot h = 120 \frac{lbs}{pie^e} \cdot 5.00 pies = 600 \frac{lbs}{pie^2} \quad (6.11)$$

$$\gamma_{EV-MAX} = 1.35$$

El valor de  $K_r$  para refuerzos a una distancia menor de 20 pies medidos desde el fondo del muro es obtenido de la Figura 4.13 o utilizando la ecuación 4.13.

$$K_r = 1.2K_a + \frac{(20 - z) \cdot (2.5K_a - 1.2K_a)}{20} \quad (6.12)$$

$$K_r = 1.2 \cdot 0.217 + \frac{\{(20 - 5) \cdot ([2.5 \cdot 0.217] - [1.2 \cdot 0.217])\}}{20} = 0.471$$

$$\sigma_h = (0.615 \cdot 600 \frac{lbs}{pie^2} \cdot 1.35) + (0.471 \cdot 250 \frac{lbs}{pie^2} \cdot 1.35) = 657 \frac{lbs}{pie^2}$$

La magnitud de esta tensión máxima a la profundidad de cada refuerzo (maximum force) está definida por la fórmula 4.21.

$$T_{max} = \sigma_h \cdot S_v \quad (6.13)$$

$$T_{max} = 657 \frac{lbs}{pie^2} \cdot 2.50 pies = 1643 \frac{lbs}{pie}$$

La tensión actuando en cualquier nivel de refuerzo debe ser tal que no sobrepase la resistencia nominal y debe cumplir con la siguiente

$$T_{\max} \leq \phi_t \cdot T_{al} \quad (6.14)$$

La resistencia nominal de los refuerzos inextensible (metálicos) es obtenida de la ecuación 4.22. En caso de que el refuerzo sea continuo, como es el caso de las grillas metálicas, el valor de  $b$  es igual a 1.

$$\phi_t \cdot T_{al} = 0.75 \cdot \frac{A_c \cdot F_y}{b} \quad (6.15)$$

La pérdida del cinc para los primeros dos años es de alrededor 0.58 mil y 0.16 mil para los años subsiguientes, mientras que el acero se corroe a una razón de 0.16 mil/año. Basado en la tasa de corrosiones ya mencionadas, se determina la vida de la capa galvanizada de cinc utilizado en los refuerzos de la siguiente manera:

$$\text{Vida del cinc} = 2 \text{ años} + \frac{\left( 3.386 \text{ mil} - \left( 2 \text{ años} \cdot \frac{0.58 \text{ mil}}{\text{años}} \right) \right)}{\frac{0.16 \text{ mil}}{\text{años}}} = 16 \text{ años} \quad (6.16)$$

$$\text{Años de corrosión del acero} = 75 \text{ años} - 16 \text{ años} = 59 \text{ años} \quad (6.17)$$

La pérdida de acero (material utilizado en los refuerzos inextensible) es de 0.47 mil/año/lado por un total de 59 años. El diámetro que se anticipa al finalizar los 75 años de su vida útil,  $D_{75}$ , es necesario para poder determinar el área corregida por pérdidas a la corrosión,

$A_c \cdot \pi$

$$D_{75} = 0.437 \text{ pulg} - \frac{(0.47 \text{ mil} / \text{año} / \text{lado}) \cdot 59 \text{ años} \cdot 2 \text{ lados}}{\frac{1000 \text{ mil}}{1 \text{ pulg}}} = 0.381 \text{ pulg} \quad (6.18)$$

$$A_c = \left( \frac{\pi}{4} \right) \cdot (0.381 \text{ pulg})^2 = 0.1142 \text{ pulg}^2 \quad (6.19)$$

$$\phi_t \cdot T_{al} = 0.65 \cdot \frac{0.1142 \text{ pulg}^2 \cdot 65,000 \frac{\text{lbs}}{\text{pulg}^2}}{1 \text{ pie}} = 4,825 \text{ lbs} / \text{pie} \quad (6.20)$$

$$1,643 \frac{\text{lbs}}{\text{pie}} \leq 4,825 \frac{\text{lbs}}{\text{pie}} \therefore \text{cumple}$$

Para evitar que ocurra una falla de los refuerzos por deslizamiento en un muro mecánicamente estabilizado, se debe cumplir la siguiente expresión:

$$T_{\max} \leq \phi_p P_r \quad (6.21)$$

La resistencia última al arrancamiento o fuerza de fricción “pull out resistance”,  $P_r$ , para cada nivel de refuerzo en la zona pasiva o de soporte está dada por la ecuación 4.42.

$$P_r = 2 \cdot F^* \cdot \alpha \cdot L_e \cdot \sigma_v \quad (6.22)$$

Para refuerzos inextensibles, el factor de corrección,  $\alpha$ , es igual a 1

Para grillas de acero

Cuando  $0 \leq z \leq 20$  pies

$$F^* = 10 \cdot \left( \frac{t}{S_t} \right) + \frac{(20 - z) \cdot \left( 20 \cdot \left( \frac{t}{S_t} \right) - 10 \cdot \left( \frac{t}{S_t} \right) \right)}{20} \quad (6.23)$$

$$F^* = 10 \cdot \left( \frac{0.437}{6} \right) + \frac{(20 - 5) \cdot \left( 20 \cdot \left( \frac{0.437}{6} \right) - 10 \cdot \left( \frac{0.437}{6} \right) \right)}{20} = 1.27$$

Se determina el largo efectivo,  $L_e$ , el cual representa el largo del refuerzo que se encuentra en la zona de soporte para cualquier nivel de refuerzo.

$$L_e = L - L_a \quad (6.24)$$

Para refuerzo inextensible ( $0 \leq z \leq H/2$ )

$$L_a = 0.3H \quad (6.25)$$

$$L_e = 18.2 - (0.3 \cdot 26) = 10.4 \text{ pies}$$

$$P_r = 2 \cdot 1.27 \cdot 1 \cdot 10.4 \text{ pies} \cdot 657 \frac{\text{lbs}}{\text{pie}^2} = 17,355 \frac{\text{lbs}}{\text{pie}^2}$$

$$1,643 \frac{\text{lbs}}{\text{pie}} \leq 0.90 \cdot 17,355 \frac{\text{lbs}}{\text{pie}} \therefore \text{cumple}$$

Tabla 6.2 Resumen de los valores de peso unitario, ángulo de fricción interna, coeficiente de presión activa, empuje de tierra, excentricidad, CDR para deslizamiento, CDR para capacidad portante, para distintos porcentajes de goma triturada para el ejemplo del muro mecánicamente estabilizado (MSE)

	Arena Ottawa	10% Goma	20% Goma	25% Goma	30% Goma	40% Goma	Goma Triturada
Peso Unitario (lbs/pie <sup>3</sup> )	120	111	103	98	94	86	36
Ángulo de Fricción Interna	40°	43°	42°	40°	38°	36°	26°
Coeficiente de Presión Activa (K <sub>a</sub> )	0.217	0.189	0.198	0.217	0.238	0.260	.390
V <sub>1</sub> (lbs/pie)	56,784	52,525	48,740	46,374	44,481	40,695	17,035
V <sub>s</sub> (lbs/pie)	4,550	4,550	4,550	4,550	4,550	4,550	4,550
Empuje de Tierra (lbs/pie)	8,802	7,091	6,893	7,188	7,562	7,558	4,746
F <sub>2</sub> (lbs/pie)	1,411	1,229	1,287	1,411	1,547	1,690	2,535
∑V (lbs/pie)	64,747	60,488	56,703	54,337	52,444	48,658	24,998
∑H (lbs/pie)	15,672	12,787	12,592	13,251	14,050	14,295	11,555
∑M <sub>R</sub> (lbs·pie)	589,193	550,436	515,993	494,462	477,236	442,783	227,477
∑M <sub>O</sub> (lbs·pie)	146,526	120,143	118,888	125,544	133,500	136,702	119,369
Excentricidad (pies)	2.26	1.99	2.10	2.31	2.55	2.81	4.78
Excentricidad < L/4	OK	OK	OK	OK	OK	OK	NO
σ <sub>v max</sub>	5,741	5,203	4,924	4,820	4,763	4,538	2,954
φ <sub>b</sub> · q <sub>n</sub>	22,642	23,288	23,011	22,489	21,936	21,291	16,099
CDR Capacidad Portante	3.94	4.48	4.67	4.67	4.61	4.60	5.45
CDR Deslizamiento	2.79	3.19	3.04	2.77	2.52	2.30	1.46

Es importante mencionar que los valores de pesos unitarios y ángulo de fricción interna en términos de esfuerzos efectivos utilizados para el análisis del muro de contención hipotético fueron obtenidos directamente de los resultados experimentales del Capítulo 5. Para el muro de contención con relleno de arena Ottawa se utilizó un peso unitario de 120 lbs/pie<sup>3</sup> y un ángulo de fricción equivalente, φ<sub>eq</sub> igual a 40°. Para el relleno de 100% de goma triturada se utilizó un

peso unitario de 36 lbs/pie<sup>3</sup> y un  $\phi_{eq}$  igual a 26°. El coeficiente de presión activa de la goma triturada,  $k_a$ , experimentó una disminución de 44% al ser comparado con la arena Ottawa, debido a una reducción de un 35% en el ángulo de fricción interna equivalente. Como consecuencia, el empuje de tierra total activo de la goma triturada,  $P_a$ , presentó una disminución significativa de 46%.

El análisis de capacidad “a” o “sobre” demanda por deslizamiento, CDR, (capacity demand ratio) obtenido para la arena Ottawa como material de relleno fue 2.79 en comparación con utilizar goma triturada que fue 1.46. La disminución en el CDR por deslizamiento se le puede atribuir a la disminución significativa en la sumatoria de las fuerzas verticales,  $\sum V$ , de 61% en comparación con la disminución de las fuerzas horizontales,  $\sum H$ , de 26%. Se recuerda que el análisis por deslizamiento consiste en hallar la relación entre las fuerzas que tienden a fallar y/o volcar el muro y las fuerzas que tienden a estabilizar el muro,  $\sum V / \sum H$ .

El análisis por capacidad portante presenta un aumento de 28% cuando se utiliza goma triturada como material de relleno en comparación al utilizar arena Ottawa. Dicho aumento se le atribuye a que el peso unitario de la goma triturada es alrededor de un tercio del peso unitario del suelo, lo cual se representa una disminución en el peso del relleno soportado por el suelo de la fundación y como consecuencia una disminución en la presión vertical,  $\sigma_{vmax}$ .

El valor de la excentricidad,  $e$ , cuando se usa goma triturada como material de relleno excede el límite requerido ( $e < L/4$ ), lo cual es indicativo que los momentos generarán una falla en el muro de contención debido a vuelco. El análisis muestra un aumento de 49% en la excentricidad cuando se sustituye goma triturada en vez de arena Ottawa, debido a una disminución sustancial en el valor de la sumatoria de los momentos resistentes,  $\sum M_R$ , de 61% en comparación a la sumatoria de momentos que tienden a volcar el muro de contención,  $\sum M_O$ , de

18%. La gran variación que existe entre la sumatoria de los momentos resistentes se debe al bajo peso unitario que tiene la goma triturada (36 lbs/pie<sup>3</sup>). Sin embargo, el aumento poco significativo en la  $\sum M_O$  se debe a la disminución del ángulo de fricción interna de la goma triturada, que se refleja en un aumento en la presión lateral que contrarresta el beneficio de utilizar material de bajo peso “lightweght”. Para aumenta el CDR en el análisis de excentricidad, se debe utilizar un material con mayor peso unitario, lo que resultaría en un aumento en el costo del proyecto.

El utilizar mezclas de 10 y 20% de goma triturada con arena Ottawa tiende a mejorar el comportamiento por capacidad portante, excentricidad y por deslizamiento un 7, 12 y 13% respectivamente. Dicho incremento se debe al aumento en el ángulo de fricción y la disminución del peso unitario de la goma triturada comparado con los parámetros de la arena Ottawa. Sin embargo, el utilizar mezclas con 25, 30 y 40% de goma triturada genera una reducción en los parámetros analizados cuando se compara con la arena Ottawa. No obstante, sigue siendo un material de relleno satisfactorio para el uso de muros de retención, debido a que el CDR de cada uno de los análisis es mayor o igual a 1.

El utilizar mezcla de 40% de goma triturada con arena Ottawa sería la alternativa más favorable dentro del estudio realizado, debido a que cumple con todos los análisis (excentricidad, capacidad portante, deslizamiento) y a su vez, es la alternativa en donde se podrá reciclar la mayor cantidad de goma sin que se afecte la estabilidad externa del muro de contención.

### 6.3 Ejemplo del Análisis de un Muro en voladizo

Se realizó el análisis externo de un muro en voladizo hipotético con una altura de 26 pies y con una carga de tráfico en la parte superior de 250 lbs/pie<sup>2</sup>. Los valores del peso unitario y ángulo de fricción interna son los obtenidos de la prueba triaxial. El ángulo de fricción del suelo de la fundación,  $\phi_f$ , fue de 34°. El peso unitario del concreto utilizado en el análisis fue de 150 lbs/pie<sup>3</sup>. El muro tiene un largo aproximado de 500 pies de largo. La Figura 5.19 muestra el diagrama de cuerpo libre en donde se ilustran las fuerzas externas a utilizarse en el análisis del muro. Se utilizó la teoría de Coulomb para determinar el coeficiente de presión activa y la teoría de Rankine para determinar el coeficiente de presión pasiva. Las Tablas 6.3 y 6.4 muestra un resumen de los resultados obtenidos durante el análisis del muro en voladizo.

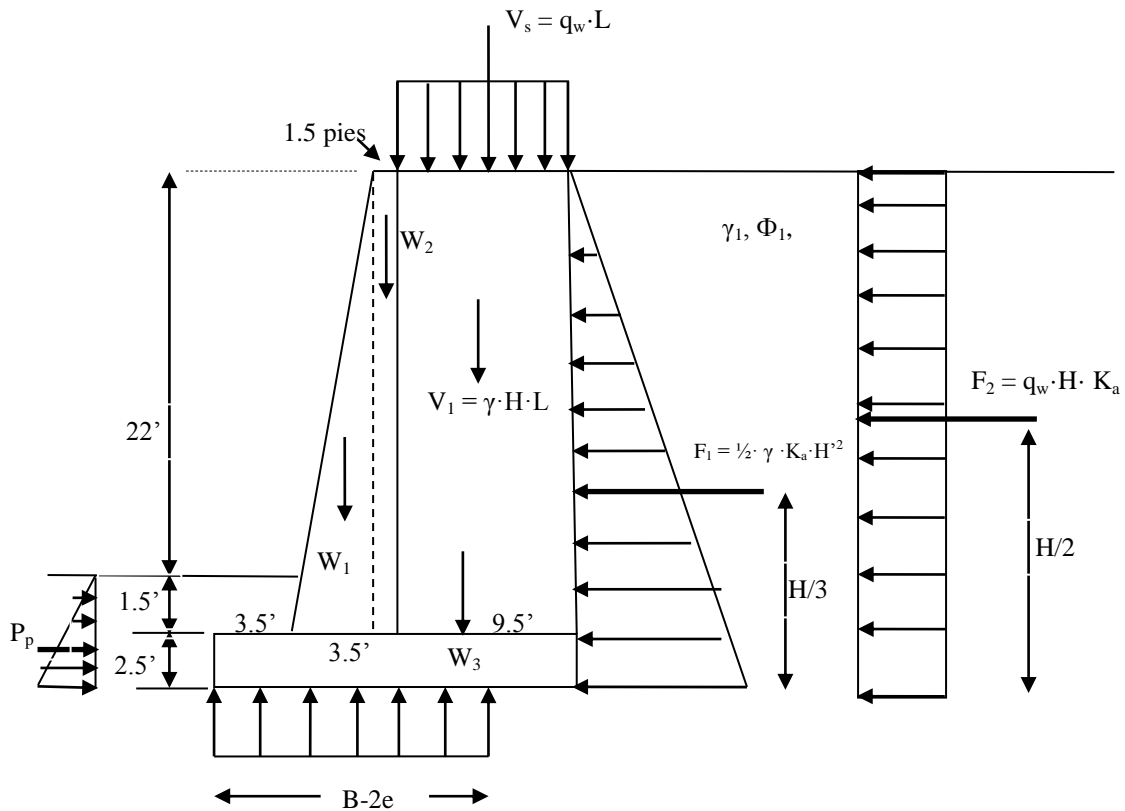


Figura 6.2 Diagrama de cuerpo libre para ejemplo del muro mecánicamente al voladizo



Coulomb define el coeficiente de presión lateral activa mediante la ecuación 4.5

$$k_a(\text{Coulomb}) = \frac{\cos^2(\phi' - \theta)}{\cos^2 \theta \cdot \cos(\delta + \theta) \cdot \left[ 1 + \sqrt{\frac{\sin(\phi' + \delta) \cdot \sin(\phi' - \beta)}{\cos(\delta + \theta) \cdot \cos(\theta - \beta)}} \right]^2} = 0.200 \quad (6.26)$$

$$k_p = \frac{1 + \sin \phi'}{1 - \sin \phi'} = \tan^2 \left( 45 + \frac{\phi'}{2} \right) = 4.60 \quad (6.27)$$

$$P_p = \frac{1}{2} \cdot k_p \cdot H^2 \cdot \gamma = \frac{1}{2} \cdot \frac{1 + \sin 40}{1 - \sin 40} \cdot (4 \text{ pie})^2 \cdot 120 \text{ lbs/pie}^3 = 4416 \text{ lbs/pie} \quad (6.28)$$

Tabla 6.3 Resumen de los valores de las fuerzas y momentos que aplican en el ejemplo del muro en voladizo

Fuerza Considerada	Valor (lbs/pie)	Tipo de Fuerza	Valor del Brazo (pie)	Momento (lbs·pie)
$V_1 = 120 \frac{\text{lbs}}{\text{pie}^3} \cdot 23.5 \text{ pies} \cdot 9.5 \text{ pies}$	26,790	EV	11.75	314,782
$V_s = 250 \frac{\text{lbs}}{\text{pie}^2} \cdot 9.5 \text{ pies}$	2,375	LL	11.75	27,906
$F_1 = P_a = \frac{1}{2} \cdot 120 \frac{\text{lbs}}{\text{pie}^3} \cdot (26 \text{ pies})^2 \cdot 0.200$	8,112	EH	8.67	76,313
$F_2 = 250 \frac{\text{lbs}}{\text{pie}^2} \cdot 26 \text{ pies} \cdot 0.200$	1,300	LL	13.00	16,900
$W_1 = \frac{1}{2} \cdot 150 \frac{\text{lbs}}{\text{pie}^3} \cdot 23.5 \text{ pie} \cdot 2.0 \text{ pie}$	3,525	EV	4.83	17,026
$W_2 = 150 \frac{\text{lbs}}{\text{pie}^3} \cdot 23.5 \text{ pie} \cdot 1.5 \text{ pie}$	5,288	EV	6.25	33,050
$W_3 = 150 \frac{\text{lbs}}{\text{pie}^3} \cdot 16.5 \text{ pie} \cdot 2.5 \text{ pie}$	6,188	EV	8.25	51,051
$W_m = W_1 + W_2 + W_3$	15,001	EV	-	101,127

El propósito del análisis de la estabilidad al vuelco es evaluar que la excentricidad en la base del muro esté dentro del límite requerido. Primero se determinó los momentos que tienden a resistir y a volcar la estructura que se ilustra en la Figura 6.1 y luego se calculó la excentricidad. Los momentos que resisten y los momentos que tienden a volcar el muro son obtenidos de las ecuaciones 4.37 y 4.38, respectivamente, con la modificación que hay que añadir la presión ejercida por el tráfico.

$$\Sigma M_R = (V_1 \cdot \gamma_{EV-MIN} \cdot X_{V1}) + (V_s \cdot \gamma_{LS} \cdot X_{Vs}) + (W_1 \cdot \gamma_{DC-MIN} \cdot X_{W1}) + (W_2 \cdot \gamma_{DC-MIN} \cdot X_{W2}) + (W_3 \cdot \gamma_{DC-MIN} \cdot X_{W3}) \quad (6.29)$$

$$\Sigma M_R = (26,790 \cdot 1 \cdot 11.75) + (2,375 \cdot 1.75 \cdot 11.75) + (3,525 \cdot 0.90 \cdot 4.83) + (5,280 \cdot 0.90 \cdot 6.25) + (6,188 \cdot 0.90 \cdot 8.25)$$

$$\Sigma M_R = 454,633 \text{ lbs} \cdot \text{pie}$$

$$\Sigma M_o = (F_1 \cdot \gamma_{EH-MAX} \cdot X_{F1}) + (F_2 \cdot \gamma_{LS} \cdot X_{F2}) \quad (6.30)$$

$$\Sigma M_o = (8,112 \cdot 1.50 \cdot 8.67) + (1,300 \cdot 1.75 \cdot 13.0) = 135,072 \text{ lbs} \cdot \text{pie}$$

La excentricidad de la fuerza resultante medida respecto al centro de la base,  $e$ , debe ser menor que  $L/4$  ( $e < L/4$ ).

$$\text{excentricidad}(e) = \frac{B}{2} - \frac{\Sigma M_R - \Sigma M_o}{\Sigma V} \quad (6.31)$$

$$e = \frac{16.5 \text{ pies}}{2} - \frac{454,633 \text{ lbs} \cdot \text{pie} - 135,072 \text{ lbs} \cdot \text{pie}}{(26,790 \text{ lbs} \cdot 1.00) + (2,375 \text{ lbs} \cdot 1.75) + (15,001 \text{ lbs} \cdot 0.90)} = 1.06 \text{ pies}$$

$$\text{excentricidad}(e) < L/4$$

$$1.06 < 4.12 \therefore OK$$

Para que el muro cumpla por el análisis de deslizamiento, la razón demanda capacidad, CDR debe ser igual o mayor que 1.

$$CDR = \frac{\text{Fuerzas Resistentes (verticales)}}{\text{Fuerzas Deslizantes (horizontales)}} = \frac{R_r}{P_d} = \frac{P_p + \phi_s \cdot (\Sigma V \cdot \tan \delta)}{\Sigma H} \quad (6.32)$$

$$CDR = \frac{4,416 \text{ lbs} + 1.00 \cdot ((26,790 \text{ lbs} \cdot 1.00) + (2,375 \text{ lbs} \cdot 1.75) + (15,001 \text{ lbs} \cdot 0.90) \cdot \tan(27))}{(8,112 \text{ lbs} \cdot 1.50) + (1,300 \text{ lbs} \cdot 1.75)}$$

$$CDR = 1.87 \Rightarrow CDR > 1 \therefore OK$$

Para que un muro sea satisfactorio y/o cumpla con el análisis de la estabilidad por capacidad de carga, la respectiva razón de capacidad sobre demanda, CDR, debe ser igual o mayor que 1.

$$CDR = \frac{\phi_b \cdot q_n}{\sigma_{v \max}} \geq 1 \quad (6.33)$$

La presión vertical,  $\sigma_{v \max}$ , y la capacidad de carga del suelo de cimentación,  $q_n$ , están dadas por las ecuaciones 4.14 y 4.15 respectivamente. Se re-calcula la excentricidad debido a que los factores de carga cambian para el análisis de capacidad de carga. La excentricidad re-calculada fue de 0.38 pies.

$$\sigma_{v \max} = \frac{\Sigma V}{B - 2e} \quad (6.34)$$

$$q_n = c \cdot N_c + 0.5 \cdot \gamma_f \cdot B' \cdot N_\gamma \quad (6.35)$$

$$\sigma_{v \max} = \frac{\Sigma V}{L - 2e} = \frac{(26,790 \text{ lbs} \cdot 1.35) + (2,375 \text{ lbs} \cdot 1.75) + (15,001 \text{ lbs} \cdot 1.25)}{16.5 \text{ pie} - (2 \cdot 0.38 \text{ pie})} = 3,753 \frac{\text{lbs}}{\text{pie}^2}$$

$$q_n = c \cdot N_c + 0.5 \cdot \gamma_f \cdot L \cdot N_\gamma = 0 + (0.5 \cdot 115 \frac{\text{lbs}}{\text{pie}^3} \cdot \{ [16.5 \text{ pie} - (2 \cdot 0.38)] \cdot 41.1 \}) = 37,198 \frac{\text{lbs}}{\text{pie}^2}$$

$$CDR = \frac{\phi_b \cdot q_n}{\sigma_{v \max}} = \frac{0.65 \cdot 37,198}{3,753} = 6.44 \Rightarrow CDR \geq 1 \therefore OK$$

La Tabla 6.4 muestra un resumen de los parámetros más importantes en el análisis realizado al muro en voladizo. Entre los parámetros tabulados se encuentra el peso unitario, ángulo de fricción interna, coeficiente de presión activa, empuje de tierra, excentricidad, CDR para deslizamiento y CDR para capacidad portante.

