

**ESTUDIO DE LA RETRACCIÓN POR FRAGUADO DE BASES  
ESTABILIZADAS CON CEMENTO QUE INCLUYEN MATERIALES  
BITUMINOSOS RECICLADOS**

**EDGAR JIMENEZ CARRILLO  
BENEDICTO RAMIREZ HERNANDEZ**



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOMECANICAS  
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL  
BUCARAMANGA  
2009**

**ESTUDIO DE LA RETRACCIÓN POR FRAGUADO DE BASES  
ESTABILIZADAS CON CEMENTO QUE INCLUYEN MATERIALES  
BITUMINOSOS RECICLADOS**

**EDGAR JIMENEZ CARRILLO  
BENEDICTO RAMIREZ HERNANDEZ**

Tesis de grado en la modalidad de investigación

Para optar el título de:

**INGENIERO CIVIL**

Director:

**EDUARDO ALBERTO CASTAÑEDA PINZON**

Ingeniero Civil, M. Sc. Ph D

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOMECANICAS  
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL**

**BUCARAMANGA**

**2009**

## TABLA DE CONTENIDO

	<i>Pág.</i>
<b>1 INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
<b>1.1 Introducción.</b>	<b>1</b>
<b>1.2 Objetivos.</b>	<b>2</b>
1.2.1 Objetivo general	2
1.2.2 Objetivos específicos	2
<b>2 ESTADO DEL ARTE.</b>	<b>3</b>
<b>2.1 Bases estabilizadas con cemento.</b>	<b>3</b>
2.1.1 Desarrollo de las bases estabilizadas con cemento.	3
2.1.2 Normativas y recomendaciones actuales.	4
2.1.3 Componentes.	7
2.1.4 Características de las bases estabilizadas.	10
<b>2.2 Retracción.</b>	<b>14</b>
2.2.1 Retracción plástica.	15
2.2.2 Retracción autógena.	16
2.2.3 Retracción de secado.	16
2.2.4 Factores que influyen sobre la retracción.	19
2.2.5 Retracción en bases estabilizadas con cemento.	25
<b>3 MODELO DE ESTIMACIÓN DE LA RETRACCIÓN.</b>	<b>26</b>
<b>3.1 Criterios para caracterizar la retracción en el modelo de cálculo.</b>	<b>26</b>
<b>3.2 Descripción del modelo de cálculo.</b>	<b>26</b>
3.2.1 ACI 209R-92.	27

3.2.2	Limitaciones y requisitos del modelo de cálculo.	33
<b>4</b>	<b>CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES.</b>	<b>34</b>
<b>4.1</b>	<b>Criterios para selección de suelo.</b>	<b>34</b>
<b>4.2</b>	<b>Características de las mezclas.</b>	<b>34</b>
4.2.1	Tipos de suelos.	34
4.2.2	Ensayos para caracterizar los suelos.	35
<b>4.3</b>	<b>Dosificación de las mezclas.</b>	<b>38</b>
4.3.1	Contenido y tipos de cementos.	38
4.3.2	Contenido de agua.	39
4.3.3	Contenido de material reciclado.	40
<b>4.4</b>	<b>Preparación de probetas.</b>	<b>40</b>
<b>5</b>	<b>ANÁLISIS DE LA RETRACCION.</b>	<b>43</b>
<b>5.1</b>	<b>Toma de datos de retracción</b>	<b>43</b>
<b>5.2</b>	<b>Análisis datos de retracción.</b>	<b>44</b>
<b>5.3</b>	<b>Retracción calculada de las mezclas utilizando el modelo de estimación.</b>	<b>48</b>
<b>5.4</b>	<b>Análisis del modelo de cálculo de la retracción.</b>	<b>50</b>
	<b>CONCLUSIONES</b>	<b>51</b>
	<b>RECOMENDACIONES</b>	<b>52</b>
	<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>53</b>
	<b>ANEXOS</b>	<b>54</b>

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Perdida máxima de peso de la mezcla (INV E-807).	6
Tabla 2. Requerimientos de cemento para varios tipos de suelos.	8
Tabla 3. Factor corrector de la retracción para el curado inicial (Tabla 2.5.3 del ACI 209).	28
Tabla 4. Factor corrector de la retracción para la humedad relativa (Tabla 2.5.4 del ACI 209).	29
Tabla 5. Factores correctores para el espesor medio de la pieza.	30
Tabla 6. Factor corrector para la relación volumen/superficie, $\gamma_{vs}$ .	31
Tabla 7. Factor corrector para el contenido de cemento, $\gamma_c$ .	32
Tabla 8. Tipos de suelos. Clasificación AASHTO.	35
Tabla 9. Contenido de cemento en las probetas.	39
Tabla 10. Dosificación en suelos sin material bituminoso reciclado.	39
Tabla 11. Dosificación en suelos con material bituminoso reciclado.	39
Tabla 12. Enumeración probetas Suelo A1.	41
Tabla 13. Enumeración probetas Suelo A3.	41
Tabla 14. Retracciones Máximas Suelo A1.	48
Tabla 15. Retracciones Máximas Suelo A3.	48
Tabla 16. Datos granulometría Suelo A1.	56
Tabla 17. Datos granulometría Suelo A3.	56
Tabla 18. Datos ensayo limite liquido Suelo A1.	58
Tabla 19. Datos ensayo limite plastico Suelo A1.	58
Tabla 20. Datos ensayo Proctor modificado Suelo A1 con 3% de cemento.	60
Tabla 21. Datos ensayo Proctor modificado Suelo A1 con 5% de cemento.	61
Tabla 22. Datos ensayo Proctor modificado Suelo A1 + Reciclado con 3% de cemento.	62
Tabla 23. Datos ensayo Proctor modificado Suelo A1 + Reciclado con 5% de cemento.	63
Tabla 24. Datos ensayo Proctor modificado Suelo A3 con 7% de cemento.	64
Tabla 25. Datos ensayo Proctor modificado Suelo A3 con 9% de cemento.	65
Tabla 26. Datos ensayo Proctor modificado Suelo A3 + Reciclado con 7% de cemento.	66
Tabla 27. Datos ensayo Proctor modificado Suelo A3 + Reciclado con 9% de cemento.	67
Tabla 28. Medición tomada por el deformimetro. Suelo A1	69
Tabla 29. Retracciones diarias. Suelo A1	69
Tabla 30. Retracciones Acumuladas. Suelo A1	70
Tabla 31. Medición tomada por el deformimetro. Suelo A3	70
Tabla 32. Retracciones diarias. Suelo A3	71

Tabla 33. Retracciones Acumuladas. Suelo A3	71
Tabla 34. Factores correctores Suelo A1 con 3% cemento.	73
Tabla 35. Retracciones acumuladas calculadas Suelo A1 con 3% cemento.	73
Tabla 36. Factores correctores Suelo A1 con 5% cemento.	73
Tabla 37. Retracciones acumuladas calculadas Suelo A1 con 5% cemento.	73
Tabla 38. Factores correctores Suelo A3 con 7% cemento.	74
Tabla 39. Retracciones acumuladas calculadas Suelo A3 con 7% cemento.	74
Tabla 40. Factores correctores Suelo A3 con 9% cemento.	74
Tabla 41. Retracciones acumuladas calculadas Suelo A3 con 9% cemento.	74

## LISTA DE GRAFICAS

Gráfica 1. La retracción plásticas en pastas, morteros y hormigones (Neville, 1995).	15
Gráfica 2. Relación entre la retracción y la pérdida de humedad en pastas de cemento (Mindess y Young, 1981).	17
Gráfica 3. Retracción de secado compuesta por retracción reversible y irreversible. (Mindess y Young, 1981).	18
Gráfica 4. Influencia de la cantidad de áridos de diferentes naturalezas sobre la retracción (Delibes, 1993).	20
Gráfica 5. Relación entre el volumen de pasta y la retracción relativa (Bissonnette et al. , 1999).	21
Gráfica 6. Influencia de la relación agua/cemento y el contenido de árido sobre la retracción del hormigón.	22
Gráfica 7. Relación entre el contenido de agua, contenido de cemento y relación agua/cemento con la retracción de hormigón curado en humedad durante 28 días y secado a 450 días (Neville, 1995).	23
Gráfica 8. Efecto de la relación volumen/superficie sobre la retracción última del hormigón.	25
Gráfica 9. Retracciones Acumuladas Suelo A1.	44
Gráfica 10. Retracciones Acumuladas Suelo A1 + Reciclado.	45
Gráfica 11. Retracciones Acumuladas. Suelo A3.	46
Gráfica 12. Retracciones Acumuladas Suelo A3 + Reciclado.	47
Gráfica 13. Datos de retracción estimados para las bases estabilizadas.	50
Gráfica 14. Relación Humedad - Densidad Suelo A1 3% cemento.	60
Gráfica 15. Relación Humedad - Densidad Suelo A1 5% cemento.	61
Gráfica 16. Relación Humedad - Densidades Suelo A1+Reciclado 3% cemento.	62
Gráfica 17. Relación Humedad - Densidades Suelo A1+Reciclado 5% cemento.	63
Gráfica 18. Relación Humedad - Densidades Suelo A3 7% cemento.	64
Gráfica 19. Relación Humedad - Densidades Suelo A3 9% cemento.	65
Gráfica 20. Relación Humedad - Densidades Suelo A3+Reciclado 7% cemento.	66
Gráfica 21. Relación Humedad - Densidades Suelo A3+Reciclado 9% cemento.	67

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Suelo-Cemento	12
Figura 2. Hormigón.	12
Figura 3. SUELO A1	36
Figura 4. Molde proctor estándar.	37
Figura 5. Mezcla con material reciclado	40
Figura 6. Probetas Suelo A1.	41
Figura 7. Probetas Suelo A3.	41
Figura 8. Características de la probeta.	42
Figura 9. Montaje para medir las retracciones de las probetas.	43

## **LISTA DE ANEXOS**

ANEXO A. GRANULOMETRIA	55
ANEXO B. LIMITES	57
ANEXO C. COMPACTACION	59
ANEXO D. DATOS DE RETRACCION	68
ANEXO E. DATOS RETRACCION CALCULADOS	72

## RESUMEN

### TITULO

ESTUDIO DE LA RETRACCIÓN POR FRAGUADO DE BASES ESTABILIZADAS CON CEMENTO QUE INCLUYEN MATERIALES BITUMINOSOS RECICLADOS\*

### AUTORES

JIMENEZ CARRILLO, Edgar\*\*

RAMIREZ HERNANDEZ, Benedicto\*\*

### PALABRAS CLAVES:

Estabilización de suelos, Material bituminoso reciclado,

### DESCRIPCION

Los avances que se han dado en la construcción a llevado a buscar nuevas alternativas que permitan mejorar las propiedades de los materiales, en nuestro país actualmente se observa el uso de cemento para la estabilización de suelos que van a ser utilizados en construcción de vías de comunicación.

La Universidad Industrial de Santander realiza estudios de nuevos materiales que puedan incluirse en los suelos que serán estabilizados con cemento.

Por esta razón, el presente trabajo consiste en:

- Analizar el comportamiento de la retracción en dos tipos de suelos (A1 y A3) estabilizados con cemento. Antes y después de incluir material bituminoso reciclado.
- Comparar los valores obtenidos y determinar el efecto que causa en la retracción la inclusión de material bituminoso reciclado.

Las bases estabilizadas con cemento a las cuales se le ha incluido material bituminoso reciclado han demostrado una reducción en la retracción. Se recomienda analizar el comportamiento en otros tipos de suelos y calcular valores de resistencia.

La primera parte de la investigación se trata de la elaboración de las bases estabilizadas con cemento sus respectivos ensayos, los indicados en la norma INVIAS; la construcción de las probetas para la lectura de las deformaciones.

La segunda parte de la investigación consiste en el análisis del modelo de estimación con especial énfasis sobre los parámetros necesarios en el cálculo, y un estudio sobre los datos calculados por el modelo para las mezclas.

---

\* Trabajo de Investigación

\*\*Facultad de Ciencias Físico Mecánica, Escuela de Ingeniería Civil, Director: Eduardo Castañeda Pinzón

## ABSTRACT

### TITLE

STUDY OF THE SHRINKAGE BY SETTING OF BASES STABILIZED WITH CEMENT THAT INCLUDE BITUMINOUS MATERIALS RECYCLING\*

### AUTHORS

JIMENEZ CARRILLO, Edgar\*\*

RAMIREZ HERNANDEZ, Benedicto\*\*

### KEY WORDS:

Ground stabilization, bituminous material recycling, shrinkage

### DESCRIPTION

The advances that have occurred in the construction get to look for some alternatives that allow improving the characteristics of the materials, in our country at the moment is observed the cement use for the ground stabilization that is going to be used in communication ways construction.

The Universidad Industrial de Santander realizes studies of new materials that can be included in the grounds that will be stabilized with cement.

Therefore, the present work consists of:

- To analyze the behavior of the retraction in two types of grounds stabilized with cement (A1 and A3). Before and after including bituminous material recycling.
- To compare the obtained values and to determine the effect that causes in the shrinkage the inclusion of bituminous material recycling.

The bases stabilized with cement which recycling had including bituminous material have demonstrated a reduction in the shrinkage. It is recommended to analyze the behavior in other types of grounds and to calculate values of resistance.

The first part of the investigation is the elaboration of the stabilized bases with cement for its respective tests, the indicated ones in INVIAS standard; the construction of the test tubes for the reading of the deformations.

The second part of the investigation consists of the model analysis of estimation with special emphasis on the necessary parameters in the calculation and a study on the calculated data by the model for the mixtures.

---

\*Work of Investigation

\*\*Faculty of Physical-mechanical Sciences, School of Civil Engineering, Director: Eduardo Castañeda Pinzón

# 1 INTRODUCCIÓN

## 1.1 Introducción.

En el estudio de los materiales que incluyen cemento cada vez se hace mas evidente el análisis de la capacidad portante dejando a un lado el fenómeno de la retracción, propio de los materiales que contienen cemento; un problema que necesita de un estudio claro el cual es el responsable de la fisuración en nuestras estructuras.

La retracción es una característica importante en la evaluación a largo plazo de las mezclas utilizadas en estructuras para carreteras ya que nos da un parámetro muy importante que nos lleva al diseño de juntas en las vías; Para implementar y extender el uso del cemento en la estabilización de bases para pavimentos.

Estimar la retracción de forma realista es un aspecto importante en la evaluación de estructuras utilizadas en pavimentos, para garantizar su durabilidad y condiciones de servicio a largo plazo. Existen varios modelos empíricos de cálculo para estimar la retracción del hormigón. Estos modelos varían en su complejidad, precisión y en los parámetros necesarios para el cálculo. Teniendo en cuenta que estos modelos han sido desarrollados y calibrados mediante ensayos relativamente antiguos, y todos para mezclas de hormigón, es importante evaluar la aplicabilidad de estos modelos a las bases estabilizadas con cemento.

Los resultados de la investigación incluyen los valores calculados de la retracción de las mezclas estabilizadas con cemento y estas mismas bases con la incorporación del material reciclado. En el cálculo de las

deformaciones se utilizan los parámetros específicos de cada mezcla y las condiciones de ensayo.

El análisis de los resultados se hace por separado para la retracción, y consiste en comparar los valores estimados de retracción con los resultados experimentales, con el fin de evaluar y comparar las mezclas y la conveniencia del material reciclado.

## **1.2 Objetivos.**

### ***1.2.1 Objetivo general***

Analizar la retracción en suelos que serán utilizados en bases estabilizadas con cemento con la incorporación de nuevos materiales y comparando con la estabilización de material reciclado.

### ***1.2.2 Objetivos específicos***

Analizar el comportamiento en la retracción de material bituminoso reciclado al que se le ha adicionado cemento.

Determinar la retracción de los suelos estabilizados con cemento y comparar con la retracción de material bituminoso reciclado estabilizado con cemento.

Aplicar un modelo de estimación de retracciones para hormigones y calcular las retracciones de las bases estabilizadas con cemento.

## **2 ESTADO DEL ARTE.**

En este capítulo se analizan algunos temas generales que tienen importancia en la evaluación de la retracción en las bases estabilizadas con cemento complementando estas con agregados de material reciclado para la disminución de las deformaciones debido a la retracción. Primero se describen las características de las bases estabilizadas con cemento, sus componentes, características en fresco y en el estado endurecido. Luego se presenta algún concepto relacionado con la retracción. Esto incluye una descripción de estos fenómenos, así como a los factores que influyen sobre ellos.

### **2.1 Bases estabilizadas con cemento.**

#### ***2.1.1 Desarrollo de las bases estabilizadas con cemento.***

La búsqueda de nuevos materiales ha llevado al hombre a profundizar en el estudio y desarrollo de nuevas tecnologías para crear un procedimiento de estabilización en el cual se mejora la capacidad portante del material incidiendo sobre el parámetro cohesión el que es modificado debido a la incorporación de un agente cementante que une las partículas del suelo en forma tal que genera resistencia al corte por aporte cohesivo por cementación.

El material que se incorpora al suelo es cemento portland en proporciones y formas variables dando lugar a los siguientes productos:

*Suelo tratado con cemento:* Es una mezcla íntima de suelo y cemento con adición de agua, es una mezcla no endurecida o semi-endurecida de suelo y cemento. El mejoramiento que se alcanza depende de la cantidad de cemento que se incorpora y del tipo de suelo. En realidad lo que hace el cemento incorporado al suelo en tan baja proporción es modificar la aridez

de agua del suelo disminuyendo su plasticidad. El suelo modificado con cemento puede emplearse en bases, sub-bases, subrasantes, etc.

*Suelo cemento:* Este material contiene suficiente cemento como para endurecer el suelo al cual se ha incorporado al grado de humedad necesaria para lograr una buena compactación y conseguir la hidratación del cemento. La denominación de este material es variada por ejemplo: suelo estabilizado con cemento, agregado estabilizado, etc.

