



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

**FACULTAD DE INGENIERÍA  
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

**TÍTULO:  
ESTUDIO PARA LA MEDICIÓN DEL LÍMITE DE DURABILIDAD  
(ENDURANCE LIMIT) EN LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS  
MEDIANTE EL ENSAYO DE FATIGA POR TRACCIÓN  
INDIRECTA**

**AUTOR:  
Vélez Vera, Francisco Javier**

**Trabajo de grado previo a la obtención del título de:  
INGENIERO CIVIL**

**TUTOR:  
Ing. García Caputi, Gustavo**

**Guayaquil, Ecuador**

**2016**



UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

**FACULTAD DE INGENIERÍA  
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

## **CERTIFICACIÓN**

Certificamos que el presente trabajo de titulación fue realizado en su totalidad por **Francisco Javier Vélez Vera**, como requerimiento para la obtención del Título de **Ingeniero Civil**.

**TUTOR**

---

**Ing. Gustavo García Caputi**

**DIRECTOR DE LA CARRERA**

---

**Ing. Stefany Alcívar Bastidas**

**Guayaquil, a los 29 del mes de febrero del 2016**



UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

FACULTAD DE INGENIERÍA  
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

## DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Yo, **Francisco Javier Vélez Vera**

### DECLARO QUE:

El Trabajo de Titulación “**Estudio para la medición del límite de durabilidad (Endurance Limit) en las mezclas asfálticas mediante el ensayo de fatiga por tracción indirecta.**” previo a la obtención del Título **de INGENIERO CIVIL**, ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan al pie de las páginas correspondientes, cuyas fuentes se incorporan en la bibliografía. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance del Trabajo de Titulación, de tipo experimental referido.

**Guayaquil, a los 29 días del mes de febrero del año 2016**

**EL AUTOR**

---

**Francisco Javier Vélez Vera**



UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

FACULTAD DE INGENIERÍA  
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

## AUTORIZACIÓN

Yo, **Francisco Javier Vélez Vera**

Autorizo a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil a la **publicación** en la biblioteca de la institución del Trabajo de Titulación “**Estudio para la medición del límite de durabilidad (Endurance Limit) en las mezclas asfálticas mediante el ensayo de fatiga por tracción indirecta.**”, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

**Guayaquil, a los 29 días del mes de febrero del 2016**

**EL AUTOR:**

---

**Francisco Javier Vélez Vera**

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a Dios y a la Virgen por guiarme en estos años de estudio y bendecirme cada día de mi vida, dándome la oportunidad de terminar esta etapa de mi vida.

Gracias a mis papás Javier y Helen por siempre confiar en mis capacidades, apoyándome y aconsejándome todos los días.

A mis amigos por estos 5 años de amistad y también a aquellos que me ayudaron en esta etapa de titulación.

A mi tutor el Ing. Gustavo García por su paciencia y su ayuda para poder realizar este trabajo.

Al Ing. Rolando Vila y al Ing. José Jaramillo por sus enseñanzas y ayuda cada vez que se las solicite.

## **DEDICATORIA**

Este logro se lo dedico especialmente a mis papás que siempre han sido un ejemplo para mí de superarme cada día y de esforzarme lo más que pueda.

A mis hermanos y abuelos por estar a mi lado siempre apoyándome.

## ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I: MARCO INTRODUCTORIO.....	2
1.1. Planteamiento del problema.....	2
1.2. Justificación del problema.....	3
1.3. Objetivos.....	4
1.3.1. Objetivo General.....	4
1.3.2. Objetivos Específicos.....	4
CAPÍTULO 2: MEZCLAS ASFÁLTICAS.....	5
2.1. Asfalto.....	5
2.2. Agregado.....	5
2.3. Propiedades de mezclas asfálticas.....	6
2.3.1. Estabilidad.....	7
2.3.2. Durabilidad.....	8
2.3.3. Resistencia a la fatiga.....	10
CAPÍTULO 3: COMPORTAMIENTO DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS POR FATIGA.....	11
3.1. Fatiga.....	11
3.2. Agrietamiento por fatiga.....	14
3.3. Parámetros que afectan la resistencia a la fatiga.....	15
3.3.1. Contenido de asfalto.....	15
3.3.2. Efecto de envejecimiento.....	16
3.3.3. Rigidez de la mezcla.....	17
3.3.4. Condiciones de carga.....	18
3.4. Límite de durabilidad “ENDURANCE LIMIT”.....	19
3.4.1. Conceptos.....	19
3.4.1.1. Principios.....	19
3.4.1.2. Límite de durabilidad en la fatiga de asfaltos.....	21
3.4.2. Tipos de ensayo para comprobación de existencia del límite de durabilidad.....	23
3.4.2.1. Ensayos de fatiga por flexión de viga.....	23
3.4.2.2. Ensayos de fatiga por ensayo uniaxial.....	25

3.4.2.3. Ensayos de fatiga por tracción indirecta .....	26
3.4.3. Efectos del periodo de descanso .....	28
CAPÍTULO 4: PREPARACIÓN Y RESULTADOS DEL EXPERIMENTO .....	30
4.1. Preparación de los especímenes .....	30
4.1.1. Compactación de los especímenes .....	30
4.1.2. Densidad y porcentaje de vacíos de la mezcla asfáltica compactada .....	32
4.1.3. Extracción de briquetas .....	34
4.1.4. Datos de briquetas.....	36
4.2. Ensayos realizados para encontrar límite de durabilidad “Endurance Limit” .....	37
4.2.1. Información General .....	37
4.2.2. Descripción de ensayos en Equipo NAT (Nottingham Asphalt Test) .....	38
4.2.2.1. Módulo de Rigidez.....	38
4.2.2.2. Ensayo de fatiga.....	40
4.3. Proceso experimental para encontrar el límite de durabilidad .....	42
4.3.1. Desarrollo de la metodología .....	42
4.3.2. Desviación estándar .....	47
4.3.3. Análisis de briqueta N°2 .....	54
4.3.4. Fatiga bajo esfuerzo de 90 kPa .....	57
4.3.5. Fatiga bajo esfuerzo de 100 kPa .....	61
4.3.6. Fatiga bajo esfuerzo de 110 kPa .....	64
CAPÍTULO 5: ANALISIS DE RESULTADOS .....	68
CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	74
6.1. Conclusiones.....	74
6.2. Recomendaciones.....	75
Bibliografía.....	76
ANEXO 1: Ensayos en briqueta 2 con esfuerzo de 60 KPa .....	78
ANEXO 2: Ensayos en briqueta 2 con esfuerzo de 70 KPa .....	81
ANEXO 3: Ensayos en briqueta 2 con esfuerzo de 80 KPa .....	84
ANEXO 4: Ensayos en briqueta 2 con esfuerzo de 90 KPa .....	87



ANEXO 5: Ensayos en briqueta 2 con esfuerzo de 100 KPa .....	90
ANEXO 6: Ensayos en briqueta 2 con esfuerzo de 110 KPa .....	93
ANEXO 7: Ensayos en briqueta 2 con esfuerzo de 120 KPa .....	96
ANEXO 8: Ensayos en briqueta 2 con esfuerzo de 130 KPa .....	99
ANEXO 9: Ensayos en briqueta 2 con esfuerzo de 140 KPa .....	102
ANEXO 10: Ensayos en briqueta 3 con esfuerzo de 90 KPa .....	105
ANEXO 11: Ensayos en briqueta 5 con esfuerzo de 90 KPa .....	108
ANEXO 12: Ensayos en briqueta 7 con esfuerzo de 90 KPa .....	111
ANEXO 13: Ensayos en briqueta 8 con esfuerzo de 90 KPa .....	114
ANEXO 14: Ensayos en briqueta 6 con esfuerzo de 100 KPa .....	117
ANEXO 15: Ensayos en briqueta 10 con esfuerzo de 100 KPa .....	120

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Causas y efectos de inestabilidad en el pavimento .....	8
Tabla 2: Causas y efectos de una poca durabilidad.....	9
Tabla 3: Causas y efectos de la resistencia a la fatiga.....	10
Tabla 4: Datos de briquetas.....	36
Tabla 5: Tabla para hallar esfuerzo inicial.....	43
Tabla 6: Valores del módulo cada 2000 ciclos de carga en el ensayo a fatiga ( $\sigma = 50$ KPa, Briqueta 2).....	44
Tabla 7: Valores del módulo cada 2000 ciclos de carga en el ensayo a fatiga ( $\sigma = 150$ KPa, Briqueta 2).....	46
Tabla 8: Media de valores para cada 2000 ciclos de carga ( $\sigma = 50$ KPa, Briqueta 2).....	48
Tabla 9: Media, varianza y desviación estándar de los módulos de rigidez cada 2000 ciclos ( $\sigma = 50$ KPa, Briqueta 2) .....	49
Tabla 10: Media, varianza y desviación estándar de los módulos de rigidez cada 2000 ciclos ( $\sigma = 150$ KPa, Briqueta 2).....	52
Tabla 11: Media, varianza y desviación estándar de los módulos de rigidez cada 5000 ciclos ( $\sigma = 90$ KPa, Briqueta 1).....	58
Tabla 12: Tabla de deformación unitaria de la mezcla cada 5000 ciclos ( $\sigma = 90$ KPa, Briqueta 1) .....	60
Tabla 13: Media, varianza y desviación estándar de los módulos de rigidez cada 5000 ciclos ( $\sigma = 100$ KPa, Briqueta 9).....	61
Tabla 14: Tabla de deformación unitaria de la mezcla cada 5000 ciclos ( $\sigma = 100$ KPa, Briqueta 9) .....	63
Tabla 15: Media, varianza y desviación estándar de los módulos de rigidez cada 5000 ciclos ( $\sigma = 110$ KPa, Briqueta 4).....	65
Tabla 16: Tabla de deformación unitaria de la mezcla cada 5000 ciclos ( $\sigma = 110$ KPa, Briqueta 4) .....	66
Tabla 17: Tabla de Módulos y deformaciones unitaria de la mezcla cada 5000 ciclos ( $\sigma = 90$ KPa) .....	68
Tabla 18: Promedio de Módulo y Desviación Estándar.....	69