Tabla 6.4 Resumen de los valores de peso unitario, ángulo de fricción interna, coeficiente de presión activa, empuje de tierra, excentricidad, CDR para deslizamiento, CDR para capacidad portante, para distintos porcentajes de goma triturada para el ejemplo del muro en voladizo

	Arena Ottawa	10% Goma	20% Goma	25% Goma	30% Goma	40% Goma	Goma Triturada
Peso Unitario (lbs/pie <sup>3</sup> )	120	111	103	98	94	86	36
Ángulo de Fricción Interna	40°	43°	42°	40°	38°	36°	26°
Coefficiente de Presión Activa (Ka)	0.200	0.177	0.184	.200	.217	0.235	0.348
V <sub>1</sub> (lbs/pie)	26,790	24,781	22,995	21,879	20,968	19,200	8,037
V <sub>s</sub> (lbs/pie)	2,375	2,375	2,375	2,375	2,375	2,375	2,375
Empuje de Tierra (lbs/pie)	8,112	6,641	6,406	6,625	6,895	6,831	4,235
F <sub>2</sub> (lbs/pie)	1,300	1,151	1,196	1,300	1,411	1,528	2,262
∑V (lbs/pie)	44,166	42,157	40,371	39,255	38,362	36,576	25,413
∑H (lbs/pie)	9,412	7,792	7,602	7,925	8,306	8,359	6,497
∑M <sub>R</sub> (lbs·pie)	454,634	431,028	410,042	396,929	386,437	365,451	234,286
∑M <sub>O</sub> (lbs·pie)	135,072	112,552	110,519	115,733	121,770	123,599	106,537
Excentricidad (pies)	1.06	0.75	0.88	1.14	1.40	1.69	3.28
Excentricidad < L/4	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
σ <sub>v max</sub>	3,753	3,483	3,389	3,383	3,398	3,344	2,905
φ <sub>b</sub> · q <sub>n</sub>	24,178	24,854	24,455	23,810	23,165	22,427	17,850
CDR Capacidad Portante	6.44	7.14	7.22	7.04	6.82	6.71	6.14
CDR Deslizamiento	1.87	2.36	2.20	1.94	1.65	1.48	0.83

Los valores de peso unitario y ángulo de fricción equivalente son los mismos utilizados en el ejemplo de muros mecánicamente estabilizados analizado anteriormente ( $\gamma = 120 \text{ lbs/pie}^3$  y  $\phi_{eq}' = 40^\circ$ ). El coeficiente de presión activa de la goma triturada, utilizando el método de Coulomb, experimentó una disminución de 43% al ser comparado con la arena Ottawa, debido a una reducción de un 35% en el ángulo de fricción interna equivalente. Como consecuencia, el empuje de tierra total activo de la goma triturada, Pa, presentó una disminución significativamente de 48%.

La razón capacidad demanda para deslizamiento, CDR, obtenido para la arena Ottawa como material de relleno fue 1.87 en comparación con utilizar goma triturada que fue 0.83. La disminución en el CDR para deslizamiento se le puede atribuir a la disminución significativa en la sumatoria de las fuerzas verticales,  $\sum V$ , de 42% en comparación con la disminución de las fuerzas horizontales,  $\sum H$ , de 31%. Un valor de CDR menor que 1, como es el caso al utilizar goma triturada, es indicativo que las cargas aplicadas al suelo son mayores a la resistencia nominal lo que generaría una falla en la estructura. Para minimizar el riesgo a que ocurra desplazamiento, los siguientes métodos pueden ser considerados como alternativas viables: (1) extender el talón con el propósito de incrementar el peso del muro, a su vez, aumentando la resistencia al deslizamiento; (2) añadir un dentellón (key) en la parte inferior del muro con el propósito de aumentar la presión pasiva actuando en el muro, y (3) utilizar un material de relleno con un peso unitario y un ángulo de fricción interna mayor.

El análisis de la capacidad portante presenta una disminución de solo un 5% al utilizar goma triturada como material de relleno en comparándola con arena Ottawa. Debido a que la fuerza vertical que predomina en el análisis es el peso del muro,  $W_{total}$ , el peso unitario de la goma triturada no juega un papel dominante en dicho análisis.

El análisis de la excentricidad muestra un aumento de 68% cuando se sustituye goma triturada en vez de arena Ottawa, debido a una disminución sustancial en el valor de la sumatoria de los momentos resistentes,  $\sum M_R$ , de 48% en comparación a la sumatoria de momentos que tienden a volcar el muro de contención,  $\sum M_O$ , de 21%.

El utilizar mezcla de 10% de goma triturada con arena Ottawa tiende a mejorar el comportamiento por capacidad portante, excentricidad y por deslizamiento un 10, 29 y 21% respectivamente. Dicho aumento se debe al aumento en el ángulo de fricción y la disminución

del peso unitario de la goma triturada al ser comparados con los parámetros de la arena Ottawa. Sin embargo, el utilizar mezclas con 25, 30 y 40% de goma triturada genera una reducción en los parámetros analizados. No obstante, sigue siendo un material de relleno satisfactorio para el uso de muros de retención, debido a que el CDR de cada uno de los análisis es mayor o igual a 1.

El utilizar mezcla de 40% de goma triturada con arena Ottawa sería la alternativa más favorable dentro del estudio realizado, debido a que cumple con todos los análisis (excentricidad, capacidad portante, deslizamiento) y a su vez, es la alternativa en donde se podrá reciclar la mayor cantidad de goma sin que se afecte la estabilidad del muro de contención. El utilizar goma triturada como material de relleno se descarta como alternativa viable, debido a que no cumple con el análisis de deslizamiento.

# CAPÍTULO 7. RESUMEN Y CONCLUSIONES

---

## 7.1 Introducción

Durante esta investigación se evaluaron las propiedades índices de la arena Ottawa y de muestras de arena mezclada con diferentes porcentaje de goma triturada tales como la granulometría, la gravedad específica  $G_s$ , el peso unitario máximo y mínimo ( $\gamma_{max}$ ,  $\gamma_{min}$ ). En adición, se midieron propiedades mecánicas tales como la permeabilidad ( $k$ ), el ángulo de fricción interna ( $\phi'$ ) y la cohesión ( $c'$ ) del material en términos de esfuerzos efectivos y el módulo tangente inicial ( $E_i$ ). Estas propiedades fueron medidas para mezclas de arena con diferentes porcentajes de goma triturada variando desde 0 hasta 100 por ciento por volumen. La prueba de permeabilidad se realizó utilizando el equipo de carga constante, mientras que los parámetros de resistencia al corte fueron determinados mediante la prueba de corte directo y la prueba triaxial tipo consolidada drenada (CD) en condición seca. La goma triturada obtenida para esta investigación fue provista por la empresa Rema Inc. ubicada en el municipio de Caguas y la arena Ottawa fue obtenida del Laboratorio de Geotecnia de la Universidad de Puerto Rico.

## 7.2 Resumen

El Capítulo 2 presentó un resumen literario acerca de las investigaciones geotécnicas realizadas a la goma triturada como material reciclable. Esta revisión de literatura se enfocó en investigaciones que presentaban metodologías similares a las utilizadas durante el proyecto. El Capítulo 3 contiene el programa experimental llevado a cabo durante esta investigación. En el mismo, se identificaron los materiales y se describió geotécnicamente el suelo mediante



resultados de las pruebas índices y de clasificación. Se incluyó la metodología que se utilizó en las diferentes pruebas realizadas, el procedimiento seguido para la preparación de muestras, la descripción del equipo utilizado y el procesamiento de los resultados obtenidos.

El Capítulo 4 contiene un breve resumen de los conceptos básicos relacionados al análisis y diseño de muros de contención según el método LRFD. El Capítulo 5 contiene los resultados y análisis de los ensayos de laboratorio y finalmente el Capítulo 6 mostró un ejemplo numérico del análisis de un muro en voladizo y mecánicamente estabilizado MSE.

Las Tablas 7.1 y 7.2 muestran un resumen de las propiedades mecánicas e índices medidas en esta investigación para la arena Ottawa y para la goma triturada, respectivamente.

Tabla 7.1 Propiedades índices y mecánicas de la arena silíceo Ottawa

<b>Propiedades</b>	<b>Arena Silíceo Ottawa</b>
D <sub>60</sub> (mm)	0.79
D <sub>50</sub> (mm)	0.76
D <sub>30</sub> (mm)	0.74
D <sub>10</sub> (mm)	0.67
Coefficiente de uniformidad (Cu)	1.17
Coefficiente de curvatura (Cc)	1.03
Gradación del material	Pobremente gradada
Gravedad específica (Gs)	2.64
Peso unitario máximo (lbs/pie <sup>3</sup> )	120
Peso unitario mínimo (lbs/pie <sup>3</sup> )	111
Razón de vanos máxima (e <sub>max</sub> )	0.48
Razón de vanos mínima (e <sub>min</sub> )	0.37
Conductividad hidráulica (cm/seg)	6.2 x 10 <sup>-2</sup>
Cohesión (lbs/pie <sup>2</sup> )	0
Ángulo de fricción interna (corte directo)	40°
Ángulo de fricción interna (triaxial)	40°
Módulo tangente inicial (lbs/pulg <sup>2</sup> )	2,598 – 8,425
Clasificación según USCS	SP
Clasificación según AASHTO	A-3(0)

Tabla 7.2 Propiedades índices y mecánicas de la miga de goma

Propiedades	Goma Triturada
D <sub>60</sub> (mm)	1.40
D <sub>50</sub> (mm)	1.37
D <sub>30</sub> (mm)	1.20
D <sub>10</sub> (mm)	0.97
Coefficiente de uniformidad (Cu)	1.44
Coefficiente de curvatura (Cc)	1.06
Gradación del material	Pobrementemente gradada
Gravedad específica (Gs)	1.11
Peso unitario máximo (lbs/pie <sup>3</sup> )	36
Peso unitario mínimo (lbs/pie <sup>3</sup> )	33
Razón de vanos máxima (e <sub>max</sub> )	1.10
Razón de vanos mínima (e <sub>min</sub> )	0.92
Conductividad hidráulica (cm/seg)	8.0 x 10 <sup>-2</sup>
Cohesión (lbs/pie <sup>2</sup> ) (corte directo)	262
Cohesión (lbs/pie <sup>2</sup> ) (triaxial)	304
Ángulo de fricción interna (corte directo)	24°
Ángulo de fricción interna (triaxial)	23°
Módulo tangente inicial (lbs/pulg <sup>2</sup> )	127 - 321
Clasificación según ASTM D6270	“Ground Rubber”

### 7.3 Contribuciones

#### 7.3.1 Propiedades índices

Durante esta investigación se obtuvieron mediciones de propiedades índices y mecánicas para muestras de arena Ottawa mezclada con diferentes porcentajes de goma triturada variando entre 0 y 100%. Se midió la variación en el peso unitario seco para muestras con diferentes porcentajes; estos porcentajes fueron medidos por peso y por volumen. Se encontró una variación lineal cuando el porcentaje de goma triturada fue medida en términos de volumen. El peso unitario seco máximo de la arena Ottawa fue de 120 lbs/pie<sup>3</sup> mientras que para goma triturada fue de 36 lbs/pie<sup>3</sup>. El peso de la goma triturada se acerca a un tercio del peso de la

arena Ottawa, por lo cual este material es considerado un material de bajo peso (*light weight*). Según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos, la arena Ottawa se clasifica como un material uniforme de pobre gradación (SP), mientras que el Asociación Americana de Autoridades Estatales de Carreteras y Transportes, la clasifica como material A-3(0). La goma utilizada en esta investigación según la terminología de la norma ASTM D-6270, clasifica como goma triturada “ground rubber” debido a que su tamaño de partículas está entre 450  $\mu\text{m}$  y 2 mm, en adición está libre de hilos de acero y nilón.

De la prueba de tamices se determinó que el coeficiente de uniformidad ( $C_u$ ) y el coeficiente de curvatura de ( $C_c$ ) para la arena Ottawa fue de 1.17 y 1.03, respectivamente, lo cual indica que esta arena está pobremente gradada. A su vez, para la goma triturada  $C_u$  y  $C_c$  fue de 1.44 y 1.06, respectivamente. Dicho material también es dominado como un material pobremente gradado.

Los valores de la gravedad específica medidos para la arena Ottawa, goma triturada y para las mezclas de goma con 20, 40, 60 y 80 por ciento por volumen fueron de 2.64, 1.11, 2.50, 2.25, 1.96, y 1.51, respectivamente. Comparando el valor de la  $G_s$  entre la arena Ottawa (2.64) y la goma triturada (1.11), se observó que la gravedad específica de la arena Ottawa es poco más del doble del valor de  $G_s$  para la goma triturada.

### **7.3.2 Permeabilidad**

La permeabilidad de la arena Ottawa y de la goma triturada fue de  $6.17 \times 10^{-2}$  cm/seg y  $8.02 \times 10^{-2}$  cm/seg, respectivamente. Se observó que al añadir goma triturada a la arena, se genera un incremento en la permeabilidad de la muestra debido a que parte del volumen de la arena es sustituido por goma triturada cuyas partículas son mayores que la de la arena Ottawa generando un incremento en la razón de vanos. La permeabilidad de las muestras formadas

corresponden, según Das (2010), a una arena gruesa dado a que los valores están dentro del rango de 1.0 – 0.01 cm/seg.

### **7.3.3 Curvas esfuerzo deformación**

De la curva de esfuerzo-deformación se pudo observar que las muestras de arena Ottawa tuvieron un comportamiento similar al de materiales quebradizos “brittle behavior” donde el suelo llega a un valor de esfuerzo máximo a deformaciones bajas; a partir de este valor máximo el esfuerzo comienza a disminuir hasta llegar a un valor residual.

De la pruebas de corte directo se encontró que el esfuerzo cortante máximo para la arena Ottawa varió entre 9.8 lbs/pulg<sup>2</sup> y 25.3 lbs/pulg<sup>2</sup> para presiones de confinamiento variando entre 10 y 30 lbs/pulg<sup>2</sup>. Estos esfuerzos máximos fueron generados a desplazamiento horizontales de 0.04 y 0.05 pulgadas, respectivamente. Mientras que en las pruebas triaxiales el esfuerzo normal máximo para muestras de arena varió entre 35.5 lbs/pulg<sup>2</sup> y 108.4 lbs/pulg<sup>2</sup> para las mismas variaciones en presiones de confinamiento. La deformación axial correspondiente a estos esfuerzos máximos fue de 4.0% y 3.5%, respectivamente.

A diferencia de las muestras de arena, los especímenes formados con porcentajes de goma y con 100% de goma triturada presentaron un comportamiento dúctil donde el material no experimentó una reducción en resistencia a medida que se continuó desplazando la caja. En adición, se observó que a altas deformaciones la ductilidad en las muestras de goma triturada aumenta.

Se puede observar de las curvas esfuerzo – deformación que a bajas deformaciones (0 - 5%), la resistencia última a compresión de las muestras con mezclas de goma triturada es menor que la resistencia de la arena Ottawa. Sin embargo, a altas deformaciones (10 - 20%) este efecto es lo contrario y donde las mezclas utilizando goma triturada generan una resistencia mayor que

la resistencia residual de la arena Ottawa. En adición, se observa que a altas deformaciones la ductilidad en las muestras de goma triturada aumenta.

La arena Ottawa se comportó como un material dilatante es decir que hubo un aumento en el volumen mientras se desplazaba la caja de corte. Sin embargo, las muestras preparadas con goma triturada y mezclas con arena Ottawa experimentaron un comportamiento contractivo al aplicar el esfuerzo cortante, es decir que hubo una reducción en el volumen al ser desplazados. Dicho efecto se le atribuye a la característica elástica que tiene la goma triturada, y a su compresibilidad.

#### **7.3.4 Parámetros de resistencia**

Los resultados fueron analizados utilizando dos criterios de falla: (1) bajas deformaciones y (2) grandes deformaciones. Esto es debido a la diferencia en el comportamiento esfuerzo – desplazamiento de las muestras de arena y las muestras formadas con goma/arena. Se encontró que a bajos desplazamientos el  $\phi'$  en términos de esfuerzos efectivos para la arena Ottawa según la prueba de corte directo fue de  $40^\circ$  mientras que para muestras de 100% el valor medido fue de  $11^\circ$ , este representa una disminución de 29%. A grandes desplazamientos se encontró un valor de  $\phi' = 32^\circ$  para la arena Ottawa y de  $24^\circ$  para muestras formadas con un 100% de goma, en este caso la reducción fue 8%. Sin embargo en el caso de mezclas de arena Ottawa con 10% y 20% de goma triturada hubo un aumento de  $13^\circ$  y  $11^\circ$  en el ángulo de fricción interna, respectivamente, al ser comparado con la arena, lo cual se reflejó en un aumento en la resistencia del material cuando se analizó a grandes desplazamientos.

Los resultados de la prueba de compresión triaxial consolidada – drenada (CD) a grandes deformaciones mostraran un aumento de  $9^\circ$  y  $7^\circ$  en el ángulo de fricción interna cuando se mezcla goma triturada a 10% y al 20%, respectivamente. Utilizar porcentajes de mezclas de

arena con goma triturada mayores de un 20% genera una reducción mínima en la resistencia al corte del suelo para los porcentajes de goma estudiados en esta investigación. El módulo tangente inicial de las muestras formadas con arena Ottawa fue 8,425 lbs/pulg<sup>2</sup> a una presión de confinamiento de 30 lbs/pulg<sup>2</sup>. Según Das (2010), este material corresponde a una arena en condición densa, debido a que los valores medidos están dentro del rango de 5,000 - 10,000 lbs/pulg<sup>2</sup>. El módulo tangente inicial de la goma triturada varió entre 127 - 321 lbs/pulg<sup>2</sup>, dependiendo de la presión de confinamiento, lo cual es característico de un material altamente compresible.

### **7.3.5 Muros de contención y muros mecánicamente estabilizados - LRFD**

Los datos experimentales medidos en el laboratorio durante esta investigación fueron utilizados para realizar una hoja de cálculo con la finalidad de analizar el comportamiento de muros de contención al voladizo y mecánicamente estabilizados utilizando arena mezclada con diferentes porcentajes de goma triturada como relleno. El utilizar mezclas de 10% y 20% de goma triturada con arena Ottawa tiende a mejorar el comportamiento por capacidad portante, excentricidad y por deslizamiento, debido al aumento en el ángulo de fricción interna del material y a la disminución del peso unitario de la goma triturada al ser comparados con los parámetros de la arena Ottawa según las condiciones establecidas y analizadas en esta investigación.

Sin embargo, el utilizar mezclas con 25%, 30% y 40% de goma triturada genera una reducción en los parámetros analizados pero, no obstante sigue siendo un material de relleno satisfactorio para el uso de muros de retención, debido a que el CDR de cada uno de los análisis es mayor o igual a 1 y la excentricidad está dentro del límite requerido, recalcando nuevamente

que estos resultados dependen de los análisis utilizados en esta investigación y de los materiales estudiados.

Basados en los valores de CDR calculados según el método de LRFD se encontró que añadir porcentajes de goma de hasta un 40% genera un análisis de estabilidad favorable, debido a que cumple con los criterios de excentricidad, capacidad portante y deslizamiento tanto para muros de contención como para muros mecánicamente estabilizados, según las suposiciones utilizadas para el análisis durante esta investigación. Las propiedades de compresibilidad de la goma triturada no fueron incorporadas en el análisis de muros de contención, por lo que deformaciones excesivas pueden ser esperadas al utilizar los materiales aquí estudiados. Se recomienda estudiar este comportamiento de forma mas detallada.

#### **7.4 Recomendaciones para Futuras Investigaciones**

Recomendaciones para investigaciones futuras relacionadas con el estudio experimental del efecto de la goma triturada en la arena Ottawa se incluyen:

- Utilizar como material de mezcla un suelo bien gradado para analizar los efectos que tiene en los parámetros índices y mecánicos al compararse con un suelo pobremente gradado.
- Utilizar un tamaño de partícula de goma triturada mayor de 2 mm (>30 mm).
- Realizar pruebas dinámicas a la goma triturada y arena Ottawa para determinar los parámetros del módulo cortante, G, y razón de amortiguación, D.

- Realizar las pruebas de laboratorio para un rango de densidades relativas para ver el efecto que tiene en los parámetros de resistencia.
- Analizar el efecto que tiene el grado de saturación en las propiedades de los materiales estudiados.
- Se recomienda realizar un análisis mas detallado de las propiedades elásticas de la goma los cuales pueden generar deformaciones excesivas en los muros de contención.



## REFERENCIAS

---

AASHTO “LRFD Bridge Design and Specifications”, 4<sup>th</sup> Ed., 2007, with 2008 and 2009 Interims.

ASTM D 422 (2002). “Standar Test Method for Particle – Size Analysis of Soils”. ASTM International.

ASTM D 854 (2002). “Standar Test Method for Specific Gravity of Soil Soilds by Water Picnometer,” ASTM International.

ASTM D 2434 (2000). “Standar Test Method for Permeability of Granular Soils (Constant Head),” ASTM International.

ASTM D 2487 (2000). “Standar Practice for Classification of Soils for Engineering Purpose (Unified Soil Classification System),” ASTM International

ASTM D 3080 (2003). “Standar Test Method for Direct Shear Test Soils under Consolidate Drained Conditions,” ASTM International.

ASTM D 4253 (2000). “ Standar Test Methods for Maximum Index Density and Unit Wieght of Soils Calculation of Relative Density Using a Vibratory Table,” ASTM International.

ASTM D 4253 (2000). “ Standar Test Methods for Minimum Index Density and Unit Wieght of Soils and Calculation of Relative Density,” ASTM International.

ASTM D 6270 (2004). “Standard Practice for Use of Scrap Tires in Civil Engineering Applications,” ASTM International.

Ahmed, I., and Lovell, C.W. (1993). “Rubber Soils as Lightweight Geomaterials,” *Transportation Research Record*, 1422, pp 61-70.

Bardet, J.P. (1997). “*Experimental Soil Mechanics*”, Prentice-Hall, New Jersey.

Bishop, A.W. and Henkel, D.F. (1957). “*The Measurements of Soil Properties in the Triaxial Test*”, Edward Arnold LTD, London

Botero, J. H., Valentín, M. O., Suárez, M. O., Santos, J., Acosta, F. J., Cáceres, A., and 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.

Bowles, J. E. (1992). “*Engineering Properties of Soils and their Measurements*”, 4<sup>th</sup> Ed., McGraw-Hill, New York

Cecich, V., Gonzales, L., Holsaeter, A., Williams, J., and Reddy, K. (1996). “Use of Shredded Tires as Lightweight Backfill Material for Retaining Structure”, *Waste Management & Research*, Volume 14, pp. 433-451.

Cedergren, R. H. (1989). “*Seepage, Drainage, and Flow Nets*”, 3<sup>rd</sup> Ed., A Wiley-Interscience Publication.

Charlotte, C., Meardon K., Russell, D., (1993). “Scrap Tire Technology and Markets”, *Library of Congress Catalog Card Number 92- 25264*.

Coduto, P. D. (2001). “*Foundation design Principles and Practices*”, 2<sup>nd</sup> Ed., Prentice Hall, New Jersey

Das, B. M. (2010). “*Principles of Geotechnical Engineering*”, 7<sup>th</sup> Ed., P.S W. Kent, Boston.

Das, M. D. (1992). “*Soil Mechanics Laboratory Manual*,” Engineering Press Inc, San Jose California.

Edil, T. B., y Bosscher, P.J., (1994), “Engineering Properties of Tires Chips and Soil Mixtures,” *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 17, No. 4, pp. 453-464.