*Suelo cemento plástico:* Es una mezcla de suelo y cemento endurecida que contiene en el momento de elaborarla, suficiente cantidad de agua como para lograr una consistencia similar a la del mortero plástico. Este producto se emplea para taludes, áreas irregulares o confinadas como puede ser revestimientos de cunetas, etc.

En todos los casos el suelo-cemento es una mezcla íntima de suelo, cemento portland y agua.

### **2.1.2 Normativas y recomendaciones actuales.**

En la actualidad en nuestro país, la técnica de estabilización de suelos con cemento es una práctica muy conocida y bastante utilizada en lo referente a la construcción de estructuras para pavimentos. Existen normas de control que estipulan las características necesarias en un diseño.

#### **2.1.2.1 Normativas INVIAS.**

El INVIAS es la entidad encargada del control y normatividad para todo lo relacionado a diseño y construcción de vías; en base a normativas internacionales dicha entidad publicó un artículo donde se establecen las especificaciones de una base estabilizada con cemento.

### **Artículo 341**

Construcción de una capa de base, constituida por material adicionado totalmente o resultante de la escarificación de la capa superficial existente, o mezcla de ambos, estabilizándolos con cemento portland.

#### *Suelo.*

Proveniente de la escarificación de la capa superficial existente.

Suelo natural proveniente de excavaciones o zonas de préstamo.

Agregados locales de baja calidad.

Escorias o mezclas de cualquiera de ellos, libres de materia orgánica u otra sustancia que pueda perjudicar el correcto fraguado del cemento.

La granulometría del material por estabilizar no podrá contener mas de 50% en peso, de partículas retenidas en el tamiz N° 4; ni mas de 50% en peso, de partículas que pasen el tamiz N° 200.

El tamaño máximo no podrá ser mayor de 75 mm, ni superior a la ½ del espesor de la capa compactada.

Plasticidad. La fracción inferior al tamiz N° 40, deberá presentar un LL inferior a 35 y un IP menor de 15, determinados según norma de ensayo INV E-126.

Composición química. La proporción de sulfatos no podrá exceder de 0.5%, en peso, al ser determinada según la norma de ensayo INV E-233.

#### *Cemento.*

El cemento para estabilización será de tipo Portland, el cual deberá cumplir lo especificado en las normas ICONTEC 121 y 321.

#### *Agua.*

Deberá ser limpia y estará libre de materia orgánica, álcalis y otras sustancias deletéreas.

El pH, medido según la norma ASTM D-1293, deberá estar comprendido entre 5,5-8,0.

El contenido de sulfatos, determinado según norma ASTM D-516, no podrá ser superior a 1 g/l.

*Diseño de la mezcla.* Se tendrán en cuenta los siguientes ensayos y parámetros.

Resistencia a la compresión inconfiada (INV E-809) garantizando una resistencia mínima de 21 kg/cm<sup>2</sup>, luego de 7 días de curado húmedo.

Humedecimiento-secado (INV E-807) en donde el contenido de cemento deberá ser tal, que la pérdida de peso de la mezcla compactada no supere los siguientes límites:

SUELO POR ESTABILIZAR	PERDIDA MAXIMA (%)
A-1; A-2-4; A-2-5; A-3	14
A-2-6; A-2-7; A-4; A-5	10
A-6; A-7	7

*Tabla 1. Pérdida máxima de peso de la mezcla (INV E-807).*

Contenido de cemento.

Contenido de agua del suelo en el momento del mezclado y el de la mezcla en el de la compactación.

El valor densidad máxima humedad optima.

#### *2.1.2.2 Normativa Internacional.*

En la normativa española, según las características finales establecen tres tipos de suelos estabilizados in situ, denominados respectivamente:

- S-EST1. Cemento y cal
- S-EST1. Cemento y cal
- S-EST1. *Cemento*

*Cemento.*

No se emplearan cementos de aluminato de calcio.

### *Suelo.*

Los materiales a estabilizar con cemento tendrán un tamaño máximo inferior a  $\frac{1}{2}$  del espesor de la capa compactada, sin exceder el espesor de 80 mm.

No contendrá mas de un 80% en peso de elementos retenidos en el tamiz 2 ni mas de un 50%, en peso, de elementos que pasen por el tamiz 0,080.

Limite liquido  $LL < 35$  e índice de plasticidad  $IP < 15$ .

La dosificación de cemento será igual o superior al tres porciento (3%).

### *Humedad del suelo.*

La humedad del suelo disgregado, inmediatamente antes de su mezcla con cemento, deberá ser tal, que permita una subsiguiente mezcla uniforme e intima de ambos.

Previamente será necesario humedecer la mezcla para facilitar dicha mezcla.

### *Curado de la mezcla.*

La mezcla se mantendrá húmeda, por lo menos, durante los 7 días que sigan a su terminación.

### *Limitaciones.*

Las estabilizaciones con cemento se efectuaran cuando la temperatura ambiente, a la sombra, sea superior  $5^{\circ}$  C, y no exista fundado temor de heladas.

### **2.1.3 Componentes.**

Los componentes de la mezcla dependerán de la clase de suelo y la función estructural a que se encontrara la capa. La granulometría del suelo es indicativa de la cantidad de cemento que consumirá el material pero además será necesario cuidar la durabilidad del producto obtenido, durabilidad ante las tensiones que lo solicitan y que son provocadas por el transito atendiendo a los siguientes parámetros:

- Características de los componentes cemento, suelo y agua.

- Durabilidad de la mezcla.
- Calidad del producto final.

### 2.1.3.1 *Cemento.*

#### *Tipos de cementos empleados.*

En principio cualquier cemento puede utilizarse en la estabilización de suelos, sin embargo el mayormente empleado es el TIPO I también utilizado en esta investigación, además es el que permite a la mezcla suelo-cemento alcanzar mayor resistencia por su contenido de aluminato tricálcico y sulfato de calcio.

#### *Contenido de cemento.*

La cantidad de cemento puede variar entre el 3 y el 25 porciento del peso seco de la mezcla. El promedio es de 10% y se procura que no pase del 15% por razones económicas.

<b>REQUERIMIENTOS DE CEMENTO PARA VARIOS TIPOS DE SUELOS</b>				
<b>Clasificación de suelos AASHTO</b>	Clasificación de suelos ASTM	Contenido de cemento % en peso	Contenido de cemento prueba de humedad % en peso	Contenido de cemento prueba de durabilidad % en peso
<b>A-1-a</b>	GW, GP, GM, SW, SP, SM	3-5	5	3-5-7
<b>A-1-b</b>	GM, GP, SM, SP	5-8	6	4-6-8
<b>A-2</b>	GM, GC, SM, SC	5-9	7	5-7-9
<b>A-3</b>	SP	7-11	9	7-9-11
<b>A-4</b>	CL, ML	7-12	10	8-10-12
<b>A-5</b>	ML, MH, CH	8-13	10	8-10-12
<b>A-6</b>	CL, CH	9-15	12	10-12-14
<b>A-7</b>	MH, CH	10-16	13	11-13-15

*Tabla 2. Requerimientos de cemento para varios tipos de suelos.*

### 2.1.3.2 Suelo.

Dado que el suelo-cemento obtiene su estabilidad principalmente por la hidratación del cemento y no por la cohesión del suelo y fricción interna del material, prácticamente todos los suelos y combinaciones de materiales pueden ser endurecidos o mejorados con cemento portland.

Algunas excepciones son suelos orgánicos, arcillas plásticas y suelos arenosos poco reactivos.

Para determinar el contenido de cemento necesario para estabilizar el suelo es preciso caracterizarlo y determinar:

- Granulometría.
- Limite líquido.
- Índice de plasticidad.
- Clasificación AASHTO.
- Densidad seca máxima de la mezcla.

### 2.1.3.3 Agua.

Componente con el cual el cemento experimenta reacciones químicas que le dan propiedades de fraguar y endurecer para formar un sólido único con el suelo.

*Agua de adsorción:* Interfaces entre gel y medio ambiente.

*Agua capilar:* Se evapora al aumentar la temperatura.

*Agua libre:* Se evapora con facilidad, controla el asentamiento de la mezcla.

Si aumentamos la cantidad de agua la hidratación disminuye.

*Agua de absorción del suelo o agregados.*

*Agua de curado:* Para garantizar completa hidratación del gel de cemento; A mayor curado las resistencias se incrementan.

Para la fabricación de mezclas debe ser clara, limpia y libre de:

- Aceites que dañan la adherencia con los agregados.
- Ácidos que puedan atacar el cemento.
- Materia orgánica que reduce la resistencia del suelo-cemento.
- Azúcares que retardan el fraguado de la mezcla.

#### **2.1.4 Características de las bases estabilizadas.**

Al hacer una estabilización de suelo con la adición de cemento se busca el mejoramiento de algunas de las características de dicho suelo. Entre las más significativas para el diseño de bases para pavimentos están la durabilidad, la capacidad portante entre otras.

##### **2.1.4.1 Microestructura.**

Aunque la microestructura no es exactamente una característica del suelo-cemento, una breve descripción sobre este aspecto es necesaria para explicar los fenómenos de la retracción.

En este tipo de mezcla, el mecanismo de acción entre el cemento y el suelo es el mismo que en la mezcla de hormigón.

Se considera que la estructura de las bases estabilizadas con cemento está compuesta por tres fases: la pasta de cemento hidratado, el árido, y la zona de transición entre la pasta y el árido. La pasta de cemento hidratado contiene una distribución no homogénea de diferentes tipos de sólidos, poros y microgrietas. Se pueden considerar cuatro fases sólidas principales en la pasta de cemento hidratado: hidrato de silicato de calcio (C-S-H), también llamado gel de sílice, que representa entre el 50 al 60% del volumen de la pasta, hidróxido de calcio que constituye el 20-25 % de volumen de pasta, cristales de sulfoaluminato de calcio, que ocupan entre el 15-20% de volumen, y los granos de clinker no hidratados. Se puede considerar que la

pasta consiste en una continua matriz de C-S-H que rodea grandes cristales de hidróxido de calcio, y de sulfoaluminato de calcio con forma de agujas, y a granos de cemento no hidratados.

La resistencia del suelo-cemento es atribuida principalmente a las fuerzas de Van Der Waals entre las capas del gel. Los fenómenos de la retracción están relacionados con el movimiento de agua capilar y agua adherida entre las capas de gel, debido al secado o a las tensiones externas aplicadas. (Whittman, 1982).

La fase del árido constituye entre el 80-90% de la mezcla y es la principalmente responsable de la estabilidad dimensional del mismo. En relación con la microestructura de la mezcla suelo-cemento, su importancia está en su influencia sobre la zona de transición.

La zona de transición es la zona límite entre los áridos y la pasta, y su espesor está entre 10-50  $\mu\text{m}$ . Esta fase es la más débil de las tres fases, por lo cual tiene mayor influencia en el comportamiento mecánico (Mehta y Montero, 1993).

Las características de las tres fases y la interacción entre ellas son las que determinan las propiedades mecánicas del suelo-cemento.

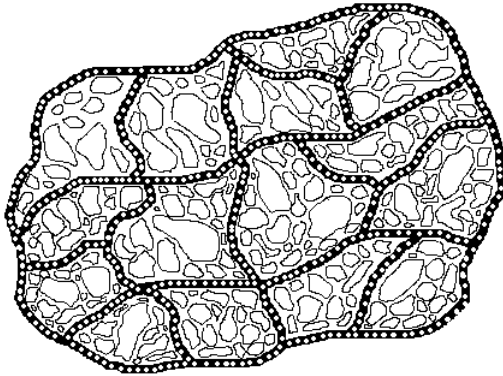
La porosidad del hormigón es una de las características más importante en relación con la microestructura. Los parámetros que caracterizan la porosidad son el tamaño, la forma y la continuidad de los poros. Existen dos tipos de poros: los microporos y los macroporos. Los microporos son los espacios entre las capas del gel de sílice (C-S-H) y su tamaño varía entre 0,5 nm – 10 nm, Estos espacios son muy pequeños y no afectan la permeabilidad de la mezcla.

Los macroporos, también llamados poros capilares, son los espacios no llenados por los productos de la hidratación. Estos poros son los que determinan el grado de permeabilidad; y por consiguiente su durabilidad. Se

considera que los macroporos tienen un diámetro con tamaño entre 10 nm y 10  $\mu\text{m}$ . Hay que tener en cuenta que el tamaño y distribución de los poros capilares depende del grado de hidratación y la relación agua/cemento.

Cuanta más alta es la relación agua/cemento, la cantidad y el tamaño de los poros aumenta.

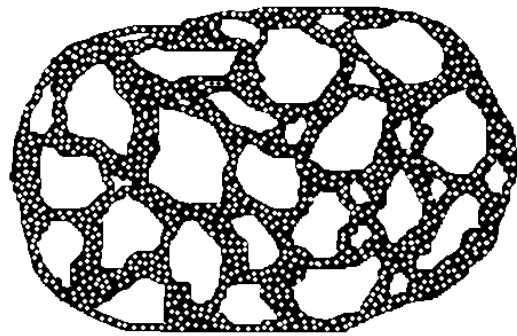
#### SUELO-CEMENTO



*Figura 1. Suelo-Cemento*

Casi cualquier tipo de suelo/agregado;  
Granulometría sin restricción;  
Insuficiente pasta para formar una capa  
sobre todas las partículas.

#### HORMIGÓN



*Figura 2. Hormigón.*

Agregados seleccionados;  
Granulometría específica; Pasta sobre  
todas las partículas.

#### 2.1.4.2 Resistencia a compresión.

Es una de las propiedades más ampliamente discutidas; la escuela británica la toma como criterio básico para el diseño de la mezcla. La escuela americana prefiere partir de ensayos de durabilidad para el diseño del suelo-cemento.

Los suelos granulares alcanzan resistencia a la compresión, con menores cantidades de cemento que los suelos arcillosos o limosos.

El cemento utilizado en mezcla, no debe tener mas de 90 días de almacenados o 120 de fabricado, ya que la resistencia se ve afectada por este factor y otros como el tipo de suelo, el porcentaje de cemento, la edad, y curado.

Para ensayos, se sigue la norma ASTM D1635-63.

El comportamiento elástico del suelo-cemento, esta influenciado por:

- Compactación relativa.
- Porcentaje de cemento.
- Contenido de agua.
- Porcentaje de arcilla en el suelo.

Se pueden tomar como valores medios.

$$E = 100000 \text{ kg/cm}^2$$

$$\mu = 0.13$$

Fuente:

Instituto colombiano productores de  
cemento

Suelos granulares con porcentajes de cemento entre 3- 14% y edades entre 7 y 90 días, presentan valores entre 55000 y 300000 kg/cm<sup>2</sup>; y suelos limosos y arcillosos, presentan valores menores entre 50000 a 175000 kg/cm<sup>2</sup>.

#### 2.1.4.3 *Durabilidad.*

La mezcla suelo-cemento, debe resistir las acciones naturales, para que las propiedades que aseguran el buen funcionamiento de esta, no presente grandes variaciones con el paso del tiempo.

## 2.2 Retracción.

La retracción es la deformación de la mezcla suelo, agregado y cemento en estado fresco o endurecido producida por la pérdida de humedad, y que no depende de la carga externa aplicada. Wittman (1982)

Durante el proceso de endurecimiento y fraguado, el suelo-cemento contrae de volumen cuando se verifica en el aire, y entumece cuando se verifica en el agua. Al primer fenómeno se llama retracción.

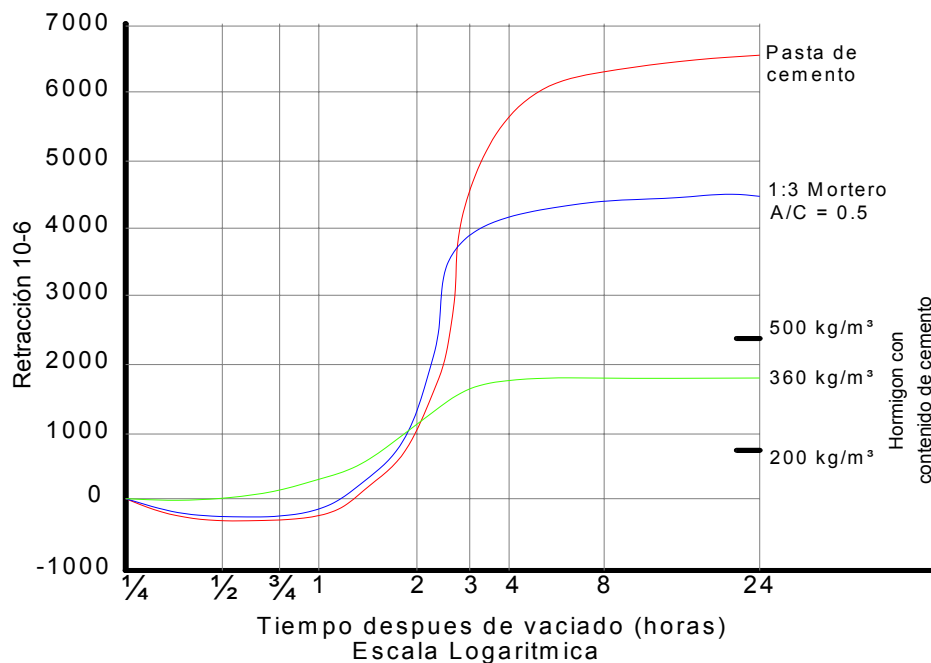
La retracción puede explicarse por la pérdida paulatina de agua en la mezcla. Aunque el fenómeno es complejo, de una forma simplificada se puede decir que la mezcla suelo-cemento contiene agua en cinco estados distintos:

- Agua combinada químicamente o de cristalización.
- Agua de gel.
- Agua zeolítica o intercrystalina.
- Agua adsorbida, que rodea los granos del árido y pasta.
- Agua capilar o libre.