Tabla 19: Tabla de diferencia en Módulos de rigidez de la mezcla cada 5000 ciclos ( $\sigma = 90$ KPa) .....	70
Tabla 20: Tabla de diferencia en Módulos de rigidez de la mezcla cada 5000 ciclos ( $\sigma = 100$ KPa) .....	72
Tabla 21: Tabla de diferencia en Módulos de rigidez de la mezcla cada 5000 ciclos ( $\sigma = 110$ KPa) .....	72
Tabla 22: Tabla de deformaciones y desviación estándar.....	73
Tabla 23: Media +/- Desviación Estándar .....	73

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Deformación del pavimento producido por esfuerzos de tensión y compresión .....	12
Ilustración 2: Gráfico de repeticiones de carga hasta la falla Vs la deformación .....	13
Ilustración 3: Agrietamiento por fatiga del pavimento.....	14
Ilustración 5: Etapas de envejecimiento del asfalto y mezclas asfálticas .....	17
Ilustración 6: Comportamiento del esfuerzo y la deformación bajo el modo de esfuerzo controlado .....	18
Ilustración 6: Concepto idealizado de límite de durabilidad.....	20
Ilustración 8: Límite durabilidad en pavimentos rígidos.....	21
Ilustración 9: Relación entre esfuerzo, deformación, rigidez y vida a la fatiga .....	22
Ilustración 10: Relación Tensión Vs Carga .....	23
Ilustración 11: Viga de 4 puntos.....	24
Ilustración 12: Muestra de ensayo de fatiga a tensión uniaxial .....	26
Ilustración 13: Deformación a tensión en el ensayo por tracción indirecta vs límite de durabilidad a fatiga de la viga.....	27
Ilustración 14: Ensayo de tracción indirecta .....	28
Ilustración 15: Esquema de la compactación giratoria .....	30
Ilustración 16: Compactador Giratorio.....	31
Ilustración 17: Peso seco.....	32
Ilustración 18: Peso sumergido.....	33
Ilustración 19: Peso superficialmente seco .....	33
Ilustración 20: Extracción de las briquetas .....	35
Ilustración 21: Briquetas extraídos .....	35
Ilustración 22: Medición de diámetro y espesor .....	36
Ilustración 23: Plantilla de alineación del LVDT .....	39
Ilustración 24: Patrón de carga superior .....	39
Ilustración 25: Dispositivo para la medición de deformación horizontal.....	40

Ilustración 26: Esquema de ensayo de fatiga por tracción indirecta.....	41
Ilustración 27: Plantilla de alineación .....	41
Ilustración 28: Patrón de carga superior .....	42

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Módulo Vs Número de ciclos ( $\sigma = 50$ KPa, Briqueta 2).....	45
Gráfico 2: Módulo Vs Número de ciclos (esfuerzo de 150 kPa) .....	46
Gráfico 3: Módulo Vs Número de ciclos ( $\sigma = 50$ KPa, Briqueta 2) incluyendo desviación estándar.....	51
Gráfico 4: Módulo Vs Número de ciclos ( $\sigma = 150$ KPa, Briqueta 2) incluyendo desviación estándar.....	53
Gráfico 5: Módulo Vs Número de ciclos ( $\sigma = 90$ KPa, Briqueta 2) incluyendo desviación estándar.....	54
Gráfico 6: Módulo Vs Número de ciclos ( $\sigma = 100$ KPa, Briqueta 2) incluyendo desviación estándar.....	55
Gráfico 7: Módulo Vs Número de ciclos ( $\sigma = 110$ KPa, Briqueta 2) incluyendo desviación estándar.....	56
Gráfico 8: Módulo Vs Número de ciclos ( $\sigma = 120$ KPa, Briqueta 2) incluyendo desviación estándar.....	56
Gráfico 9: Módulo Vs Número de ciclos ( $\sigma = 90$ KPa, Briqueta 1).....	59
Gráfico 10: Deformación Vs Número de ciclos ( $\sigma = 90$ KPa, Briqueta 1) .....	60
Gráfico 11: Módulo Vs Número de ciclos ( $\sigma = 100$ KPa, Briqueta 9).....	63
Gráfico 12: Deformación Vs Número de ciclos ( $\sigma = 100$ KPa, Briqueta 9) ....	64
Gráfico 13: Módulo Vs Número de ciclos ( $\sigma = 110$ KPa, Briqueta 4).....	66
Gráfico 14: Deformación Vs Número de ciclos ( $\sigma = 110$ KPa, Briqueta 4) ....	67

## RESUMEN (ABSTRACT)

En la actualidad los pavimentos asfálticos tienen fallas por fatiga el cual lo controlan con espesores gruesos pero esto no es la manera más óptima de control este problema de fatiga.

Este trabajo plantea estudiar la medición del límite de durabilidad en las mezclas asfálticas mediante el ensayo de fatiga por tracción indirecta, con solo un tipo de mezcla para mediante el ensayo de fatiga obtener valores de módulo de rigidez y deformación.

Mediante las pruebas se definieron a que niveles de deformación unitaria se comienzan a presentar macro fisuras en la mezcla asfálticas bajo diferentes niveles de esfuerzo y compararlos.

Toda la investigación se la realizo con el equipo N.A.T. facilitado por la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil en la cual se realizaron todos los ensayos de fatiga por tracción indirecta.

**Palabras Claves:** límite de durabilidad, deformación unitaria, fatiga, tracción indirecta, módulo de rigidez, esfuerzo.

## INTRODUCCIÓN

Hoy en día los pavimentos asfálticos en nuestro país llegan a fallar rápidamente por la fatiga. La deficiencia de falla por fatiga se produce por dos aspectos importantes, los espesores delgados y el efecto de envejecimiento de la mezcla. Estos problemas rigidizan la mezcla asfáltica y la hacen fallar prematuramente.

En muchos países se utiliza el diseño de pavimentos de espesores gruesos de manera que se obtienen deformaciones unitarias sumamente bajas y se logra evitar o eliminar por completo la fatiga que nace en la capa inferior del pavimento ("Down top").

El diseño de espesores gruesos se lo realiza aumentando el espesor de la carpeta asfáltica, con el fin de obtener deformaciones unitarias en la cual las cargas que se presenten, no ocasionen daños en la mezcla asfáltica. Este valor de la deformación unitaria, debajo del cual ya no se produce daño en la mezcla asfáltica, y elimina el efecto de la fatiga se lo conoce como "endurance limit".

Este límite representa cierto nivel de esfuerzo sobre el pavimento asfáltico, evitando o eliminando por completo la fatiga. Realizando este procedimiento, se descarta el empleo de espesores gruesos, el cual aumenta los costos de construcción.

Debido a lo mencionado anteriormente la presente investigación tiene como objetivo encontrar mediante el ensayo de fatiga por tracción indirecta, a través del equipo Nottingham Asphalt Test (N.A.T), el rango de esfuerzos sobre las mezclas asfálticas que permitan alcanzar el límite de durabilidad o "endurance limit".



## **CAPÍTULO I: MARCO INTRODUCTORIO**

### **1.1. Planteamiento del problema**

En la construcción de pavimentos asfálticos se tiene un gran problema como es la fatiga que se genera por la carga continua del paso de vehículos en las vías. Esto genera que en los diseños de pavimentos asfálticos se realice la construcción de pavimentos con capas asfálticas gruesas con el fin de evitar grandes tensiones en la zona inferior de la capa asfáltica y así beneficiarse de deformaciones pequeñas.

El rápido deterioro del asfalto crea desventajas, las cuales afectan en la parte económica ya que si se construyen capas más gruesas para disminuir las deformaciones, significa aumento en costos y mano de obra al aumentar el tiempo de construcción.

Al conocer la necesidad de encontrar un límite, es importante realizar una investigación que permitan obtener diseños óptimos con relación a los problemas de fatiga que se pueden presentar en las vías de pavimento.

Estos diseños óptimos se los pueden verificar con ensayos de fatiga por compresión y tracción, pero hoy en día no se cuenta con ese tipo de equipos para realizar dichos ensayos, por lo tanto se debe de buscar otra forma para realizar los ensayos.

## 1.2. Justificación del problema

Debido al problema de fatiga en los pavimentos asfálticos, esta investigación se realizó con el fin de poder encontrar mediante el ensayo de fatiga por tracción indirecta, el esfuerzo máximo en el cual la muestra de mezcla asfáltica no genere macro fisuras y así prolongar la vida a fatiga de la mezcla asfáltica.

Una vez confeccionadas las muestras se encontrará un rango de esfuerzos aplicado en las diferentes muestras asfálticas, empleando el equipo N.A.T. proporcionado por la Universidad Católica de Guayaquil, permitiendo verificar de acuerdo a los resultados la inexistencia de macro fisuras.