GeoSyntec Consultants Inc. (2008). “Guidance Manual – For Engineering Use of Scrap Tires”, preparado por Maryland Department of the Environment.

Ghazavi, M., and Sakhi, M.A. (2005). “Influence of Optimized Tire Shreds on Shear Strength Parameters of Sands,” *International Journal of Geomechanics*, Vol. 5, No. 1, pp. 58-65.

Humphrey, D. N. (2004). “Civil Engineering Applications of Scrap Tire,” *Heartland Scrap Tire Management Conference*.

Ladd, R.S (1978). “Preparing Test Specimens Using Undercompaction,” *Geotechnical Testing Journal*, GTJODJ, Vol. 1, No. 1, March, pp.16-23.

Lee, J. and Salgado, R. (1999). “Shredded Tires and Rubber-Sand as Lightweight Backfill,” *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 125, No. 2. pp. 132-141.

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

Mulilis, J.P., Seed, H.B., Chan, C.K., Mitchel, J.K., and Arulanadan, K. (1977). "Effects of Sample Preparation on Sand Liquefaction," *Journal of Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol 103, GT2, pp 91-108.

Reddy, K. R., and 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 Solids Waste Technology and Management, Philadelphia, PA, USA.*, pp. 1-19.

Rivera Caicedo, L. (2004). "*Muros de Contención de Suelos Reforzados con Cintas Metálicas y Geo sintéticos*" 1<sup>ra</sup> Ed., Editorial Universidad del Cauca, Colombia.

U.S Department of Transportation - Federal Highway Administration (2009). "Design Construction of Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Soil Slope" Vol. 1-2 Publication No. FHWA-NHI-10-024/5.

Wu, W. Y., Benda, C.C., and Cauley, R.F. (1997). "Triaxial determination of shear strength of tires chips," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol.123, No.5, pp.479-482

Yang, S., Lohnes, R. A., and Kjartanson, B. H. (2002). "Mechanical Properties of Shredded Tires," *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 25, No. 1, pp 44-52.

Zheng-Yi, F. and Sutter, K. G. (2000). "Dynamic Properties of Granulated Rubber/Sand Mixtures," *Geotechnical Testing Journal*. Vol. 23, No. 3. pp. 338-344.

# APÉNDICE A – PROCEDIMIENTO DE SUB-COMPACTACIÓN

Proceso de sub-compactación sugerido por Ladd para la prueba de corte directo con 40% de goma y 60% de arena Ottawa

Datos Iniciales

$$G_s = 2.25$$

$$\text{Altura de la muestra} = 63.50 \text{ mm}$$

$$\text{Diámetro de la muestra} = 27.51 \text{ mm}$$

$$\text{Peso unitario mínimo } (\gamma_{\max}) = 80 \text{ lbs/pie}^3$$

$$\text{Peso unitario máximo } (\gamma_{\min}) = 86 \text{ lbs/pie}^3$$

$$\text{Relación de vacíos mínimo } (e_{\min}) = 0.63$$

$$\text{Relación de vacío máximo } (e_{\max}) = 0.76$$

$$\text{Densidad relativa deseada } (\%) = 90 \%$$

$$\text{Densidad del agua} = 1 \text{ g/cm}^3$$

$$\text{Número total de capas } (n_t) = 5 \text{ (Puede ser mayor o menor)}$$

$$\text{Porcentaje de sub-compactación para la primera capa } (U_{ni}) = 5\% \text{ sugerido por Ladd}$$

Datos calculados

1. Relación de vacío deseado ( $e$ )

$$D_r = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}} \quad (\text{A.1.1})$$

donde;

$D_r$  = densidad relativa (%)

$e_{\max}$  = razón de vanos máximo,

$e_{\min}$  = razón de vanos mínimo, y

$e$  = razón de vanos deseado.

Despejando para la variable “ $e$ ” se obtiene que la razón de vanos deseada es de **0.64**

2. Peso unitario deseado ( $\gamma_d$ )

$$D_r = \frac{\gamma_{\max} \cdot (\gamma_d - \gamma_{\min})}{\gamma_d \cdot (\gamma_{\max} - \gamma_{\min})} \quad (\text{A.1.2})$$

$$\gamma_d = \frac{-1}{D_r \cdot \left( \frac{1}{\gamma_{\min}} - \frac{1}{\gamma_{\max}} \right) - \frac{1}{\gamma_{\min}}} \quad (\text{A.1.3})$$

donde;

$\gamma_{\max}$  = peso unitario máximo (lbs/pie<sup>3</sup>), y

$\gamma_{\min}$  = peso unitario mínimo (lbs/pie<sup>3</sup>).

El peso unitario seco deseado es de **86lbs/pie<sup>3</sup>**

3. Calcular el área de la muestra (A)

$$A = \frac{\pi}{4} \cdot (\text{diametro})^2 \quad (\text{A.1.4})$$

donde;

A = área de la muestra ( $\text{mm}^2$ ), y

Diámetro = diámetro de la muestra (mm).

El área de la muestra es de **4,032 mm<sup>2</sup>**

4. Determinar el volumen de la muestra (Vol)

$$\text{Vol} = A \cdot L \quad (\text{A.1.5})$$

donde;

Vol = Volumen de la muestra ( $\text{mm}^3$ ), y

L = largo de la muestra (mm).

El volumen de la muestra es de **110,927.19 mm<sup>3</sup> = 0.00391 pie<sup>3</sup>**

5. Determinar la peso unitario seco de la muestra ( $\gamma_d$ )

$$\gamma_d = \frac{G_s \cdot \gamma_w}{1 + e} \quad (\text{A.1.6})$$

donde;

$\gamma_d$  = peso unitario seco de la muestra ( $\text{g/cm}^3$ ),

$G_s$  = gravedad específica del suelo,

e = razón de vanos deseado, y

$\gamma_w =$  peso unitario del agua ( $\text{g/cm}^3$ ).

El peso unitario seco determinado en la muestra es de **86 lbs/pie<sup>3</sup>** (corroborar resultados con el paso número 2)

6. Determinar el peso total de la muestra ( $W_T$ )

$$W_T = \gamma_d \cdot Vol \quad (\text{A.1.7})$$

donde:

$W_T =$  peso seco total de la muestra (g).

El peso total de la muestra obtenido es de **152.4 g**

7. Determinar el peso de cada capa

$$W_L = \frac{W_T}{n_t} \quad (\text{A.1.8})$$

donde;

$n_t =$  número de capas totales, y

$W_L =$  peso de suelo para cada capa ( $\text{g/cm}^3$ ).

El peso de cada capa es de **30.12g**

Cálculos para el método de sub-compactación

Capa	Un	Un prom	hn (mm)	H capa (mm)	Dr capa (%)	e deseada	Peso seco (g)	Ho medido (mm)
1	5.000	5.000	<b>5.8</b>	5.78	88.5	0.6406	<b>31.95</b>	21.73
2	3.750	1.875	<b>11.2</b>	5.43	89.5	0.6393	<b>30.07</b>	16.30
3	2.500	0.833	<b>16.6</b>	5.43	90.5	0.6379	<b>30.10</b>	10.87
4	1.250	0.313	<b>22.1</b>	5.43	91.5	0.6365	<b>30.12</b>	5.43
5	0.000	0.000	<b>27.5</b>	5.43	91.5	0.6365	<b>30.12</b>	0.00

Σ = 152.4

8. Determinar el porcentaje de compactación ( $U_n$ ) para cada capa

$$U_n = U_{ni} - \left[ \frac{U_{ni} + U_{nt}}{n_t - 1} \cdot (n - 1) \right] \quad (\text{A.1.9})$$

donde;

$U_n$  = porcentaje de sub-compactación para n capa,

$U_{ni}$  = porcentaje de sub-compactación para la primera capa (5% el óptimo),

$U_{nt}$  = porcentaje de sub-compactación para la última capa (recomendado = 0),

$n_t$  = número total de capas, y

$n$  = capa o capas en consideración.

El porcentaje de sub-compactación para la primera capa es de **5**

9. El porcentaje de sub-compactación promedio para cada capa

$$U_{n\text{promedio}} = \frac{U_n}{n} \quad (\text{A.10})$$

El porcentaje de sub-compactación promedio para la primera capa es de **5**

10. Determinar la altura desde el fondo hasta el tope de la capa a ser compactada



$$h_n = \frac{h_t}{n_t} \left[ (n-1) + \left( 1 + \frac{U_n}{100} \right) \right] \quad (\text{A.11})$$

donde;

$h_n$  = altura total hasta la capa estudiada (mm), y

$h_t$  = altura total del espécimen (mm).

La altura desde el fondo del espécimen hasta la primera capa es de **21.7mm**

Para corroborar los resultados se estimó una densidad relativa para cada capa para determinar la relación de vacíos deseados y poder determinar el peso de suelo necesario para cada capa.

11. Relación de vacio deseado (e)

$$D_r = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}} \quad (\text{A.12})$$

donde;

$D_r$  = densidad relativa (%) para cada capa ( $D_r = 90.5\%$  para la primera capa)

$e_{\max}$  = razón de vanos máximo,

$e_{\min}$  = razón de vanos mínimo, y

$e$  = razón de vanos deseado.

Despejando para la variable “e” se obtiene que la razón de vanos deseada es de **0.64**

12. Determinar el peso necesario de suelo para cada capa

$$W_s = \frac{Vol_{capa(mm^3)}}{1000} \cdot \frac{G_s \cdot \gamma_w}{1 + e_{deseada}} \quad (A.13)$$

donde;

$Vol_{capa(mm^3)}$  = volumen de la capa en estudio,  $\text{área} \cdot H_{capa}$  ( $mm^3$ ), y

$H_{capa}$  = la altura de la capa en estudio (mm).

Para la primera capa el peso de suelo necesario es de **31.95 g**

Para corroborar, determinar el peso de cada capa y luego hacer una sumatoria. En este caso la sumatoria dio un valor de **152.4 g** y se compara con el resultado del paso número 6, el valor debe ser igual y/o similar.

Número de golpes por capa para la prueba de permeabilidad con 0% de goma triturada

Capa	Número de Golpes
1	30
2	60
3	90
4	120
5	150
6	180
7	210
8	240
9	270
10	300
11	320
12	360

Número de golpes por capa para la prueba de permeabilidad con 20% de goma triturada

Capa	Número de Golpes
1	25
2	50
3	75
4	100
5	125
6	150
7	175
8	200
9	225
10	250
11	275
12	300

Número de golpes por capa para la prueba de permeabilidad con 40% de goma triturada

Capa	Número de Golpes
1	20
2	40
3	60
4	80
5	100
6	120
7	140
8	160
9	180
10	200
11	220
12	240

Número de golpes por capa para la prueba de permeabilidad con 60% de goma triturada

Capa	Número de Golpes
1	15
2	30
3	45
4	60
5	75
6	90
7	105
8	120
9	135
10	150
11	165
12	180

Número de golpes por capa para la prueba de permeabilidad con 80% de goma triturada

Capa	Número de Golpes
1	10
2	20
3	30
4	40
5	50
6	60
7	70
8	80
9	90
10	100
11	110
12	120

Número de golpes por capa para la prueba de permeabilidad con 100% de goma triturada

Capa	Número de Golpes
1	5
2	10
3	15
4	20
5	25
6	30
7	35
8	40
9	45
10	50
11	55
12	60

Número de golpes por capa para la prueba de corte directo con 0% de goma triturada

Capa	Número de Golpes
1	65
2	130
3	195
4	260
5	325

Número de golpes por capa para la prueba de corte directo con 10% de goma triturada

Capa	Número de Golpes
1	60
2	120
3	180
4	240
5	300

Número de golpes por capa para la prueba de corte directo con 20% de goma triturada

Capa	Número de Golpes
1	55
2	110
3	165
4	220
5	275

Número de golpes por capa para la prueba de corte directo con 25% de goma triturada

Capa	Número de Golpes
1	50
2	100
3	150
4	200
5	250

Número de golpes por capa para la prueba de corte directo con 30% de goma triturada

Capa	Número de Golpes
1	45
2	90
3	135
4	180
5	225

Número de golpes por capa para la prueba de corte directo con 40% de goma triturada

Capa	Número de Golpes
1	40
2	80
3	120
4	160
5	200

Número de golpes por capa para la prueba de corte directo con 100% de goma triturada

Capa	Número de Golpes
1	35
2	70
3	105
4	140
5	175

Número de golpes por capa para la prueba triaxial con 0% de goma triturada

Capa	Número de Golpes
1	50
2	100
3	150
4	200
5	250
6	300
7	350
8	400

Número de golpes por capa para la prueba triaxial con 10% de goma triturada

Capa	Número de Golpes
1	45
2	90
3	135
4	180
5	225
6	270
7	315
8	360

Número de golpes por capa para la prueba triaxial con 20% de goma triturada

Capa	Número de Golpes
1	40
2	80
3	120
4	160
5	200
6	240
7	280
8	320

Número de golpes por capa para la prueba triaxial con 25% de goma triturada

Capa	Número de Golpes
1	35
2	70
3	105
4	140
5	175
6	210
7	245
8	280

Número de golpes por capa para la prueba triaxial con 30% de goma triturada

Capa	Número de Golpes
1	30
2	90
3	120
4	150
5	180
6	210
7	240
8	270

Número de golpes por capa para la prueba triaxial con 40% de goma triturada

Capa	Número de Golpes
1	25
2	50
3	75
4	100
5	125
6	150
7	175
8	200

Número de golpes por capa para la prueba triaxial con 100% de goma triturada

Capa	Número de Golpes
1	20
2	40
3	60
4	80
5	100
6	120
7	140
8	160





# APÉNDICE C - PESO UNITARIO MÍNIMO Y MÁXIMO

Tabla C.1 Prueba de peso unitario de la goma triturada

**Peso Unitario Mínimo según el ASTM D 4245**

**Muestra de goma triturada 100%**

Altura del Molde	72.16	mm
"	7.216	cm

Diámetro del Molde	64.07	mm
"	6.407	cm

Área del Molde	32.24	cm <sup>2</sup>
----------------	-------	-----------------

Volumen del Molde	232.64	cm <sup>3</sup>
-------------------	--------	-----------------

Peso del Molde	30.81	g
----------------	-------	---

Peso del Molde + Goma	152.08	g
-----------------------	--------	---

Peso de la Goma	121.27	g
-----------------	--------	---

Peso Unitario	0.52	g/cm <sup>3</sup>
"	<b>32.5</b>	<b>lbs/pie<sup>3</sup></b>

Tabla C.2 Prueba de peso unitario de la arena Ottawa

**Peso Unitario Mínimo según el ASTM D 4245**

**Muestra de Arena Silíceea**

**100%**

Altura del Molde	72.16	mm
"	7.216	cm

Diámetro del Molde	64.07	mm
"	6.407	cm

Área del Molde	32.24	cm <sup>2</sup>
----------------	-------	-----------------

Volumen del Molde	232.64	cm <sup>3</sup>
-------------------	--------	-----------------

Peso del Molde	30.81	g
----------------	-------	---

Peso del Molde + Arena	446.01	g
------------------------	--------	---

Peso de la Arena	415.2	g
------------------	-------	---

Peso Unitario	1.78	g/cm <sup>3</sup>
"	<b>111.4</b>	<b>lbs/pie<sup>3</sup></b>

Tabla C.3 Prueba de peso unitario por masa y por volumen de 10% de goma triturada y 80% de arena

**Peso Unitario Mínimo según el ASTM D 4245**

**Muestra de 10% goma triturada y 80% de arena**

Por Masa

Por Volumen

Altura del Molde	72.16	mm
"	7.216	cm

Altura del Molde	72.16	mm
"	7.216	cm

Diámetro del Molde	64.07	mm
"	6.407	cm

Diámetro del Molde	64.07	mm
"	6.407	cm

rea del Molde	32.24	cm <sup>2</sup>
----------------	-------	-----------------

rea del Molde	32.24	cm <sup>2</sup>
----------------	-------	-----------------

Volumen del Molde	232.64	cm <sup>3</sup>
-------------------	--------	-----------------

Volumen del Molde	232.64	cm <sup>3</sup>
-------------------	--------	-----------------

Peso del Molde	30.81	g
----------------	-------	---

Peso del Molde	30.81	g
----------------	-------	---

Peso del Molde + Goma	368.6	g
-----------------------	-------	---

Peso del Molde + Goma	414.69	g
-----------------------	--------	---

Peso de la Goma	337.79	g
-----------------	--------	---

Peso de la Goma	383.88	g
-----------------	--------	---

Peso Unitario	1.45	g/cm <sup>3</sup>
"	<b>90.6</b>	<b>lbs/pie<sup>3</sup></b>

Peso Unitario	1.65	g/cm <sup>3</sup>
"	<b>103.0</b>	<b>lbs/pie<sup>3</sup></b>

Tabla C.4 Prueba de peso unitario por masa y por volumen de 20% de goma triturada y 60% de arena

**Peso Unitario Mínimo según el ASTM D 4245**

**Muestra de 20% goma triturada y 60% de arena**

Por Masa		Por Volumen	
Altura del Molde	72.16 mm	Altura del Molde	72.16 mm
"	7.216 cm	"	7.216 cm
Diámetro del Molde	64.07 mm	Diámetro del Molde	64.07 mm
"	6.407 cm	"	6.407 cm
Área del Molde	32.24 cm <sup>2</sup>	Área del Molde	32.24 cm <sup>2</sup>
Volumen del Molde	232.64 cm <sup>3</sup>	Volumen del Molde	232.64 cm <sup>3</sup>
Peso del Molde	30.81 g	Peso del Molde	30.81 g
Peso del Molde + Goma	317.3 g	Peso del Molde + Goma	384.98 g
Peso de la Goma	286.49 g	Peso de la Goma	354.17 g
Peso Unitario	1.23 g/cm <sup>3</sup>	Peso Unitario	1.52 g/cm <sup>3</sup>
"	<b>76.9 lbs/pe<sup>3</sup></b>	"	<b>95.0 lbs/pe<sup>3</sup></b>

Tabla C.5 Prueba de peso unitario por masa y por volumen de 30% de goma triturada y 70% de arena

**Peso Unitario Mínimo según el ASTM D 4245**

**Muestra de 30% goma triturada y 70% de arena**

Por Masa

Por Volumen

Altura del Molde	72.16	mm
"	7.216	cm

Altura del Molde	72.16	mm
"	7.216	cm

Diámetro del Molde	64.07	mm
"	6.407	cm

Diámetro del Molde	64.07	mm
"	6.407	cm

Área del Molde	32.24	cm <sup>2</sup>
----------------	-------	-----------------

Área del Molde	32.24	cm <sup>2</sup>
----------------	-------	-----------------

Volumen del Molde	232.64	cm <sup>3</sup>
-------------------	--------	-----------------

Volumen del Molde	232.64	cm <sup>3</sup>
-------------------	--------	-----------------

Peso del Molde	30.81	g
----------------	-------	---

Peso del Molde	30.81	g
----------------	-------	---

Peso del Molde + Goma	278.1	g
-----------------------	-------	---

Peso del Molde + Goma	355	g
-----------------------	-----	---

Peso de la Goma	247.29	g
-----------------	--------	---

Peso de la Goma	324.19	g
-----------------	--------	---

Peso Unitario	1.06	g/cm <sup>3</sup>
"	<b>66.4</b>	<b>lbs/pie<sup>3</sup></b>

Peso Unitario	1.39	g/cm <sup>3</sup>
"	<b>87.0</b>	<b>lbs/pie<sup>3</sup></b>

Tabla C.6 Prueba de peso unitario por masa y por volumen de 40% de goma triturada y 60% de arena

**Peso Unitario Mínimo según el ASTM D 4245**

**Muestra de 40% goma triturada y 60% de arena**

Por Masa

Altura del Molde	72.16	mm
"	7.216	cm

Diámetro del Molde	64.07	mm
"	6.407	cm

Área del Molde	32.24	cm <sup>2</sup>
----------------	-------	-----------------

Volumen del Molde	232.64	cm <sup>3</sup>
-------------------	--------	-----------------

Peso del Molde	30.81	g
----------------	-------	---

Peso del Molde + Goma	244.84	g
-----------------------	--------	---

Peso de la Goma	214.03	g
-----------------	--------	---

Peso Unitario	0.92	g/cm <sup>3</sup>
"	<b>57.4</b>	<b>lbs/pie<sup>3</sup></b>

Por Volumen

Altura del Molde	72.16	mm
"	7.216	cm

Diámetro del Molde	64.07	mm
"	6.407	cm

Área del Molde	32.24	cm <sup>2</sup>
----------------	-------	-----------------

Volumen del Molde	232.64	cm <sup>3</sup>
-------------------	--------	-----------------

Peso del Molde	30.81	g
----------------	-------	---

Peso del Molde + Goma	334.07	g
-----------------------	--------	---

Peso de la Goma	303.26	g
-----------------	--------	---

Peso Unitario	1.30	g/cm <sup>3</sup>
"	<b>81.4</b>	<b>lbs/pie<sup>3</sup></b>

Tabla C.7 Prueba de peso unitario por masa y por volumen de 50% de goma triturada y 50% de arena

**Peso Unitario Mínimo según el ASTM D 4245**

**Muestra de 50% goma triturada y 50% de arena**

Por Masa

Altura del Molde	72.16	mm
"	7.216	cm

Diámetro del Molde	64.07	mm
"	6.407	cm

rea del Molde	32.24	cm <sup>2</sup>
----------------	-------	-----------------

Volumen del Molde	232.64	cm <sup>3</sup>
-------------------	--------	-----------------

Peso del Molde	30.81	g
----------------	-------	---

Peso del Molde + Goma	225.29	g
-----------------------	--------	---

Peso de la Goma	194.48	g
-----------------	--------	---

Peso Unitario	0.84	g/cm <sup>3</sup>
"	52.2	lbs/pe <sup>3</sup>

Por Volumen

Altura del Molde	72.16	mm
"	7.216	cm

Diámetro del Molde	64.07	mm
"	6.407	cm

rea del Molde	32.24	cm <sup>2</sup>
----------------	-------	-----------------

Volumen del Molde	232.64	cm <sup>3</sup>
-------------------	--------	-----------------

Peso del Molde	30.81	g
----------------	-------	---

Peso del Molde + Goma	300	g
-----------------------	-----	---

Peso de la Goma	269.19	g
-----------------	--------	---

Peso Unitario	1.16	g/cm <sup>3</sup>
"	72.2	lbs/pe <sup>3</sup>



Tabla C.8 Prueba de peso unitario por masa y por volumen de 60% de goma triturada y 40% de arena

**Peso Unitario Mínimo según el ASTM D 4245**

**Muestra de 60% goma triturada y 40% de arena**

Por Masa

Altura del Molde	72.16	mm
"	7.216	cm

Diámetro del Molde	64.07	mm
"	6.407	cm

Área del Molde	32.24	cm <sup>2</sup>
----------------	-------	-----------------

Volumen del Molde	232.64	cm <sup>3</sup>
-------------------	--------	-----------------

Peso del Molde	30.81	g
----------------	-------	---

Peso del Molde + Goma	207.5	g
-----------------------	-------	---

Peso de la Goma	176.69	g
-----------------	--------	---

Peso Unitario	0.76	g/cm <sup>3</sup>
"	<b>47.4</b>	<b>lbs/pie<sup>3</sup></b>

Por Volumen

Altura del Molde	72.16	mm
"	7.216	cm

Diámetro del Molde	64.07	mm
"	6.407	cm

Área del Molde	32.24	cm <sup>2</sup>
----------------	-------	-----------------

Volumen del Molde	232.64	cm <sup>3</sup>
-------------------	--------	-----------------

Peso del Molde	30.81	g
----------------	-------	---

Peso del Molde + Goma	266	g
-----------------------	-----	---

Peso de la Goma	235.19	g
-----------------	--------	---

Peso Unitario	1.01	g/cm <sup>3</sup>
"	<b>63.1</b>	<b>lbs/pie<sup>3</sup></b>

Tabla C.9 Prueba de peso unitario por masa y por volumen de 70% de goma triturada y 30% de arena