También existen tres tipos de retracción: retracción capilar, retracción química, y retracción de secado. La retracción capilar, también llamada retracción plástica, está relacionada con la retracción de la mezcla en su estado fresco y actúa durante las primeras horas. La retracción química es un término utilizado para varios tipos de retracción que deben su origen a reacciones químicas en la mezcla. Whittman define seis diferentes tipos de retracción de origen químico, pero en este trabajo sólo se va a comentar la retracción autógena ya que las mezclas de suelo-cemento estudiadas la relación agua/cemento son bajas. La retracción de secado es la deformación de la mezcla endurecida producida por la pérdida de humedad.

### 2.2.1 Retracción plástica.

La retracción plástica se refiere a la deformación antes del fraguado final. La retracción plástica ocurre por la pérdida de agua de la mezcla, normalmente debido a la evaporación de agua de la superficie, pero también por la succión de agua por el encofrado. La mezcla en estado fresco, todo el espacio libre entre las partículas está lleno de agua. Factores exteriores, como la evaporación de agua de la superficie, causan la formación de meniscos que generan presión negativa sobre la pasta, produciendo su retracción. La retracción plástica es menor en el suelo-cemento que en la pasta (cemento-agua), debido a la presencia de los áridos. En la Gráfica 1 se pueden ver valores típicos de la retracción plástica de la pasta, mortero y hormigón. La retracción en el hormigón es hasta tres veces más pequeña que la de la pasta, debido a los áridos.



Gráfica 1. La retracción plástica en pastas, morteros y hormigones (Neville, 1995).

Los factores relacionados con la mezcla que influyen sobre la retracción plástica son el contenido de cemento, la relación agua/cemento y el volumen de pasta. La retracción plástica aumenta con el aumento en contenido de cemento y pasta y al disminuir la relación agua/cemento.

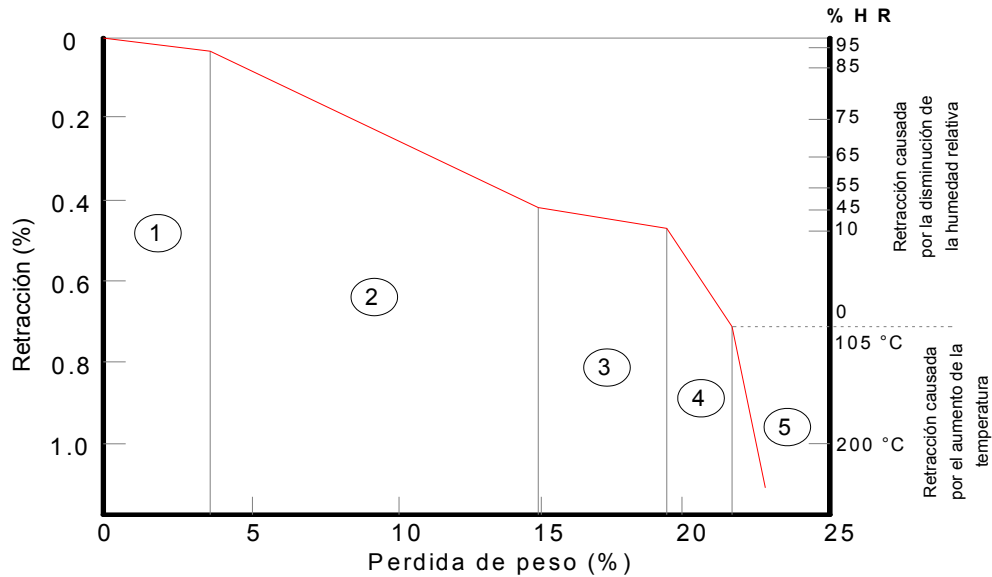
Los factores externos que agravan la retracción plástica son: humedad relativa baja, altas temperaturas y el viento. Se puede reducir y hasta eliminar la retracción plástica del hormigón con un curado adecuado y previniendo la evaporación de agua de la superficie.

### **2.2.2 Retracción autógena.**

En un hormigón de baja relación agua/cemento puede ocurrir que no haya suficiente agua para completar el proceso de hidratación. En estas condiciones, se va a consumir el agua libre que se encuentra en los poros capilares para seguir con el proceso de hidratación. Este fenómeno de consumo interno de agua, también llamado autosecado, es la causa de la retracción autógena del hormigón o mezcla suelo-cemento. La retracción autógena tiende a incrementarse con temperaturas elevadas, alto contenido de cemento, cementos más finos, y con cementos que tienen alto contenido de C3A y C4AF. Todos estos factores también aceleran el proceso de hidratación.

### **2.2.3 Retracción de secado.**

La retracción de secado es una deformación relacionada con la pérdida de humedad del la mezcla de suelo-cemento en estado ya endurecido. Cuando existe un gradiente de humedad entre la mezcla y el ambiente, se pierde parte del agua que contiene la pasta. Este movimiento de agua hacia el exterior es la causa de la retracción. En la Grafica 2 se puede ver cómo la retracción se desarrolla en función de humedad relativa.



**Gráfica 2. Relación entre la retracción y la pérdida de humedad en pastas de cemento (Mindess y Young, 1981).**

Según la Gráfica 2, la retracción aumenta con la disminución de la humedad relativa. La disminución de la humedad relativa aumenta el gradiente de humedad entre la pasta y el ambiente, acelerando la pérdida de agua hacia el exterior. El proceso de secado empieza con la pérdida de agua libre que se encuentra en los poros capilares (fase 1 y 2 en Gráfica 2) En estas primeras fases, la retracción de la pasta aún no es visible, pero ya se forma un gradiente interno de humedad por el cual el agua adsorbida al gel de sílice se desplaza hacia los poros. En caso que la humedad relativa baje del 45%, la pérdida de agua continúa y empieza a afectar al agua absorbida a la superficie del gel de sílice C-S-H (fase 3). A continuación se pierde el agua interna del gel C-S-H (fase 4), y por último tiene lugar la descomposición del gel (fase 5).

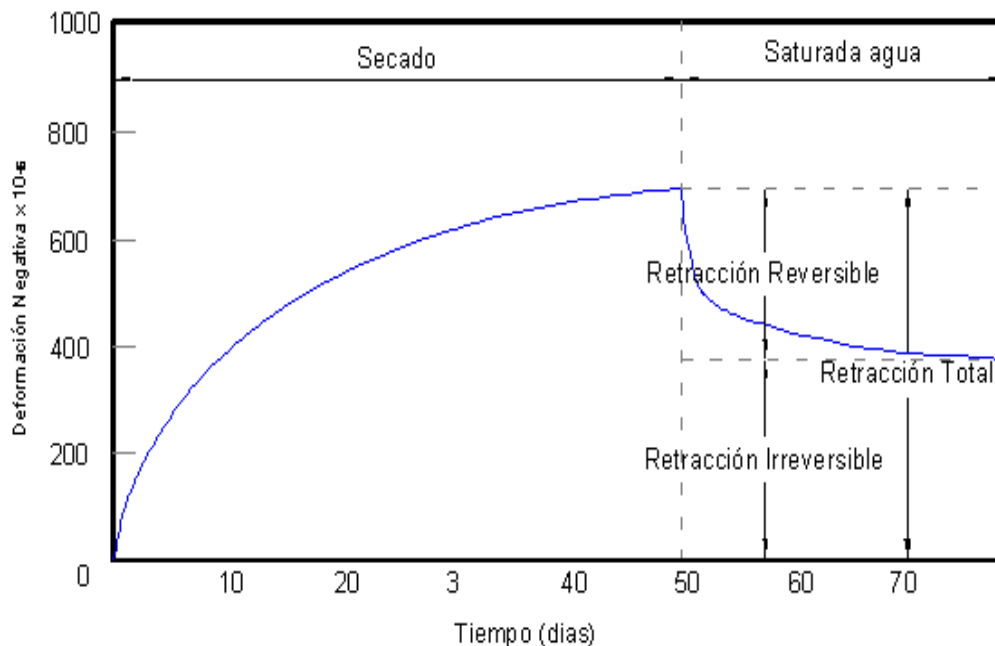
La retracción de la pasta puede ser reversible y irreversible (Gráfica 3). Los procesos que intervienen en este fenómeno aún no están completamente comprendidos, pero en general se atribuye la retracción reversible a los siguientes tres fenómenos (Mindess y Young, 1981).

La tensión capilar creada por la formación de meniscos en los poros.

Presión de desconexión. Esto se refiere a la presión causada por las moléculas de agua adsorbidas a la superficie del gel C-S-H. Esta presión aumenta con el grosor de la capa de agua adsorbida.

Energía libre de superficie. Cuando la humedad relativa está por debajo del 40%, desaparece la tensión capilar y la presión de desconexión. En estas condiciones la retracción se debe a la presión generada por la energía libre de superficie.

La retracción irreversible es atribuida a los cambios en la microestructura que tiene lugar durante el proceso de secado. (Mindness y Young, 1981). Las deformaciones irreversibles se deben a cambios físicos o químicos en la pasta. En general se atribuye estos cambios a la reorganización de gel de C-S-H debido al secado.



Gráfica 3. Retracción de secado compuesta por retracción reversible e irreversible. (Mindness y Young, 1981).

La retracción irreversible es la diferencia final en largo de la probeta después de que ha sido secada y otra vez saturada en agua. El envejecimiento de la pasta reduce la cantidad total de la retracción por secado. Pastas más maduras y pastas secadas a temperaturas elevadas se retraen menos para una humedad relativa dada. El proceso de envejecimiento afecta mayormente al componente irreversible de la retracción.

#### ***2.2.4 Factores que influyen sobre la retracción.***

Los factores que afectan la magnitud y velocidad de desarrollo de la retracción son numerosos. Se pueden separar a los factores que afectan a la retracción en tres grupos: factores relacionados con la dosificación de la mezcla, factores relacionados con el ambiente, y factores relacionados con el método de ejecución.

##### *2.2.4.1 Factores relacionados con la dosificación de la mezcla.*

En relación con los factores relacionados con la dosificación de la mezclas, se puede mencionar el contenido de árido, tamaño y distribución de los áridos, contenido de agua y cemento, tipo de cemento.

El factor más importante que afecta a la magnitud de la retracción es el contenido de árido. Aunque este fenómeno tiene lugar en la pasta, el árido tiene la función de limitar estas deformaciones. Hay que recordar que el volumen del hormigón está compuesto por el volumen de pasta más el volumen de árido, lo que significa que mayor volumen de pasta implica menor volumen de árido.

El contenido de árido es uno de los factores que más influye en la retracción del hormigón. Se puede cuantificar la influencia del árido sobre la retracción utilizando la siguiente expresión (Newman y Choo, 2003).

$$S_c = S_p(1 - a)^n \quad [1]$$

Donde:

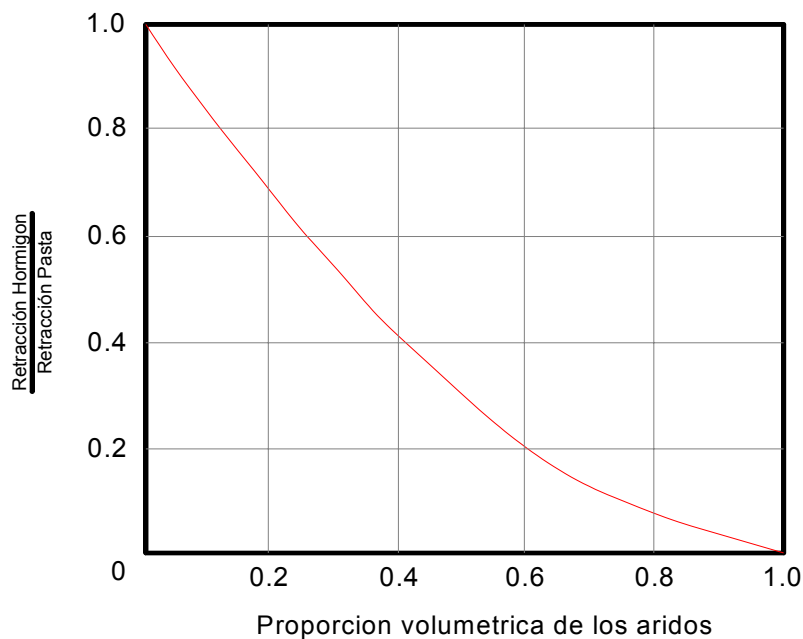
$S_c$  es la retracción del hormigón.

$S_p$  es la retracción de la pasta.

$a$  es el contenido de árido en la mezcla del hormigón.

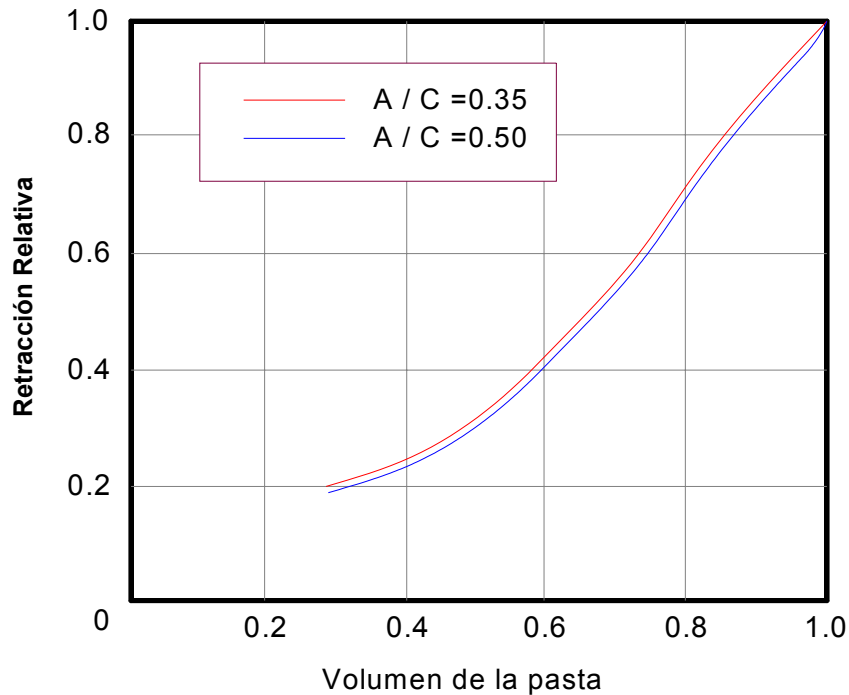
$n$  es un valor experimental. Los valores de  $n$  varían entre 1,2 y 1,7.

Según esta expresión, el aumento en contenido de árido contribuye a disminuir la retracción. Por ejemplo, aumentando el volumen de árido de 71% a 74% se reduce la retracción en, aproximadamente, 20%. En la Grafica 4 se ve la relación directa entre el contenido de árido y la retracción del hormigón.



**Gráfica 4. Influencia de la cantidad de áridos de diferentes naturalezas sobre la retracción (Delibes, 1993).**

Bissonnette, *et al.* (1999) confirma que en pastas y morteros, la magnitud de la retracción es proporcional al volumen de pasta. La forma de la curva, si es cóncava o convexa, depende de los valores relativos del módulo de elasticidad de la pasta y los áridos.



Gráfica 5. Relación entre el volumen de pasta y la retracción relativa (Bissonnette et al. , 1999).

Como la relación entre el contenido de árido y la retracción es lineal, el ACI 209-92 incluye la siguiente expresión para dos mezclas de hormigón hechas con la misma pasta, pero diferente contenido de árido.

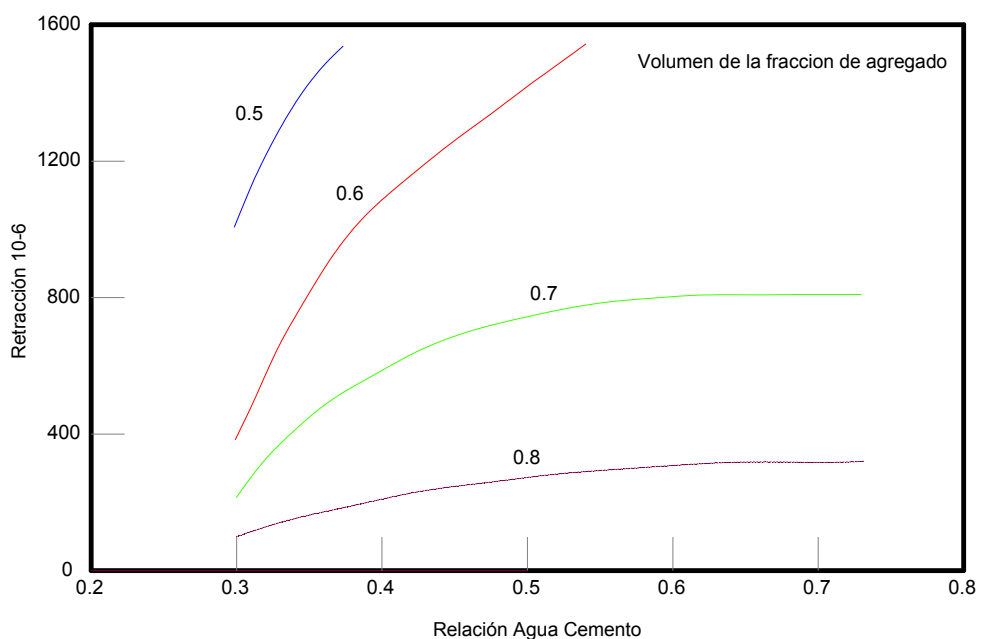
$$\frac{(\varepsilon_{sh})_{u1}}{(\varepsilon_{sh})_{u2}} = \frac{1 - (V_1)^{\frac{1}{3}}}{1 - (V_2)^{\frac{1}{3}}}$$

Donde  $V_1$  y  $V_2$  son el volumen total de árido por unidad de volumen del hormigón para las mezcla 1 y 2.  $(\varepsilon_{sh})_{u1}$  y  $(\varepsilon_{sh})_{u2}$  son la retracción de las mezclas 1 y 2.