A través de la verificación de la existencia del límite mediante el ensayo de fatiga realizado, el rango de esfuerzos usado para el respectivo análisis será de gran ayuda debido a que, si se diseñan los pavimentos asfálticos sobrepasando este límite en base al factor fatiga no mejorará la parte estructural del pavimento asfáltico sino que encarecerá el diseño al tener espesores más gruesos.

## **1.3. Objetivos**

### **1.3.1. Objetivo General**

Verificar la existencia del límite de durabilidad en las mezclas asfálticas mediante el ensayo de fatiga por tracción indirecta para determinar el esfuerzo máximo en el cual se produzca la mínima deformación unitaria.

### **1.3.2. Objetivos Específicos**

- Determinar un rango de esfuerzos en el cual las deformaciones unitarias sean pequeñas para que la mezcla asfáltica no falle por fatiga.
- Analizar el comportamiento de la mezcla asfáltica bajo los diferentes niveles de esfuerzos encontrados.
- Comprobar la existencia del límite de durabilidad bajo el ensayo de fatiga por tracción indirecta.

## **CAPÍTULO 2: MEZCLAS ASFÁLTICAS**

### **2.1. Asfalto**

El asfalto se lo conoce como un ligante de color oscuro, el cual proviene del petróleo, por lo tanto este está compuesto de hidrocarburos que incluyen gases livianos hasta compuestos semisólidos. Este material se lo puede obtener en establecimientos de la superficie conocidos como Asfaltos naturales por evaporación natural, o también se lo puede obtener por medio de procesos de destilación industrial donde el material que prevalece es el Bitumen. (El asfalto, 2012)

El asfalto extraído del petróleo es producido por dos métodos, por destilación primaria o al vacío. Cabe recalcar que el asfalto por destilación primaria produce un excelente asfalto para pavimentos, al contrario del asfalto obtenido por soplado ya que es poco usado para pavimentación. El asfalto es el elemento que más influye en la calidad de la mezcla asfáltica, a pesar de ser aproximadamente el 5% en la composición de la misma. (Valenzuela, 2003)

### **2.2. Agregado**

El agregado se conoce como material granular. Dentro de este grupo se encuentran la grava, arena y roca, que provienen de cantos rodados o de canteras. Estos materiales establecen una parte fundamental en las mezclas asfálticas para pavimentación ya que es la parte mineral de la mezcla y porque tienen gran influencia en el comportamiento mecánico de la mezcla.

La capacidad que puedan tener los agregados estará basada en ciertas características tales como la granulometría, durabilidad, porosidad, textura, forma, afinidad con el asfalto, etc.

Con respecto a la dosificación del agregado con el asfalto, es importante tener un control riguroso con la cantidad de asfalto en la mezcla. Si hay mucho porcentaje de asfalto, este produce que el pavimento tenga una superficie inconsistente pero al contrario si se tiene poco porcentaje de asfalto, se produce un pavimento expuesto a que se desintegre por lo áspero que estará. (Maldonado, 2015)

### **2.3. Propiedades de mezclas asfálticas**

Las mezclas asfálticas están expuestas a los diferentes factores ambientales. En Ecuador predominan las altas temperaturas e intensas lluvias. Sin olvidar que estas mezclas también están expuestas al daño que pueda producir el tráfico y el peso, paso de autos y camiones. A pesar de estar expuestas a diversos factores ambientales, las mezclas asfálticas deben de soportarlas y evitar el agrietamiento y deformación. Debido a esto, las mezclas asfálticas deben cumplir 3 criterios importantes que van a aportar con la buena calidad de los pavimentos asfálticos:

- Estabilidad
- Durabilidad
- Resistencia a la fatiga

### 2.3.1. Estabilidad

La estabilidad de una mezcla asfáltica se define como la capacidad que tiene la mezcla para resistir deformaciones que puedan existir por el paso continuo de vehículos en una vía. Para que un pavimento asfáltico sea estable debe mantener su forma, debido a que cuando es inestable se pueden presentar fallas en el pavimento como ahuellamiento, ondulaciones u otros tipos de fallas. Estas propiedades suelen ser comprobados por medio de ciertos ensayos empíricos, dentro de estos se encuentran los de Marshall, Hveem y Hubbard-Field.

La estabilidad de la mezcla asfáltica va a depender de la fricción que se va a presentar internamente entre los agregados de la mezcla, estando sujeto a las características de los mismos como la angularidad, caras fracturadas del árido, tamaño, forma, etc. (Universidad de Piura, 2015)

Las especificaciones de estabilidad de un pavimento van a depender del tráfico esperado, entonces para poder analizar esta característica se debe hacer un análisis completo del tránsito para determinada vía.

La estabilidad también dependerá de la cohesión, esto tiene que ver básicamente con la capacidad ligante del asfalto, esto influye en que el agregado no se salga debido a la acción del paso de vehículos en una vía.

La cohesión en la mezcla se puede ver afectada por el tráfico, en la frecuencia de carga. Por otro lado, al haber aumento de viscosidad o teniendo una disminución de temperatura en el mismo, se puede tener un aumento de cohesión, esto en cierto aspecto afecta ya que está directamente relacionado con el contenido de asfalto, y al haber un aumento de cohesión tenemos un aumento en el contenido de asfalto, el cual puede perjudicar ya que se crea una capa gruesa, afectando la fricción entre las partículas.

**Tabla 1: Causas y efectos de inestabilidad en el pavimento**

<b>CAUSAS</b>	<b>EFFECTOS</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Exceso de asfalto en la mezcla</li><li>• Exceso de arena de tamaño medio en la mezcla</li><li>• Agregado redondeado con o sin pocas superficies trituradas.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Ondulaciones, ahuellamientos y afloramiento.</li><li>• Baja resistencia durante la compactación</li><li>• Ahuellamiento y canalización.</li></ul>

Fuente: Diseños de mezclas asfálticas (2015)

Elaboración propia

### **2.3.2. Durabilidad**

La durabilidad de una mezcla asfáltica consiste en resistir factores producidos por el clima y tránsito, estos pueden ser la pérdida del agregado de la mezcla, aumento en la oxidación del asfalto, entre otros.

La durabilidad de las mezclas asfálticas se la puede controlar o mejorar de 3 formas: aumentar la cantidad de asfalto en la mezcla, usar agregado denso y realizar una buena compactación.

Se puede aumentar la cantidad de asfalto usado en la mezcla, usando un agregado que sea denso para resistir la desagregación que pueda tener la mezcla, y de igual forma una buena compactación para reducir el número de vacíos para así tener una máxima impermeabilidad.

Al aumentar la cantidad de asfalto se logra que la capa de asfalto no se rigidice o envejezca rápidamente, como lo haría una capa delgada, debido a que esto mantiene, por más tiempo las características de la mezcla. Si se tiene más asfalto esto puede complementar en la impermeabilización del mismo sellando vacíos, en el cual dificulta el paso a través del pavimento.

Usando un agregado denso se puede obtener mayor contacto entre los agregados, lo cual le da firmeza a la mezcla evitando que se disgregue por la acción del paso de vehículos, y evitando así que se desintegre el pavimento asfáltico. Estas condiciones pueden ser mejoradas con el uso de la cal hidratada como relleno.

Por último se necesitaría una buena compactación para poder reducir los vacíos, ya que el paso del agua afecta mucho a la durabilidad, bajando su resistencia a la acción con el paso continuo de vehículos.

**Tabla 2: Causas y efectos de una poca durabilidad**

<b>Causas</b>	<b>Efectos</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bajo contenido de asfaltos</li> <li>• Alto contenido de vacíos debido al diseño o falta de compactación</li> <li>• Agregados susceptibles al agua</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Endurecimiento rápido del asfalto y desintegración por pérdida de agregado.</li> <li>• Endurecimiento temprano del asfalto</li> <li>• Desprendimiento de películas de asfalto</li> </ul>

Fuente: Diseños de mezclas asfálticas (2015)

Elaboración propia



### 2.3.3. Resistencia a la fatiga

Se considera resistencia a la fatiga como la capacidad de soportar cargas repetidas del paso de vehículos. Según estudios realizados se sabe que los factores que influyen en la resistencia se deben a la viscosidad y a los vacíos que se puede presentar en la mezcla. En la siguiente tabla se puede apreciar causas y efectos de la mala resistencia a la fatiga.