**Peso Unitario Mínimo según el ASTM D 4245**

**Muestra de 70% goma triturada y 30% de arena**

Por Masa

Por Volumen

Altura del Molde	72.16	mm
"	7.216	cm

Altura del Molde	72.16	mm
"	7.216	cm

Diámetro del Molde	64.07	mm
"	6.407	cm

Diámetro del Molde	64.07	mm
"	6.407	cm

Área del Molde	32.24	cm <sup>2</sup>
----------------	-------	-----------------

Área del Molde	32.24	cm <sup>2</sup>
----------------	-------	-----------------

Volumen del Molde	232.64	cm <sup>3</sup>
-------------------	--------	-----------------

Volumen del Molde	232.64	cm <sup>3</sup>
-------------------	--------	-----------------

Peso del Molde	30.81	g
----------------	-------	---

Peso del Molde	30.81	g
----------------	-------	---

Peso del Molde + Goma	189.66	g
-----------------------	--------	---

Peso del Molde + Goma	244.54	g
-----------------------	--------	---

Peso de la Goma	158.85	g
-----------------	--------	---

Peso de la Goma	213.73	g
-----------------	--------	---

Peso Unitario	0.68	g/cm <sup>3</sup>
"	<b>42.6</b>	<b>lbs/pie<sup>3</sup></b>

Peso Unitario	0.92	g/cm <sup>3</sup>
"	<b>57.4</b>	<b>lbs/pie<sup>3</sup></b>

Tabla C.10 Prueba de peso unitario por masa y por volumen de 80% de goma triturada y 20% de arena

**Peso Unitario Mínimo según el ASTM D 4245**

**Muestra de 80% goma triturada y 20% de arena**

Por Masa

Por Volumen

Altura del Molde	72.16	mm
"	7.216	cm

Altura del Molde	72.16	mm
"	7.216	cm

Diámetro del Molde	64.07	mm
"	6.407	cm

Diámetro del Molde	64.07	mm
"	6.407	cm

Área del Molde	32.24	cm <sup>2</sup>
----------------	-------	-----------------

Área del Molde	32.24	cm <sup>2</sup>
----------------	-------	-----------------

Volumen del Molde	232.64	cm <sup>3</sup>
-------------------	--------	-----------------

Volumen del Molde	232.64	cm <sup>3</sup>
-------------------	--------	-----------------

Peso del Molde	30.81	g
----------------	-------	---

Peso del Molde	30.81	g
----------------	-------	---

Peso del Molde + Goma	175.35	g
-----------------------	--------	---

Peso del Molde + Goma	205.81	g
-----------------------	--------	---

Peso de la Goma	144.54	g
-----------------	--------	---

Peso de la Goma	175	g
-----------------	-----	---

Peso Unitario	0.62	g/cm <sup>3</sup>
"	<b>38.8</b>	<b>lbs/pe<sup>3</sup></b>

Peso Unitario	0.75	g/cm <sup>3</sup>
"	<b>47.0</b>	<b>lbs/pe<sup>3</sup></b>

Tabla C.11 Prueba de peso unitario por masa y por volumen de 90% de goma triturada y 10% de arena

**Peso Unitario Mínimo según el ASTM D 4245**

**Muestra de 90% goma triturada y 10% arena**

Por Masa

Por Volumen

Altura del Molde	72.16 mm
"	7.216 cm

Altura del Molde	72.16 mm
"	7.216 cm

Diámetro del Molde	64.07 mm
"	6.407 cm

Diámetro del Molde	64.07 mm
"	6.407 cm

rea del Molde	32.24 cm <sup>2</sup>
----------------	-----------------------

rea del Molde	32.24 cm <sup>2</sup>
----------------	-----------------------

Volumen del Molde	232.64 cm <sup>3</sup>
-------------------	------------------------

Volumen del Molde	232.64 cm <sup>3</sup>
-------------------	------------------------

Peso del Molde	30.81 g
----------------	---------

Peso del Molde	30.81 g
----------------	---------

Peso del Molde + Goma	162.38 g
-----------------------	----------

Peso del Molde + Goma	181.49 g
-----------------------	----------

Peso de la Goma	131.57 g
-----------------	----------

Peso de la Goma	150.68 g
-----------------	----------

Peso Unitario	0.57 g/cm <sup>3</sup>
"	<b>35.3 lbs/pie<sup>3</sup></b>

Peso Unitario	0.65 g/cm <sup>3</sup>
"	<b>40.4 lbs/pie<sup>3</sup></b>

## APÉNDICE D – GRAVEDAD ESPECÍFICA

Tabla D.1 Prueba de gravedad específica por volumen de 100% de arena Ottawa

**Prueba de Gravedad Específica según el ASTM D 854**  
**Muestra de arena silícea 100%**

W <sub>1</sub> (Peso del picnómetro lleno de agua hasta la marca de 500 ml)	671.8 g
T <sub>1</sub> (Temperatura del agua en el picnómetro)	24 °C
W <sub>2</sub> (Peso del picnómetro lleno de agua y suelo hasta la marca de 500 ml)	733.34 g
W <sub>tara</sub>	775.69 g
W <sub>3</sub> * (Peso del suelo luego del horno)	874.71 g
W <sub>3</sub> (Peso del suelo dentro del picnómetro seco)    W <sub>3</sub> * - W <sub>tara</sub>	99.02 g
Gravedad Específica @ T <sub>1</sub> $W_3 / [(W_1 + W_3) - W_2]$	2.64
Valor A obtenido de Tabla dado T <sub>1</sub>	0.9991
Gravedad Específica @ 20°C	2.64

Tabla D.2 Prueba de gravedad específica por volumen de 100% de goma triturada

**Prueba de Gravedad Específica según el ASTM D 854**  
**Muestra de 100% de goma**

W <sub>1</sub> (Peso del picnómetro lleno de agua hasta la marca indicada)	671.8 g
T <sub>1</sub> (Temperatura del agua en el picnómetro)	24 °C
W <sub>2</sub> (Peso del picnómetro lleno de agua y suelo hasta la marca indicada)	673.17 g
W <sub>tara</sub>	925.28 g
W <sub>3</sub> * (Peso del suelo luego del horno)	938.72 g
W <sub>3</sub> (Peso del suelo dentro del picnómetro seco)    W <sub>3</sub> * - W <sub>tara</sub>	13.44 g
Gravedad Específica @ T <sub>1</sub> $W_3 / [(W_1 + W_3) - W_2]$	1.11
Valor A obtenido de Tabla dado T <sub>1</sub>	0.9991
Gravedad Específica @ 20°C	1.11

Tabla D.3 Prueba de gravedad específica por volumen de 20% de goma triturada y 80% de arena Ottawa

**Muestra de 20% de goma y 80% de arena**

W <sub>1</sub> (Peso del picnómetro lleno de agua hasta la marca indicada)	671.41 g
T <sub>1</sub> (Temperatura del agua en el picnómetro)	24 °C
W <sub>2</sub> (Peso del picnómetro lleno de agua y suelo hasta la marca indicada)	733.79 g
W <sub>tara</sub>	775.83 g
W <sub>3</sub> * (Peso del suelo luego del horno)	879.83 g
W <sub>3</sub> (Peso del suelo dentro del picnómetro seco) W <sub>3</sub> * - W <sub>tara</sub>	104.00 g
Gravedad Específica @ T <sub>1</sub> $W_3 / [(W_1 + W_3) - W_2]$	2.50
Valor A obtenido de Tabla dado T <sub>1</sub>	0.9991
Gravedad Específica @ 20°C	2.50

Tabla D.4 Prueba de gravedad específica por volumen de 40% de goma triturada y 60% de arena Ottawa

**Muestra de 40% de goma y 60% de arena**

W <sub>1</sub> (Peso del picnómetro lleno de agua hasta la marca indicada)	670.81 g
T <sub>1</sub> (Temperatura del agua en el picnómetro)	24 °C
W <sub>2</sub> (Peso del picnómetro lleno de agua y suelo hasta la marca indicada)	695.63 g
W <sub>tara</sub>	458.51 g
W <sub>3</sub> * (Peso del suelo luego del horno)	503.16 g
W <sub>3</sub> (Peso del suelo dentro del picnómetro seco) W <sub>3</sub> * - W <sub>tara</sub>	44.65 g
Gravedad Específica @ T <sub>1</sub> $W_3 / [(W_1 + W_3) - W_2]$	2.25
Valor A obtenido de Tabla dado T <sub>1</sub>	0.9991
Gravedad Específica @ 20°C	2.25

Tabla D.5 Prueba de gravedad específica por volumen de 60% de goma triturada y 40% de arena Ottawa

**Muestra de 60% goma y 40% arena**

W <sub>1</sub> (Peso del picnómetro lleno de agua hasta la marca indicada)	671.14 g
T <sub>1</sub> (Temperatura del agua en el picnómetro)	24 °C
W <sub>2</sub> (Peso del picnómetro lleno de agua y suelo hasta la marca indicada)	687.52 g
W <sub>tara</sub>	775.69 g
W <sub>3</sub> * (Peso del suelo luego del horno)	809.06 g
W <sub>3</sub> (Peso del suelo dentro del picnómetro seco) W <sub>3</sub> * - W <sub>tara</sub>	33.37 g
Gravedad Específica @ T <sub>1</sub> $W_3 / [(W_1 + W_3) - W_2]$	1.96
Valor A obtenido de Tabla dado T <sub>1</sub>	0.9991
Gravedad Específica @ 20°C	1.96

Tabla D.6 Prueba de gravedad específica por volumen de 80% de goma triturada y 20% de arena Ottawa

**Muestra de 80% goma y 20% arena**

W <sub>1</sub> (Peso del picnómetro lleno de agua hasta la marca indicada)	670.48 g
T <sub>1</sub> (Temperatura del agua en el picnómetro)	24 °C
W <sub>2</sub> (Peso del picnómetro lleno de agua y suelo hasta la marca indicada)	681.75 g
W <sub>tara</sub>	775.69 g
W <sub>3</sub> * (Peso del suelo luego del horno)	809.06 g
W <sub>3</sub> (Peso del suelo dentro del picnómetro seco) W <sub>3</sub> * - W <sub>tara</sub>	33.37 g
Gravedad Específica @ T <sub>1</sub> $W_3 / [(W_1 + W_3) - W_2]$	1.51
Valor A obtenido de Tabla dado T <sub>1</sub>	0.9991
Gravedad Específica @ 20°C	1.51

## APÉNDICE E – PERMEABILIDAD

Tabla E.1 Prueba de permeabilidad por el método de carga constante para la arena Ottawa

**Muestra de arena silicea 100%**

Volumen de agua recolectado	150	ml
Largo de la muestra	12.5	cm
Área de la muestra	31.65	cm <sup>2</sup>
Carga Hidráulica	77.00	cm
Tiempo en recolectar Volumen	12.80 12.40 12.20	seg seg seg
Promedio de los tiempos	12.47	seg
Permeabilidad (k)	0.0617	cm/seg

Tabla E.2 Prueba de permeabilidad por el método de carga constante para la goma triturada

Volumen de agua recolectado	150	ml
Largo de la muestra	12.5	cm
Área de la muestra	31.65	cm <sup>2</sup>
Carga Hidráulica	77.00	cm
Tiempo en recolectar Volumen	9.90 9.20 9.60	seg seg seg
Promedio de los tiempos	9.57	seg
Permeabilidad (k)	0.0804	cm/seg



Tabla E.3 Prueba de permeabilidad por el método de carga constante por volumen de 20% de goma triturada y 80% de arena Ottawa

Volumen de agua recolectado	150	ml
Largo de la muestra	12.5	cm
Área de la muestra	31.65	cm <sup>2</sup>
Carga Hidráulica	77.00	cm
Tiempo en recolectar Volumen	11.70	seg
	12.00	seg
	11.90	seg
Promedio de los tiempos	11.87	seg
Permeabilidad (k)	0.0648	cm/seg

Tabla E.4 Prueba de permeabilidad por el método de carga constante por volumen de 40% de goma triturada y 60% de arena Ottawa

Volumen de agua recolectado	150	ml
Largo de la muestra	12.5	cm
Área de la muestra	31.65	cm <sup>2</sup>
Carga Hidráulica	77.00	cm
Tiempo en recolectar Volumen	11.50	seg
	11.90	seg
	11.70	seg
Promedio de los tiempos	11.70	seg
Permeabilidad (k)	0.0658	cm/seg

Tabla E.5 Prueba de permeabilidad por el método de carga constante por volumen de 60% de goma triturada y 20% de arena Ottawa

Volumen de agua recolectado	150	ml
Largo de la muestra	12.5	cm
Área de la muestra	31.65	cm <sup>2</sup>
Carga Hidráulica	77.00	cm
Tiempo en recolectar Volumen	11.10	seg
	11.30	seg
	11.30	seg
Promedio de los tiempos	11.23	seg
Permeabilidad (k)	0.0685	cm/seg

Tabla E.6 Prueba de permeabilidad por el método de carga constante por volumen de 80% de goma triturada y 20% de arena Ottawa

Volumen de agua recolectado	150	ml
Largo de la muestra	12.5	cm
Área de la muestra	31.65	cm <sup>2</sup>
Carga Hidráulica	77.00	cm
Tiempo en recolectar Volumen	10.10	seg
	10.70	seg
	10.60	seg
Promedio de los tiempos	10.47	seg
Permeabilidad (k)	0.0735	cm/seg

## APÉNDICE F – SUB-COMPACTACION (PERMEABILIDAD, CORTE DIRECTO, TRIAXIAL)

Tabla F.1 Proceso de sub-compactación para la prueba de permeabilidad para muestra de 100% goma

Porcentaje de goma P(%)	100	%
Gravedad Especifica	1.2	
Diámetro del espécimen	63.5	mm
Altura deseada de la muestra	125	mm
Número de capas	7	
Relación de vacíos mínima	1.08	
Relación de vacíos máxima	1.30	
Sub compactación	5	
Densidad Relativa deseada (%)	65	%
Relación de vacíos deseada	1.15	
Volumen de suelo	183.76	cm <sup>3</sup>
Volumen de muestra	395.87	cm <sup>3</sup>
Densidad seca	0.556	g/cm <sup>3</sup>
Peso total de la muestra	220.0	g
Peso del equipo (permeámetro)	6.550	lbs
Peso del equipo más suelo	7.03	lbs
Peso del suelo	0.480	lbs
Volumen de la muestra	0.01397	ft <sup>3</sup>
Peso unitario obtenido	<b>34.4</b>	lbs/pie <sup>3</sup>
Peso unitario máximo	36	lbs/pie <sup>3</sup>
Peso unitario mínimo	32.48	lbs/pie <sup>3</sup>
Peso unitario deseado	<b>34.7</b>	lbs/pie <sup>3</sup>

Capa	Un	Un prom	hn (mm)	H capa (mm)	Dr capa (%)	e deseada	Peso seco (g)	Ho medido (mm)
1	5.000	5.000	<b>18.8</b>	18.75	63.5	1.1576	<b>32.95</b>	106.25
2	4.167	2.083	<b>36.5</b>	17.71	64.5	1.1553	<b>31.16</b>	88.54
3	3.333	1.111	<b>54.2</b>	17.71	65.5	1.1531	<b>31.19</b>	70.83
4	2.500	0.625	<b>71.9</b>	17.71	66.5	1.1508	<b>31.22</b>	53.13
5	1.667	0.333	<b>89.6</b>	17.71	67.5	1.1486	<b>31.25</b>	35.42
6	0.833	0.139	<b>107.3</b>	17.71	67.5	1.1486	<b>31.25</b>	17.71
7	0.000	0.000	<b>125.0</b>	17.71	67.5	1.1486	<b>31.25</b>	0.00

66.1

**220.3** gramos  
0.486 lbs

## APÉNDICE G – CORTE DIRECTO

Tabla G.2 Resultados de la prueba de corte directo para la arena Ottawa a un esfuerzo normal de 10 lbs/pulg<sup>2</sup>

10	lb/pulgadas <sup>2</sup>
Constante de Anilla de Carga	0.9914
Velocidad de Corte	0.8 mm/min

Lectura de Deformación Vertical (x 10 <sup>-3</sup> pulg)	Lectura de Deformación Horizontal (pulg)	Lectura Reloj de Carga (x 10 <sup>-4</sup> pulg)	Carga de Corte (lbs)	Área Corregida (pulg <sup>2</sup> )	Esfuerzo Cortante (lbs/pulg <sup>2</sup> )
0	0	0	0	6.25	0.00
-1	0.005	8	7.93	6.24	1.27
-2	0.010	19	18.84	6.23	3.03
-3	0.015	30	29.74	6.21	4.79
-2	0.020	45	44.61	6.20	7.20
-1	0.025	53	52.54	6.19	8.49
0	0.030	59	58.49	6.18	9.47
3	0.040	61	60.48	6.15	9.83
6	0.050	58	57.50	6.13	9.39
10	0.060	54	53.54	6.10	8.78
13	0.070	50	49.57	6.08	8.16
17	0.080	46	45.60	6.05	7.54
19	0.090	42	41.64	6.03	6.91
20	0.100	40	39.66	6.00	6.61
20	0.120	38	37.67	5.95	6.33
21	0.140	37	36.68	5.90	6.22
21	0.150	36	35.69	5.88	6.07
21	0.160	35	34.70	5.85	5.93
21	0.180	34	33.71	5.80	5.81
22	0.200	34	33.71	5.75	5.86
22	0.220	33	32.72	5.70	5.74
22	0.240	33	32.72	5.65	5.79
22	0.250	33	32.72	5.63	5.82

Tabla G.3 Resultados de la prueba de corte directo para la arena Ottawa a un esfuerzo normal de 20 lbs/pulg<sup>2</sup>

Esfuerzo Normal	20	lb/pulgadas <sup>2</sup>
Constante de Anilla de Carga	0.9914	
Velocidad de Corte	0.8	mm/min

Lectura de Deformación Vertical (x 10 <sup>-3</sup> pulg)	Lectura de Deformación Horizontal (pulg)	Lectura Reloj de Carga (x 10 <sup>-4</sup> pulg)	Carga de Corte (lbs)	Área Corregida (pulg <sup>2</sup> )	Esfuerzo Cortante (lbs/pulg <sup>2</sup> )
0	0	0	0.00	6.25	0.00
-2	0.005	26	25.78	6.24	4.13
-4	0.010	50	49.57	6.23	7.96
-5	0.015	65	64.44	6.21	10.37
-3	0.020	74	73.36	6.20	11.83
-1	0.025	80	79.31	6.19	12.82
0	0.030	86	85.26	6.18	13.81
3	0.040	91	90.22	6.15	14.67
5	0.050	94	93.19	6.13	15.21
7	0.060	96	95.17	6.10	15.60
10	0.070	94	93.19	6.08	15.34
12	0.080	90	89.23	6.05	14.75
14	0.090	86	85.26	6.03	14.15
16	0.100	82	81.29	6.00	13.55
18	0.120	76	75.35	5.95	12.66
18	0.140	71	70.39	5.90	11.93
19	0.150	69	68.41	5.88	11.64
20	0.160	67	66.42	5.85	11.35
21	0.180	64	63.45	5.80	10.94
21	0.200	62	61.47	5.75	10.69
22	0.220	60	59.48	5.70	10.44
22	0.240	59	58.49	5.65	10.35
22	0.250	59	58.49	5.63	10.40

Tabla G.4 Resultados de la prueba de corte directo para la arena Ottawa a un esfuerzo normal de 30 lbs/pulg<sup>2</sup>

Esfuerzo Normal	30	lb/pulgadas <sup>2</sup>
Constante de Anilla de Carga	0.9914	
Velocidad de Corte	0.8	mm/min

Lectura de Deformación Vertical (x 10 <sup>-3</sup> pulg)	Lectura de Deformación Horizontal (pulg)	Lectura Reloj de Carga (x 10 <sup>-4</sup> pulg)	Carga de Corte (lbs)	Área Corregida (pulg <sup>2</sup> )	Esfuerzo Cortante (lbs/pulg <sup>2</sup> )
0	0	0	0.00	6.25	0.00
-3	0.005	27	26.77	6.24	4.29
-5	0.010	55	54.53	6.23	8.76
-7	0.015	77	76.34	6.21	12.29
-5	0.020	99	98.15	6.20	15.83
-3	0.025	115	114.01	6.19	18.43
-1	0.030	133	131.86	6.18	21.35
0	0.040	147	145.74	6.15	23.70
3	0.050	156	154.66	6.13	25.25
8	0.060	152	150.69	6.10	24.70
11	0.070	148	146.73	6.08	24.15
15	0.080	140	138.80	6.05	22.94
18	0.090	133	131.86	6.03	21.88
19	0.100	127	125.91	6.00	20.98
20	0.120	124	122.93	5.95	20.66
21	0.140	121	119.96	5.90	20.33
22	0.150	120	118.97	5.88	20.25
23	0.160	119	117.98	5.85	20.17
23	0.180	118	116.99	5.80	20.17
23	0.200	117	115.99	5.75	20.17
23	0.220	117	115.99	5.70	20.35
23	0.240	117	115.99	5.65	20.53
24	0.250	116	115.00	5.63	20.44

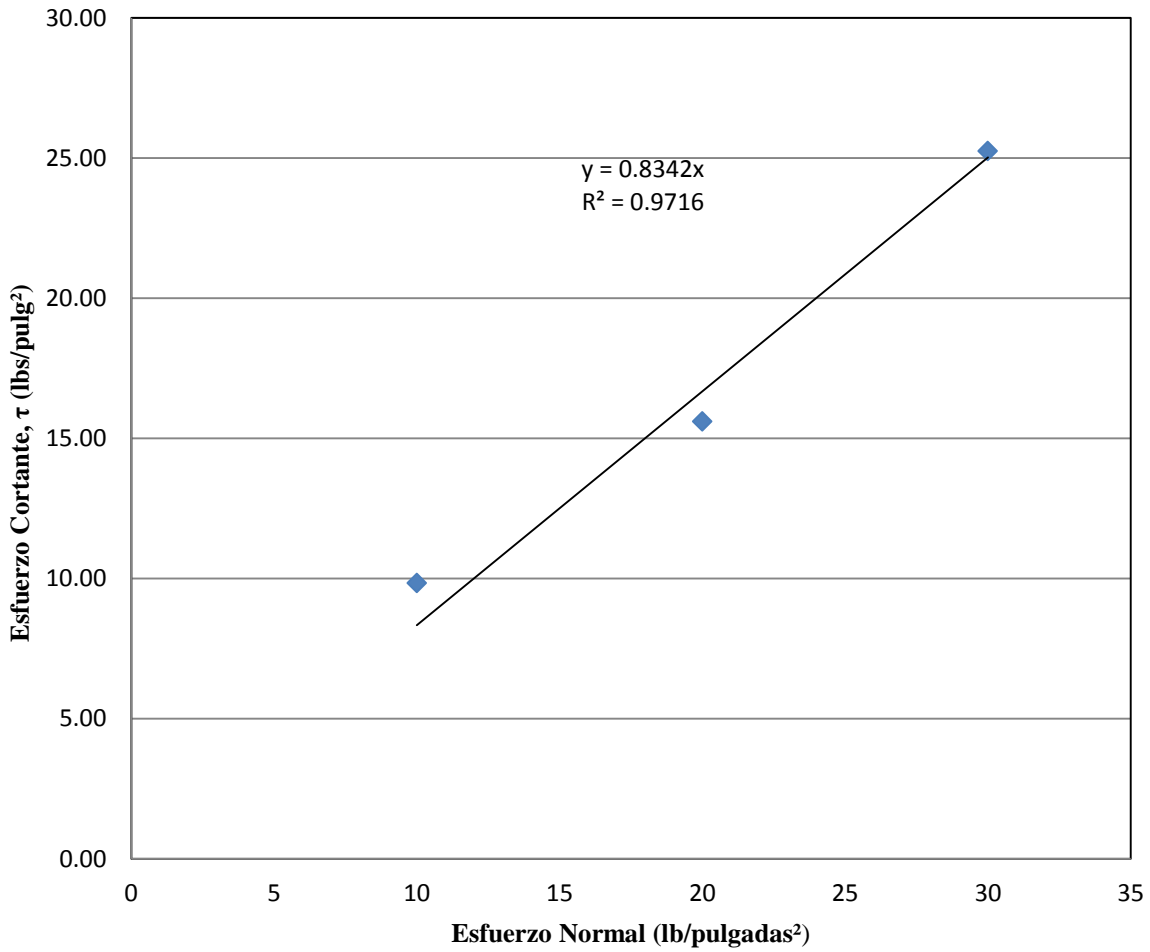


Figura G.7 Envoltente de falla Mohr-Coulomb para muestras de arena Ottawa obtenida mediante pruebas de corte directo a grandes desplazamientos (0.25 pulgadas)