En relación con el tamaño y la distribución del árido, a mayor tamaño máximo, mayor es el contenido de árido debido a su distribución. Esto disminuye el volumen de pasta, que a su vez, reduce la retracción (Neville, 1995).

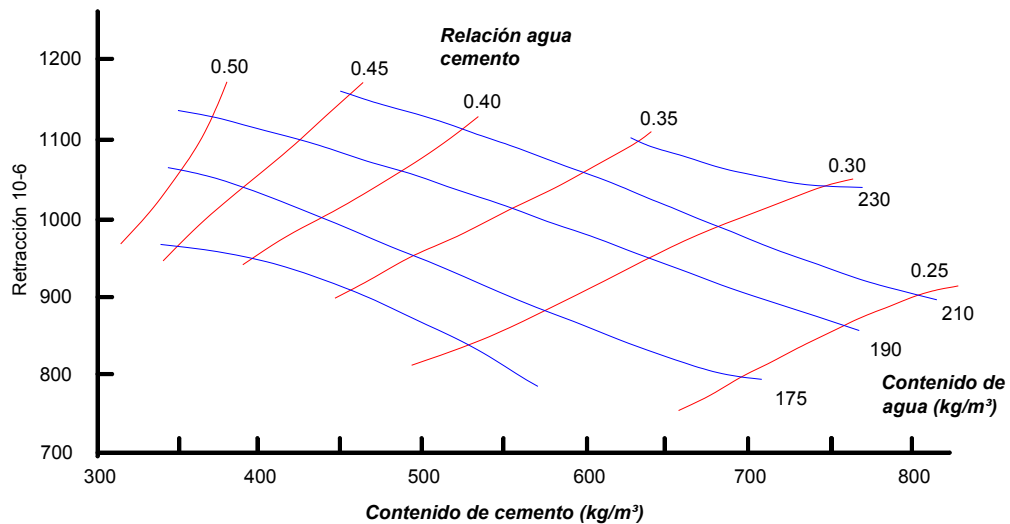
El incremento de los tres parámetros: contenido de agua, contenido de cemento y relación/agua cemento, están relacionados con un aumento en el contenido de pasta y en consecuencia, en el aumento de la retracción.

En la Grafica 6 se observa que, aunque la retracción aumenta con el incremento en la relación agua/cemento, la influencia del contenido de árido sobre la magnitud de la retracción es más significativa.



**Gráfica 6. Influencia de la relación agua/cemento y el contenido de árido sobre la retracción del hormigón.**

La influencia conjunta del contenido de agua, contenido de cemento y relación agua/cemento sobre la retracción aparece en la Grafica 7.



Gráfica 7. Relación entre el contenido de agua, contenido de cemento y relación agua/cemento con la retracción de hormigón curado en humedad durante 28 días y secado a 450 días (Neville, 1995).

Es interesante mencionar que según el estudio de Bissonnette *et al.* (1999), a contrario de lo generalmente indicado, la relación agua/cemento influye poco sobre la retracción, en caso de pastas con relación agua/cemento entre 0,35 y 0,55 (Grafica 5). El factor determinante es sólo el contenido de pasta. Según Neville (1995), las propiedades químicas del cemento influyen poco sobre la retracción. La finura del cemento influye sólo en caso de partículas mayores que 75µm, que también contribuyen a restringir la retracción.

#### 2.2.4.2 Factores ambientales.

Considerando que la pérdida de humedad es la causa principal de la retracción de secado, este es uno de los factores que más influyen sobre este fenómeno. La relación entre la humedad relativa y la retracción esta analizada más arriba, en la Grafica 2.

En pastas, la retracción aumenta de forma casi lineal con la disminución en la humedad relativa (Bissonnette, *et al.*, 1999).

#### 2.2.4.3 Factores relacionados con el método de ejecución.

Entre los factores relacionados con el método de ejecución tenemos el periodo de curado, tipo de curado, tamaño y forma de la probeta, la edad de aplicación de la carga, y la magnitud de la carga.

Según Neville (1995), los resultados de varias investigaciones sobre este aspecto son contradictorias, pero en general, el período de curado no es un factor importante en la retracción.

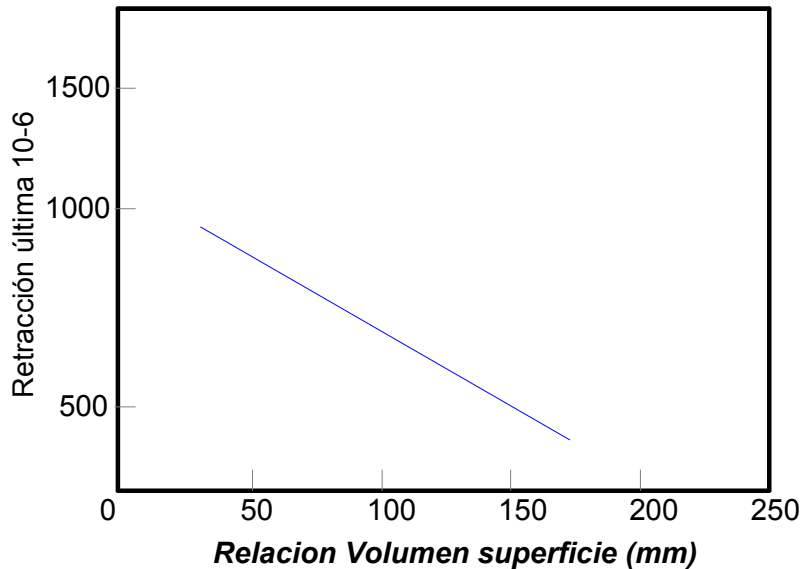
Utilizar curado al vapor puede reducir la retracción del hormigón hasta el 30% (Attiogbe *et al.* 2002).

El tamaño de la pieza es importante en el desarrollo y el valor último de la retracción.

En piezas pequeñas la velocidad de desarrollo de la retracción es mayor que en piezas grandes, y en general se asume que la retracción es proporcional al inverso de la relación volumen/superficie.

$$retraccion \propto \frac{1}{(V/S)^2}$$

Según Mindess y Young (1981), en piezas grandes, la velocidad de retracción es menor, pero el valor último es mayor que en piezas pequeñas. Esta relación inversa entre la velocidad de desarrollo y la retracción última está relacionada con la retracción diferencial en el interior de la pieza (Grafica 8).



*Gráfica 8. Efecto de la relación volumen/superficie sobre la retracción última del hormigón.*

El efecto de la forma de la pieza también influye sobre la retracción, pero según Neville (1995), su influencia es secundaria. Piezas con la misma relación volumen/superficie, pero en forma de I, manifiestan menor retracción que piezas cilíndricas. Estas diferencias están relacionadas con la distancia que el agua tiene que recorrer hasta la superficie.

### **2.2.5 Retracción en bases estabilizadas con cemento.**

Cambios de volumen del material a causa de la pérdida paulatina de agua en los procesos de hidratación y secado.

La distancia media entre fisuras es directamente proporcional a la resistencia a tracción del material a corto plazo. Si se dejara fisurar libremente, las distancias entre fisuras serian normalmente del orden de 3 a 6 mts para suelo-cemento, 5 a 10 mts para grava cemento y 8 a 15 mts para hormigones compactados.

### **3 MODELO DE ESTIMACIÓN DE LA RETRACCIÓN.**

#### **3.1 Criterios para caracterizar la retracción en el modelo de cálculo.**

El modelo utilizado esta calibrado para hormigones y existen diferencias con las bases estabilizadas; las diferencias son parte de los factores aplicados en el modelo y también fueron modificados para el cálculo de las retracciones.

Las diferencias con un hormigón convencional y las bases estabilizadas son:

- Consistencia de la mezcla.
- Contenido de material fino y granular
- Contenido de agua; En las bases estabilizadas el contenido de a gua es muy bajo debido a que se trabajo con la humedad optima de compactación.
- Contenido de aire; bajo debido a la compactación en las probetas.

El modelo de cálculo es el utilizado en América latina.

#### **3.2 Descripción del modelo de cálculo.**

El modelo del ACI 209R-92 está basado en el trabajo de Branson y Christianson (1971), con algunas modificaciones introducidas en el ACI 209R-82.

Inicialmente este modelo fue desarrollado para la industria de los prefabricados, pero con los años se ha convertido en el modelo de referencia para hormigones en EE.UU.

Este modelo es también utilizado en Canadá, Australia y en parte de América Latina.

Es un modelo puramente empírico, basado en resultados experimentales anteriores al año 1968 (Al-Manaseer, 2005).

El modelo es aplicable al hormigón de peso normal y a hormigón ligero con cementos tipo I y III, y curado en condiciones húmedas o con vapor.

En su nivel más básico, los parámetros necesarios son:

- Edad cuando comienza la retracción.
- Edad de puesta en carga.
- Método de curado.
- Humedad relativa, expresada en decimales,  $\gamma$ .
- Relación volumen/superficie, o espesor medio, mm.

Este modelo permite utilizar factores correctores que consideran el contenido de árido fino, el contenido de aire, consistencia de la mezcla, y contenido de cemento.

### **3.2.1 ACI 209R-92.**

#### *3.2.1.1 Modelo de cálculo de la retracción.*

Para el cálculo de la retracción,  $(\epsilon_{sh})_t$  después de 7 días de curado húmedo, se utiliza la siguiente ecuación:

$$(\epsilon_{sh})_t = \frac{t}{35 + t} (\epsilon_{sh})_u$$

La retracción,  $(\epsilon_{sh})_t$  después de 1 a 3 días de curado al vapor es:

$$(\epsilon_{sh})_t = \frac{t}{55 + t} (\epsilon_{sh})_u$$

Donde:

$t$  Es la edad del hormigón después del curado inicial del hormigón.

$$(\varepsilon_{sh})_u = 780\gamma_{sh} \times 10^{-6} \text{ [m/m]}$$

El coeficiente  $\gamma_{sh}$  representa el producto de todos los factores de corrección aplicables, definidos en la siguiente ecuación.

$$\gamma_{sh} = \gamma_{cp} \times \gamma_{\lambda} \times \gamma_{vs} \times \gamma_s \times \gamma_{\psi} \times \gamma_c \times \gamma_{\alpha}$$

Donde:

$\gamma_{cp}$  Es un factor corrector para periodos de curado húmedo diferentes a los 7 días.

$\gamma_{\lambda}$  Es un factor corrector para la humedad relativa.

$\gamma_{vs}$  Es un factor corrector para el tamaño de la pieza.

$\gamma_s$  Es un factor corrector para la consistencia del hormigón.

$\gamma_{\psi}$  Es un factor corrector para el contenido de árido fino.

$\gamma_c$  Es un factor corrector para el contenido de cemento.

$\gamma_{\alpha}$  Es un factor corrector para el contenido de aire.

Para determinar el valor del factor corrector para el curado inicial,  $\gamma_{cp}$  se utiliza la Tabla 3.

Periodo de curado, días.	Factor corrector, $\gamma_{cp}$
1	1,2
3	1,1
7	1,0
14	0,93
28	0,86
90	0,75

Tabla 3. Factor corrector de la retracción para el curado inicial (Tabla 2.5.3 del ACI 209).

Para determinar el valor del factor corrector para la humedad relativa,  $\gamma_\lambda$  se utilizan las siguientes expresiones:

$$\begin{aligned} \gamma_\lambda &= 1,40 - 0,010\gamma && \text{para } 40 \leq \gamma \leq 80 \\ \gamma_\lambda &= 3,0 - 0,030\gamma && \text{para } 80 < \gamma \leq 100 \end{aligned}$$

Donde:

$\gamma$  Es la humedad relativa en porcentaje. Valores representativos de  $\gamma_\lambda$  están incluidos en la Tabla 4.

Humedad relativa, %	$\gamma_\lambda$
<40	>1,00
40	1,00
50	0,90
60	0,80
70	0,70
80	0,60
90	0,30
100	0,00

Tabla 4. Factor corrector de la retracción para la humedad relativa (Tabla 2.5.4 del ACI 209).

El ACI 209 ofrece dos métodos para estimar el efecto del tamaño de la probeta sobre la retracción. El primer método es el método del espesor medio,  $\gamma_h$ . En este método se considera el espesor medio de la pieza. Para piezas con espesor medio menor de 150 mm se utiliza la Tabla 5 para determinar el valor de  $\gamma_h$ . Para piezas con espesor medio entre 150 y 380 mm se utiliza las siguientes expresiones:

Para la retracción última,

$$\gamma_h = 1,17 - 0,00114 \times h$$

Durante el primer año de secado,

$$\gamma_h = 1,23 - 0,0015 \times h$$

Donde:

$h$  Es el espesor medio de la pieza.

$$h = \frac{4 \times V}{S}$$

$V$  Es el volumen de la pieza,  $\text{mm}^3$ .

$S$  Es la sección de la pieza,  $\text{mm}^2$ .

La Tabla 5 (Tabla 2.5.5.1 del ACI 209) incluye los factores correctores para el espesor medio de la pieza.

Espesor medio, mm	Retracción, $\gamma_h$	
	$\leq 1$ año	Valor ultimo
51	1,3	1,3
76	1,17	1,17
104	1,11	1,11
127	1,04	1,04
152	1,00	1,00
203	0,96	0,96
254	0,91	0,93
305	0,86	0,90
381	0,80	0,85

Tabla 5. Factores correctores para el espesor medio de la pieza.

Según el ACI 209, el método del espesor medio ofrece valores mayores para el factor de corrección en comparación con el método basado en la relación volumen/superficie. En este trabajo se utiliza el método de la relación volumen/ superficie para estimar el coeficiente  $\gamma_{vs}$ .

$$\gamma_{vs} = 1,2^{(-0,00472 \cdot V/S)}$$

$V/S$  En  $\text{mm}$

La Tabla 6 incluye valores representativos de  $\gamma_{vs}$  (Tabla 2.5.5.2 de la ACI 209).

Relación volumen/superficie, mm	Retracción, $\gamma_{vs}$
25	1,06
38	1,00
51	0,94
76	0,84
102	0,74
127	0,66
152	0,58
203	0,46
254	0,36

Tabla 6. Factor corrector para la relación volumen/superficie,  $\gamma_{vs}$ .

El valor de  $\gamma_{vs}$  no debe ser menor que 0,2.

El modelo ACI 209-92 incluye factores correctores para la composición de la mezcla. Estos factores consideran el efecto de la consistencia, porcentaje de árido fino, contenido de cemento y aire. En caso de no tener estos datos, el ACI 209 indica que se puede prescindir de estos factores.

El factor corrector para la consistencia del hormigón,  $\gamma_s$  es:

$$\gamma_s = 0,89 + 0,0016 \cdot s$$

Donde  $s$  es el asiento del hormigón, en mm.

El factor corrector para el porcentaje de árido fino,  $\gamma_\psi$  es:

$$\text{Para } \psi \leq 50\% \quad \gamma_\psi = 0,30 + 0,014 \cdot \psi$$

$$\text{Para } \psi > 50\% \quad \gamma_\psi = 0,90 + 0,002 \cdot \psi$$

Donde  $\psi$  es la relación entre el árido fino y el total de los áridos en peso, expresado en porcentaje.

El factor corrector para el contenido de cemento,  $\gamma_c$  es:

$$\gamma_c = 0,75 + 0,00061 \cdot c$$

Donde  $c$  es el contenido de cemento en kg/m<sup>3</sup>.

En la Tabla 7 están incluidos valores típicos para  $\gamma_c$ .

<b>cemento, kg/m<sup>3</sup></b>	<b><math>\gamma_c = 0,75 + 0,00061 \cdot c</math></b>
<b>100</b>	0,84
<b>150</b>	0,81
<b>200</b>	0,87
<b>250</b>	0,90
<b>300</b>	0,93
<b>350</b>	0,96
<b>400</b>	0,99
<b>450</b>	1,02
<b>500</b>	1,06
<b>550</b>	1,09
<b>600</b>	1,12

*Tabla 7. Factor corrector para el contenido de cemento,  $\gamma_c$ .*

El factor corrector para el contenido de aire,  $\gamma_\alpha$  es:

$$\gamma_\alpha = 0,95 + 0,008 \cdot \alpha$$

Donde  $\alpha$  es el contenido de aire, en %.

### **3.2.2 Limitaciones y requisitos del modelo de cálculo.**

El modelo de cálculo varía en su complejidad y en las variables necesarias para el cálculo. A continuación en resumen, las variables necesarias para el cálculo de la retracción es:

- Humedad relativa, %
- Dimensión de la probeta.
- Condiciones de curado.
- Edad de comienzo de la retracción;  $t_s$ , días.
- Edad de la mezcla,  $t$ .
- Contenido de cemento,  $\text{kg/m}^3$
- Contenido de árido fino,  $\text{kg/m}^3$

## **4 CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES.**

### **4.1 Criterios para selección de suelo.**

En la investigación se estabilizaron dos tipos de suelos tomados de la clasificación de suelos y agregados para la construcción de carreteras conocida como la clasificación AASHTO. La clasificación AASHTO establece 7 grupos de suelos y agregados con base en la determinación en el laboratorio de la granulometría, el límite líquido y el límite plástico.

Los tipos de suelos utilizados son el suelo A1 y el suelo A3, debido a que su capacidad portante es la mas alta que los otros tipos de suelos; también son los que requieren el menor porcentaje de cemento para su estabilización.