**Tabla 3: Causas y efectos de la resistencia a la fatiga**

<b>Causas</b>	<b>Efectos</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Bajo contenido de asfaltos</li><li>• Vacíos altos de diseño</li><li>• Falta de compactación</li><li>• Espesor inadecuado de pavimento</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Agrietamiento por fatiga</li><li>• Envejecimiento temprano del asfalto</li><li>• Alta flexión por agrietamiento</li></ul>

Fuente: Diseños de mezclas asfálticas (2015)

Elaboración propia

## **CAPÍTULO 3: COMPORTAMIENTO DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS POR FATIGA**

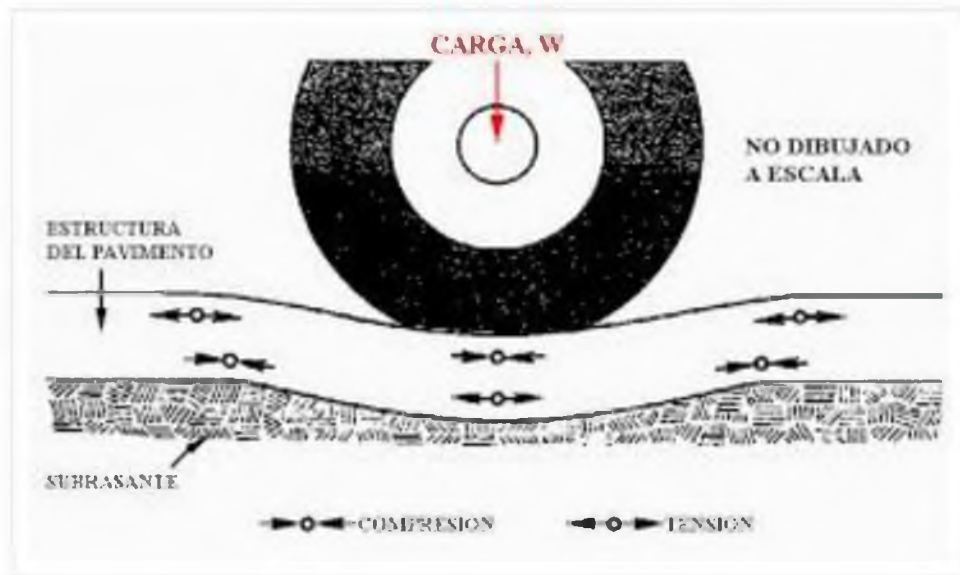
### **3.1. Fatiga**

La fatiga en las mezclas asfálticas se puede interpretar como la pérdida de resistencia mecánica en la mezcla. Este es uno de los principales deterioros que se presentan en las mezclas asfálticas durante su vida útil y esto es en consecuencia de una disminución en su rigidez o módulo dinámico. También debido al aumento de deformaciones superficiales elásticas se generan fisuras, entonces es necesario saber cómo se comporta y cuál es la resistencia que tendrán las capas que componen el pavimento a la fatiga. (FRANCO, 2012)

Este comportamiento va a estar basado en la alteración del material cuando esté sometido al esfuerzo dinámico causado por cargas cíclicas (repetición de carga y descarga), en el cual al ir perdiendo resistencia mecánica aumentará las deflexiones que producirán fisuras dentro de la mezcla.

La falla que se produce por fatiga en la mezcla asfáltica demuestra que la aplicación de carga ha excedido el diseño de la capa estructural de la mezcla. Al pasar vehículos en la vía estos producen una flexión en la capa asfáltica y generan esfuerzos de tensión en la zona inferior del pavimento asfáltico. Al haber esta aplicación continua de cargas se van generando micro fisuras en la zona inferior, en las que a medida que aumentan el número de ciclos de carga, se generan macro fisuras que llevan a fallar a la mezcla asfáltica.

### Ilustración 1: Deformación del pavimento producido por esfuerzos de tensión y compresión



Fuentes: Asphalt Institute's Thickness Design Manual

La introducción de la fatiga para el diseño de pavimentos delgados ha hecho que se use una expresión relacionando la deformación por tensión y el número de ciclos de carga a un determinado nivel de falla, en este caso se asume como nivel de falla que el módulo inicial de rigidez se reduzca al 50 por ciento. Esta fórmula se la expresa como:

$$N_f = K1(1/\epsilon)^{K2}$$

Dónde:

- $N_f$  es el número de ciclos de carga hasta la falla
- $\epsilon$  es la deformación unitaria en la viga
- $K1$  y  $K2$  son los coeficientes de fatiga de pruebas de laboratorio

Debido a los fenómenos que caracterizan esta relación se propuso ajustar la ecuación para poder obtener un mejor ajuste con los diferentes

comportamientos observados. El ajuste ideal fue haber adicionado el término del módulo. En donde la ecuación queda:

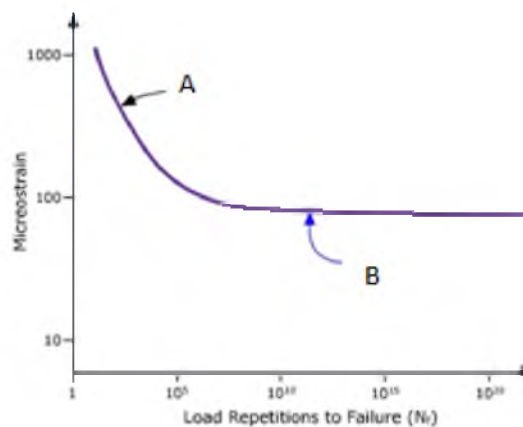
$$N_f = K1(1/\varepsilon)^{K2}[(1/E^*)^{K3}]$$

Dónde:

- E es la deformación unitaria en la viga
- $K1$ ,  $K2$  y  $K3$  son los coeficientes de fatiga de pruebas de laboratorio

Como se puede observar en la ilustración 2 la mayoría de los estudios originales se concentraron en la parte A que es la pendiente inicial de la curva donde solo obtuvieron pistas del comportamiento a la fatiga a deformaciones unitarias bajas, olvidando por completo la parte B de la pendiente donde se vuelve horizontal que es generada por la aplicación de cargas ilimitadas hasta el fallo.

**Ilustración 2: Gráfico de repeticiones de carga hasta la falla Vs la deformación**



Fuente: Pavement Interactiva (2015)

### 3.2. Agrietamiento por fatiga

El agrietamiento por fatiga también es conocido como piel de cocodrilo. La razón por la cual se la conoce así es debido a que el espaciamiento que se presenta entre las grietas, es de alguna forma muy similar a la forma exterior de la piel del cocodrilo. Este tipo de falla ocurre cuando se somete el pavimento a esfuerzos que sobrepasan el límite debido a la repetición de cargas aplicadas.

**Ilustración 3: Agrietamiento por fatiga del pavimento**



Fuente: Ing. Gustavo Corredor M.

Se presenta el agrietamiento por fatiga cuando se producen a lo largo de la vía fisuras longitudinales intermitentes. Esta falla está relacionada específicamente con las cargas a la que está sometida la mezcla asfáltica, ya sea que el número de repeticiones por carga es mucho mayor a la considerada en el diseño o que estas cargas sean mucho más pesadas que lo que puede soportar la estructura del pavimento.

Este problema se puede agravar si existe un drenaje insuficiente en el pavimento, debido a que ocasiona que las capas inferiores que soportan las

cargas se saturan y pierdan resistencia. Al presentarse este caso de presencia de humedad en el pavimento, se debilitan las capas y se producen grandes deformaciones que ocasionan que el pavimento falle prematuramente por fatiga. (Paul Garnica, 2005)

### **3.3. Parámetros que afectan la resistencia a la fatiga**

#### **3.3.1. Contenido de asfalto**

El contenido de asfalto es una de las características de la mezcla que más afecta a la fatiga, debe ser lo suficientemente grande para así aportar una alta resistencia a la fatiga, simultáneamente debe ser pequeño para evitar otros problemas como ahuellamiento, exudación y la inestabilidad estructural. Di Benedetto y De La Roche (2005) indican que esto tiene una gran influencia en el comportamiento a la fatiga.

Jiménez y Gallaway (1962) presentaron varios ensayos de fatiga bajo esfuerzo controlado, con el cual determinaron que existe un contenido óptimo de asfalto que asegura el mejor comportamiento de la mezcla asfáltica a la fatiga. El contenido óptimo de asfalto, que depende tanto del tipo de agregado como de la gradación, parece corresponder al contenido de asfalto que se requiere para lograr la máxima rigidez de la mezcla y es superior al porcentaje de ligante que se determina con base en el método Marshall.

Investigaciones de Epps y Monismith (1969) reportan que por debajo del valor óptimo de asfalto la vida a la fatiga aumenta a medida que sube el contenido de ligante. Por encima del valor óptimo de asfalto, la resistencia a la fatiga disminuye a medida que aumenta el contenido de asfalto.

### 3.3.2. Efecto de envejecimiento

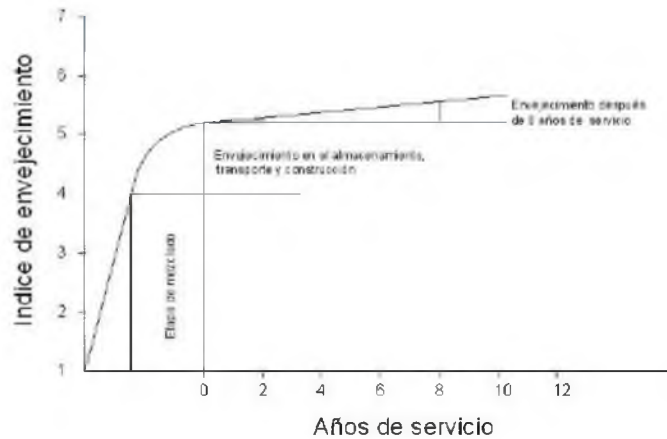
Las mezclas asfálticas cuando están en servicio se envejecen y aumentan su rigidez con el tiempo. El efecto de envejecimiento ocasiona en las mezclas asfálticas cambios en sus propiedades fisicoquímicas en el material y esto afecta a su durabilidad ya que lo vuelve más frágil y es susceptible a agrietarse. Las propiedades iniciales del asfalto se ven afectadas con el tiempo y debido a esto en el diseño de los pavimentos no asegura un buen desempeño ya que durante el proceso de elaboración de una mezcla asfáltica, el asfalto se oxida por el mezclado de altas temperatura y el contacto del aire, consecutivamente el asfalto estará sometido a la intemperie que incide directamente al pavimento.