Tabla G.5 Resultados de la prueba de corte directo para un 90% de arena Ottawa y 10% de goma triturada a un esfuerzo normal de 10 lbs/pulg<sup>2</sup>

Esfuerzo Normal	10	lb/pulgadas <sup>2</sup>
Constante de Anilla de Carga	0.9914	
Velocidad de Corte	0.8	mm/min

Lectura de Deformación Vertical (x 10 <sup>-3</sup> pulg)	Lectura de Deformación Horizontal (pulg)	Lectura Reloj de Carga (x 10 <sup>-4</sup> pulg)	Carga de Corte (lbs)	Área Corregida (pulg <sup>2</sup> )	Esfuerzo Cortante (lbs/pulg <sup>2</sup> )
0	0	0	0	6.25	0.00
0	0.005	9	8.92	6.24	1.43
0	0.010	15	14.87	6.23	2.39
0	0.015	18	17.85	6.21	2.87
-1	0.020	22	21.81	6.20	3.52
-1	0.025	25	24.79	6.19	4.01
-1	0.030	28	27.76	6.18	4.50
-2	0.040	31	30.73	6.15	5.00
-2	0.050	35	34.70	6.13	5.67
-2	0.060	38	37.67	6.10	6.18
-3	0.070	40	39.66	6.08	6.53
-3	0.080	43	42.63	6.05	7.05
-3	0.090	45	44.61	6.03	7.40
-3	0.100	46	45.60	6.00	7.60
-3	0.120	49	48.58	5.95	8.16
-3	0.140	52	51.55	5.90	8.74
-3	0.150	53	52.54	5.88	8.94
-4	0.160	53	52.54	5.85	8.98
-4	0.180	55	54.53	5.80	9.40
-4	0.200	56	55.52	5.75	9.66
-4	0.220	57	56.51	5.70	9.91
-3	0.240	58	57.50	5.65	10.18
-3	0.250	58	57.50	5.63	10.22



Tabla G.6 Resultados de la prueba de corte directo para un 90% de arena Ottawa y 10% de goma triturada a un esfuerzo normal de 20 lbs/pulg<sup>2</sup>

Esfuerzo Normal	20	lb/pulgadas <sup>2</sup>
Constante de Anilla de Carga	0.9914	
Velocidad de Corte	0.8	mm/min

Lectura de Deformación Vertical (x 10 <sup>-3</sup> pulg)	Lectura de Deformación Horizontal (pulg)	Lectura Reloj de Carga (x 10 <sup>-4</sup> pulg)	Carga de Corte (lbs)	Área Corregida (pulg <sup>2</sup> )	Esfuerzo Cortante (lbs/pulg <sup>2</sup> )
0	0	0	0.00	6.25	0.00
0	0.005	20	19.83	6.24	3.18
0	0.010	25	24.79	6.23	3.98
0	0.015	33	32.72	6.21	5.27
-1	0.020	37	36.68	6.20	5.92
-1	0.025	40	39.66	6.19	6.41
-2	0.030	45	44.61	6.18	7.22
-3	0.040	50	49.57	6.15	8.06
-4	0.050	54	53.54	6.13	8.74
-5	0.060	60	59.48	6.10	9.75
-5	0.070	67	66.42	6.08	10.93
-5	0.080	74	73.36	6.05	12.13
-5	0.090	82	81.29	6.03	13.49
-6	0.100	90	89.23	6.00	14.87
-6	0.120	96	95.17	5.95	16.00
-6	0.140	100	99.14	5.90	16.80
-6	0.150	104	103.11	5.88	17.55
-7	0.160	107	106.08	5.85	18.13
-7	0.180	109	108.06	5.80	18.63
-7	0.200	111	110.05	5.75	19.14
-8	0.220	113	112.03	5.70	19.65
-8	0.240	114	113.02	5.65	20.00
-7	0.250	115	114.01	5.63	20.27

Tabla G.7 Resultados de la prueba de corte directo para un 90% de arena Ottawa y 10% de goma triturada a un esfuerzo normal de 30 lbs/pulg<sup>2</sup>

Esfuerzo Normal	30	lb/pulgadas <sup>2</sup>
Constante de Anilla de Carga	0.9914	
Velocidad de Corte	0.8	mm/min

Lectura de Deformación Vertical (x 10 <sup>-3</sup> pulg)	Lectura de Deformación Horizontal (pulg)	Lectura Reloj de Carga (x 10 <sup>-4</sup> pulg)	Carga de Corte (lbs)	Área Corregida (pulg <sup>2</sup> )	Esfuerzo Cortante (lbs/pulg <sup>2</sup> )
0	0	0	0.00	6.25	0.00
0	0.005	40	39.66	6.24	6.36
0	0.010	55	54.53	6.23	8.76
0	0.015	60	59.48	6.21	9.57
-1	0.020	68	67.42	6.20	10.87
-1	0.025	73	72.37	6.19	11.70
-1	0.030	79	78.32	6.18	12.68
-3	0.040	83	82.29	6.15	13.38
-4	0.050	90	89.23	6.13	14.57
-4	0.060	95	94.18	6.10	15.44
-5	0.070	100	99.14	6.08	16.32
-6	0.080	105	104.10	6.05	17.21
-7	0.090	115	114.01	6.03	18.92
-8	0.100	120	118.97	6.00	19.83
-8	0.120	124	122.93	5.95	20.66
-8	0.140	130	128.88	5.90	21.84
-9	0.150	137	135.82	5.88	23.12
-9	0.160	140	138.80	5.85	23.73
-9	0.180	147	145.74	5.80	25.13
-10	0.200	153	151.68	5.75	26.38
-10	0.220	164	162.59	5.70	28.52
-10	0.240	167	165.56	5.65	29.30
-9	0.250	168	166.56	5.63	29.61

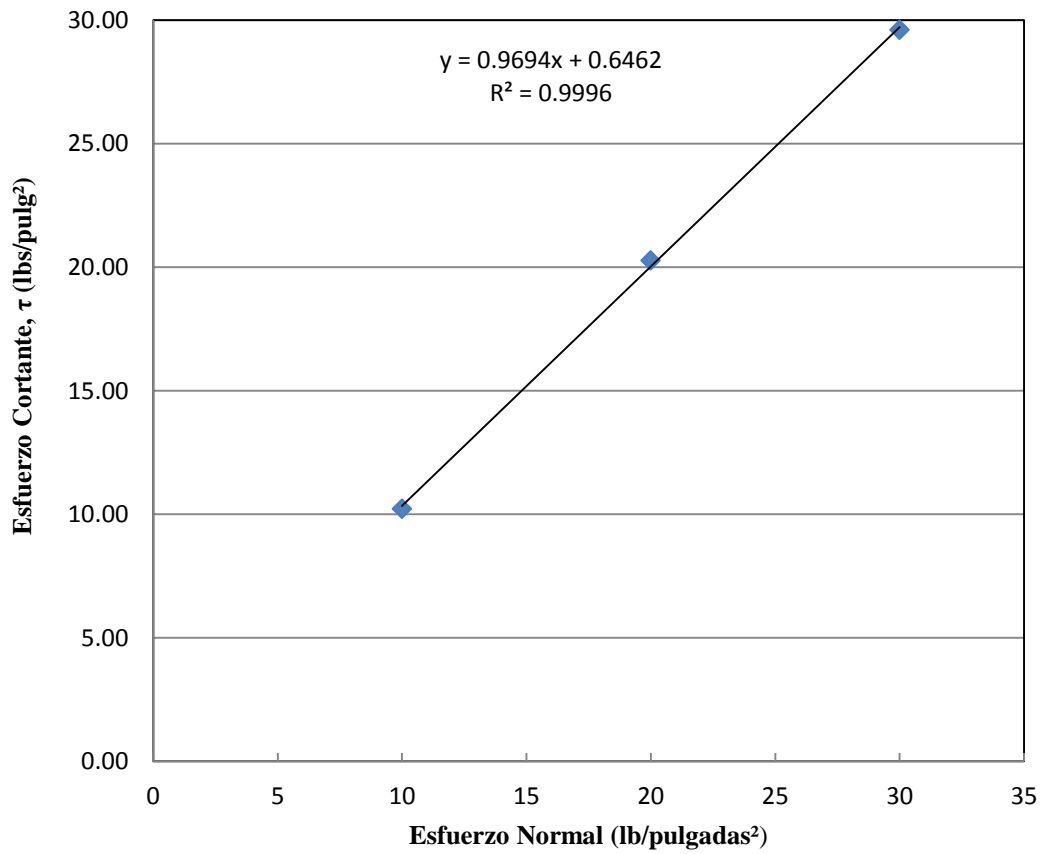


Figura G.8 Envolverte de falla Mohr-Coulomb para muestras de 90% de arena Ottawa y 10% de goma triturada obtenida mediante pruebas de corte directo a grandes desplazamientos (0.25 pulgadas)

Tabla G.8 Resultados de la prueba de corte directo para un 80% de arena Ottawa y 20% de goma triturada a un esfuerzo normal de 10 lbs/pulg<sup>2</sup>

Esfuerzo Normal	10	lb/pulgadas <sup>2</sup>
Constante de Anilla de Carga	0.9914	
Velocidad de Corte	0.8	mm/min

Lectura de Deformación Vertical (x 10 <sup>-3</sup> pulg)	Lectura de Deformación Horizontal (pulg)	Lectura Reloj de Carga (x 10 <sup>-4</sup> pulg)	Carga de Corte (lbs)	Área Corregida (pulg <sup>2</sup> )	Esfuerzo Cortante (lbs/pulg <sup>2</sup> )
0	0	0	0	6.25	0.00
0	0.005	11	10.91	6.24	1.75
-1	0.010	14	13.88	6.23	2.23
-1	0.015	17	16.85	6.21	2.71
-1	0.020	20	19.83	6.20	3.20
-2	0.025	21	20.82	6.19	3.36
-2	0.030	26	25.78	6.18	4.17
-3	0.040	29	28.75	6.15	4.67
-3	0.050	31	30.73	6.13	5.02
-3	0.060	33	32.72	6.10	5.36
-4	0.070	36	35.69	6.08	5.87
-4	0.080	39	38.66	6.05	6.39
-4	0.090	40	39.66	6.03	6.58
-4	0.100	42	41.64	6.00	6.94
-4	0.120	46	45.60	5.95	7.66
-4	0.140	47	46.60	5.90	7.90
-4	0.150	48	47.59	5.88	8.10
-5	0.160	51	50.56	5.85	8.64
-5	0.180	51	50.56	5.80	8.72
-5	0.200	52	51.55	5.75	8.97
-5	0.220	53	52.54	5.70	9.22
-5	0.240	54	53.54	5.65	9.48
-5	0.250	54	53.54	5.63	9.52

Tabla G.9 Resultados de la prueba de corte directo para un 80% de arena Ottawa y 20% de goma triturada a un esfuerzo normal de 20 lbs/pulg<sup>2</sup>

Esfuerzo Normal	20	lb/pulgadas <sup>2</sup>
Constante de Anilla de Carga	0.9914	
Velocidad de Corte	0.8	mm/min

Lectura de Deformación Vertical (x 10 <sup>-3</sup> pulg)	Lectura de Deformación Horizontal (x 10 <sup>-3</sup> pulg)	Lectura Reloj de Carga (x 10 <sup>-4</sup> pulg)	Carga de Corte (lbs)	Área Corregida (pulg <sup>2</sup> )	Esfuerzo Cortante (lbs/pulg <sup>2</sup> )
0	0	0	0.00	6.25	0.00
-1	0.005	19	18.84	6.24	3.02
-1	0.010	21	20.82	6.23	3.34
-2	0.015	26	25.78	6.21	4.15
-3	0.020	32	31.72	6.20	5.12
-3	0.025	38	37.67	6.19	6.09
-6	0.030	42	41.64	6.18	6.74
-7	0.040	47	46.60	6.15	7.58
-8	0.050	52	51.55	6.13	8.42
-8	0.060	56	55.52	6.10	9.10
-9	0.070	65	64.44	6.08	10.61
-9	0.080	70	69.40	6.05	11.47
-9	0.090	75	74.36	6.03	12.34
-9	0.100	83	82.29	6.00	13.71
-10	0.120	87	86.25	5.95	14.50
-10	0.140	94	93.19	5.90	15.80
-10	0.150	97	96.17	5.88	16.37
-11	0.160	101	100.13	5.85	17.12
-12	0.180	103	102.11	5.80	17.61
-12	0.200	105	104.10	5.75	18.10
-12	0.220	107	106.08	5.70	18.61
-12	0.240	108	107.07	5.65	18.95
-12	0.250	110	109.05	5.63	19.39

Tabla G.10 Resultados de la prueba de corte directo para un 80% de arena Ottawa y 20% de goma triturada a un esfuerzo normal de 30 lbs/pulg<sup>2</sup>

Esfuerzo Normal	30	lb/pulgadas <sup>2</sup>
Constante de Anilla de Carga	0.9914	
Velocidad de Corte	0.8	mm/min

Lectura de Deformación Vertical (x 10 <sup>-3</sup> pulg)	Lectura de Deformación Horizontal (x 10 <sup>-3</sup> pulg)	Lectura Reloj de Carga (x 10 <sup>-4</sup> pulg)	Carga de Corte (lbs)	Área Corregida (pulg <sup>2</sup> )	Esfuerzo Cortante (lbs/pulg <sup>2</sup> )
0	0	0	0.00	6.25	0.00
-3	0.005	35	34.70	6.24	5.56
-5	0.010	44	43.62	6.23	7.01
-7	0.015	53	52.54	6.21	8.46
-8	0.020	62	61.47	6.20	9.91
-9	0.025	68	67.42	6.19	10.90
-10	0.030	74	73.36	6.18	11.88
-11	0.040	80	79.31	6.15	12.90
-12	0.050	85	84.27	6.13	13.76
-12	0.060	91	90.22	6.10	14.79
-12	0.070	97	96.17	6.08	15.83
-12	0.080	103	102.11	6.05	16.88
-13	0.090	110	109.05	6.03	18.10
-13	0.100	114	113.02	6.00	18.84
-14	0.120	124	122.93	5.95	20.66
-14	0.140	130	128.88	5.90	21.84
-14	0.150	135	133.84	5.88	22.78
-15	0.160	138	136.81	5.85	23.39
-15	0.180	145	143.75	5.80	24.79
-15	0.200	151	149.70	5.75	26.04
-16	0.220	152	150.69	5.70	26.44
-16	0.240	153	151.68	5.65	26.85
-16	0.250	154	152.68	5.63	27.14

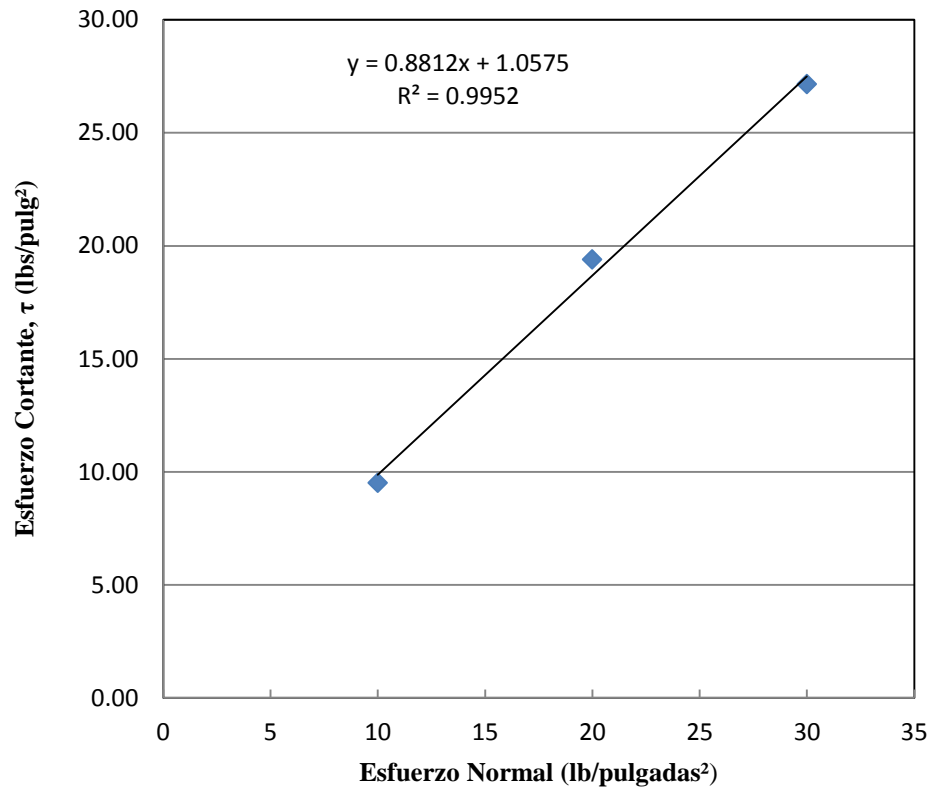


Figura G.9 Envoltente de falla Mohr-Coulomb para muestras de 80% de arena Ottawa y 20% de goma triturada obtenida mediante pruebas de corte directo a grandes desplazamientos (0.25 pulgadas)

Tabla G.11 Resultados de la prueba de corte directo para un 75% de arena Ottawa y 25% de goma triturada a un esfuerzo normal de 10 lbs/pulg<sup>2</sup>

Esfuerzo Normal	10	lb/pulgadas <sup>2</sup>
Constante de Anilla de Carga	0.9914	
Velocidad de Corte	0.8	mm/min

Lectura de Deformación Vertical (x 10 <sup>-3</sup> pulg)	Lectura de Deformación Horizontal (x 10 <sup>-3</sup> pulg)	Lectura Reloj de Carga (x 10 <sup>-4</sup> pulg)	Carga de Corte (lbs)	Área Corregida (pulg <sup>2</sup> )	Esfuerzo Cortante (lbs/pulg <sup>2</sup> )
0	0	0	0	6.25	0.00
0	0.005	7	6.94	6.24	1.11
0	0.010	9	8.92	6.23	1.43
-1	0.015	15	14.87	6.21	2.39
-1	0.020	17	16.85	6.20	2.72
-1	0.025	20	19.83	6.19	3.20
-2	0.030	22	21.81	6.18	3.53
-2	0.040	27	26.77	6.15	4.35
-3	0.050	29	28.75	6.13	4.69
-3	0.060	31	30.73	6.10	5.04
-4	0.070	34	33.71	6.08	5.55
-4	0.080	36	35.69	6.05	5.90
-4	0.090	37	36.68	6.03	6.09
-4	0.100	38	37.67	6.00	6.28
-5	0.120	41	40.65	5.95	6.83
-5	0.140	42	41.64	5.90	7.06
-5	0.150	43	42.63	5.88	7.26
-5	0.160	44	43.62	5.85	7.46
-6	0.180	46	45.60	5.80	7.86
-6	0.200	47	46.60	5.75	8.10
-6	0.220	48	47.59	5.70	8.35
-6	0.240	49	48.58	5.65	8.60
-6	0.250	49	48.58	5.63	8.64



Tabla G.12 Resultados de la prueba de corte directo para un 75% de arena Ottawa y 25% de goma triturada a un esfuerzo normal de 20 lbs/pulg<sup>2</sup>

Esfuerzo Normal	20	lb/pulgadas <sup>2</sup>
Constante de Anilla de Carga	0.9914	
Velocidad de Corte	0.8	mm/min

Lectura de Deformación Vertical (x 10 <sup>-3</sup> pulg)	Lectura de Deformación Horizontal (x 10 <sup>-3</sup> pulg)	Lectura Reloj de Carga (x 10 <sup>-4</sup> pulg)	Carga de Corte (lbs)	Área Corregida (pulg <sup>2</sup> )	Esfuerzo Cortante (lbs/pulg <sup>2</sup> )
0	0	0	0.00	6.25	0.00
0	0.005	12	11.90	6.24	1.91
-1	0.010	18	17.85	6.23	2.87
-1	0.015	23	22.80	6.21	3.67
-2	0.020	28	27.76	6.20	4.48
-2	0.025	33	32.72	6.19	5.29
-3	0.030	37	36.68	6.18	5.94
-4	0.040	40	39.66	6.15	6.45
-5	0.050	47	46.60	6.13	7.61
-5	0.060	50	49.57	6.10	8.13
-5	0.070	59	58.49	6.08	9.63
-6	0.080	63	62.46	6.05	10.32
-6	0.090	67	66.42	6.03	11.02
-7	0.100	72	71.38	6.00	11.90
-8	0.120	79	78.32	5.95	13.16
-8	0.140	83	82.29	5.90	13.95
-9	0.150	88	87.24	5.88	14.85
-9	0.160	90	89.23	5.85	15.25
-10	0.180	93	92.20	5.80	15.90
-10	0.200	95	94.18	5.75	16.38
-11	0.220	96	95.17	5.70	16.70
-11	0.240	97	96.17	5.65	17.02
-11	0.250	97	96.17	5.63	17.10

Tabla G.13 Resultados de la prueba de corte directo para un 75% de arena Ottawa y 25% de goma triturada a un esfuerzo normal de 30 lbs/pulg<sup>2</sup>

Esfuerzo Normal	30	lb/pulgadas <sup>2</sup>
Constante de Anilla de Carga	0.9914	
Velocidad de Corte	0.8	mm/min

Lectura de Deformación Vertical (x 10 <sup>-3</sup> pulg)	Lectura de Deformación Horizontal (x 10 <sup>-3</sup> pulg)	Lectura Reloj de Carga (x 10 <sup>-4</sup> pulg)	Carga de Corte (lbs)	Área Corregida (pulg <sup>2</sup> )	Esfuerzo Cortante (lbs/pulg <sup>2</sup> )
0	0	0	0.00	6.25	0.00
0	0.005	30	29.74	6.24	4.77
-1	0.010	39	38.66	6.23	6.21
-1	0.015	45	44.61	6.21	7.18
-2	0.020	50	49.57	6.20	8.00
-3	0.025	56	55.52	6.19	8.97
-4	0.030	61	60.48	6.18	9.79
-5	0.040	72	71.38	6.15	11.61
-6	0.050	80	79.31	6.13	12.95
-7	0.060	85	84.27	6.10	13.81
-8	0.070	92	91.21	6.08	15.01
-9	0.080	98	97.16	6.05	16.06
-9	0.090	104	103.11	6.03	17.11
-11	0.100	109	108.06	6.00	18.01
-12	0.120	117	115.99	5.95	19.49
-13	0.140	123	121.94	5.90	20.67
-14	0.150	127	125.91	5.88	21.43
-14	0.160	130	128.88	5.85	22.03
-15	0.180	133	131.86	5.80	22.73
-14	0.200	135	133.84	5.75	23.28
-15	0.220	137	135.82	5.70	23.83
-16	0.240	139	137.80	5.65	24.39
-15	0.250	140	138.80	5.63	24.67