### **4.2 Características de las mezclas.**

Las mezclas utilizadas en esta investigación se construyeron con una estabilización mecánica; formando los suelos tipo A1 y A3 los cuales se califican como excelentes para el uso en subrasantes los cuales necesitan muy poco porcentaje de cemento.

#### **4.2.1 Tipos de suelos.**

**Suelo A1:** El material típico de este grupo es una mezcla bien gradada de fragmentos de piedra o grava, arena gruesa, arena fina, y un ligante de suelo no plástico o de baja plasticidad.

**Suelo A3:** El material típico de este grupo es la arena fina de playa o la arena fina de desierto, sin finos de arcilla, limo o una pequeña cantidad de limo no plástico. Este grupo también incluyen las mezclas aluviales de arena fina mal gradada con pequeñas cantidades de arena gruesa y grava.

Clasificación general	Materiales granulares (35% o menos pasa el tamiz de # 200)		
	A1	A3	A2
Clasificación de grupo			
Análisis de tamizado, % que pasa			
2,00 mm (# 10)	...	...	...
425 µm (# 40)	50 máx.	51 mín.	...
75 µm (# 200)	25 máx.	10 máx.	35 máx.
Límite líquido			B
Índice de plasticidad	6 máx.	N.P.	B
Calificación general como subrasante	Excelente a bueno		
Tipos característicos de materiales del grupo	Cantos, grava y arena	Arena fina	Grava y arena limoacilosas

Tabla 8. Tipos de suelos. Clasificación AASHTO.

#### 4.2.2 Ensayos para caracterizar los suelos.

En primer lugar se opta por estabilizar suelos granulares tipo A1 y A3 los cuales el requerimiento de cemento es mínimo y se lograra una buena capacidad portante también los materiales empleados deberán cumplir:

- Adecuada granulometría y condiciones de plasticidad
- Adecuada compactación.
- Adecuada capacidad portante.

##### 4.2.2.1 Granulometría y límites

Los suelos utilizados en la investigación presentan las siguientes características granulométricas:

El suelo A1 es un material granular, cuyo porcentaje que pasa el tamiz No. 200 es inferior al 25% y el que pasa el tamiz No. 40 no excede el 50%, cumpliendo con la clasificación AASTHO (Ver Tabla 8). El suelo presenta un Índice de Plasticidad de 5.84.



*Figura 3. SUELO A1*

*Ver Granulometría ANEXO A*

*Ver Limites ANEXO B*

El suelo A3 es una arena fina, cuyo porcentaje que pasa el tamiz No. 200 es inferior al 10% y el que pasa el tamiz No. 40 es mayor al 50%, cumpliendo con la clasificación AASTHO (Ver Tabla 8). Las arenas no presentan límites.

*Ver Granulometría ANEXO A*

#### *4.2.2.2 Compactación.*

El ensayo de compactación se realiza con la Prueba Proctor Modificado. Este ensayo nos proporciona el valor de la humedad óptima para alcanzar el mayor nivel de energía de compactación.

Se realizaron ocho ensayos de compactación como lo estipula la norma INV E-141.

El molde en el ensayo de compactación reúne las siguientes características:

*Diametro ( $\emptyset$ ) = 15,2 cm*

*Altura (h) = 11,62 cm*



**Figura 4. Molde proctor estándar.**

Entonces el volumen es:  $V = \frac{\pi \emptyset^2}{4} \times h = \frac{\pi \times 15,2^2}{4} \times 11,62 = 2108,55 \text{ cm}^3$

*Características del martillo.*

*Peso (W) = 4432 gr*

*Altura de caída (H) = 43,3 cm*

Los golpes fueron como lo indica la norma 5 capas cada una de 55 golpes; con una energía de compactación de:

$$E_e = \frac{N * n * W * H}{V} = \frac{55 * 5 * 4,432 * 43,3}{2108,55} = 25,03 \text{ Kcm/cm}^3$$

*N = Numero de golpes*

*n = Numero de capas*

**Suelo A1 con 3% de cemento**

*Humedad óptima = 5,8%*

*Densidad máxima = 3,03 gr/cm<sup>3</sup>*

**Suelo A1 con 5% de cemento**

*Humedad óptima = 7,4%*

*Densidad máxima = 3,02 gr/cm<sup>3</sup>*

**Suelo A1+Reciclado con 3% de cemento**

*Humedad óptima = 4,0%*

*Densidad máxima = 2,93 gr/cm<sup>3</sup>*

**Suelo A1+Reciclado con 5% de cemento**

*Humedad óptima = 5,0%*

*Densidad máxima = 2,91 gr/cm<sup>3</sup>*

**Suelo A3 con 7% de cemento**

*Humedad óptima = 6,1%*

*Densidad máxima = 2,96 gr/cm<sup>3</sup>*

**Suelo A3 con 9% de cemento**

*Humedad óptima = 7,0%*

*Densidad máxima = 2,94 gr/cm<sup>3</sup>*

**Suelo A3+Reciclado con 7% de cemento**

*Humedad óptima = 5,6%*

*Densidad máxima = 2,94 gr/cm<sup>3</sup>*

**Suelo A3+Reciclado con 9% de cemento**

*Humedad óptima = 6,1%*

*Densidad máxima = 2,94 gr/cm<sup>3</sup>*

**4.3 Dosificación de las mezclas.**

**4.3.1 Contenido y tipos de cementos.**

Para la dosificación de cemento de cada uno de los suelos a estabilizar (A1 y A3) se tiene en cuenta los valores dados por las correspondientes normas,

para cada uno de los suelos se permite usar un rango de porcentajes de cemento. Para el estudio se tomaron dos valores para cada tipo de suelo, siendo estos valores el menor y el mayor en dicho rango.

El porcentaje de cemento no varía con la inclusión del material bituminoso reciclado.

Tipo de Suelo	% Cemento
A1	3
A1	5
A3	7
A3	9

*Tabla 9. Contenido de cemento en las probetas.*

#### **4.3.2 Contenido de agua.**

La cantidad de agua es la correspondiente a la humedad óptima con la cual se alcanza la mayor energía de compactación del suelo. El porcentaje de agua es proporcionado por el ensayo de compactación con la Prueba Proctor Modificado.

Tipo de Suelo	% Cemento	% Agua
A1	3	5.8
A1	5	7.4
A3	7	6.1
A3	9	7.0

*Tabla 10. Dosificación en suelos sin material bituminoso reciclado.*

Tipo de Suelo	% Cemento	% Agua
A1	3	4.0
A1	5	5.0
A3	7	5.6
A3	9	6.1

*Tabla 11. Dosificación en suelos con material bituminoso reciclado.*

#### **4.3.3 Contenido de material reciclado.**

La cantidad de material bituminoso reciclado es la misma cantidad de material grueso presente en las muestras utilizadas para la fabricación de las probetas. Se toma de cada una de las granulometrías de cada suelo, en la figura 5 se puede ver la mezcla del suelo con el material bituminoso reciclado.



*Figura 5. Mezcla con material reciclado*

*Ver Granulometría ANEXO A*

#### **4.4 Preparación de probetas.**

Ya conformados los suelos con las correspondientes granulometrías, límites, conociendo porcentajes de cemento a utilizar y la humedad óptima requerida se preparan las probetas necesarias para el estudio.

Se preparan 2 probetas por cada suelo en estado natural con sus diferentes porcentajes de cemento, lo mismo se hace después de la adición del material bituminoso reciclado. Para un total de 8 probetas por cada tipo de suelo las cuales fueron enumeradas como se puede ver en las Tablas 12 y 13.

SUELO A1	Probeta No.
3%	1
	2
5%	3
	4
3% + Reciclado	5
	6
5% + Reciclado	7
	8

Tabla 12. Enumeración probetas Suelo A1.

SUELO A3	Probeta No.
9%	1
	2
7%	3
	4
7% + Reciclado	5
	6
9% + Reciclado	7
	8

Tabla 13. Enumeración probetas Suelo A3.

El molde en el que se realizaron las probetas reúne las siguientes características:

#### Suelo A1

Diametro ( $\phi$ ) = 8,02 cm

Altura (h) = 15,30 cm

#### Suelo A3

Diametro ( $\phi$ ) = 8,02 cm

Altura (h) = 13,80 cm



Figura 6. Probetas Suelo A1.



Figura 7. Probetas Suelo A3.

Entonces el volumen es suelo A1:  $V = \frac{\pi\phi^2}{4} \times h = \frac{\pi \times 8,02^2}{4} \times 15,30 = 772,91 \text{ cm}^3$

Entonces el volumen es suelo A3:  $V = \frac{\pi\phi^2}{4} \times h = \frac{\pi \times 8,02^2}{4} \times 13,80 = 697,14 \text{ cm}^3$



Figura 8. Características de la probeta.

Para lograr en cada una de las probetas una energía de compactación igual a la utilizada en la Prueba de Proctor, es necesario determinar el número de golpes que se deben dar por capa, ya que el molde utilizado para las probetas tiene dimensiones diferentes al molde utilizado en la prueba de compactación.

El nuevo número de golpes se determina usando el valor de energía específica, conociendo el volumen del molde y las características del martillo a utilizar.

Características del martillo.

*Peso (W) = 2634 gr*

*Altura de caída (H) = 48,8 cm*

La energía específica en la prueba de Proctor fue igual a:

$$E_e = 25,03 \text{ Kcm/cm}^3$$

Número de golpes para cada molde utilizado.

Suelo A1

$$N = \frac{E_e * V}{n * W * H} = \frac{25,03 * 772,91}{5 * 2,634 * 48,8} = 30 \text{ golpes}$$

Suelo A3

$$N = \frac{E_e * V}{n * W * H} = \frac{25,03 * 697,14}{5 * 2,634 * 48,8} = 28 \text{ golpes}$$

## 5 ANALISIS DE LA RETRACCION.

### 5.1 Toma de datos de retracción

Para determinar la retracción del suelo, a cada una de las probetas fabricadas, se mide el cambio de longitud o altura de cada una de ellas.

Esta medición se realiza con un deformímetro cuya precisión es de 0.01 mm montado de forma fija sobre una estructura especialmente diseñada para tal fin, ajustándose a las dimensiones de la probeta. Las mediciones se realizan diariamente.

El montaje utilizado se puede observar en la siguiente figura:



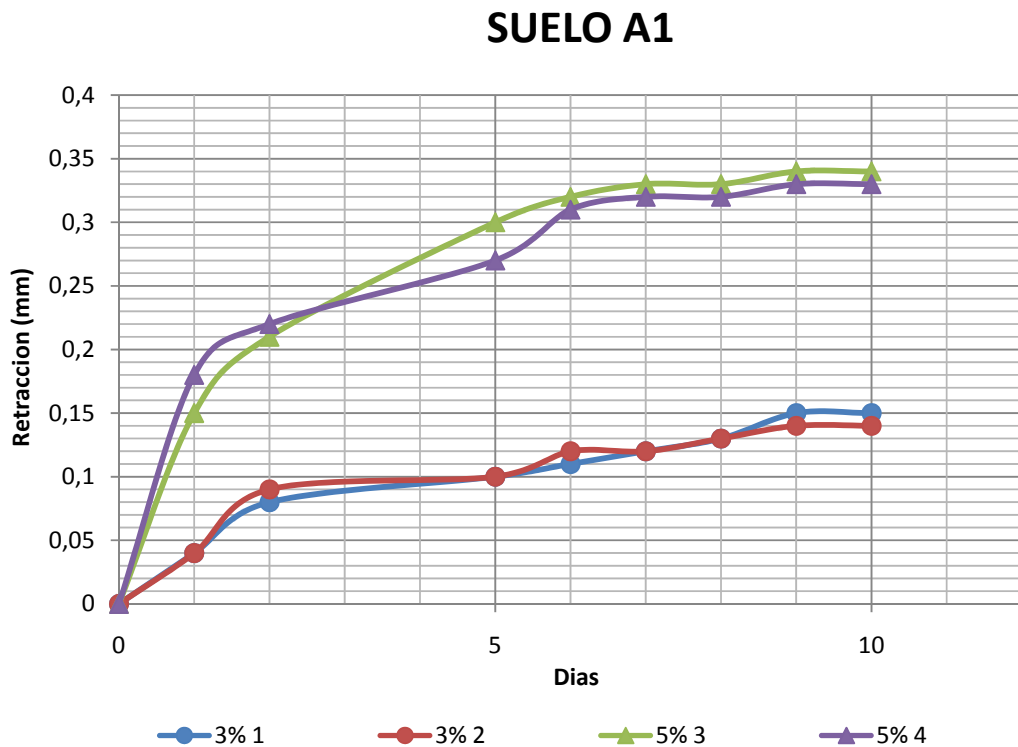
*Figura 9. Montaje para medir las retracciones de las probetas.*

Los datos obtenidos se organizan en diferentes Tablas, mostrando lecturas en el deformímetro, retracciones diarias y retracciones acumuladas.

Ver ANEXO D

## 5.2 Análisis datos de retracción.

En las siguientes graficas se puede observar el comportamiento de la retracción de cada una de las probetas a lo largo del tiempo.

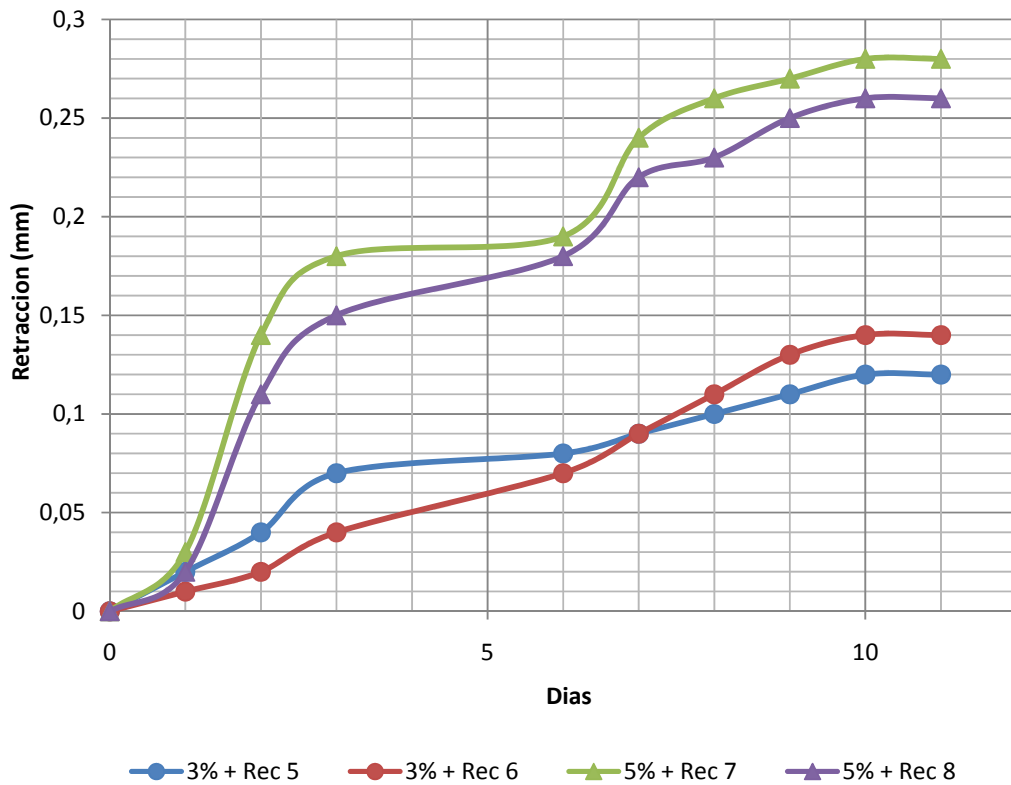


Gráfica 9. Retracciones Acumuladas Suelo A1.

En la Grafica 9 se puede observar que en el suelo estabilizado con cemento, sin adición de material bituminoso reciclado, la retracción máxima se alcanza a una edad de 10 días.

La diferencia de porcentaje de cemento adicionado en la estabilización del suelo, conlleva a la variación de la retracción máxima, siendo mayor en las probetas que presentan un 5% de cemento, dicho valor promedio es de 0.335 mm. Las probetas con 3% de cemento alcanzaron una retracción promedio de 0.145mm.

## SUELO A1 + Rec



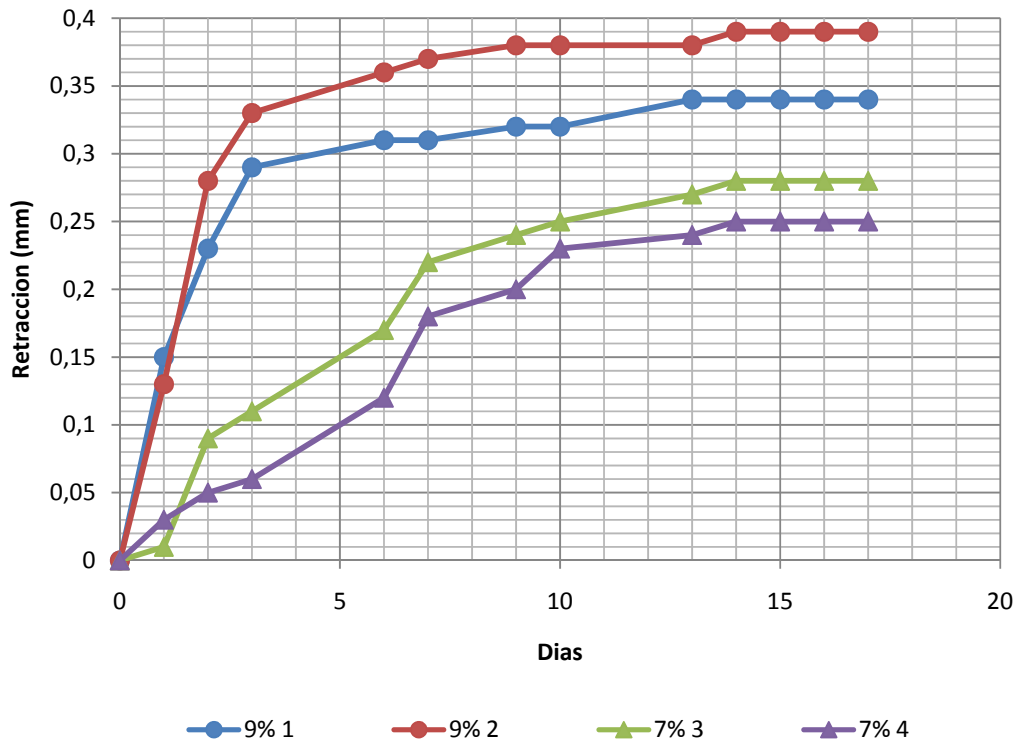
Gráfica 10. Retracciones Acumuladas Suelo A1 + Reciclado.