Youtcheff y Jones en 1994 definieron el envejecimiento oxidativo como la reacción de grupos lábiles del asfalto como el oxígeno; sin embargo, este proceso involucra otros cambios a nivel estructural. Este fenómeno del envejecimiento de las mezclas asfálticas puede darse en dos etapas: El envejecimiento a corto plazo y el envejecimiento a largo plazo.

En la primera etapa, el envejecimiento a corto plazo se da produce en el momento en que se transporta la mezcla en las cisternas y se almacena en los tanques de la planta. En este lapso de tiempo, la temperatura es el principal factor que causa el envejecimiento. En la planta al momento de la fabricación de la mezcla asfáltica se encuentra a altas temperaturas sumándole la presencia del oxígeno, sin embargo también se produce una adsorción entre los áridos y fracciones de asfalto. (Fernández-Gómez, Rondón Quintan, & Reyes Lascano, 2011)

En la segunda etapa el envejecimiento a largo plazo se produce cuando la mezcla asfáltica está ya en servicio, se expone a la intemperie (radiación solar, oxígeno, agua, temperatura). Adicionalmente, se suma la contaminación que arrojan los vehículos y se produce una oxidación progresiva.

#### Ilustración 4: Etapas de envejecimiento del asfalto y mezclas asfálticas



Fuente: Envejecimiento de Asfaltos y Mezclas Asfálticas: Estado del conocimiento (2011)

#### 3.3.3. Rigidez de la mezcla

La rigidez de la mezcla asfáltica es uno de los factores que afecta la resistencia a la fatiga. Una mezcla asfáltica muy rígida no presentará buen comportamiento a la fatiga. Según Brown y Selig, una mezcla no tan rígida tendrá buen comportamiento a la fatiga, pero no lo tendrá al ahuellamiento, debido a que se deberá tener un equilibrio y garantizar un buen comportamiento en la resistencia a la fatiga y al ahuellamiento en pavimentos flexibles.

Las leyes de fatiga determinadas experimentalmente señalan que las mezclas asfálticas más rígidas poseen una menor pendiente de la ley de fatiga, lo que las hace altamente frágiles y mayormente susceptibles en su vida. Por el contrario, las mezclas menos rígidas poseen un mayor rango de deformación otorgándoles más flexibilidad.



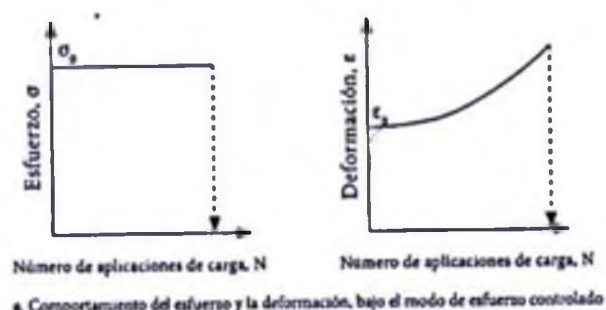
Las mezclas con mayor contenido de finos en su granulometría presentaron un mejor comportamiento frente al fallo por fisuración por fatiga, independientemente del tipo de ligante y temperatura ambiental evaluada.

De acuerdo a estudios realizados en la Universidad Politécnica de Catalunya, se pudo determinar que el aumento de rigidez en las mezclas de asfalto tiene mayor influencia en la fatiga desarrollada en el pavimento que en la pérdida de capacidad de deformación ocasionada por descensos en temperaturas y utilización de ligante más viscosos.

### 3.3.4. Condiciones de carga

Los ensayos de laboratorio se pueden realizar bajo dos métodos de carga para caracterizar la resistencia a la fatiga, carga bajo esfuerzo constante o deformación constante.

#### Ilustración 5: Comportamiento del esfuerzo y la deformación bajo el modo de esfuerzo controlado



Libro: Ahuellamiento y fatiga en mezclas asfálticas (2008)

Para los ensayos de carga bajo esfuerzo controlado, a medida que el esfuerzo se mantiene constante durante todo el proceso de carga la deformación tiende a aumentar, al contrario la carga bajo deformación constante a medida que la

deformación de la muestra se mantiene constante durante el ensayo el esfuerzo tiende a disminuir. Con el aumento de las repeticiones de carga, la mezcla asfáltica se deteriora, es decir pierde rigidez, y por tanto se requiere menos carga y menos esfuerzo para producir la misma deformación (Epps y Monismith, 1972).

Para este trabajo de investigación se usará el método de carga bajo esfuerzo controlado, en el equipo N.A.T. (Nottingham Asphalt Test). En estos ensayos a esfuerzos controlados según Di Benedetto y De la Rocha (2005), se puede decir que la muestra falla cuando la deformación unitaria inicial se duplica o cuando esta llega a la rotura. Cabe recalcar que la vida a la fatiga que tiene la muestra por pérdida de la mitad de rigidez es totalmente diferente a la vida a la fatiga que pueda tener la muestra con respecto a la rotura de la misma.

### **3.4. Límite de durabilidad “ENDURANCE LIMIT”**

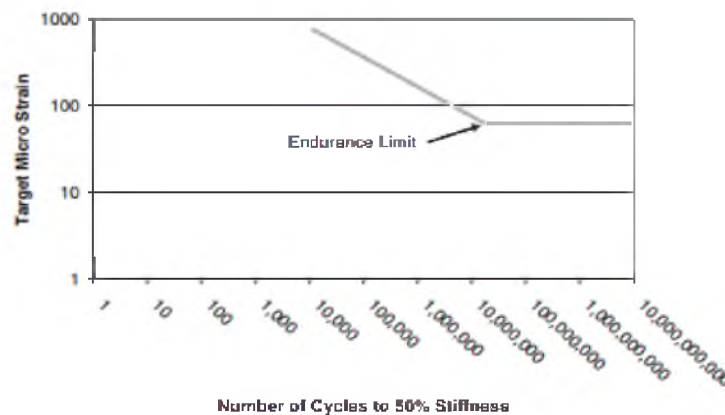
#### **3.4.1. Conceptos**

##### **3.4.1.1. Principios**

La primera investigación para caracterizar el comportamiento por fatiga de diferentes materiales fue llevada a cabo por Wöhler en 1867. Él realizó ensayos de fatiga en laboratorio usando muestras metálicas. Wöhler encontró que la fatiga ocurre cuando se presenta un crecimiento en fisuras en la superficie afectada hasta que la muestra no puede soportar más la carga aplicada. Adicionalmente Wöhler mostró que, para materiales metálicos cuando se encuentran bajo un cierto esfuerzo, el material resistirá sin fallar por fatiga por un número infinito de ciclos. Así el máximo nivel de esfuerzo relacionado con la vida infinita a fatiga ha sido llamado desde ese entonces límite de durabilidad a la fatiga. (Austroads, 2009)

A partir de estas investigaciones realizadas por Wöhler varios estudios con un rango más amplio se han realizado con materiales metálicos para caracterizar su comportamiento a la fatiga. El límite de durabilidad para los metales se describe como una tensión baja en la cual, para materiales sin fisurarse, el gráfico del esfuerzo vs el número de ciclos a la falla, se vuelve horizontal y por ende la fatiga no se produce, en la ilustración 6 se visualiza el concepto teórico del límite de durabilidad, como se aplicaría a la mezclas asfálticas. (Barret, 1973)

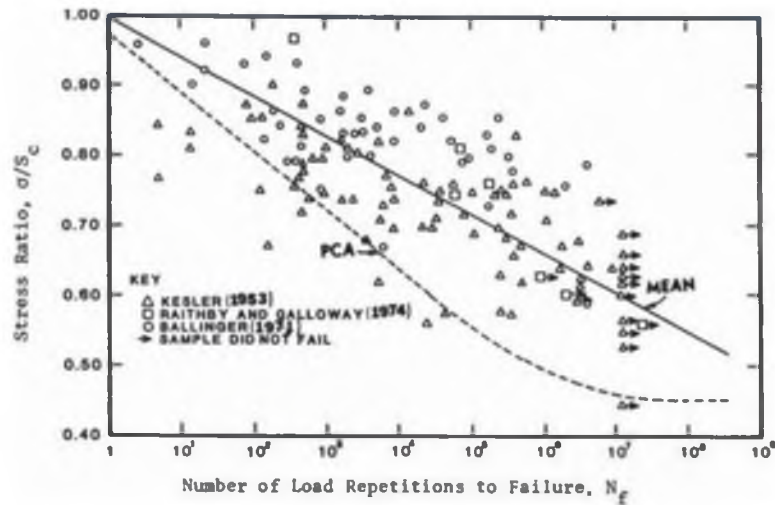
### Ilustración 6: Concepto idealizado de límite de durabilidad.