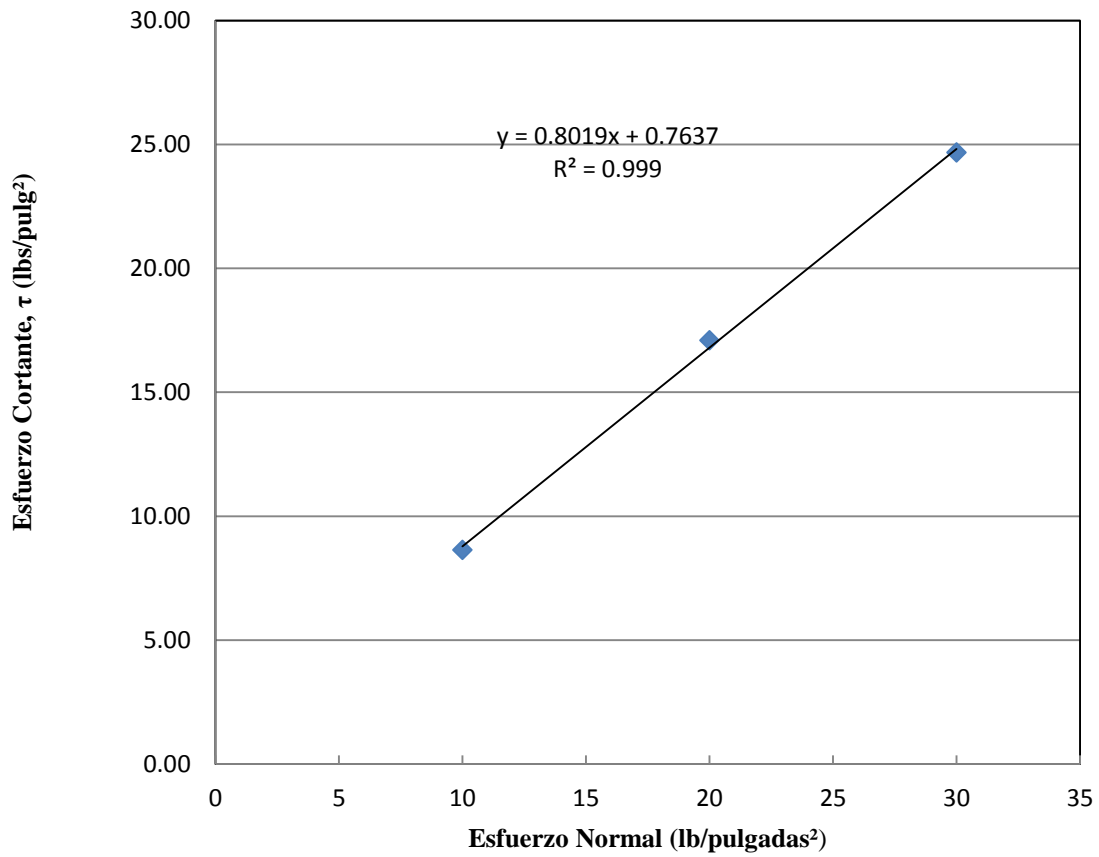


Figura G.10 Envoltente de falla Mohr-Coulomb para muestras de 75% de arena Ottawa y 25% de goma triturada obtenida mediante pruebas de corte directo a grandes desplazamientos (0.25 pulgadas)

Tabla G.14 Resultados de la prueba de corte directo para un 70% de arena Ottawa y 30% de goma triturada a un esfuerzo normal de 10 lbs/pulg<sup>2</sup>

Esfuerzo Normal	10	lb/pulgadas <sup>2</sup>
Constante de Anilla de Carga	0.9914	
Velocidad de Corte	0.8	mm/min

Lectura de Deformación Vertical (x 10 <sup>-3</sup> pulg)	Lectura de Deformación Horizontal (x 10 <sup>-3</sup> pulg)	Lectura Reloj de Carga (x 10 <sup>-4</sup> pulg)	Carga de Corte (lbs)	Área Corregida (pulg <sup>2</sup> )	Esfuerzo Cortante (lbs/pulg <sup>2</sup> )
0	0	0	0	6.25	0.00
0	0.005	7	6.94	6.24	1.11
-1	0.010	9	8.92	6.23	1.43
-1	0.015	11	10.91	6.21	1.76
-1	0.020	14	13.88	6.20	2.24
-2	0.025	17	16.85	6.19	2.72
-2	0.030	19	18.84	6.18	3.05
-3	0.040	23	22.80	6.15	3.71
-3	0.050	26	25.78	6.13	4.21
-4	0.060	28	27.76	6.10	4.55
-5	0.070	30	29.74	6.08	4.90
-5	0.080	32	31.72	6.05	5.24
-5	0.090	34	33.71	6.03	5.59
-6	0.100	35	34.70	6.00	5.78
-6	0.120	37	36.68	5.95	6.17
-7	0.140	39	38.66	5.90	6.55
-7	0.150	40	39.66	5.88	6.75
-7	0.160	41	40.65	5.85	6.95
-8	0.180	42	41.64	5.80	7.18
-8	0.200	44	43.62	5.75	7.59
-8	0.220	45	44.61	5.70	7.83
-8	0.240	46	45.60	5.65	8.07
-8	0.250	46	45.60	5.63	8.11

Tabla G.15 Resultados de la prueba de corte directo para un 70% de arena Ottawa y 30% de goma triturada a un esfuerzo normal de 20 lbs/pulg<sup>2</sup>

Esfuerzo Normal	20	lb/pulgadas <sup>2</sup>
Constante de Anilla de Carga	0.9914	
Velocidad de Corte	0.8	mm/min

Lectura de Deformación Vertical (x 10 <sup>-3</sup> pulg)	Lectura de Deformación Horizontal (x 10 <sup>-3</sup> pulg)	Lectura Reloj de Carga (x 10 <sup>-4</sup> pulg)	Carga de Corte (lbs)	Área Corregida (pulg <sup>2</sup> )	Esfuerzo Cortante (lbs/pulg <sup>2</sup> )
0	0	0	0.00	6.25	0.00
-1	0.005	9	8.92	6.24	1.43
-1	0.010	14	13.88	6.23	2.23
-2	0.015	20	19.83	6.21	3.19
-2	0.020	25	24.79	6.20	4.00
-3	0.025	29	28.75	6.19	4.65
-3	0.030	32	31.72	6.18	5.14
-4	0.040	37	36.68	6.15	5.96
-5	0.050	41	40.65	6.13	6.64
-6	0.060	47	46.60	6.10	7.64
-6	0.070	52	51.55	6.08	8.49
-7	0.080	57	56.51	6.05	9.34
-7	0.090	61	60.48	6.03	10.04
-8	0.100	64	63.45	6.00	10.57
-9	0.120	71	70.39	5.95	11.83
-11	0.140	77	76.34	5.90	12.94
-12	0.150	80	79.31	5.88	13.50
-13	0.160	84	83.28	5.85	14.24
-13	0.180	88	87.24	5.80	15.04
-14	0.200	90	89.23	5.75	15.52
-15	0.220	91	90.22	5.70	15.83
-15	0.240	92	91.21	5.65	16.14
-15	0.250	92	91.21	5.63	16.21

Tabla G.16 Resultados de la prueba de corte directo para un 70% de arena Ottawa y 30% de goma triturada a un esfuerzo normal de 30 lbs/pulg<sup>2</sup>

Esfuerzo Normal	30	lb/pulgadas <sup>2</sup>
Constante de Anilla de Carga	0.9914	
Velocidad de Corte	0.8	mm/min

Lectura de Deformación Vertical (x 10 <sup>-3</sup> pulg)	Lectura de Deformación Horizontal (x 10 <sup>-3</sup> pulg)	Lectura Reloj de Carga (x 10 <sup>-4</sup> pulg)	Carga de Corte (lbs)	Área Corregida (pulg <sup>2</sup> )	Esfuerzo Cortante (lbs/pulg <sup>2</sup> )
0	0	0	0.00	6.25	0.00
-2	0.005	25	24.79	6.24	3.97
-3	0.010	34	33.71	6.23	5.41
-5	0.015	40	39.66	6.21	6.38
-6	0.020	47	46.60	6.20	7.52
-7	0.025	52	51.55	6.19	8.33
-8	0.030	57	56.51	6.18	9.15
-9	0.040	65	64.44	6.15	10.48
-10	0.050	71	70.39	6.13	11.49
-11	0.060	76	75.35	6.10	12.35
-12	0.070	81	80.30	6.08	13.22
-13	0.080	87	86.25	6.05	14.26
-14	0.090	93	92.20	6.03	15.30
-14	0.100	98	97.16	6.00	16.19
-15	0.120	106	105.09	5.95	17.66
-16	0.140	114	113.02	5.90	19.16
-17	0.150	117	115.99	5.88	19.74
-17	0.160	120	118.97	5.85	20.34
-17	0.180	125	123.93	5.80	21.37
-18	0.200	127	125.91	5.75	21.90
-18	0.220	128	126.90	5.70	22.26
-18	0.240	129	127.89	5.65	22.64
-18	0.250	130	128.88	5.63	22.91

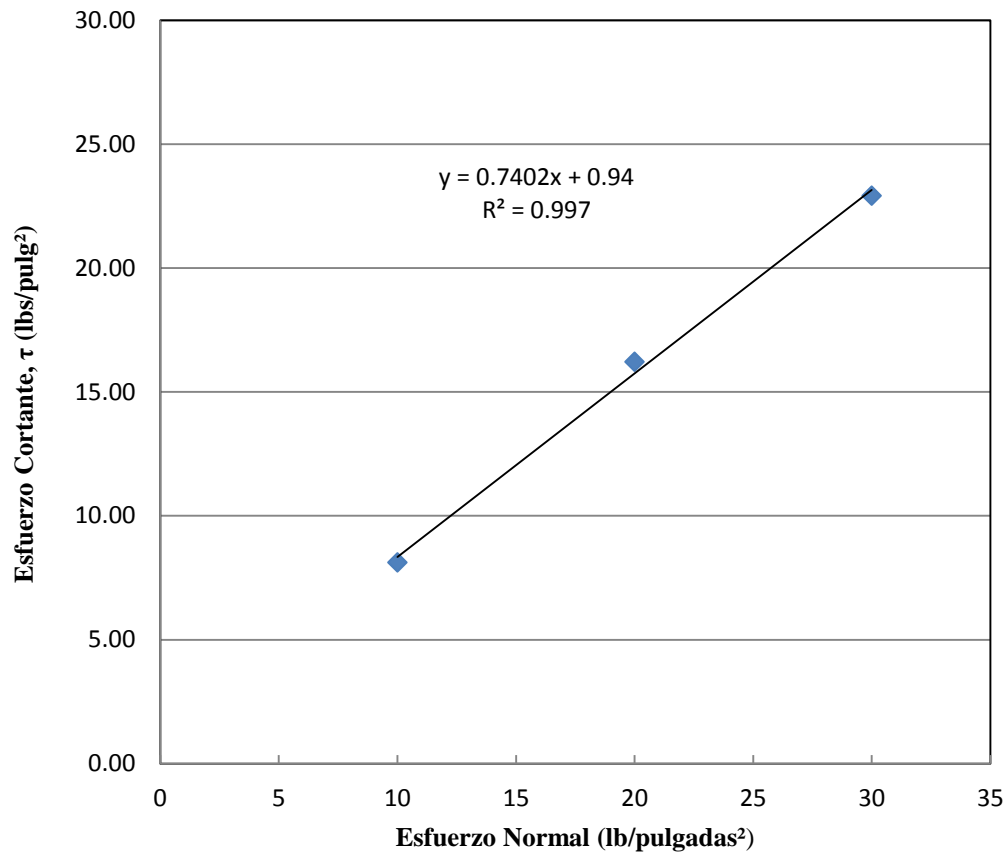


Figura G.11 Envolverte de falla Mohr-Coulomb para muestras de 70% de arena Ottawa y 30% de goma triturada obtenida mediante pruebas de corte directo a grandes desplazamientos (0.25 pulgadas)

Tabla G.17 Resultados de la prueba de corte directo para un 60% de arena Ottawa y 40% de goma triturada a un esfuerzo normal de 10 lbs/pulg<sup>2</sup>

Esfuerzo Normal	10	lb/pulgadas <sup>2</sup>
Constante de Anilla de Carga	0.9914	
Velocidad de Corte	0.8	mm/min

Lectura de Deformación Vertical (x 10 <sup>-3</sup> pulg)	Lectura de Deformación Horizontal (x 10 <sup>-3</sup> pulg)	Lectura Reloj de Carga (x 10 <sup>-4</sup> pulg)	Carga de Corte (lbs)	Área Corregida (pulg <sup>2</sup> )	Esfuerzo Cortante (lbs/pulg <sup>2</sup> )
0	0	0	0	6.25	0.00
0	0.005	5	4.96	6.24	0.79
-1	0.010	7	6.94	6.23	1.11
-2	0.015	10	9.91	6.21	1.60
-2	0.020	12	11.90	6.20	1.92
-3	0.025	14	13.88	6.19	2.24
-3	0.030	17	16.85	6.18	2.73
-4	0.040	20	19.83	6.15	3.22
-5	0.050	23	22.80	6.13	3.72
-5	0.060	25	24.79	6.10	4.06
-6	0.070	27	26.77	6.08	4.41
-7	0.080	30	29.74	6.05	4.92
-8	0.090	31	30.73	6.03	5.10
-8	0.100	33	32.72	6.00	5.45
-8	0.120	35	34.70	5.95	5.83
-9	0.140	37	36.68	5.90	6.22
-9	0.150	38	37.67	5.88	6.41
-9	0.160	39	38.66	5.85	6.61
-10	0.180	40	39.66	5.80	6.84
-10	0.200	42	41.64	5.75	7.24
-10	0.220	44	43.62	5.70	7.65
-10	0.240	45	44.61	5.65	7.90
-10	0.250	46	45.60	5.63	8.11



Tabla G.18 Resultados de la prueba de corte directo para un 60% de arena Ottawa y 40% de goma triturada a un esfuerzo normal de 20 lbs/pulg<sup>2</sup>

Esfuerzo Normal	20	lb/pulgadas <sup>2</sup>
Constante de Anilla de Carga	0.9914	
Velocidad de Corte	0.8	mm/min

Lectura de Deformación Vertical (x 10 <sup>-3</sup> pulg)	Lectura de Deformación Horizontal (x 10 <sup>-3</sup> pulg)	Lectura Reloj de Carga (x 10 <sup>-4</sup> pulg)	Carga de Corte (lbs)	Área Corregida (pulg <sup>2</sup> )	Esfuerzo Cortante (lbs/pulg <sup>2</sup> )
0	0	0	0.00	6.25	0.00
0	0.005	5	4.96	6.24	0.79
-1	0.010	9	8.92	6.23	1.43
-2	0.015	14	13.88	6.21	2.23
-3	0.020	19	18.84	6.20	3.04
-3	0.025	24	23.79	6.19	3.85
-4	0.030	27	26.77	6.18	4.33
-5	0.040	33	32.72	6.15	5.32
-6	0.050	38	37.67	6.13	6.15
-7	0.060	43	42.63	6.10	6.99
-8	0.070	49	48.58	6.08	8.00
-9	0.080	53	52.54	6.05	8.68
-10	0.090	57	56.51	6.03	9.38
-11	0.100	62	61.47	6.00	10.24
-11	0.120	67	66.42	5.95	11.16
-12	0.140	72	71.38	5.90	12.10
-13	0.150	74	73.36	5.88	12.49
-14	0.160	76	75.35	5.85	12.88
-15	0.180	79	78.32	5.80	13.50
-16	0.200	83	82.29	5.75	14.31
-17	0.220	85	84.27	5.70	14.78
-18	0.240	87	86.25	5.65	15.27
-18	0.250	88	87.24	5.63	15.51

Tabla G.19 Resultados de la prueba de corte directo para un 60% de arena Ottawa y 40% de goma triturada a un esfuerzo normal de 30 lbs/pulg<sup>2</sup>

Esfuerzo Normal	30	lb/pulgadas <sup>2</sup>
Constante de Anilla de Carga	0.9914	
Velocidad de Corte	0.8	mm/min

Lectura de Deformación Vertical (x 10 <sup>-3</sup> pulg)	Lectura de Deformación Horizontal (x 10 <sup>-3</sup> pulg)	Lectura Reloj de Carga (x 10 <sup>-4</sup> pulg)	Carga de Corte (lbs)	Área Corregida (pulg <sup>2</sup> )	Esfuerzo Cortante (lbs/pulg <sup>2</sup> )
0	0	0	0.00	6.25	0.00
-2	0.005	13	12.89	6.24	2.07
-5	0.010	25	24.79	6.23	3.98
-7	0.015	32	31.72	6.21	5.11
-8	0.020	37	36.68	6.20	5.92
-9	0.025	42	41.64	6.19	6.73
-10	0.030	47	46.60	6.18	7.55
-11	0.040	53	52.54	6.15	8.54
-12	0.050	59	58.49	6.13	9.55
-13	0.060	64	63.45	6.10	10.40
-15	0.070	70	69.40	6.08	11.42
-16	0.080	77	76.34	6.05	12.62
-17	0.090	83	82.29	6.03	13.66
-18	0.100	89	88.23	6.00	14.71
-19	0.120	98	97.16	5.95	16.33
-19	0.140	106	105.09	5.90	17.81
-20	0.150	109	108.06	5.88	18.39
-20	0.160	112	111.04	5.85	18.98
-20	0.180	115	114.01	5.80	19.66
-21	0.200	117	115.99	5.75	20.17
-21	0.220	119	117.98	5.70	20.70
-22	0.240	122	120.95	5.65	21.41
-22	0.250	123	121.94	5.63	21.68

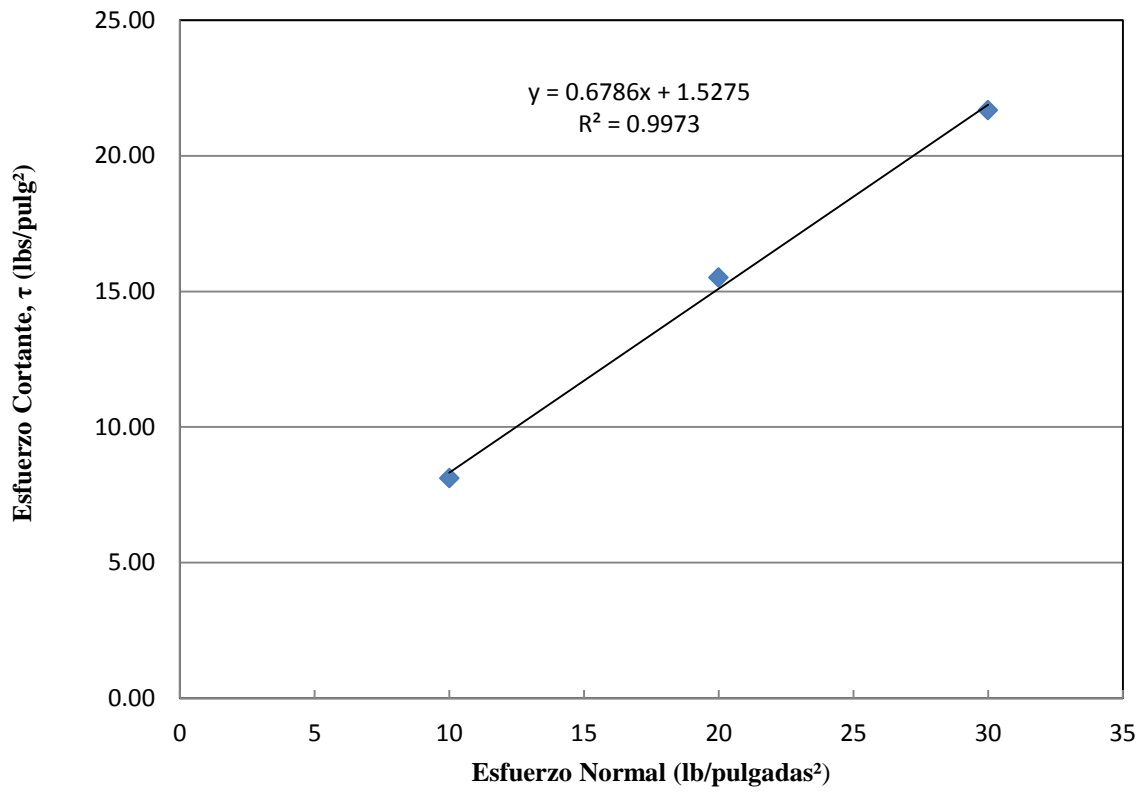


Figura G.12 Envoltente de falla Mohr-Coulomb para muestras de 60% de arena Ottawa y 40% de goma triturada obtenida mediante pruebas de corte directo a grandes desplazamientos (0.25 pulgadas)

Tabla G.17 Resultados de la prueba de corte directo para goma triturada a un esfuerzo normal de 10 lbs/pulg<sup>2</sup>

Esfuerzo Normal	10	lb/pulgadas <sup>2</sup>
Constante de Anilla de Carga	0.9914	
Velocidad de Corte	0.8	mm/min

Lectura de Deformación Vertical (x 10 <sup>-3</sup> pulg)	Lectura de Deformación Horizontal (pulg)	Lectura Reloj de Carga (x 10 <sup>-4</sup> pulg)	Carga de Corte (lbs)	Área Corregida (pulg <sup>2</sup> )	Esfuerzo Cortante (lbs/pulg <sup>2</sup> )
0	0	0	0	6.25	0.00
-1	0.005	3	2.97	6.24	0.48
-1	0.010	4	3.97	6.23	0.64
-2	0.015	7	6.94	6.21	1.12
-3	0.020	9	8.92	6.20	1.44
-3	0.025	10	9.91	6.19	1.60
-3	0.030	12	11.90	6.18	1.93
-5	0.040	14	13.88	6.15	2.26
-6	0.050	15	14.87	6.13	2.43
-7	0.060	16	15.86	6.10	2.60
-8	0.070	18	17.85	6.08	2.94
-9	0.080	19	18.84	6.05	3.11
-9	0.090	20	19.83	6.03	3.29
-10	0.100	21	20.82	6.00	3.47
-11	0.120	23	22.80	5.95	3.83
-11	0.140	25	24.79	5.90	4.20
-12	0.150	26	25.78	5.88	4.39
-13	0.160	27	26.77	5.85	4.58
-14	0.180	28	27.76	5.80	4.79
-15	0.200	29	28.75	5.75	5.00
-16	0.220	31	30.73	5.70	5.39
-17	0.240	32	31.72	5.65	5.62
-17	0.250	33	32.72	5.63	5.82

Tabla G.18 Resultados de la prueba de corte directo para goma triturada a un esfuerzo normal de 20 lbs/pulg<sup>2</sup>

Esfuerzo Normal	20	lb/pulgadas <sup>2</sup>
Constante de Anilla de Carga	0.9914	
Velocidad de Corte	0.8	mm/min

Lectura de Deformación Vertical (x 10 <sup>-3</sup> pulg)	Lectura de Deformación Horizontal (pulg)	Lectura Reloj de Carga (x 10 <sup>-4</sup> pulg)	Carga de Corte (lbs)	Área Corregida (pulg <sup>2</sup> )	Esfuerzo Cortante (lbs/pulg <sup>2</sup> )
0	0	0	0.00	6.25	0.00
-1	0.005	7	6.94	6.24	1.11
-3	0.010	9	8.92	6.23	1.43
-4	0.015	13	12.89	6.21	2.07
-5	0.020	15	14.87	6.20	2.40
-6	0.025	17	16.85	6.19	2.72
-6	0.030	19	18.84	6.18	3.05
-7	0.040	23	22.80	6.15	3.71
-9	0.050	27	26.77	6.13	4.37
-10	0.060	31	30.73	6.10	5.04
-11	0.070	34	33.71	6.08	5.55
-13	0.080	36	35.69	6.05	5.90
-14	0.090	39	38.66	6.03	6.42
-15	0.100	42	41.64	6.00	6.94
-17	0.120	45	44.61	5.95	7.50
-18	0.140	49	48.58	5.90	8.23
-19	0.150	52	51.55	5.88	8.77
-20	0.160	55	54.53	5.85	9.32
-21	0.180	56	55.52	5.80	9.57
-22	0.200	58	57.50	5.75	10.00
-23	0.220	60	59.48	5.70	10.44
-24	0.240	62	61.47	5.65	10.88
-25	0.250	63	62.46	5.63	11.10

Tabla G.19 Resultados de la prueba de corte directo para goma triturada a un esfuerzo normal de 30 lbs/pulg<sup>2</sup>

Esfuerzo Normal	30	lb/pulgadas <sup>2</sup>
Constante de Anilla de Carga	0.9914	
Velocidad de Corte	0.8	mm/min