La Gráfica 10 nos muestra que la adición de material bituminoso reciclado al suelo A1 disminuye el valor de retracción máxima en comparación con el suelo antes de la adición de dicho material.

Para un 3% de cemento la retracción máxima promedio varió de 0.145 mm a 0.13 mm, representando esto una reducción del 10.34 % aproximadamente.

Para un porcentaje del 5% de cemento la reducción de la retracción máxima promedio fue aproximadamente de 19.40%

## Suelo A3

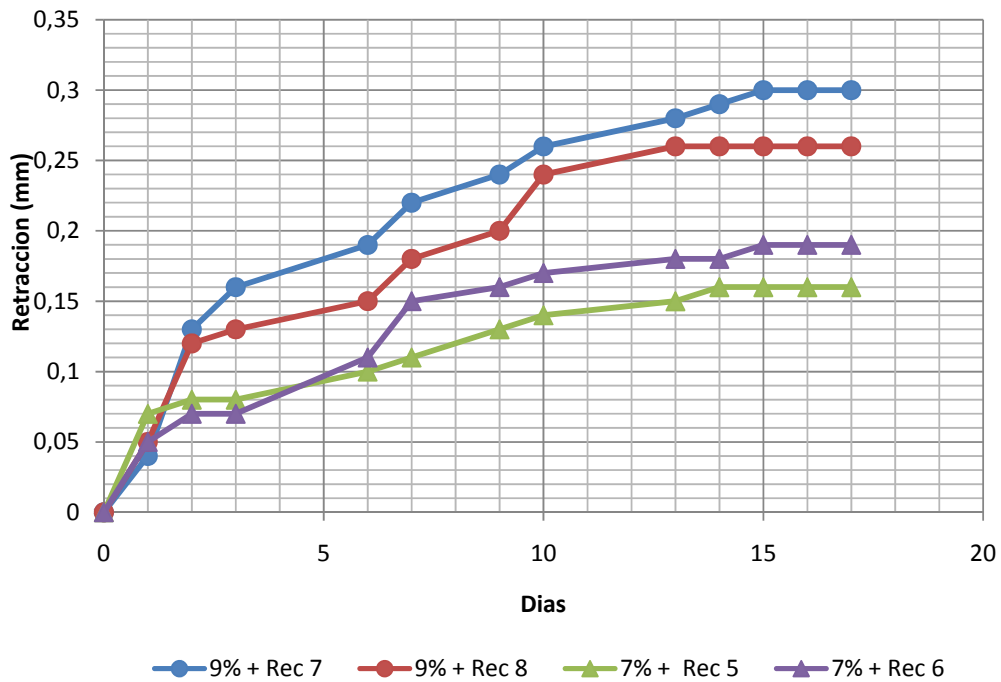


Gráfica 11. Retracciones Acumuladas. Suelo A3.

En la grafica se puede observar que el suelo estabilizado con cemento, sin adición de material bituminoso reciclado, la retracción máxima se alcanza a una edad de 17 días.

El mayor valor de retracción máxima se obtiene con el 9% de cemento y su valor promedio es de 0.365, para el 7% de cemento la retracción fue de 0.265.

## Suelo A3 + Rec



Gráfica 12. Retracciones Acumuladas Suelo A3 + Reciclado.

En el suelo A3, la adición de material bituminoso reciclado disminuye la retracción máxima.

Para el suelo con 9% de cemento la reducción de la retracción está alrededor de un 23.29%, y de 33.96% para un porcentaje de cemento igual al 7%.

**Tabla 14. Retracciones Máximas Suelo A1.**

SUELO A1	Probeta No.	L. Inic (mm)	Ret (mm)	Ret (%)
3%	1	153,48	0,15	0,098
	2	152,42	0,14	0,092
5%	3	152,65	0,34	0,223
	4	153,38	0,33	0,215
3% + Rec.	5	153,89	0,12	0,078
	6	153,92	0,14	0,091
5% + Rec.	7	153,45	0,28	0,182
	8	153,79	0,26	0,169

**Tabla 15. Retracciones Máximas Suelo A3.**

SUELO A3	Probeta No.	L. Inic (mm)	Ret (mm)	Ret (%)
9%	1	137,50	0,34	0,247
	2	137,86	0,39	0,283
7%	3	139,10	0,28	0,201
	4	138,96	0,25	0,180
7% + Rec.	5	139,10	0,16	0,115
	6	138,40	0,19	0,137
9% + Rec.	7	138,36	0,30	0,217
	8	138,12	0,26	0,188

### **5.3 Retracción calculada de las mezclas utilizando el modelo de estimación.**

En el desarrollo del modelo de cálculo para la estimación de las retracciones, se tuvieron en cuenta las características propias que se presentaron en los ensayos de laboratorio de retracción; ya que el modelo de cálculo presenta una serie de factores de gran importancia que influyen en el resultado final de la retracción.

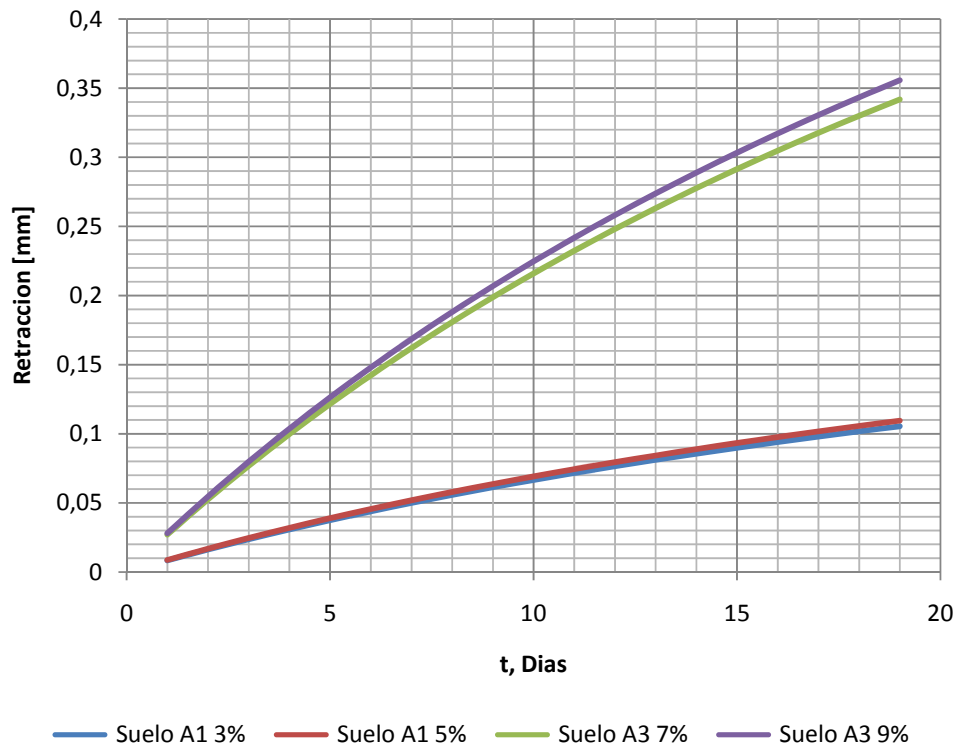
En la aplicación del modelo de cálculo los factores de corrección se establecieron de la siguiente manera:

- El factor corrector para periodos de curados de la mezcla se dispuso para cada suelo como 1,2 que es el menor valor, debido que a ninguna mezcla estabilizada fue sometida a un proceso de curado; esto con el fin, de no disminuir la retracciones.
- La humedad relativa utilizada en los ensayos de retracción se establece menor del cuarenta porciento (40%); dando el menor valor para el factor corrector de humedad relativa.
- El factor corrector para el tamaño de la pieza se calculo con el método de relación volumen / superficie expuesta al ambiente. En cada suelo el factor corrector es diferente.
- Uno de los factores mas influyentes en la retracción es el porcentaje de árido fino; para cada suelo se utilizaron diferentes valores y se calculo el factor según granulometría de cada suelo.
- El factor que reúne las características como el contenido de cemento fue variado para cada mezcla; pero, en el modelo de cálculo estas variaciones no son muy significativas, debido a que en los suelos estabilizados los contenidos de cemento son muy bajos.

Para el cálculo de cada retracción se tomo cada uno de los factores correctores y se multiplico según la teoría establecida por el modelo de cálculo; Se remplazaron los valores en la ecuación.

Se calcularon los valores para los mismos intervalos de tiempo obtenidos en los ensayos de retracción.

#### 5.4 Análisis del modelo de cálculo de la retracción.



**Gráfica 13. Datos de retracción estimados para las bases estabilizadas.**

En el modelo de estimación de las retracciones los valores calculados son concordantes con la teoría; En que, a mayor porcentaje de cemento las retracciones son mayores; pero, no tan influyentes como el contenido de material granular presente en el suelo. Los resultados obtenidos nos dice que las retracciones disminuyen cuando aumentamos el porcentaje de árido.

En la Grafica 13 se puede observar que el modelo de estimación por ser para concreto y mezclas con mayor cantidad de agua los tiempos de secado son más largos presentando una diferencia con los datos experimentales.

## **CONCLUSIONES**

El porcentaje de cemento utilizado en la estabilización de cada uno de los suelos estudiados, es una variable influyente en el resultado final de la retracción. Al adicionar una mayor cantidad de cemento a cada uno de los suelos se produce un aumento en el valor de la retracción.

La adición de material bituminoso reciclado a cada uno de los suelos estabilizados con cemento disminuye la retracción final, que conlleva a la reducción de la presencia de fisuras en las bases usadas en pavimentos mejorando así la calidad de dicha base.

Después de la adición del material bituminoso reciclado al suelo con arena fina mal gradada con pequeñas cantidades de arena gruesa y grava. Presenta un mejor comportamiento en la disminución de la retracción que el suelo bien gradado de fragmentos de piedra o grava, arena gruesa, arena fina, y un ligante de suelo no plástico.

El uso de material bituminosos reciclado disminuye costos en la construcción, además es una gran ayuda al medio ambiente ya que se evitaría la explotación de nuevas canteras en busca de nuevo material.

## RECOMENDACIONES

Con base en las observaciones y datos obtenidos a lo largo del desarrollo del presente trabajo, se proponen las siguientes recomendaciones con objeto de continuar con el estudio del uso de material bituminoso reciclado:

- Como este es un estudio preliminar se recomienda hacer una mejor caracterización del material reciclado, como determinar porcentaje de asfalto presente.
- Realizar el estudio con material nuevo al cual se le recubre el material grueso con asfalto y hacer comparaciones con el material ya usado (reciclado).
- Implementar el estudio de la retracción en distintos tipos de suelo a los estudiados en este trabajo.
- En este trabajo se obtuvo resultados favorables con respecto a la retracción, se recomienda hacer análisis de resistencia de los suelos estabilizados estudiados para analizar el comportamiento de los mismos de acuerdo a esta propiedad tan importante.
- Realizar el análisis para diferentes energías de compactación y comparar los resultados.
- Realizar una comparación de la retracción de un mismo suelo utilizando probetas con diferentes dimensiones.

## BIBLIOGRAFÍA

**ACI 209R-92, (1992).** American Concrete Institute Committee 209, Prediction of Creep, Shrinkage and temperature effects in concrete structures.

**ACI 209.1R-05, (2005).** American Concrete Institute Committee 209, Report on Factors affecting shrinkage and creep of hardened concrete.

**Wittmann, F.H., (1982).** Creep and shrinkage mechanisms, en *Creep and shrinkage in concrete structures*.

**Mehta K.P., Monteiro, P.J.M., (1993),** *Concrete – Estructura. Propiedades y materials*. Version traducida al español por el Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto en 1998.

**Neville, A.M. (1995).** *Properties of Concrete*, 4th ed., Longman Group, Londres, Inglaterra.

**Mindess, S., Young, F.J., (1981).** *Concrete* . Prentice-Hall.

**Newman, J., Choo, B.S. , (2003).** *Advanced concrete Technology*.

**Delibes Liniers, A. (2003).** *Tecnología y Propiedades Mecánicas del Hormigón*, INTEMAC Ediciones.

**Bissonnete, B., Pierre, P., Pigeon, M., (1999).** Influence of key parameters on drying shrinkage of cementitious materials, *Cement and Concrete Research*, 25(5), pp. 1075-1085.

**Al-Manaseer, A., Lam, J.P., (2005).** Statistical evaluation of shrinkage and creep models, *ACI Materials Journal*, vol. 102, no. 3.

## **ANEXOS**

## **ANEXO A. GRANULOMETRIA**

**SUELO A1**

Peso Muestra = 1820.1 gr

**Tabla 16. Datos granulometría Suelo A1.**

Malla No.	Peso Suelo Retenido (gr)	Porcentaje retenido Parcial (%)	% que pasa malla
1/2"	0	0	100
3/8"	286,55	15,743	84,256
No. 4	487,1	26,762	57,494
No. 10	215,59	11,844	45,649
No. 20	311,4	17,108	28,540
No. 40	208,6	11,460	17,079
No. 60	94,4	5,186	11,892
No. 100	34,6	1,900	9,991
No. 200	72,2	3,966	6,024
Pasa 200	80,7	4,433	1,591
	1791,14	98,40887863	

**SUELO A3**

Peso Muestra = 2014.4 gr

**Tabla 17. Datos granulometría Suelo A3.**

Malla No.	Peso Suelo Retenido (gr)	Porcentaje retenido Parcial (%)	% que pasa malla
1/2"	143,65	7,131	92,868
3/8"	53,79	2,670	90,198
No. 4	157,64	7,825	82,372
No. 10	253,03	12,561	69,811
No. 20	147,17	7,305	62,505
No. 40	144,51	7,173	55,3328
No. 60	467,5	23,207	32,124
No. 100	273,4	13,572	18,551
No. 200	250,9	12,455	6,096
Pasa 200	99,5	4,939	1,157
	1991,09	98,84283161	

## **ANEXO B. LIMITES**

**Tabla 18. Datos ensayo limite liquido Suelo A1.**

*LIMITE LIQUIDO*

<i>Lata #</i>	1	2	3	4
<i>Peso Suelo Húmedo + Lata</i>	25,74	18,7	26,99	29,51
<i>Peso Suelo Seco + Lata</i>	20,92	15,73	22,81	24,92
<i>Peso Lata</i>	6,88	7,3	7,25	10,96
<i>Peso Suelo Seco</i>	14,04	8,43	15,56	13,96
<i>Peso agua</i>	4,82	2,97	4,18	4,59
<i>Contenido de Humedad</i>	23,04%	18,88%	18,33%	18,42%
<i># de Golpes</i>	32	29	24	18

*Limite Liquido = 19.67*

**Tabla 19. Datos ensayo limite plástico Suelo A1.**

*LIMITE PLASTICO*

<i>Lata #</i>	1	2	3	4
<i>Peso Suelo Húmedo + Lata</i>	27,39	26,91	22,01	33,77
<i>Peso Suelo Seco + Lata</i>	23,7	23,9	19,4	29,7
<i>Peso Lata</i>	6,83	10,6	6,88	10,86
<i>Peso Suelo Seco</i>	16,87	13,3	12,52	18,84
<i>Peso agua</i>	3,69	3,01	2,61	4,07
<i>Contenido de Humedad</i>	15,57%	12,59%	13,45%	13,70%