Fuente: National Cooperative Highway Research Program (2010)

El concepto del límite de durabilidad fue inicialmente realizado para materiales de pavimentación por la Asociación de Cemento Portland. Un estudio de ensayos de fatiga realizado por varios investigadores en vigas de hormigón con cemento Portland, Según Baladi, Snyder y Huang indicaron que si la relación de esfuerzos aplicados se mantiene por debajo de 0.45, el hormigón va a tener una vida fatiga esencialmente ilimitada. Esta relación de esfuerzos la definieron como la relación de esfuerzos inducida en los pavimentos de hormigón y el módulo de ruptura del hormigón. En las pruebas que realizaron se usaron ciclos máximos de 10 millones de repeticiones hasta la falla, como se puede observar en la ilustración 8. (National Cooperative Highway Research Program, 2010)

### Ilustración 7: Límite durabilidad en pavimentos rígidos.



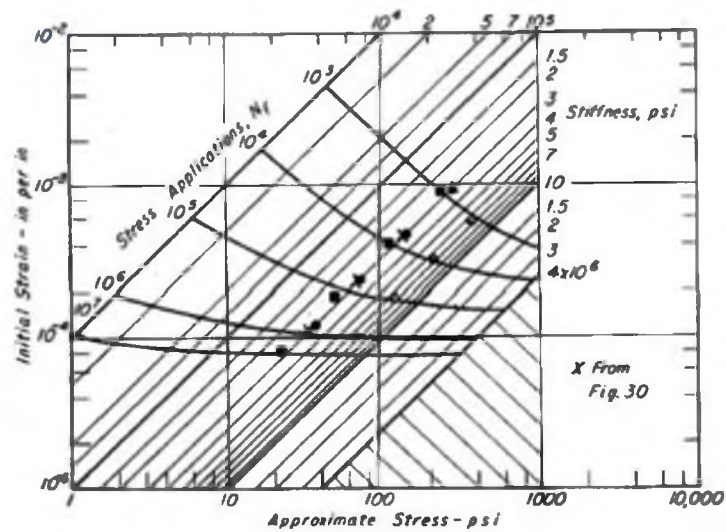
Fuente: National Cooperative Highway Research Program (2010)

#### 3.4.1.2. Límite de durabilidad en la fatiga de asfaltos

Se cree que mezclas asfálticas que puedan durar 40 años contienen un límite de durabilidad bajo en el cual no se presenta daño por fatiga, debido a esto determinar el límite de durabilidad por fatiga en mezclas asfálticas está directamente relacionado al diseño y a la construcción de pavimento de larga vida. Sin embargo, la existencia de este límite de durabilidad a la fatiga es relativamente nueva y no hay valores establecidos para este límite. (Bateman, 2012)

El concepto del límite de durabilidad en la fatiga de mezclas asfálticas, fue inicialmente propuesto por Monismith en 1972. El trabajo que realizó Monismith se enfocó en los factores que afectan la respuesta de las mezclas asfálticas a la fatiga. Como parte de datos de fatiga analizados de mezclas asfálticas de California, Monismith realizó un diagrama que muestra la respuesta a la fatiga de una mezcla con 5% de vacíos bajo condiciones de esfuerzos controlados. (Austroads, 2009)

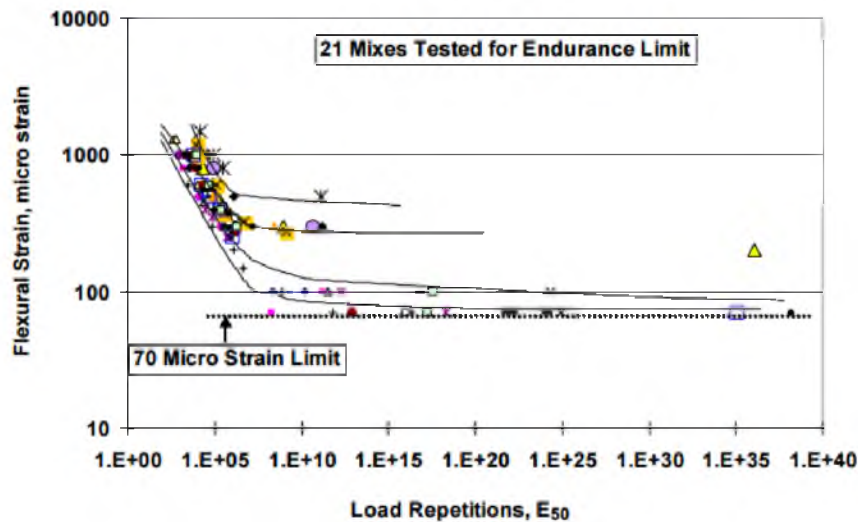
### Ilustración 8: Relación entre esfuerzo, deformación, rigidez y vida a la fatiga



Fuente: Austroads (2009)

Los datos recolectados le sirvieron a Monismith para indicar que aproximadamente la deformación de 70 microstrain aparentemente producía una larga vida a fatiga, excediendo 10 millones de repeticiones. Luego estos datos en el 2000 lo investigo Carpenter, y mediante ensayos extremadamente largos a bajos niveles de esfuerzos mostrados en la Figura demostró la existencia del límite de durabilidad. De las 24 mezclas que ensayo, ninguna se desvía de esa tendencia. Existe un punto definido en el que la curva toma una pendiente horizontal. Esta pendiente horizontal indica que las deformaciones bajas producen vida a la fatiga extremadamente larga, y se las puede asumir como infinitas. (Thompson, 2004)

### Ilustración 9: Relación Tensión Vs Carga



Fuente: International Conference on Perpetual Pavement (2004)

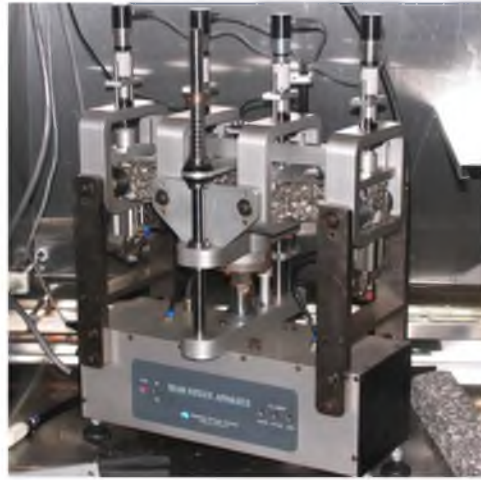
#### 3.4.2. Tipos de ensayo para comprobación de existencia del límite de durabilidad

El proyecto A003-A del SHRP (Strategic Highway Research Program) evaluó siete métodos para medir en laboratorio la vida de fatiga. Las cargas repetidas de flexión y el ensayo por tensión directa fueron los más convenientes.

##### 3.4.2.1. Ensayos de fatiga por flexión de viga

El ensayo de fatiga por viga de 4 puntos se las realizó de acuerdo a la norma AASHTO T321 a 20°C, los especímenes tipo viga fueron ensayadas bajo deformación controlada usando una carga sinusoidal de 10 Hz. Se desarrolló una metodología para evaluar la vida a la fatiga usando este ensayo, para los pavimentos delgados generalmente se representan mejor si el modo de carga se lo realiza por deformación constante, además los espesores gruesos son generalmente representados por un modo de carga representado como esfuerzos constante. (National Cooperative Highway Research Program, 2010)

### ilustración 10: Viga de 4 puntos



Fuente: National Cooperative Highway Research Program (2010)

La investigación elaborada por el SHRP recomendó cambiar un factor de 10 entre los resultados de fatiga en laboratorio de la viga y como en realidad actúa en el campo igualándolo al 10 por ciento de las fisuras producidas en la vía. Entonces gracias a este factor de cambio el número de ensayos de 50 millones de ciclos de carga en laboratorio serán iguales a aproximadamente 500 millones de ciclos de carga en el campo, que sería según estudios de Mahoney a la máxima carga posible que se presentara en la vía durante 40 años. Además basándose en esos análisis, determinaron que si una mezcla puede soportar 50 millones ciclos de carga, se consideraría que estará por debajo del límite de durabilidad, cabe recalcar que para un ensayo de 50 millones de repeticiones se tomaría un tiempo de dos meses de ensayo. (Brown, 2003)

Con los resultados obtenidos se concluyó que con la mezcla usada, fabricada con un asfalto PG 64-22, observaron el límite de durabilidad aproximadamente en 100 microstrain de deformación unitaria.

#### 3.4.2.2. Ensayos de fatiga por ensayo uniaxial

Según Daniel y Kim desarrollaron un método usando una curva característica en donde la vida de la fatiga se podía predecir con rapidez a través el ensayo monotónico de tensión uniaxial. La curva característica es generada modelando el comportamiento de materiales viscos elásticos usando el principio de correspondencia de Schapery, el cual se basa en el principio de las mecánicas de daño continuo y del potencial de trabajo. Este método puede ser usado para determinar rápidamente el límite de durabilidad en una mezcla.

Lo que pretendían Daniel y Kim con esta curva característica era poder conocer con exactitud el comportamiento de la parte elástica y de la parte viscosa en una mezcla asfáltica, ya que el límite de durabilidad corresponde exclusivamente a la parte elástica y para poder encontrar esta curva característica, en la cual la parte viscosa que predomina, usaron el principio de superposición del tiempo-temperatura.

Además para hallar la curva característica de daño real se realizaron ensayos monotónicos uniaxiales hasta la falla y comprobaron las curvas características que obtuvieron mediante el principio de Schapery. Una vez hallada esta curva se puede usar para poder predecir el número de ciclos hasta la falla, a diferentes niveles de deformación, para determinar el límite de durabilidad en la mezcla.



### Ilustración 11: Muestra de ensayo de fatiga a tensión uniaxial



Fuente: National Cooperative Highway Research Program (2010)

#### 3.4.2.3. Ensayos de fatiga por tracción indirecta

Para el reporte del “National Cooperative Highway Research Program” se evaluaron ensayos de fatiga por tracción indirecta con el fin de conocer la resistencia a la fatiga. Los ensayos se realizaron a tres diferentes temperaturas: 5°C, 25°C y 40°C. Los resultados de estos ensayos fueron comparados con las propiedades de una mezcla estandarizada.