Lectura de Deformación Vertical (x 10 <sup>-3</sup> pulg)	Lectura de Deformación Horizontal (pulg)	Lectura Reloj de Carga (x 10 <sup>-4</sup> pulg)	Carga de Corte (lbs)	Área Corregida (pulg <sup>2</sup> )	Esfuerzo Cortante (lbs/pulg <sup>2</sup> )
0	0	0	0.00	6.25	0.00
-2	0.005	12	11.90	6.24	1.91
-4	0.010	16	15.86	6.23	2.55
-6	0.015	20	19.83	6.21	3.19
-9	0.020	25	24.79	6.20	4.00
-11	0.025	27	26.77	6.19	4.33
-13	0.030	29	28.75	6.18	4.66
-14	0.040	32	31.72	6.15	5.16
-15	0.050	37	36.68	6.13	5.99
-17	0.060	40	39.66	6.10	6.50
-19	0.070	44	43.62	6.08	7.18
-21	0.080	50	49.57	6.05	8.19
-22	0.090	55	54.53	6.03	9.05
-23	0.100	59	58.49	6.00	9.75
-23	0.120	63	62.46	5.95	10.50
-24	0.140	67	66.42	5.90	11.26
-25	0.150	70	69.40	5.88	11.81
-26	0.160	72	71.38	5.85	12.20
-27	0.180	76	75.35	5.80	12.99
-28	0.200	78	77.33	5.75	13.45
-29	0.220	81	80.30	5.70	14.09
-30	0.240	82	81.29	5.65	14.39
-30	0.250	82	81.29	5.63	14.45

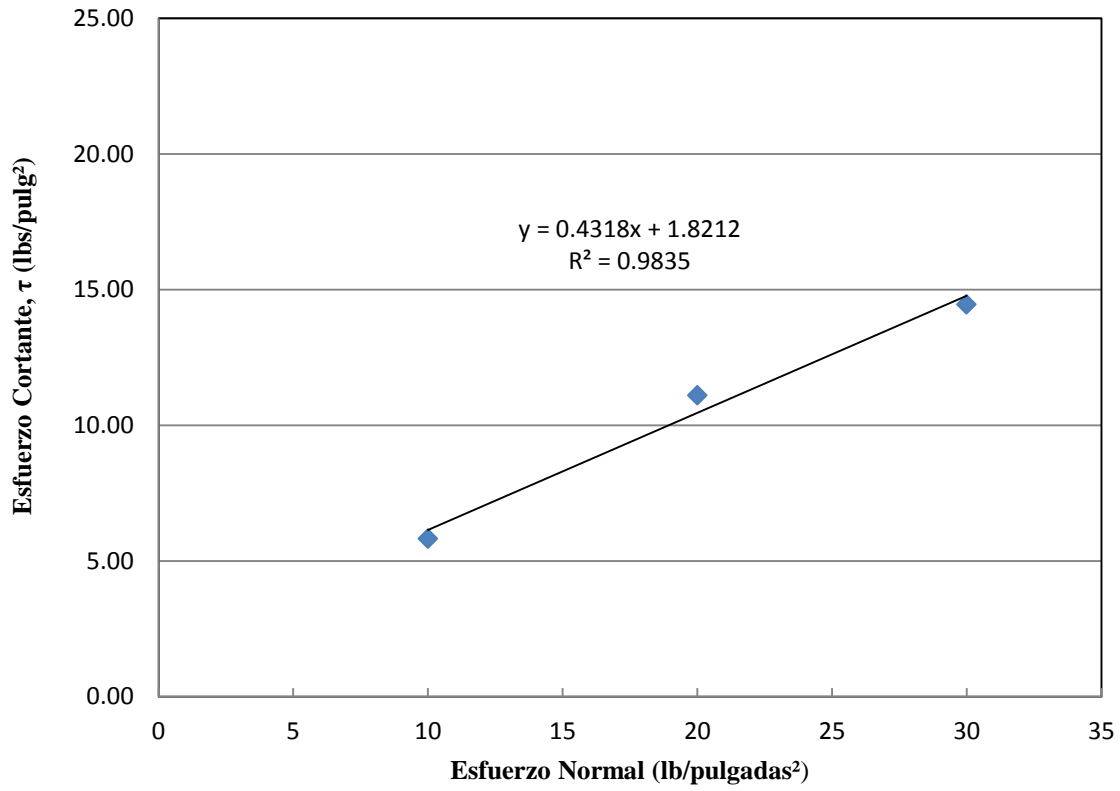


Figura G.12 Envoltente de falla Mohr-Coulomb para muestras de goma triturada obtenida mediante pruebas de corte directo a grandes desplazamientos (0.25 pulgadas)

## APÉNDICE H – TRIAXIAL

Tabla H.1 Resultados de la prueba triaxial para un esfuerzo de confinamiento de 10 lbs/pulg<sup>2</sup> para la arena Ottawa

Esfuerzo de Cámara ( $\sigma_3$ )	10	lbs/pulgada <sup>2</sup>
Constante de Anilla de Carga	0.76969	
Velocidad de Corte	1	mm/min
Altura inicial de la muestra	4.86	pulg
Diámetro de la muestra	1.98	pulg
Área inicial de la muestra	3.08	pulg <sup>2</sup>
Módulo Tangente Inicial	2598	lbs/pulg <sup>2</sup>

Lectura de Deformación $\Delta L$ (pulg)	Deformación Unitaria $\epsilon = \Delta L / L_0$	Deformación anilla de carga Carga ( $\times 10^{-4}$ pulg)	Carga sobre la muestra (lbs)	Área Corregida (pulg <sup>2</sup> )	Diferencia de Esfuerzos $\Delta\sigma = P/A$ (lbs/pulg <sup>2</sup> )
0.000	0	0	0.00	0	0
0.012	0.25	65	50.03	3.09	16.21
0.024	0.50	85	65.42	3.09	21.14
0.036	0.75	97	74.66	3.10	24.07
0.049	1.00	105	80.82	3.11	25.98
0.073	1.50	119	91.59	3.13	29.30
0.097	2.00	129	99.29	3.14	31.60
0.122	2.50	138	106.22	3.16	33.63
0.146	3.00	144	110.84	3.17	34.92
0.170	3.50	147	113.14	3.19	35.46
0.194	4.00	148	113.91	3.21	35.52
0.219	4.50	147	113.14	3.22	35.09
0.243	5.00	145	111.61	3.24	34.43
0.292	6.00	135	103.91	3.28	31.72
0.389	8.00	115	88.51	3.35	26.45
0.486	10.00	102	78.51	3.42	22.95
0.583	12.00	95	73.12	3.50	20.90
0.680	14.00	95	73.12	3.58	20.42
0.778	16.00	95	73.12	3.67	19.95
0.875	18.00	95	73.12	3.75	19.47
0.972	20.00	95	73.12	3.85	19.00



Tabla H.2 Resultados de la prueba triaxial para un esfuerzo de confinamiento de 20 lbs/pulg<sup>2</sup> para la arena Ottawa

Esfuerzo de Cámara ( $\sigma_3$ )	20	lbs/pulgada <sup>2</sup>
Constante de Anilla de Carga	0.76969	
Velocidad de Corte	1	mm/min
Altura inicial de la muestra	4.79	pulg
Diámetro de la muestra	1.99	pulg
Área inicial de la muestra	3.11	pulg <sup>2</sup>
Módulo Tangente Inicial	5463	lbs/pulg <sup>2</sup>

Lectura de Deformación $\Delta L$ (pulg)	Deformación Unitaria $\epsilon = \Delta L / L_0$	Deformación anilla de carga Carga ( $\times 10^{-4}$ pulg)	Carga sobre la muestra (lbs)	Área Corregida (pulg <sup>2</sup> )	Diferencia de Esfuerzos $\Delta\sigma = P/A$ (lbs/pulg <sup>2</sup> )
0.000	0	0	0.00	0	0
0.012	0.25	139	106.99	3.12	34.31
0.024	0.50	180	138.54	3.13	44.32
0.036	0.75	201	154.71	3.13	49.37
0.049	1.00	223	171.64	3.14	54.63
0.073	1.50	249	191.65	3.16	60.70
0.097	2.00	268	206.28	3.17	65.00
0.122	2.50	280	215.51	3.19	67.56
0.146	3.00	285	219.36	3.21	68.41
0.170	3.50	287	220.90	3.22	68.54
0.194	4.00	286	220.13	3.24	67.94
0.219	4.50	285	219.36	3.26	67.35
0.243	5.00	280	215.51	3.27	65.83
0.292	6.00	265	203.97	3.31	61.64
0.389	8.00	247	190.11	3.38	56.23
0.486	10.00	236	181.65	3.46	52.56
0.583	12.00	228	175.49	3.53	49.65
0.680	14.00	225	173.18	3.62	47.89
0.778	16.00	226	173.95	3.70	46.98
0.875	18.00	225	173.18	3.79	45.66
0.972	20.00	225	173.18	3.89	44.54

Tabla H.3 Resultados de la prueba triaxial para un esfuerzo de confinamiento de 30 lbs/pulg<sup>2</sup> para la arena Ottawa

Esfuerzo de Cámara ( $\sigma_3$ )	30	lbs/pulgada <sup>2</sup>
Constante de Anilla de Carga	0.76969	
Velocidad de Corte	1	mm/min
Altura inicial de la muestra	4.91	pulg
Diámetro de la muestra	1.97	pulg
Área inicial de la muestra	3.05	pulg <sup>2</sup>
Módulo Tangente Inicial	8425	lbs/pulg <sup>2</sup>

Lectura de Deformación $\Delta L$ (pulg)	Deformación Unitaria $\epsilon = \Delta L/L_0$	Deformación anilla de carga Carga ( $\times 10^{-4}$ pulg)	Carga sobre la muestra (lbs)	Área Corregida (pulg <sup>2</sup> )	Diferencia de Esfuerzos $\Delta\sigma = P/A$ (lbs/pulg <sup>2</sup> )
0.00	0	0	0	0	0
0.01	0.25	200	153.94	3.06	50.38
0.02	0.50	270	207.82	3.06	67.84
0.04	0.75	309	237.83	3.07	77.44
0.05	1.00	337	259.39	3.08	84.25
0.07	1.50	380	292.48	3.09	94.52
0.10	2.00	410	315.57	3.11	101.46
0.12	2.50	430	330.97	3.13	105.87
0.15	3.00	442	340.20	3.14	108.26
0.17	3.50	445	342.51	3.16	108.44
0.19	4.00	445	342.51	3.18	107.88
0.22	4.50	443	340.97	3.19	106.83
0.24	5.00	435	334.82	3.21	104.35
0.29	6.00	415	319.42	3.24	98.51
0.39	8.00	379	291.71	3.31	88.05
0.49	10.00	360	277.09	3.39	81.82
0.58	12.00	355	273.24	3.46	78.89
0.68	14.00	353	271.70	3.54	76.66
0.78	16.00	354	272.47	3.63	75.09
0.87	18.00	353	271.70	3.72	73.09
0.97	20.00	352	270.93	3.81	71.11

Tabla H.4 Resultados de la prueba triaxial para goma triturada a un esfuerzo normal de 10 lbs/pulg<sup>2</sup>

Esfuerzo de Cámara ( $\sigma_3$ )	10	lbs/pulgada <sup>2</sup>
Constante de Anilla de Carga	0.76969	
Velocidad de Corte	1	mm/min
Altura inicial de la muestra	4.22	pulg
Diámetro de la muestra	1.87	pulg
Área inicial de la muestra	2.75	pulg <sup>2</sup>
Módulo Tangente Inicial	127	lbs/pulg <sup>2</sup>

Lectura de Deformación $\Delta L$ (pulg)	Deformación Unitaria $\epsilon = \Delta L / L_0$	Deformación anilla de carga Carga ( $\times 10^{-4}$ pulg)	Carga sobre la muestra (lbs)	Área Corregida (pulg <sup>2</sup> )	Diferencia de Esfuerzos $\Delta\sigma = P/A$ (lbs/pulg <sup>2</sup> )
0.000	0	0	0.00	0	0
0.011	0.25	2	1.54	2.75	0.56
0.021	0.50	3	2.31	2.76	0.84
0.032	0.75	4	3.08	2.77	1.11
0.042	1.00	6	4.62	2.77	1.66
0.063	1.50	8	6.16	2.79	2.21
0.084	2.00	10	7.70	2.80	2.75
0.106	2.50	12	9.24	2.82	3.28
0.127	3.00	14	10.78	2.83	3.81
0.148	3.50	16	12.32	2.85	4.33
0.169	4.00	18	13.85	2.86	4.84
0.190	4.50	20	15.39	2.88	5.35
0.211	5.00	22	16.93	2.89	5.86
0.253	6.00	25	19.24	2.92	6.59
0.338	8.00	32	24.63	2.99	8.25
0.422	10.00	40	30.79	3.05	10.09
0.506	12.00	50	38.48	3.12	12.33
0.591	14.00	59	45.41	3.19	14.22
0.675	16.00	67	51.57	3.27	15.77
0.760	18.00	76	58.50	3.35	17.47
0.844	20.00	85	65.42	3.43	19.06

Tabla H.5 Resultados de la prueba triaxial para goma triturada a un esfuerzo normal de 20 lbs/pulg<sup>2</sup>

Esfuerzo de Cámara ( $\sigma$ )	20	lbs/pulgada <sup>2</sup>
Constante de Anilla de Carga	0.76969	
Velocidad de Corte	1	mm/min
Altura inicial de la muestra	4.24	pulg
Diámetro de la muestra	1.88	pulg
Área inicial de la muestra	2.78	pulg <sup>2</sup>
Módulo Tangente Inicial	224	lbs/pulg <sup>2</sup>

Lectura de Deformación $\Delta L$ (pulg)	Deformación Unitaria $\epsilon = \Delta L / L_0$	Deformación anilla de carga Carga (x $10^{-4}$ pulg)	Carga sobre la muestra (lbs)	Área Corregida (pulg <sup>2</sup> )	Diferencia de Esfuerzos $\Delta\sigma = P/A$ (lbs/pulg <sup>2</sup> )
0.000	0	0	0.00	0	0
0.011	0.25	2	1.54	2.78	0.55
0.021	0.50	5	3.85	2.79	1.38
0.032	0.75	7	5.39	2.80	1.93
0.042	1.00	8	6.16	2.80	2.20
0.063	1.50	12	9.24	2.82	3.28
0.084	2.00	16	12.32	2.83	4.35
0.106	2.50	20	15.39	2.85	5.41
0.127	3.00	25	19.24	2.86	6.72
0.148	3.50	29	22.32	2.88	7.76
0.169	4.00	34	26.17	2.89	9.05
0.190	4.50	39	30.02	2.91	10.33
0.211	5.00	43	33.10	2.92	11.33
0.253	6.00	52	40.02	2.95	13.55
0.338	8.00	67	51.57	3.02	17.09
0.422	10.00	80	61.58	3.08	19.96
0.506	12.00	95	73.12	3.15	23.18
0.591	14.00	107	82.36	3.23	25.51
0.675	16.00	120	92.36	3.30	27.95
0.760	18.00	136	104.68	3.39	30.92
0.844	20.00	152	116.99	3.47	33.72

Tabla H.6 Resultados de la prueba triaxial para goma triturada a un esfuerzo normal de 30 lbs/pulg<sup>2</sup>

Esfuerzo de Cámara ( $\sigma_3$ )	30	lbs/pulgada <sup>2</sup>
Constante de Anilla de Carga	0.76969	
Velocidad de Corte	1	mm/min
Altura inicial de la muestra	4.13	pulg
Diámetro de la muestra	1.91	pulg
Área inicial de la muestra	2.87	pulg <sup>2</sup>
Módulo Tangente Inicial	321	lbs/pulg <sup>2</sup>

Lectura de Deformación $\Delta L$ (pulg)	Deformación Unitaria $\epsilon = \Delta L/L_0$	Deformación anilla de carga Carga (x $10^{-4}$ pulg)	Carga sobre la muestra (lbs)	Área Corregida (pulg <sup>2</sup> )	Diferencia de Esfuerzos $\Delta\sigma = P/A$ (lbs/pulg <sup>2</sup> )
0.000	0	0	0	0	0
0.011	0.25	4	3.08	2.87	1.07
0.021	0.50	8	6.16	2.88	2.14
0.032	0.75	12	9.24	2.89	3.20
0.042	1.00	15	11.55	2.89	3.99
0.063	1.50	21	16.16	2.91	5.56
0.084	2.00	26	20.01	2.92	6.84
0.106	2.50	32	24.63	2.94	8.38
0.127	3.00	37	28.48	2.95	9.64
0.148	3.50	44	33.87	2.97	11.41
0.169	4.00	49	37.71	2.98	12.64
0.190	4.50	55	42.33	3.00	14.11
0.211	5.00	61	46.95	3.02	15.57
0.253	6.00	74	56.96	3.05	18.69
0.338	8.00	92	70.81	3.11	22.74
0.422	10.00	109	83.90	3.18	26.35
0.506	12.00	127	97.75	3.26	30.02
0.591	14.00	149	114.68	3.33	34.42
0.675	16.00	170	130.85	3.41	38.36
0.760	18.00	190	146.24	3.49	41.85
0.844	20.00	210	161.63	3.58	45.13

Tabla H.7 Resultados de la prueba triaxial para un 10% de goma triturada y 90% de arena Ottawa a un esfuerzo normal de 10 lbs/pulg<sup>2</sup>

Esfuerzo de Cámara ( $\sigma_3$ )	10	lbs/pulgada <sup>2</sup>
Constante de Anilla de Carga	0.76969	
Velocidad de Corte	1	mm/min
Altura inicial de la muestra	4.27	pulg
Diámetro de la muestra	1.97	pulg
Área inicial de la muestra	3.05	pulg <sup>2</sup>
Módulo Tangente Inicial	1575	lbs/pulg <sup>2</sup>

Lectura de Deformación $\Delta L$ (pulg)	Deformación Unitaria $\epsilon = \Delta L / L_0$	Deformación anilla de carga Carga (x $10^{-4}$ pulg)	Carga sobre la muestra (lbs)	Área Corregida (pulg <sup>2</sup> )	Diferencia de Esfuerzos $\Delta\sigma = P/A$ (lbs/pulg <sup>2</sup> )
0.000	0	0	0.00	0	0
0.011	0.25	33	25.40	3.06	8.31
0.021	0.50	44	33.87	3.06	11.06
0.032	0.75	53	40.79	3.07	13.28
0.043	1.00	63	48.49	3.08	15.75
0.064	1.50	77	59.27	3.09	19.15
0.085	2.00	87	66.96	3.11	21.53
0.107	2.50	95	73.12	3.13	23.39
0.128	3.00	104	80.05	3.14	25.47
0.149	3.50	113	86.97	3.16	27.54
0.171	4.00	122	93.90	3.18	29.57
0.192	4.50	129	99.29	3.19	31.11
0.214	5.00	135	103.91	3.21	32.39
0.256	6.00	145	111.61	3.24	34.42
0.342	8.00	163	125.46	3.31	37.87
0.427	10.00	177	136.24	3.39	40.23
0.512	12.00	193	148.55	3.46	42.89
0.598	14.00	209	160.87	3.54	45.39
0.683	16.00	219	168.56	3.63	46.45
0.769	18.00	231	177.80	3.72	47.83
0.854	20.00	240	184.73	3.81	48.48

Tabla H.8 Resultados de la prueba triaxial para un 10% de arena Ottawa y 90% de goma triturada a un esfuerzo normal de 20 lbs/pulg<sup>2</sup>

Esfuerzo de Cámara ( $\sigma_3$ )	20	lbs/pulgada <sup>2</sup>
Constante de Anilla de Carga	0.76969	
Velocidad de Corte	1	mm/min
Altura inicial de la muestra	4.23	pulg
Diámetro de la muestra	1.97	pulg
Área inicial de la muestra	3.05	pulg <sup>2</sup>
Módulo Tangente Inicial	2800	lbs/pulg <sup>2</sup>

Lectura de Deformación $\Delta L$ (pulg)	Deformación Unitaria $\epsilon = \Delta L / L_0$	Deformación anilla de carga Carga ( $\times 10^{-4}$ pulg)	Carga sobre la muestra (lbs)	Área Corregida (pulg <sup>2</sup> )	Diferencia de Esfuerzos $\Delta\sigma = P/A$ (lbs/pulg <sup>2</sup> )
0.000	0	0	0.00	0	0
0.011	0.25	57	43.87	3.06	14.36
0.021	0.50	78	60.04	3.06	19.60
0.032	0.70	99	76.20	3.07	24.81
0.043	1.0	112	86.21	3.08	28.00
0.064	1.50	133	102.37	3.09	33.08
0.085	2.00	153	117.76	3.11	37.86
0.107	2.50	169	130.08	3.13	41.61
0.128	3.00	189	145.47	3.14	46.29
0.149	3.50	204	157.02	3.16	49.71
0.171	4.00	220	169.33	3.18	53.33
0.192	4.50	234	180.11	3.19	56.43
0.214	5.00	249	191.65	3.21	59.73
0.256	6.00	277	213.20	3.24	65.75
0.342	8.00	315	242.45	3.31	73.18
0.427	10.00	348	267.85	3.39	79.09
0.512	12.00	373	287.09	3.46	82.89
0.598	14.00	397	305.57	3.54	86.21
0.683	16.00	420	323.27	3.63	89.09
0.769	18.00	439	337.89	3.72	90.90
0.854	20.00	457	351.75	3.81	92.32

Tabla H.9 Resultados de la prueba triaxial para un 10% de arena Ottawa y 90% de goma triturada a un esfuerzo normal de 30 lbs/pulg<sup>2</sup>

Esfuerzo de Cámara ( $\sigma_3$ )	30	lbs/pulgada <sup>2</sup>
Constante de Anilla de Carga	0.76969	
Velocidad de Corte	1	mm/min
Altura inicial de la muestra	4.31	pulg
Diámetro de la muestra	1.96	pulg
Área inicial de la muestra	3.02	pulg <sup>2</sup>
Módulo Tangente Inicial	3384	lbs/pulg <sup>2</sup>

Lectura de Deformación $\Delta L$ (pulg)	Deformación Unitaria $\epsilon = \Delta L / L_0$	Deformación anilla de carga Carga ( $\times 10^{-4}$ pulg)	Carga sobre la muestra (lbs)	Área Corregida (pulg <sup>2</sup> )	Diferencia de Esfuerzos $\Delta\sigma = P/A$ (lbs/pulg <sup>2</sup> )
0.000	0	0	0	0	0
0.011	0.25	69	53.11	3.02	17.56
0.021	0.50	101	77.74	3.03	25.64
0.032	0.75	118	90.82	3.04	29.88
0.043	1.00	134	103.14	3.05	33.84
0.064	1.50	166	127.77	3.06	41.71
0.085	2.00	188	144.70	3.08	47.00
0.107	2.50	210	161.63	3.09	52.23
0.128	3.00	229	176.26	3.11	56.67
0.149	3.50	247	190.11	3.13	60.80
0.171	4.00	265	203.97	3.14	64.90
0.192	4.50	283	217.82	3.16	68.95
0.214	5.00	303	233.22	3.18	73.43
0.256	6.00	337	259.39	3.21	80.81
0.342	8.00	391	300.95	3.28	91.77
0.427	10.00	441	339.43	3.35	101.25
0.512	12.00	487	374.84	3.43	109.33
0.598	14.00	522	401.78	3.51	114.52
0.683	16.00	553	425.64	3.59	118.50
0.769	18.00	581	447.19	3.68	121.54
0.854	20.00	597	459.50	3.77	121.84



Tabla H.10 Resultados de la prueba triaxial para un 20% de goma triturada y 80% de arena Ottawa a un esfuerzo normal de 10 lbs/pulg<sup>2</sup>

Esfuerzo de Cámara ( $\sigma_3$ )	10	lbs/pulgada <sup>2</sup>
Constante de Anilla de Carga	0.76969	
Velocidad de Corte	1	mm/min
Altura inicial de la muestra	4.28	pulg
Diámetro de la muestra	1.96	pulg
Área inicial de la muestra	3.02	pulg <sup>2</sup>
Módulo Tangente Inicial	1237	lbs/pulg <sup>2</sup>