*Limite Plastico = 13.83*

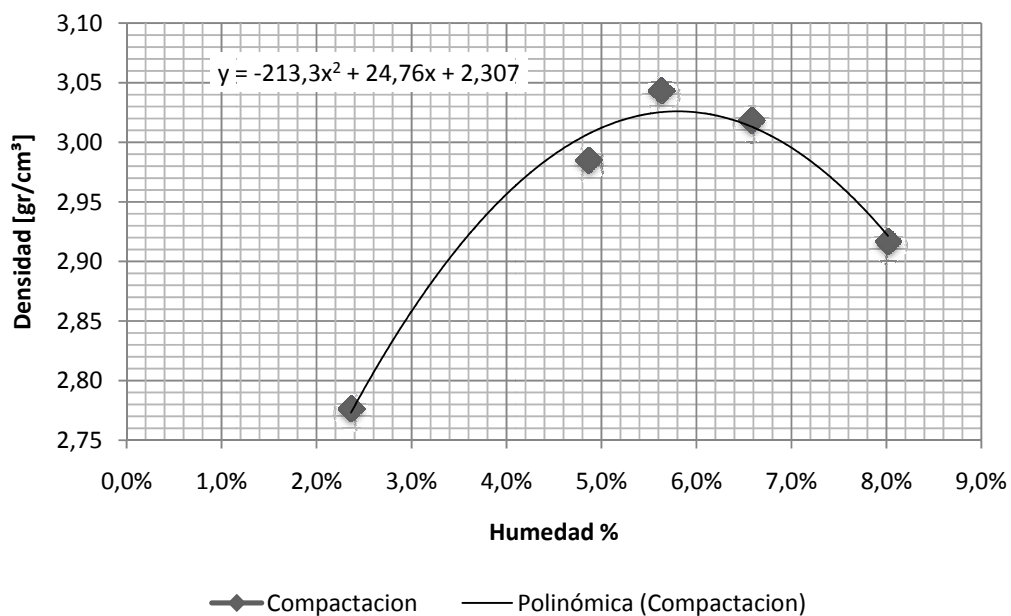
*IP = LL - LP = 5.84*

## **ANEXO C. COMPACTACION**

**Tabla 20. Datos ensayo Proctor modificado Suelo A1 con 3% de cemento.**

	1		2		3		4		5	
<b>Lata #</b>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>Peso Suelo Húmedo + Lata</b>	32,6	21,9	25	20,4	25,1	35,6	16,8	25,9	23,7	34,7
<b>Peso Suelo Seco + Lata</b>	31,99	21,3	23,76	19,52	23,8	33,65	15,79	24,26	21,89	32,2
<b>Peso Lata</b>	10,6	7,4	10,4	7,4	11,5	7,5	6,9	9,1	7,3	7,4
<b>Peso Suelo Seco</b>	21,39	13,9	13,36	12,12	12,3	26,15	8,89	15,16	14,59	24,8
<b>Peso agua</b>	0,61	0,6	1,24	0,88	1,3	1,95	1,01	1,64	1,81	2,5
<b>Contenido de Humedad</b>	1,91%	2,82%	5,22%	4,51%	5,46%	5,79%	6,40%	6,76%	8,27%	7,76%
<b>Peso gr</b>	10992		11328		11422		11382		11218	
<b>Densidad gr/cm3</b>	2,777		2,985		3,043		3,019		2,917	
<b>Contenido de Humedad</b>	2,36%		4,86%		5,63%		6,58%		8,02%	

*Humedad optima = 5,8%*

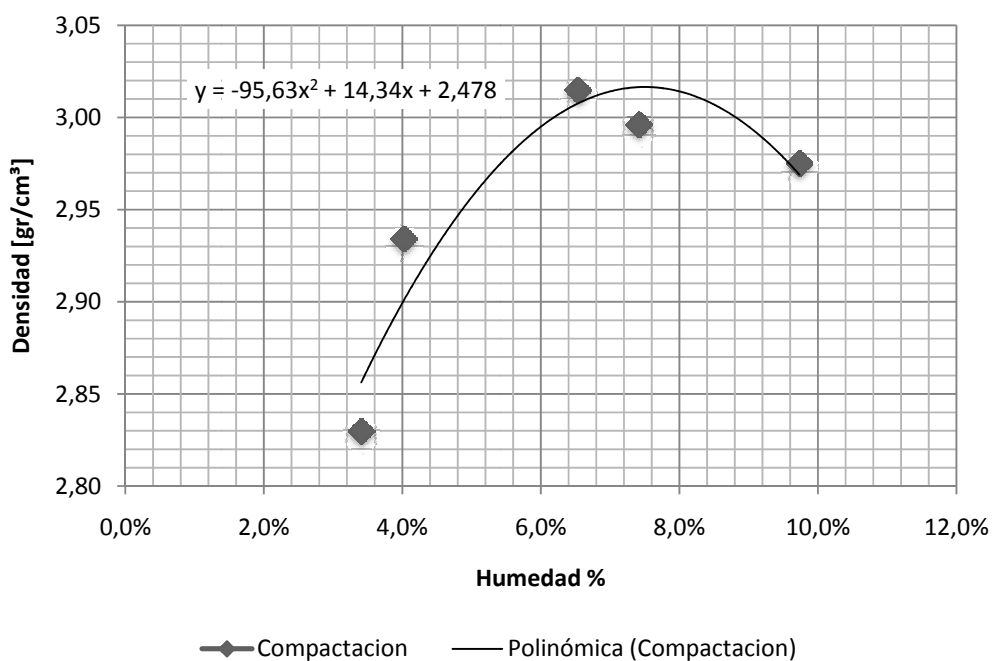


**Gráfica 14. Relación Humedad - Densidad Suelo A1 3% cemento.**

**Tabla 21. Datos ensayo Proctor modificado Suelo A1 con 5% de cemento.**

	1		2		3		4		5	
<b>Lata #</b>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>Peso Suelo Humedo + Lata</b>	40,74	37,06	32,51	30,72	34,2	33,36	31,17	32,71	29,72	29,48
<b>Peso Suelo Seco + Lata</b>	39,53	35,72	31,31	29,48	32,22	31,2	28,87	30,61	26,96	26,99
<b>Peso Lata</b>	10,73	10,37	7,52	7,39	9,05	7,32	7,38	7,45	7,22	6,92
<b>Peso Suelo Seco</b>	28,8	25,35	23,79	22,09	23,17	23,88	21,49	23,16	19,74	20,07
<b>Peso agua</b>	1,21	1,34	1,2	1,24	1,98	2,16	2,3	2,1	2,76	2,49
<b>Contenido de Humedad</b>	3,06%	3,75%	3,83%	4,21%	6,15%	6,92%	7,97%	6,86%	10,24%	9,23%
<b>Peso gr</b>	11078		11246		11376		11346		11312	
<b>Densidad gr/cm3</b>	2,830		2,934		3,015		2,996		2,975	
<b>Contenido de Humedad</b>	3,41%		4,02%		6,53%		7,41%		9,73%	

*Humedad optima = 7,4%*

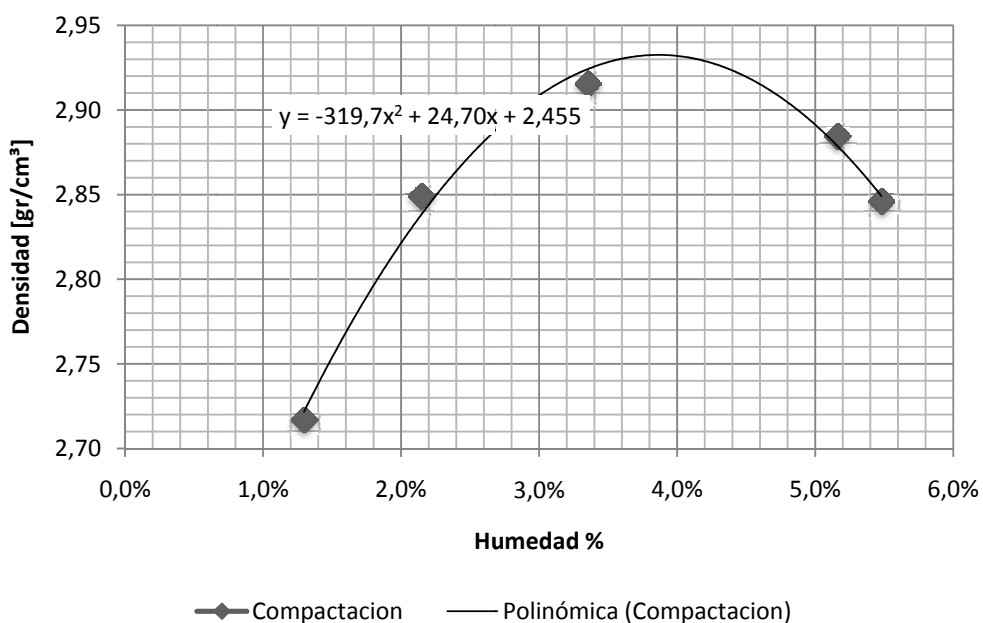


**Gráfica 15. Relación Humedad - Densidad Suelo A1 5% cemento.**

**Tabla 22. Datos ensayo Proctor modificado Suelo A1 + Reciclado con 3% de cemento.**

Lata #	1		2		3		4		5	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>Peso Suelo Húmedo + Lata</b>	17,1	21,6	32,4	29,4	26,9	35	30,5	24,1	21,1	24,8
<b>Peso Suelo Seco + Lata</b>	16,9	21,3	31,7	28,8	26	33,9	28,9	23	20,1	23,4
<b>Peso Lata</b>	7,6	10,7	7,4	7,4	7,5	10,4	11,5	7,3	9	6,9
<b>Peso Suelo Seco</b>	9,3	10,6	24,3	21,4	18,5	23,5	17,4	15,7	11,1	16,5
<b>Peso agua</b>	0,2	0,3	0,7	0,6	0,9	1,1	1,6	1,1	1	1,4
<b>Contenido de Humedad</b>	1,18%	1,41%	2,21%	2,08%	3,46%	3,24%	5,54%	4,78%	4,98%	5,98%
<b>Peso gr</b>	10896		11109		11216		11166		11104	
<b>Densidad gr/cm3</b>	2,717		2,849		2,916		2,884		2,846	
<b>Contenido de Humedad</b>	1,30%		2,15%		3,35%		5,16%		5,48%	

Humedad óptima = 4,0%

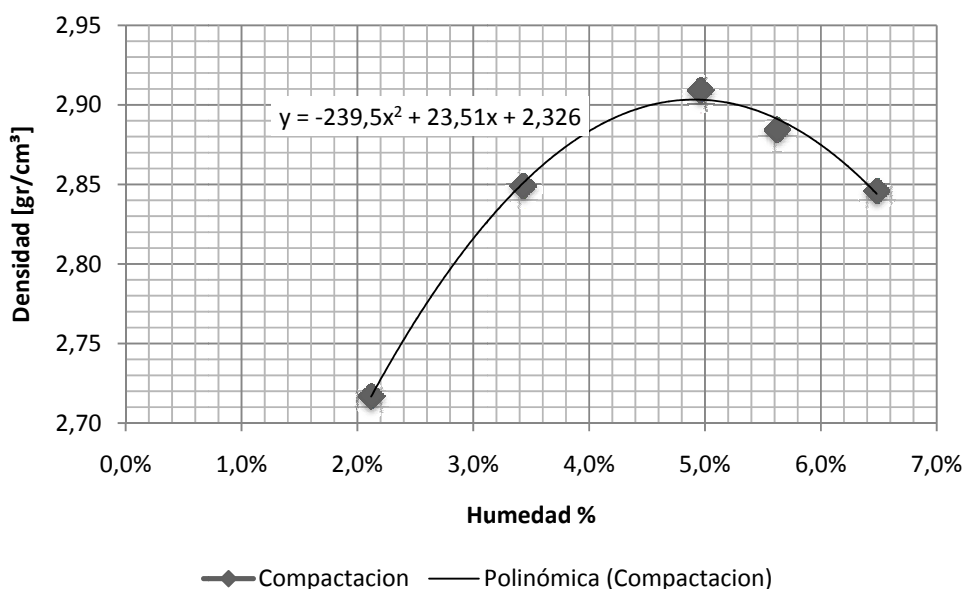


**Gráfica 16. Relación Humedad - Densidades Suelo A1+Reciclado 3% cemento.**

**Tabla 23. Datos ensayo Proctor modificado Suelo A1 + Reciclado con 5% de cemento.**

	1		2		3		4		5	
<b>Lata #</b>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>Peso Suelo Húmedo + Lata</b>	17,3	21,8	32,32	30,45	27,5	36	31,3	23,5	22,1	25,7
<b>Peso Suelo Seco + Lata</b>	16,9	21,4	31,4	29,3	26,2	34,3	29,7	22,2	20,7	24,2
<b>Peso Lata</b>	7,4	10,7	7,4	7,6	7,5	11,5	10,4	7,3	6,9	9
<b>Peso Suelo Seco</b>	9,5	10,7	24	21,7	18,7	22,8	19,3	14,9	13,8	15,2
<b>Peso agua</b>	0,4	0,4	0,92	1,15	1,3	1,7	1,6	1,3	1,4	1,5
<b>Contenido de Humedad</b>	2,37%	1,87%	2,93%	3,92%	4,96%	4,96%	5,39%	5,86%	6,76%	6,20%
<b>Peso gr</b>	10896		11109		11206		11166		11104	
<b>Densidad gr/cm3</b>	2,717		2,849		2,909		2,884		2,846	
<b>Contenido de Humedad</b>	2,12%		3,43%		4,96%		5,62%		6,48%	

*Humedad optima = 5,0%*

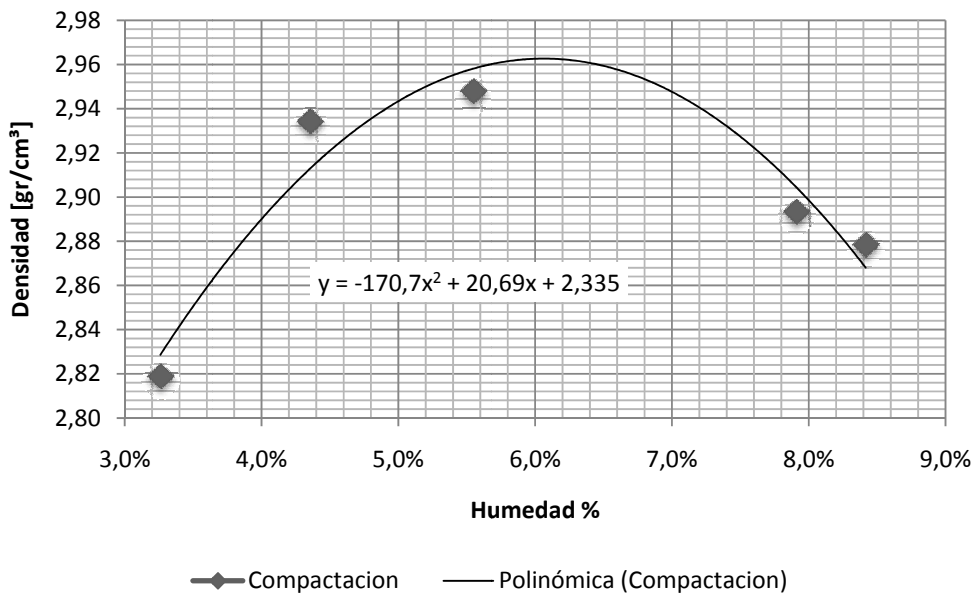


**Gráfica 17. Relación Humedad - Densidades Suelo A1+Reciclado 5% cemento.**

**Tabla 24. Datos ensayo Proctor modificado Suelo A3 con 7% de cemento.**

Lata #	1		2		3		4		5	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>Peso Suelo Humedo + Lata</b>	21,89	26,38	23,56	24,33	20,23	34,66	33,5	26,9	40,7	34,8
<b>Peso Suelo Seco + Lata</b>	21,23	25,51	22,64	23,25	19,23	32,73	31,03	24,94	37,68	31,98
<b>Peso Lata</b>	7,52	7,41	9,06	7,4	7,31	10,72	7,4	7	10,4	7,3
<b>Peso Suelo Seco</b>	13,71	18,1	13,58	15,85	11,92	22,01	23,63	17,94	27,28	24,68
<b>Peso agua</b>	0,66	0,87	0,92	1,08	1	1,93	2,47	1,96	3,02	2,82
<b>Contenido de Humedad</b>	3,11%	3,41%	4,06%	4,65%	5,20%	5,90%	7,96%	7,86%	8,01%	8,82%
<b>Peso gr</b>	11060		11246		11268		11180		11156	
<b>Densidad gr/cm<sup>3</sup></b>	2,819		2,934		2,948		2,893		2,878	
<b>Contenido de Humedad</b>	3,26%		4,35%		5,55%		7,91%		8,42%	

Humedad optima = 6,1%

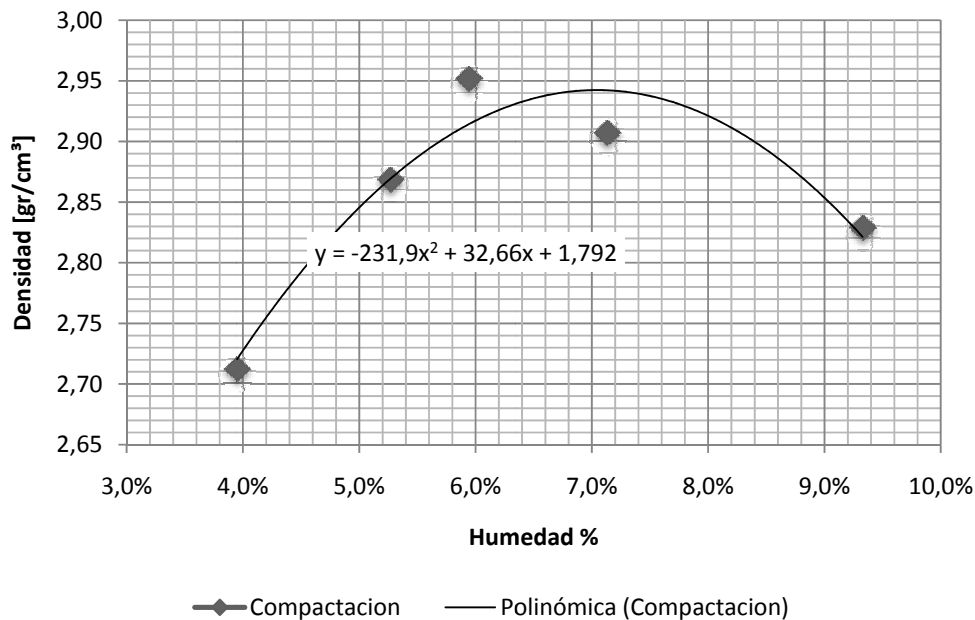


**Gráfica 18. Relación Humedad - Densidades Suelo A3 7% cemento.**

**Tabla 25. Datos ensayo Proctor modificado Suelo A3 con 9% de cemento.**

Lata #	1		2		3		4		5	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>Peso Suelo Húmedo + Lata</b>	55,76	48,51	76,88	33,19	35,06	45,27	41,91	40,07	34,9	43,06
<b>Peso Suelo Seco + Lata</b>	53,65	46,66	72,78	31,64	32,98	42,88	39,02	37,5	31,96	39,34
<b>Peso Lata</b>	7,49	7,4	9,07	7,3	7,39	10,39	7,43	10,75	6,95	7,22
<b>Peso Suelo Seco</b>	46,16	39,26	63,71	24,34	25,59	32,49	31,59	26,75	25,01	32,12
<b>Peso agua</b>	2,11	1,85	4,1	1,55	2,08	2,39	2,89	2,57	2,94	3,72
<b>Contenido de Humedad</b>	3,93%	3,96%	5,63%	4,90%	6,31%	5,57%	7,41%	6,85%	9,20%	9,46%
<b>Peso gr</b>	10888		11140		11274		11202		11076	
<b>Densidad gr/cm3</b>	2,712		2,868		2,952		2,907		2,829	
<b>Contenido de Humedad</b>	3,95%		5,27%		5,94%		7,13%		9,33%	