Se utilizó lo propuesto por Von Quintus que son las deformaciones unitarias en el fondo de la capa asfáltica menores al 1 % de la deformación unitaria al momento de la falla.

Se demostró que la resistencia a la tracción indirecta dará una rápida visualización para evaluar el límite de durabilidad en una mezcla dada. (Maupin, 1976)

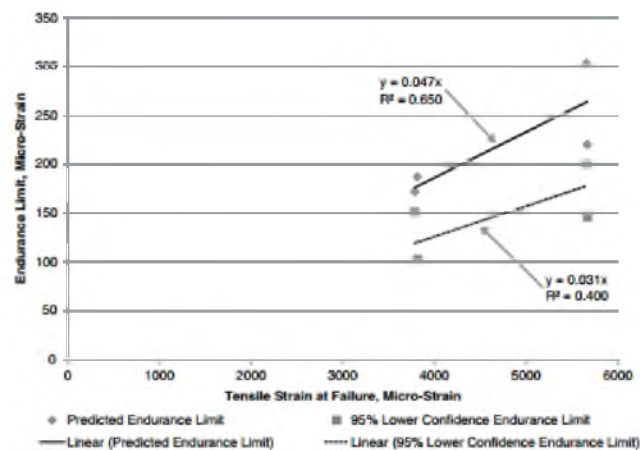
Para poder demostrarlo se calculó el límite de durabilidad de los ensayos de fatiga a una viga y luego se lo correlacionó con los del ensayo por tracción indirecta en los cuales sacaron buenos factores de correlación.

En la ilustración 13, se observan dos curvas: una es el límite de durabilidad calculado y la otra curva es límite de durabilidad con un análisis estadístico, que es el 95% de confianza para el límite de durabilidad obtenido por la deformación hasta la falla en la tracción indirecta.

Cabe recalcar que todas estas medidas no están en base a la resistencia a la tensión sino a la deformación unitaria de la mezcla. Esta forma de calcular la deformación unitaria en este ensayo lo describe Kim y West.

Por lo tanto el ensayo por tracción indirecta parece ser susceptible a dos diferentes ligantes de asfalto, pero no lo es aparentemente a la cantidad de contenido del ligante.

### Ilustración 12: Deformación a tensión en el ensayo por tracción indirecta vs límite de durabilidad a fatiga de la viga



Fuente: National Cooperative Highway Research Program (2010)

Según el reporte 646 del NCHRP (National Cooperative Highway Research Program) los ensayos de fatiga por tracción indirecta parecen tener un potencial para predecir el límite de durabilidad y serán un sustituto más

conveniente que los largos ensayos de la viga de 4 puntos debido a que estos duran casi 2 meses.

### **Ilustración 13: Ensayo de tracción indirecta**



Fuente: Equipo de ensayos de la Pontificia Universidad Javeriana (2012)

### **3.4.3. Efectos del periodo de descanso**

En los últimos tiempos se ha resaltado para los diseños de pavimentos un concepto importante como los efectos de los periodos de descanso, estos afectan directamente al límite de durabilidad por fatiga en las mezclas asfálticas, debido a que durante estos periodos ocurre una recuperación del daño de la mezcla.

Este fenómeno de la curación es muy conocido en materiales como polímeros, vidrios y cemento portland. Se considera generalmente como la capacidad que tiene un material para auto recuperarse, el cual ocurre entre la aplicación de cargas ahí el daño es revertido y los componentes agregado-asfalto se vuelven a unir, logrando que se cierren las micro-fisuras.

Investigaciones realizadas últimamente por The National Cooperative Highway Research Program considera este concepto de la curación en las mezclas asfálticas es su principal objetivo para el diseño de los pavimentos duraderos. El objetivo de esta investigación es diseñar pavimentos en los

cuales el daño provocado por las cargas aplicadas sea suficientemente baja para que ocurra esta recuperación, evitando acumulación de daño en el pavimento. (Program, 2008)

También se considera un material visco elástico Como las mezclas asfálticas, el comportamiento actual de la fatiga puede ser explicada como un equilibrio de la energía entre la energía en la superficie y la energía de daño disipada. (Suresh, 2003)

Según Little la energía superficial es la energía que se almacena en el material y tiene la capacidad de recuperarse por el contrario la energía disipada es la que se almacena en el material pero la disipa mediante calor o propagando fisuras en el material, entonces si la energía superficial es menor que la energía de daño disipada, la mezcla no tendrá potencial de curación y tenderá a producirse micro-fisuras en el material. Este es el proceso de la iniciación de la fisura y la propagación. De todos modos, si la energía de daño disipada es menor, el potencial de curación en la mezcla será alto y controlara el equilibrio de energía, el cual cerrara fisuras abiertas at revés de un proceso de curación. El nivel de energía disipada es determinado por cargas externas y propiedades internas del material (Shen, 2005)

Sin embargo, los efectos de curación y su contribución a la vida de fatiga en las mezclas asfálticas son bastante desconocidas. Todavía no hay métodos de diseño de pavimentos en los cuales se considere los efectos del periodo de descanso en condiciones reales de tráfico.

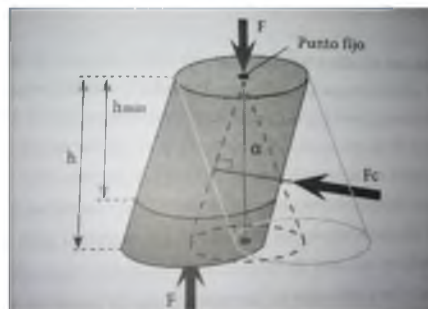
## CAPÍTULO 4: PREPARACIÓN Y RESULTADOS DEL EXPERIMENTO

### 4.1. Preparación de los especímenes

#### 4.1.1. Compactación de los especímenes

Las muestras se realizaron bajo el método de compactación giratorio. Este método consiste en poner la mezcla en un molde cilíndrico el cual se somete a movimientos giratorios, mientras que dos pistones de acero hacen presión sobre los extremos de la muestra de asfalto. Este esquema se puede observar en la siguiente ilustración.

#### Ilustración 14: Esquema de la compactación giratoria



$h_{min}$ = Altura mínima para el 0% de vacíos

$h$ = Altura aparente para N giros

$F$ = Fuerza de compresión

$F_c$ = Fuerza cortante

$A$ = Ángulo de inclinación

Fuente: Ahuellamiento y fatiga en mezclas asfálticas (2008)

Esta técnica aplica al mismo tiempo fuerza de corte y presión estática. Pero este método tiene una desventaja, que solo se limita a muestras que sean cilíndricas. Según Von Quintus en 1988, se concluyó mediante ensayos que

el método de la compactación giratoria representa la mejor compactación de la mezcla in situ.

Las muestras de asfalto para esta investigación se realizaron con el compactador giratorio Superpave (SGC= Superpave Gyratory Compact), el cual es una metodología SUPERPAVE.

### Ilustración 15: Compactador Giratorio



Fuente: Equipo del Laboratorio de la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil (2016)

El compactador giratorio es un equipo que permite compactar de una forma realista ya que obtiene la densidad requerida bajo condiciones actuales del clima y carga en el pavimento flexible. Los moldes usados en el SGC son de 150 mm de diámetro actualmente y usando agregados con un tamaño máximo de 50 mm.

Al momento de la compactación el molde se coloca a un ángulo de  $1,25^\circ$  y el motor eléctrico que hace funcionar esta base para compactar, tiene una

velocidad de 30 rpm. En el momento que la muestra se está densificando este equipo indica al sistema de carga que debe corregir la posición del pistón de carga, para así poder conseguir una compactación que sea constante en todo el proceso.

#### **4.1.2. Densidad y porcentaje de vacíos de la mezcla asfáltica compactada**

Una vez obtenida las briquetas SUPERPAVE, se procedió a verificar la densidad de cada briqueta con el fin de saber el porcentaje de vacíos que tenía cada briqueta y así poder verificar si todas fueron compactadas de igual forma por el compactador giratorio. El porcentaje de vacíos ideal para este trabajo de investigación es del 4%.

Para hallar la densidad se tomaron tres pesos de las muestras los cuales son: Peso seco, Peso en agua y peso superficialmente seco. Primero se procedió a tomar el peso seco de las muestras.

#### **Ilustración 16: Peso seco**



Fuente: Equipo de Laboratorio de la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil (2016).

Luego se sumergieron las muestras en agua y se tomó el peso de la muestra sumergida.

### Ilustración 17: Peso sumergido



Fuente: Equipo de Laboratorio de la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil (2016).

Por último se pesaron las muestras para obtener el peso superficialmente seco.

### Ilustración 18: Peso superficialmente seco



Fuente: Equipo de Laboratorio de la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil (2016).



Para conocer el volumen y la densidad de las 5 muestras, se tomaron en cuentas las fórmulas presentadas a continuación.

$$Densidad = \frac{Peso\ Seco}{Volumen}$$

$$Densidad = \frac{Peso\ Seco}{Peso\ superficialmente\ seco - Peso\ en\ agua}$$

Una vez obtenida la densidad, para poder calcular el porcentaje de vacíos con aire se necesita conocer o hallar la gravedad teórica máxima, el cual se lo determina por el ensayo RICE. En nuestro caso la planta de asfalto nos facilitó ese dato, donde el valor de la Densidad teórica máxima es 1,65. Con la siguiente formula se puede encontrar el porcentaje de vacíos, los cuales estaban alrededor del 4%.

$$\%Vacios = 100 \times \left( 1 - \frac{Densidad}{Densidad\ Maxima\ Teorica} \right)$$

#### 4.1.3. Extracción de briquetas

Para esta investigación se usó el equipo NAT (Nottingham Asphalt Test) y en este equipo el ensayo a fatiga se lo realiza con briquetas tipo Marshall que tienen aproximadamente 4 pulgadas de diámetro. Como las briquetas obtenidas en el compactador giratorio son aproximadamente de 6 pulgadas, se procedió a extraer una briqueta de 4 pulgadas en cada briqueta superpave. Se lo realizó mediante el extractor de núcleo y con una broca de diamante de un diámetro de 4¼ pulgadas.