Lectura de Deformación $\Delta L$ (pulg)	Deformación Unitaria $\epsilon = \Delta L / L_0$	Deformación anilla de carga Carga ( $\times 10^{-4}$ pulg)	Carga sobre la muestra (lbs)	Área Corregida (pulg <sup>2</sup> )	Diferencia de Esfuerzos $\Delta\sigma = P/A$ (lbs/pulg <sup>2</sup> )
0.000	0	0	0.00	0	0
0.011	0.25	25	19.24	3.02	6.36
0.021	0.50	35	26.94	3.03	8.88
0.032	0.75	43	33.10	3.04	10.89
0.043	1.00	49	37.71	3.05	12.37
0.064	1.50	59	45.41	3.06	14.83
0.086	2.00	66	50.80	3.08	16.50
0.107	2.50	74	56.96	3.09	18.41
0.128	3.00	81	62.34	3.11	20.04
0.150	3.50	88	67.73	3.13	21.66
0.171	4.00	94	72.35	3.14	23.02
0.193	4.50	99	76.20	3.16	24.12
0.214	5.00	105	80.82	3.18	25.45
0.257	6.00	115	88.51	3.21	27.58
0.342	8.00	133	102.37	3.28	31.21
0.428	10.00	151	116.22	3.35	34.67
0.514	12.00	164	126.23	3.43	36.82
0.599	14.00	177	136.24	3.51	38.83
0.685	16.00	188	144.70	3.59	40.29
0.770	18.00	199	153.17	3.68	41.63
0.856	20.00	209	160.87	3.77	42.65

Tabla H.11 Resultados de la prueba triaxial para un 20% de arena Ottawa y 80% de goma triturada a un esfuerzo normal de 20 lbs/pulg<sup>2</sup>

Esfuerzo de Cámara ( $\sigma_3$ )	20	lbs/pulgada <sup>2</sup>
Constante de Anilla de Carga	0.76969	
Velocidad de Corte	1	mm/min
Altura inicial de la muestra	4.24	pulg
Diámetro de la muestra	1.98	pulg
Área inicial de la muestra	3.08	pulg <sup>2</sup>
Módulo Tangente Inicial	2351	lbs/pulg <sup>2</sup>

Lectura de Deformación $\Delta L$ (pulg)	Deformación Unitaria $\epsilon = \Delta L/L_0$	Deformación anilla de carga Carga ( $\times 10^{-4}$ pulg)	Carga sobre la muestra (lbs)	Área Corregida (pulg <sup>2</sup> )	Diferencia de Esfuerzos $\Delta\sigma = P/A$ (lbs/pulg <sup>2</sup> )
0.000	0	0	0.00	0	0
0.011	0.25	47	36.18	3.09	11.72
0.021	0.50	69	53.11	3.09	17.16
0.032	0.75	83	63.88	3.10	20.59
0.043	1.00	95	73.12	3.11	23.51
0.064	1.50	118	90.82	3.13	29.05
0.086	2.00	135	103.91	3.14	33.07
0.107	2.50	151	116.22	3.16	36.80
0.128	3.00	167	128.54	3.17	40.49
0.150	3.50	183	140.85	3.19	44.14
0.171	4.00	196	150.86	3.21	47.04
0.193	4.50	210	161.63	3.22	50.13
0.214	5.00	222	170.87	3.24	52.72
0.257	6.00	245	188.57	3.28	57.57
0.342	8.00	278	213.97	3.35	63.93
0.428	10.00	309	237.83	3.42	69.52
0.514	12.00	339	260.92	3.50	74.57
0.599	14.00	367	282.48	3.58	78.90
0.685	16.00	390	300.18	3.67	81.89
0.770	18.00	410	315.57	3.75	84.04
0.856	20.00	431	331.74	3.85	86.19

Tabla H.12 Resultados de la prueba triaxial para un 20% de arena Ottawa y 80% de goma triturada a un esfuerzo normal de 30 lbs/pulg<sup>2</sup>

Esfuerzo de Cámara ( $\sigma_3$ )	30	lbs/pulgada <sup>2</sup>
Constante de Anilla de Carga	0.76969	
Velocidad de Corte	1	mm/min
Altura inicial de la muestra	4.31	pulg
Diámetro de la muestra	1.96	pulg
Área inicial de la muestra	3.02	pulg <sup>2</sup>
Módulo Tangente Inicial	2829	lbs/pulg <sup>2</sup>

Lectura de Deformación $\Delta L$ (pulg)	Deformación Unitaria $\epsilon = \Delta L / L_0$	Deformación anilla de carga Carga (x $10^{-4}$ pulg)	Carga sobre la muestra (lbs)	Área Corregida (pulg <sup>2</sup> )	Diferencia de Esfuerzos $\Delta\sigma = P/A$ (lbs/pulg <sup>2</sup> )
0.000	0	0	0	0	0
0.011	0.25	55	42.33	3.02	14.00
0.021	0.50	78	60.04	3.03	19.80
0.032	0.75	93	71.58	3.04	23.55
0.043	1.00	112	86.21	3.05	28.29
0.064	1.5	135	103.91	3.06	33.92
0.086	2.00	155	119.30	3.08	38.75
0.107	2.50	175	134.70	3.09	43.53
0.128	3.00	193	148.55	3.11	47.76
0.150	3.50	209	160.87	3.13	51.45
0.171	4.00	223	171.64	3.14	54.61
0.193	4.50	238	183.19	3.16	57.98
0.214	5.00	255	196.27	3.18	61.80
0.257	6.00	286	220.13	3.21	68.58
0.342	8.00	339	260.92	3.28	79.56
0.428	10.00	385	296.33	3.35	88.39
0.514	12.00	424	326.35	3.43	95.18
0.599	14.00	459	353.29	3.51	100.70
0.685	16.00	493	379.46	3.59	105.64
0.770	18.00	524	403.32	3.68	109.61
0.856	20.00	545	419.48	3.77	111.22

Tabla H.13 Resultados de la prueba triaxial para un 25% goma triturada y 75% de arena Ottawa a un esfuerzo normal de 10 lbs/pulg<sup>2</sup>

Esfuerzo de Cámara ( $\sigma_3$ )	10	lbs/pulgada <sup>2</sup>
Constante de Anilla de Carga	0.76969	
Velocidad de Corte	1	mm/min
Altura inicial de la muestra	4.17	pulg
Diámetro de la muestra	1.96	pulg
Área inicial de la muestra	3.02	pulg <sup>2</sup>
Módulo Tangente Inicial	985	lbs/pulg <sup>2</sup>

Lectura de Deformación $\Delta L$ (pulg)	Deformación Unitaria $\epsilon = \Delta L / L_0$	Deformación anilla de carga Carga (x $10^{-4}$ pulg)	Carga sobre la muestra (lbs)	Área Corregida (pulg <sup>2</sup> )	Diferencia de Esfuerzos $\Delta\sigma = P/A$ (lbs/pulg <sup>2</sup> )
0.000	0	0	0.00	0	0
0.010	0.25	18	13.85	3.02	4.58
0.021	0.50	27	20.78	3.03	6.85
0.031	0.75	33	25.40	3.04	8.36
0.042	1.00	39	30.02	3.05	9.85
0.063	1.50	48	36.95	3.06	12.06
0.083	2.00	57	43.87	3.08	14.25
0.104	2.50	64	49.26	3.09	15.92
0.125	3.00	71	54.65	3.11	17.57
0.146	3.50	78	60.04	3.13	19.20
0.167	4.00	84	64.65	3.14	20.57
0.188	4.50	89	68.50	3.16	21.68
0.209	5.00	95	73.12	3.18	23.02
0.250	6.00	104	80.05	3.21	24.94
0.334	8.00	119	91.59	3.28	27.93
0.417	10.00	133	102.37	3.35	30.54
0.500	12.00	147	113.14	3.43	33.00
0.584	14.00	159	122.38	3.51	34.88
0.667	16.00	173	133.16	3.59	37.07
0.751	18.00	187	143.93	3.68	39.12
0.834	20.00	197	151.63	3.77	40.20

Tabla H.14 Resultados de la prueba triaxial para un 25% de arena Ottawa y 75% de goma triturada a un esfuerzo normal de 20 lbs/pulg<sup>2</sup>

Esfuerzo de Cámara ( $\sigma_3$ )	20	lbs/pulgada <sup>2</sup>
Constante de Anilla de Carga	0.76969	
Velocidad de Corte	1	mm/min
Altura inicial de la muestra	4.24	pulg
Diámetro de la muestra	1.95	pulg
Área inicial de la muestra	2.99	pulg <sup>2</sup>
Módulo Tangente Inicial	2016	lbs/pulg <sup>2</sup>

Lectura de Deformación $\Delta L$ (pulg)	Deformación Unitaria $\epsilon = \Delta L / L_0$	Deformación anilla de carga Carga ( $\times 10^{-4}$ pulg)	Carga sobre la muestra (lbs)	Área Corregida (pulg <sup>2</sup> )	Diferencia de Esfuerzos $\Delta\sigma = P/A$ (lbs/pulg <sup>2</sup> )
0.000	0	0	0.00	0	0
0.010	0.25	36	27.71	2.99	9.25
0.021	0.50	55	42.33	3.00	14.10
0.031	0.75	67	51.57	3.01	17.14
0.042	1.00	79	60.81	3.02	20.16
0.063	1.50	97	74.66	3.03	24.62
0.083	2.00	111	85.44	3.05	28.04
0.104	2.50	123	94.67	3.06	30.91
0.125	3.00	134	103.14	3.08	33.50
0.146	3.50	145	111.61	3.09	36.06
0.167	4.00	158	121.61	3.11	39.09
0.188	4.50	167	128.54	3.13	41.10
0.209	5.00	178	137.00	3.14	43.58
0.250	6.00	194	149.32	3.18	47.00
0.334	8.00	222	170.87	3.25	52.64
0.417	10.00	249	191.65	3.32	57.76
0.500	12.00	271	208.59	3.39	61.46
0.584	14.00	293	225.52	3.47	64.94
0.667	16.00	318	244.76	3.56	68.84
0.751	18.00	343	264.00	3.64	72.49
0.834	20.00	367	282.48	3.73	75.67

Tabla H.15 Resultados de la prueba triaxial para un 25% de arena Ottawa y 75% de goma triturada a un esfuerzo normal de 30 lbs/pulg<sup>2</sup>

Esfuerzo de Cámara ( $\sigma_3$ )	30	lbs/pulgada <sup>2</sup>
Constante de Anilla de Carga	0.76969	
Velocidad de Corte	1	mm/min
Altura inicial de la muestra	4.23	pulg
Diámetro de la muestra	1.96	pulg
Área inicial de la muestra	3.02	pulg <sup>2</sup>
Módulo Tangente Inicial	2096	lbs/pulg <sup>2</sup>

Lectura de Deformación $\Delta L$ (pulg)	Deformación Unitaria $\epsilon = \Delta L / L_0$	Deformación anilla de carga Carga ( $\times 10^{-4}$ pulg)	Carga sobre la muestra (lbs)	Área Corregida (pulg <sup>2</sup> )	Diferencia de Esfuerzos $\Delta\sigma = P/A$ (lbs/pulg <sup>2</sup> )
0.000	0	0	0	0	0
0.010	0.25	45	34.64	3.02	11.45
0.021	0.50	60	46.18	3.03	15.23
0.031	0.75	72	55.42	3.04	18.23
0.042	1.00	83	63.88	3.05	20.96
0.063	1.50	103	79.28	3.06	25.88
0.083	2.00	121	93.13	3.08	30.25
0.104	2.50	138	106.22	3.09	34.32
0.125	3.00	153	117.76	3.11	37.86
0.146	3.50	167	128.54	3.13	41.11
0.167	4.00	181	139.31	3.14	44.33
0.188	4.50	194	149.32	3.16	47.26
0.209	5.00	207	159.33	3.18	50.17
0.250	6.00	239	183.96	3.21	57.31
0.334	8.00	291	223.98	3.28	68.30
0.417	10.00	333	256.31	3.35	76.45
0.500	12.00	370	284.79	3.43	83.06
0.584	14.00	402	309.42	3.51	88.19
0.667	16.00	438	337.12	3.59	93.86
0.751	18.00	467	359.45	3.68	97.69
0.834	20.00	490	377.15	3.77	100.00

Tabla H.16 Resultados de la prueba triaxial para un 30% de goma triturada y 70% de arena Ottawa a un esfuerzo normal de 10 lbs/pulg<sup>2</sup>

Esfuerzo de Cámara ( $\sigma_3$ )	10	lbs/pulgada <sup>2</sup>
Constante de Anilla de Carga	0.76969	
Velocidad de Corte	1	mm/min
Altura inicial de la muestra	4.17	pulg
Diámetro de la muestra	1.94	pulg
Área inicial de la muestra	2.96	pulg <sup>2</sup>
Módulo Tangente Inicial	851	lbs/pulg <sup>2</sup>

Lectura de Deformación $\Delta L$ (pulg)	Deformación Unitaria $\epsilon = \Delta L/L_0$	Deformación anilla de carga Carga ( $\times 10^{-4}$ pulg)	Carga sobre la muestra (lbs)	Área Corregida (pulg <sup>2</sup> )	Diferencia de Esfuerzos $\Delta\sigma = P/A$ (lbs/pulg <sup>2</sup> )
0.000	0	0	0.00	0	0
0.010	0.25	13	10.01	2.96	3.38
0.021	0.50	21	16.16	2.97	5.44
0.031	0.75	27	20.78	2.98	6.98
0.042	1.00	33	25.40	2.99	8.51
0.063	1.50	41	31.56	3.00	10.52
0.083	2.00	48	36.95	3.02	12.25
0.104	2.50	55	42.33	3.03	13.96
0.125	3.00	60	46.18	3.05	15.15
0.146	3.50	66	50.80	3.06	16.58
0.167	4.00	70	53.88	3.08	17.50
0.188	4.50	75	57.73	3.10	18.65
0.209	5.00	80	61.58	3.11	19.79
0.250	6.00	87	66.96	3.14	21.29
0.334	8.00	101	77.74	3.21	24.20
0.417	10.00	115	88.51	3.28	26.95
0.500	12.00	127	97.75	3.36	29.10
0.584	14.00	139	106.99	3.44	31.13
0.667	16.00	151	116.22	3.52	33.03
0.751	18.00	162	124.69	3.60	34.59
0.834	20.00	170	130.85	3.69	35.41

Tabla H.17 Resultados de la prueba triaxial para un 30% de arena Ottawa y 60% de goma triturada a un esfuerzo normal de 20 lbs/pulg<sup>2</sup>

Esfuerzo de Cámara ( $\sigma_3$ )	20	lbs/pulgada <sup>2</sup>
Constante de Anilla de Carga	0.76969	
Velocidad de Corte	1	mm/min
Altura inicial de la muestra	4.14	pulg
Diámetro de la muestra	1.94	pulg
Área inicial de la muestra	2.96	pulg <sup>2</sup>
Módulo Tangente Inicial	1444	lbs/pulg <sup>2</sup>

Lectura de Deformación $\Delta L$ (pulg)	Deformación Unitaria $\epsilon = \Delta L / L_0$	Deformación anilla de carga Carga (x $10^{-4}$ pulg)	Carga sobre la muestra (lbs)	Área Corregida (pulg <sup>2</sup> )	Diferencia de Esfuerzos $\Delta\sigma = P/A$ (lbs/pulg <sup>2</sup> )
0.000	0	0	0.00	0	0
0.010	0.25	29	22.32	2.96	7.53
0.021	0.50	41	31.56	2.97	10.62
0.031	0.75	49	37.71	2.98	12.66
0.042	1.00	56	43.10	2.99	14.44
0.063	1.50	69	53.11	3.00	17.70
0.083	2.00	82	63.11	3.02	20.92
0.104	2.50	92	70.81	3.03	23.36
0.125	3.00	102	78.51	3.05	25.76
0.146	3.50	114	87.74	3.06	28.65
0.167	4.00	124	95.44	3.08	31.00
0.188	4.50	136	104.68	3.10	33.82
0.209	5.00	147	113.14	3.11	36.36
0.250	6.00	165	127.00	3.14	40.39
0.334	8.00	197	151.63	3.21	47.19
0.417	10.00	224	172.41	3.28	52.49
0.500	12.00	247	190.11	3.36	56.60
0.584	14.00	269	207.05	3.44	60.24
0.667	16.00	287	220.90	3.52	62.77
0.751	18.00	308	237.06	3.60	65.76
0.834	20.00	320	246.30	3.69	66.66



Tabla H.18 Resultados de la prueba triaxial para un 30% de arena Ottawa y 60% de goma triturada a un esfuerzo normal de 30 lbs/pulg<sup>2</sup>

Esfuerzo de Cámara ( $\sigma_3$ )	30	lbs/pulgada <sup>2</sup>
Constante de Anilla de Carga	0.76969	
Velocidad de Corte	1	mm/min
Altura inicial de la muestra	4.23	pulg
Diámetro de la muestra	1.92	pulg
Área inicial de la muestra	2.90	pulg <sup>2</sup>
Módulo Tangente Inicial	1684	lbs/pulg <sup>2</sup>

Lectura de Deformación $\Delta L$ (pulg)	Deformación Unitaria $\epsilon = \Delta L / L_0$	Deformación anilla de carga Carga ( $\times 10^{-4}$ pulg)	Carga sobre la muestra (lbs)	Área Corregida (pulg <sup>2</sup> )	Diferencia de Esfuerzos $\Delta\sigma = P/A$ (lbs/pulg <sup>2</sup> )
0.000	0	0	0	0	0
0.010	0.25	33	25.40	2.90	8.75
0.021	0.50	45	34.64	2.91	11.90
0.031	0.75	53	40.79	2.92	13.98
0.042	1.00	64	49.26	2.92	16.84
0.063	1.50	82	63.11	2.94	21.47
0.083	2.00	99	76.20	2.95	25.79
0.104	2.50	117	90.05	2.97	30.33
0.125	3.00	133	102.37	2.98	34.30
0.146	3.50	147	113.14	3.00	37.71
0.167	4.00	162	124.69	3.02	41.34
0.188	4.50	177	136.24	3.03	44.94
0.209	5.00	191	147.01	3.05	48.24
0.250	6.00	215	165.48	3.08	53.73
0.334	8.00	256	197.04	3.15	62.61
0.417	10.00	295	227.06	3.22	70.58
0.500	12.00	331	254.77	3.29	77.43
0.584	14.00	365	280.94	3.37	83.45
0.667	16.00	398	306.34	3.45	88.88
0.751	18.00	423	325.58	3.53	92.21
0.834	20.00	433	333.28	3.62	92.09

Tabla H.19 Resultados de la prueba triaxial para un 40% de goma triturada y 60% de arena Ottawa a un esfuerzo normal de 10 lbs/pulg<sup>2</sup>

Esfuerzo de Cámara ( $\sigma_3$ )	10	lbs/pulgada <sup>2</sup>
Constante de Anilla de Carga	0.76969	
Velocidad de Corte	1	mm/min
Altura inicial de la muestra	4.18	pulg
Diámetro de la muestra	1.92	pulg
Área inicial de la muestra	2.90	pulg <sup>2</sup>
Módulo Tangente Inicial	605	lbs/pulg <sup>2</sup>

Lectura de Deformación $\Delta L$ (pulg)	Deformación Unitaria $\epsilon = \Delta L / L_0$	Deformación anilla de carga Carga ( $\times 10^{-4}$ pulg)	Carga sobre la muestra (lbs)	Área Corregida (pulg <sup>2</sup> )	Diferencia de Esfuerzos $\Delta\sigma = P/A$ (lbs/pulg <sup>2</sup> )
0.000	0	0	0.00	0	0
0.010	0.25	8	6.16	2.90	2.12
0.021	0.50	13	10.01	2.91	3.44
0.031	0.75	19	14.62	2.92	5.01
0.042	1.00	23	17.70	2.92	6.05
0.063	1.50	30	23.09	2.94	7.86
0.084	2.00	37	28.48	2.95	9.64
0.105	2.50	45	34.64	2.97	11.66
0.125	3.00	52	40.02	2.98	13.41
0.146	3.50	58	44.64	3.00	14.88
0.167	4.00	62	47.72	3.02	15.82
0.188	4.50	66	50.80	3.03	16.76
0.209	5.00	70	53.88	3.05	17.68
0.251	6.00	77	59.27	3.08	19.24
0.334	8.00	91	70.04	3.15	22.26
0.418	10.00	102	78.51	3.22	24.40
0.502	12.00	112	86.21	3.29	26.20
0.585	14.00	123	94.67	3.37	28.12
0.669	16.00	132	101.60	3.45	29.48
0.752	18.00	140	107.76	3.53	30.52
0.836	20.00	147	113.14	3.62	31.26

Tabla H.20 Resultados de la prueba triaxial para un 40% de arena Ottawa y 60% de goma triturada a un esfuerzo normal de 20 lbs/pulg<sup>2</sup>

Esfuerzo de Cámara ( $\sigma_3$ )	20	lbs/pulgada <sup>2</sup>
Constante de Anilla de Carga	0.76969	
Velocidad de Corte	1	mm/min
Altura inicial de la muestra	4.2	pulg
Diámetro de la muestra	1.91	pulg
Área inicial de la muestra	2.87	pulg <sup>2</sup>
Módulo Tangente Inicial	1250	lbs/pulg <sup>2</sup>

Lectura de Deformación $\Delta L$ (pulg)	Deformación Unitaria $\epsilon = \Delta L / L_0$	Deformación anilla de carga Carga (x $10^{-4}$ pulg)	Carga sobre la muestra (lbs)	Área Corregida (pulg <sup>2</sup> )	Diferencia de Esfuerzos $\Delta\sigma = P/A$ (lbs/pulg <sup>2</sup> )
0.000	0	0	0.00	0	0
0.010	0.25	19	14.62	2.87	5.09
0.021	0.50	30	23.09	2.88	8.02
0.031	0.75	39	30.02	2.89	10.40
0.042	1.00	47	36.18	2.89	12.50
0.063	1.50	58	44.64	2.91	15.35
0.084	2.00	70	53.88	2.92	18.43
0.105	2.50	79	60.81	2.94	20.69
0.125	3.00	88	67.73	2.95	22.93
0.146	3.50	97	74.66	2.97	25.15
0.167	4.00	107	82.36	2.98	27.59
0.188	4.50	115	88.51	3.00	29.50
0.209	5.00	125	96.21	3.02	31.90
0.251	6.00	140	107.76	3.05	35.35
0.334	8.00	167	128.54	3.11	41.27
0.418	10.00	193	148.55	3.18	46.66
0.502	12.00	213	163.94	3.26	50.35
0.585	14.00	237	182.42	3.33	54.75
0.669	16.00	253	194.73	3.41	57.09
0.752	18.00	267	205.51	3.49	58.81
0.836	20.00	275	211.66	3.58	59.10

Tabla H.21 Resultados de la prueba triaxial para un 40% de arena Ottawa y 60% de goma triturada a un esfuerzo normal de 30 lbs/pulg<sup>2</sup>

Esfuerzo de Cámara ( $\sigma_3$ )	30	lbs/pulgada <sup>2</sup>
Constante de Anilla de Carga	0.76969	
Velocidad de Corte	1	mm/min
Altura inicial de la muestra	4.18	pulg
Diámetro de la muestra	1.91	pulg
Área inicial de la muestra	2.87	pulg <sup>2</sup>
Módulo Tangente Inicial	1436	lbs/pulg <sup>2</sup>

Lectura de Deformación $\Delta L$ (pulg)	Deformación Unitaria $\epsilon = \Delta L/L_0$	Deformación anilla de carga Carga ( $\times 10^{-4}$ pulg)	Carga sobre la muestra (lbs)	Área Corregida (pulg <sup>2</sup> )	Diferencia de Esfuerzos $\Delta\sigma = P/A$ (lbs/pulg <sup>2</sup> )
0.000	0	0	0	0	0
0.010	0.25	24	18.47	2.87	6.43
0.021	0.50	33	25.40	2.88	8.82
0.031	0.75	43	33.10	2.89	11.46
0.042	1.00	54	41.56	2.89	14.36
0.063	1.50	69	53.11	2.91	18.26
0.084	2.00	89	68.50	2.92	23.43
0.105	2.50	103	79.28	2.94	26.98
0.125	3.00	118	90.82	2.95	30.75
0.146	3.50	133	102.37	2.97	34.48
0.167	4.00	146	112.37	2.98	37.65
0.188	4.50	160	123.15	3.00	41.05
0.209	5.00	174	133.93	3.02	44.41
0.251	6.00	200	153.94	3.05	50.50
0.334	8.00	240	184.73	3.11	59.31
0.418	10.00	272	209.36	3.18	65.76
0.502	12.00	297	228.60	3.26	70.21
0.585	14.00	320	246.30	3.33	73.93
0.669	16.00	340	261.69	3.41	76.72
0.752	18.00	356	274.01	3.49	78.42
0.836	20.00	371	285.55	3.58	79.73

)