Humedad optima = 7,0%

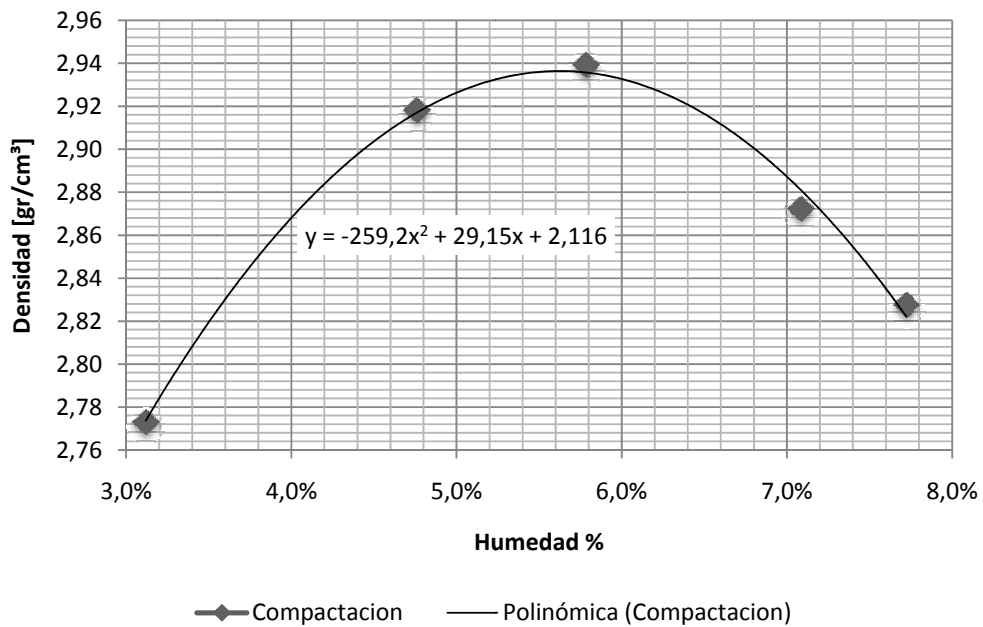


**Gráfica 19. Relación Humedad - Densidades Suelo A3 9% cemento.**

**Tabla 26. Datos ensayo Proctor modificado Suelo A3 + Reciclado con 7% de cemento.**

Lata #	1		2		3		4		5	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>Peso Suelo Húmedo + Lata</b>	32,98	39,92	19,86	23,64	32,35	29,01	33,63	35,16	27,49	31,8
<b>Peso Suelo Seco + Lata</b>	32,06	38,62	19,1	22,4	30,62	27,39	31,39	32,85	25,58	29,45
<b>Peso Lata</b>	10,9	10,55	7,69	7,54	9,25	7,48	7,54	7,61	7,38	7,09
<b>Peso Suelo Seco</b>	21,16	28,07	11,41	14,86	21,37	19,91	23,85	25,24	18,2	22,36
<b>Peso agua</b>	0,92	1,3	0,76	1,24	1,73	1,62	2,24	2,31	1,91	2,35
<b>Contenido de Humedad</b>	2,87%	3,37%	3,98%	5,54%	5,65%	5,91%	7,14%	7,03%	7,47%	7,98%
<b>Peso gr</b>	10986		11220		11254		11146		11074	
<b>Densidad gr/cm3</b>	2,773		2,918		2,939		2,872		2,827	
<b>Contenido de Humedad</b>	3,12%		4,76%		5,78%		7,08%		7,72%	

Humedad óptima = 5,6%

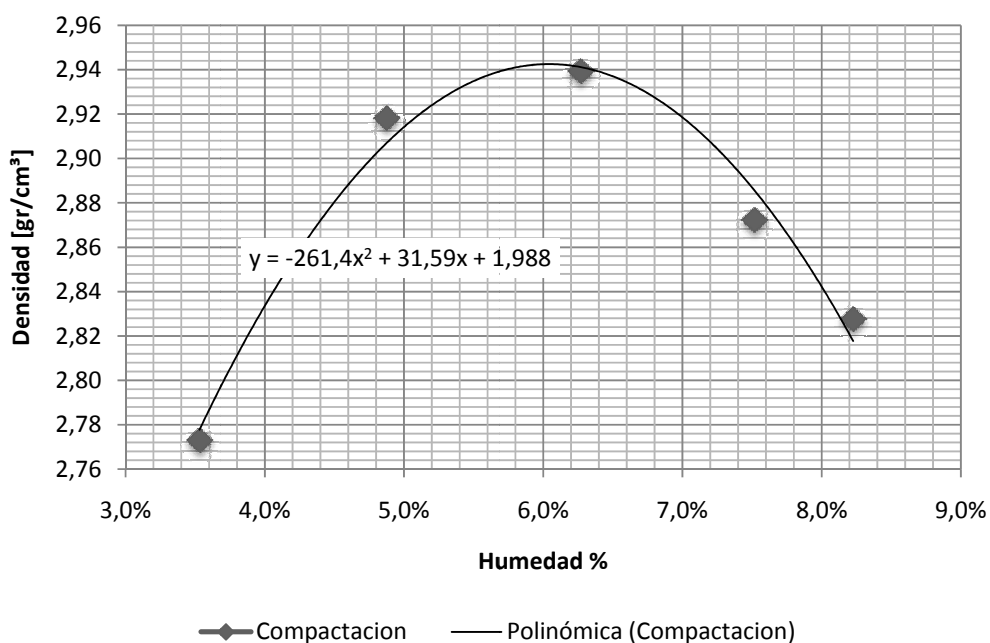


**Gráfica 20. Relación Humedad - Densidades Suelo A3+Reciclado 7% cemento.**

**Tabla 27. Datos ensayo Proctor modificado Suelo A3 + Reciclado con 9% de cemento.**

Lata #	1		2		3		4		5	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>Peso Suelo Húmedo + Lata</b>	33,28	40,22	20,16	23,94	32,65	29,31	33,93	35,46	27,79	32,1
<b>Peso Suelo Seco + Lata</b>	32,21	38,77	19,28	22,76	30,77	27,54	31,54	33	25,73	29,6
<b>Peso Lata</b>	10,75	10,4	7,54	7,39	9,1	7,33	7,39	7,46	7,23	6,94
<b>Peso Suelo Seco</b>	21,46	28,37	11,74	15,37	21,67	20,21	24,15	25,54	18,5	22,66
<b>Peso agua</b>	1,07	1,45	0,88	1,18	1,88	1,77	2,39	2,46	2,06	2,5
<b>Contenido de Humedad</b>	3,32%	3,74%	4,56%	5,18%	6,11%	6,43%	7,58%	7,45%	8,01%	8,45%
<b>Peso gr</b>	10986		11220		11254		11146		11074	
<b>Densidad gr/cm3</b>	2,773		2,918		2,939		2,872		2,827	
<b>Contenido de Humedad</b>	3,53%		4,87%		6,27%		7,52%		8,23%	

Humedad optima = 6,1%



**Gráfica 21. Relación Humedad - Densidades Suelo A3+Reciclado 9% cemento.**

## **ANEXO D. DATOS DE RETRACCION**

**Suelo A1**

**Tabla 28. Medición tomada por el deformímetro. Suelo A1**

T, Días	PROBETAS							
	1	2	3	4	5	6	7	8
	3%		5%		3% + Rec		5% + Rec	
0	NA	NA	NA	NA	9,49	9,47	9,92	9,59
1	9,88	10,94	10,6	9,84	9,47	9,46	9,89	9,57
2	9,84	10,9	10,45	9,66	9,45	9,45	9,78	9,48
3	9,8	10,85	10,39	9,62	9,42	9,43	9,74	9,44
6	9,78	10,84	10,3	9,57	9,41	9,4	9,73	9,41
7	9,77	10,82	10,28	9,53	9,4	9,38	9,68	9,37
8	9,76	10,82	10,27	9,52	9,39	9,36	9,66	9,36
9	9,75	10,81	10,27	9,52	9,38	9,34	9,65	9,34
10	9,73	10,8	10,26	9,51	9,37	9,33	9,64	9,33
11	9,73	10,8	10,26	9,51	9,37	9,33	9,64	9,33

**Tabla 29. Retracciones diarias. Suelo A1**

T, Días	PROBETAS							
	1	2	3	4	5	6	7	8
	3%		5%		3% + Rec		5% + Rec	
0	NA	NA	NA	NA	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0,02	0,01	0,03	0,02
2	0,04	0,04	0,15	0,18	0,02	0,01	0,11	0,09
3	0,04	0,05	0,06	0,04	0,03	0,02	0,04	0,04
6	0,02	0,01	0,09	0,05	0,01	0,03	0,01	0,03
7	0,01	0,02	0,02	0,04	0,01	0,02	0,05	0,04
8	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,01
9	0,01	0,01	0,00	0,00	0,01	0,02	0,01	0,02
10	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

**Tabla 30. Retracciones Acumuladas. Suelo A1**

T, Días	PROBETAS							
	1	2	3	4	5	6	7	8
	3%		5%		3% + Rec		5% + Rec	
0	NA	NA	NA	NA	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0,02	0,01	0,03	0,02
2	0,04	0,04	0,15	0,18	0,04	0,02	0,14	0,11
3	0,08	0,09	0,21	0,22	0,07	0,04	0,18	0,15
6	0,1	0,1	0,3	0,27	0,08	0,07	0,19	0,18
7	0,11	0,12	0,32	0,31	0,09	0,09	0,24	0,22
8	0,12	0,12	0,33	0,32	0,1	0,11	0,26	0,23
9	0,13	0,13	0,33	0,32	0,11	0,13	0,27	0,25
10	0,15	0,14	0,34	0,33	0,12	0,14	0,28	0,26
11	0,15	0,14	0,34	0,33	0,12	0,14	0,28	0,26

**Suelo A3**

**Tabla 31. Medición tomada por el deformimetro. Suelo A3**

T, Días	PROBETAS							
	1	2	3	4	5	6	7	8
	9%		7%		7% + Rec		9% + Rec	
0	8,18	8,46	9,72	10,04	9,5	7,92	9,74	8,62
1	8,03	8,33	9,71	10,01	9,43	7,87	9,70	8,57
2	7,95	8,18	9,63	9,99	9,42	7,85	9,61	8,50
3	7,89	8,13	9,61	9,98	9,42	7,85	9,58	8,49
6	7,87	8,10	9,55	9,92	9,40	7,81	9,55	8,47
7	7,87	8,09	9,50	9,86	9,39	7,77	9,52	8,44
8	7,86	8,08	9,48	9,84	9,37	7,76	9,50	8,42
9	7,86	8,08	9,47	9,81	9,36	7,75	9,48	8,38
12	7,84	8,08	9,45	9,80	9,35	7,74	9,46	8,36
13	7,84	8,07	9,44	9,79	9,34	7,74	9,45	8,36
14	7,84	8,07	9,44	9,79	9,34	7,73	9,44	8,36
15	7,84	8,07	9,44	9,79	9,34	7,73	9,44	8,36
16	7,84	8,07	9,44	9,79	9,34	7,73	9,44	8,36

**Tabla 32. Retracciones diarias. Suelo A3**

T, Días	PROBETAS							
	1	2	3	4	5	6	7	8
	9%		7%		7% + Rec		9% + Rec	
0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0,15	0,13	0,01	0,03	0,07	0,05	0,04	0,05
2	0,08	0,15	0,08	0,02	0,01	0,02	0,09	0,07
3	0,06	0,05	0,02	0,01	0,00	0,00	0,03	0,01
6	0,02	0,03	0,06	0,06	0,02	0,04	0,03	0,02
7	0,00	0,01	0,05	0,06	0,01	0,04	0,03	0,03
8	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,01	0,02	0,02
9	0,00	0,00	0,01	0,03	0,01	0,01	0,02	0,04
12	0,02	0,00	0,02	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02
13	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,00
14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00
15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

**Tabla 33. Retracciones Acumuladas. Suelo A3**

T, Días	PROBETAS							
	1	2	3	4	5	6	7	8
	9%		7%		7% + Rec		9% + Rec	
0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0,15	0,13	0,01	0,03	0,07	0,05	0,04	0,05
2	0,23	0,28	0,09	0,05	0,08	0,07	0,13	0,12
3	0,29	0,33	0,11	0,06	0,08	0,07	0,16	0,13
6	0,31	0,36	0,17	0,12	0,10	0,11	0,19	0,15
7	0,31	0,37	0,22	0,18	0,11	0,15	0,22	0,18
8	0,32	0,38	0,24	0,20	0,13	0,16	0,24	0,20
9	0,32	0,38	0,25	0,23	0,14	0,17	0,26	0,24
12	0,34	0,38	0,27	0,24	0,15	0,18	0,28	0,26
13	0,34	0,39	0,28	0,25	0,16	0,18	0,29	0,26
14	0,34	0,39	0,28	0,25	0,16	0,19	0,30	0,26
15	0,34	0,39	0,28	0,25	0,16	0,19	0,30	0,26

**ANEXO E. DATOS RETRACCION CALCULADOS**

**SUELO A1**

**Tabla 34. Factores correctores Suelo A1 con 3% cemento.**

Suelo A1 3%	
$\gamma_{cp}$	1,200
$\gamma_{\lambda}$	1,400
$\gamma_{vs}$	0,986
$\gamma_s$	1,000
$\gamma_{\psi}$	0,303
$\gamma_c$	0,806
$\gamma_{\alpha}$	0,950

$(\epsilon_{sh})_u$	$\gamma_{sh}$
0,2997	0,3842

**Tabla 35. Retracciones acumuladas calculadas Suelo A1 con 3% cemento.**

t	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$(\epsilon_{sh})_t$	0,0083	0,0162	0,0236	0,0307	0,0374	0,0438	0,0499	0,0557	0,0613	0,0665

t	11	12	13	14	15	16	17	18	19
$(\epsilon_{sh})_t$	0,0716	0,0765	0,0811	0,0856	0,0899	0,0940	0,0979	0,1018	0,1054

**Tabla 36. Factores correctores Suelo A1 con 5% cemento.**

Suelo A1 5%	
$\gamma_{cp}$	1,200
$\gamma_{\lambda}$	1,400
$\gamma_{vs}$	0,986
$\gamma_s$	1,000
$\gamma_{\psi}$	0,303
$\gamma_c$	0,836
$\gamma_{\alpha}$	0,950

$(\epsilon_{sh})_u$	$\gamma_{sh}$
0,3111	0,3988

**Tabla 37. Retracciones acumuladas calculadas Suelo A1 con 5% cemento.**

t	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$(\epsilon_{sh})_t$	0,0086	0,0168	0,0245	0,03191	0,0389	0,0455	0,0518	0,0579	0,0636	0,0691

t	11	12	13	14	15	16	17	18	19
$(\epsilon_{sh})_t$	0,0743	0,0794	0,0842	0,0889	0,09332	0,0976	0,1017	0,1056	0,1094

### SUELO A3

**Tabla 38. Factores correctores Suelo A3 con 7% cemento.**

Suelo A3 7%		$(\epsilon_{sh})_u$ $\gamma_{sh}$	
$\gamma_{cp}$	1,200	0,9715	1,2455
$\gamma_{\lambda}$	1,400		
$\gamma_{vs}$	0,987		
$\gamma_s$	1,000		
$\gamma_{\psi}$	0,902		
$\gamma_c$	0,876		
$\gamma_{\alpha}$	0,950		

**Tabla 39. Retracciones acumuladas calculadas Suelo A3 con 7% cemento.**

t	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$(\epsilon_{sh})_t$	0,0270	0,0525	0,0767	0,0996	0,1214	0,1422	0,1619	0,1807	0,1987	0,2159

t	11	12	13	14	15	16	17	18	19
$(\epsilon_{sh})_t$	0,2323	0,2480	0,2631	0,2776	0,2915	0,3048	0,3176	0,3299	0,3418

**Tabla 40. Factores correctores Suelo A3 con 9% cemento.**

Suelo A3 9%		$(\epsilon_{sh})_u$ $\gamma_{sh}$	
$\gamma_{cp}$	1,200	1,0109	1,2961
$\gamma_{\lambda}$	1,400		
$\gamma_{vs}$	0,987		
$\gamma_s$	1,000		
$\gamma_{\psi}$	0,902		
$\gamma_c$	0,912		
$\gamma_{\alpha}$	0,950		

**Tabla 41. Retracciones acumuladas calculadas Suelo A3 con 9% cemento.**

t	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$(\epsilon_{sh})_t$	0,0281	0,0546	0,0798	0,1037	0,1264	0,1479	0,1685	0,1881	0,2068	0,2247

t	11	12	13	14	15	16	17	18	19
$(\epsilon_{sh})_t$	0,2417	0,2581	0,2738	0,2888	0,3033	0,3172	0,3305	0,3433	0,3557