### Ilustración 19: Extracción de las briquetas



Fuente: Universidad Católica de Santiago de Guayaquil (2016).

Este procedimiento se tuvo que realizar para ensayar las muestras Superpave en el NAT. Luego de extraer las briquetas se procedió a cortarlas ya que tenían alturas de 12 cm aproximadamente, obteniendo por cada briqueta 2 muestras entre 5 y 6 cm de alto y con diámetro de 4 pulgadas.

### Ilustración 20: Briquetas extraídos



Fuente: Ensayos en la Universidad Católica Santiago de Guayaquil (2016)

#### 4.1.4. Datos de briquetas

Cuando se halla el módulo bajo esfuerzo controlado, módulo bajo deformación constante y fatiga se deben ingresar datos de las briquetas como espesor y diámetro.

**Tabla 4: Datos de briquetas**

Nº Briqueta	Espesor (mm)	Diámetro (mm)
1	58	101
2	58	102
3	60	101
4	59	102
5	57	101
6	58	101
7	58	101
8	57	101
9	59	101
10	59	101

Elaboración propia

**Ilustración 21: Medición de diámetro y espesor**





Fuente: Ensayos en Laboratorio de la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil (2016).

Una vez realizado esto, se tuvieron las muestras listas para comenzar los ensayos a fatiga.

## **4.2. Ensayos realizados para encontrar límite de durabilidad “Endurance Limit”**

### **4.2.1. Información General**

Para este trabajo de investigación se realizaron 2 pruebas importantes de desempeño, con el objetivo de determinar el comportamiento que se iba a presentar en las briquetas previamente obtenidos. Una vez realizadas estas pruebas, se pudieron obtener resultados por medio del software para medir módulo de rigidez y dado esto obtener conclusiones.

Las pruebas que se realizaron fueron:

- Módulo de rigidez
- Ensayo de fatiga

Para este proyecto pudimos obtener 10 briquetas de la misma mezcla, con características similares. Estas se ensayaron de diferente manera para obtener resultados detallados a continuación:

- a) 1 briqueta se usó para “Prueba de módulo de rigidez bajo deformación constante”, “Prueba de módulo de rigidez bajo esfuerzo constante” y “Pruebas de fatiga bajo diferentes niveles de esfuerzos permitidos por el NAT (50 kPa-150kPa)”
- b) 5 briquetas se usó para “Prueba de módulo de rigidez bajo esfuerzo constante” y “Pruebas de fatiga bajo esfuerzo de 90 kPa”
- c) 3 briquetas se usaron para “Prueba de módulo de rigidez bajo esfuerzo constante” y “Pruebas de fatiga bajo esfuerzo de 100 kPa”
- d) 1 briqueta se usaron para “Prueba de módulo de rigidez bajo esfuerzo constante” y “Pruebas de fatiga bajo esfuerzo de 110 kPa”

#### **4.2.2. Descripción de ensayos en Equipo NAT (Nottingham Asphalt Test)**

##### 4.2.2.1. Módulo de Rigidez

Este ensayo se lo realiza para determinar el Módulo de rigidez de una mezcla asfáltica en el laboratorio. Esta prueba es un ensayo no destructivo el cual nos permite saber el módulo de rigidez mediante deformación o esfuerzo controlado en el equipo NAT.

Los implementos a usarse en este ensayo serán:

- Plantilla de alineación del LVDT

### **Ilustración 22: Plantilla de alineación del LVDT**



Fuente: Laboratorio de la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil (2016)

- Patrón de carga superior

### **Ilustración 23: Patrón de carga superior**



Fuente: Laboratorio de la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil (2016)

- Dispositivo para la medición de deformación horizontal (Figura)

#### Ilustración 24: Dispositivo para la medición de deformación horizontal



Fuente: Laboratorio de la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil (2016)

Los datos que se ingresaron en el software para la medición de módulo fueron:

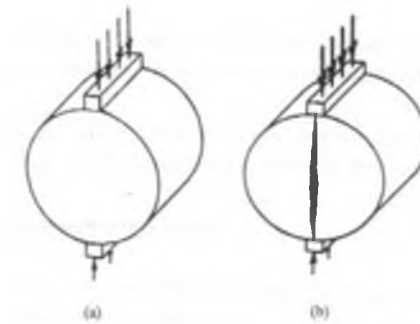
- Temperatura de ensayo: 20°C
- Relación de Poisson ( $\mu$ ) = 0.35
- Plazo deseado para carga total: 120 milisegundos
- Deformación horizontal deseada: 5  $\mu\text{m}$  (para diámetros de 100 mm)
- Número de pulsos de preparación: 5
- Los datos de los espesores y diámetros de cada muestra, serán ingresadas al programa Stiffness Micron.

#### 4.2.2.2. Ensayo de fatiga

En este trabajo se usó el ensayo “Diametral” o de “Tracción Indirecta”, es un ensayo que simula estado de esfuerzos biaxiales, de forma que en relación a los ensayos uniaxiales, estos representan una mejor condición del campo. (Al-Qadi y Nassar, 2013).

En este ensayo, la muestra cilíndrica es cargada repetidamente con una carga compresiva que actúa en dirección vertical y de forma paralela a la sección transversal.

### Ilustración 25: Esquema de ensayo de fatiga por tracción indirecta



Fuente: Ahuellamiento y fatiga en mezclas asfálticas (2008)

Los implementos a usarse en este ensayo serán:

- Plantilla de alineación – Patrón de carga inferior

### Ilustración 26: Plantilla de alineación



Fuente: Laboratorio de la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil (2016)

- Patrón de carga superior



### Ilustración 27: Patrón de carga superior



Fuente: Laboratorio de la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil (2016)

Este ensayo se realizó con esfuerzos que oscilan los 90 y 150 kPa, hasta obtener una caída en el módulo y así identificar en que rango de esfuerzos se encuentra el límite de durabilidad.

## 4.3. Proceso experimental para encontrar el límite de durabilidad

### 4.3.1. Desarrollo de la metodología

Para hallar el módulo de rigidez inicial se realizó el siguiente proceso:

Primero, se halló el módulo de rigidez ( $S_{mix}$ ) bajo deformación controlada en el NAT de 5 micrones. Con este dato y la relación de poisson que es de 0,35, se procedió a encontrar el esfuerzo necesario para tener una deformación unitaria ( $\epsilon$ ) en la mezcla de  $65 \times 10^{-6}$ . Esto se lo halla con la siguiente fórmula:

$$\sigma = \frac{S_{mix} * \epsilon}{(3\mu + 1)}$$

Se toma la primera muestra (Briqueta N°2) con el cual se obtuvo el esfuerzo inicial

**Tabla 5: Tabla para hallar esfuerzo inicial**

<b>Smix (MPa)</b>	2172
<b>Smix (kPa)</b>	2172000
<b>ϵ</b>	65E-06
<b>μ</b>	0,35

<b>Esfuerzo (kPa)</b>	68,87
-----------------------	-------

Elaboración propia

Una vez obtenido el esfuerzo se procedió a redondearlo debido a que el equipo N.A.T. solo permite obtener módulos de rigidez bajo esfuerzo controlado con valores de esfuerzos que van en intervalos de 50 kPa.

<b>esfuerzo redondeado (kPa)</b>	50
----------------------------------	----

Como el esfuerzo fue redondeado se procedió a encontrar el módulo de rigidez inicial bajo esfuerzo controlado antes de comenzar hacer el ensayo por fatiga. Este módulo de rigidez inicial es importante debido a que será el punto de partida para hallar la existencia del límite de durabilidad por fatiga por tracción indirecta.

<b>Smix (MPa)</b>	2423
-------------------	------

Para empezar los ensayos a fatiga se aplicaron 2000 ciclos de carga al esfuerzo de 50 kPa. Luego se midió el módulo de rigidez bajo esfuerzo controlado con el fin de comparar el módulo de rigidez inicial y el módulo de rigidez de los 2000 ciclos de carga.

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon}$$

Se puede deducir por medio de la fórmula E que si el módulo de rigidez está bajando su valor y al mantener el esfuerzo constante, quiere decir que la deformación unitaria está aumentando, En otras palabras significa que la mezcla asfáltica se está fisurando internamente y si al seguir bajando este módulo, la deformación unitaria aumentará hasta llegar a la falla.

$$\downarrow E = \frac{\sigma}{\epsilon} \uparrow$$

Al realizar el ensayo a fatiga con esfuerzos bajos (como 50 kPa) se determinó que a los 2000 ciclos de carga no se iban a presentar cambios en el módulo de rigidez y por ende no aumentaría la deformación unitaria. Debido a esto, se decidió realizar el ensayo de fatiga hasta 8000 ciclos de carga pero realizando incrementos de 2000 ciclos y aplicando el procedimiento similar al antes explicado.

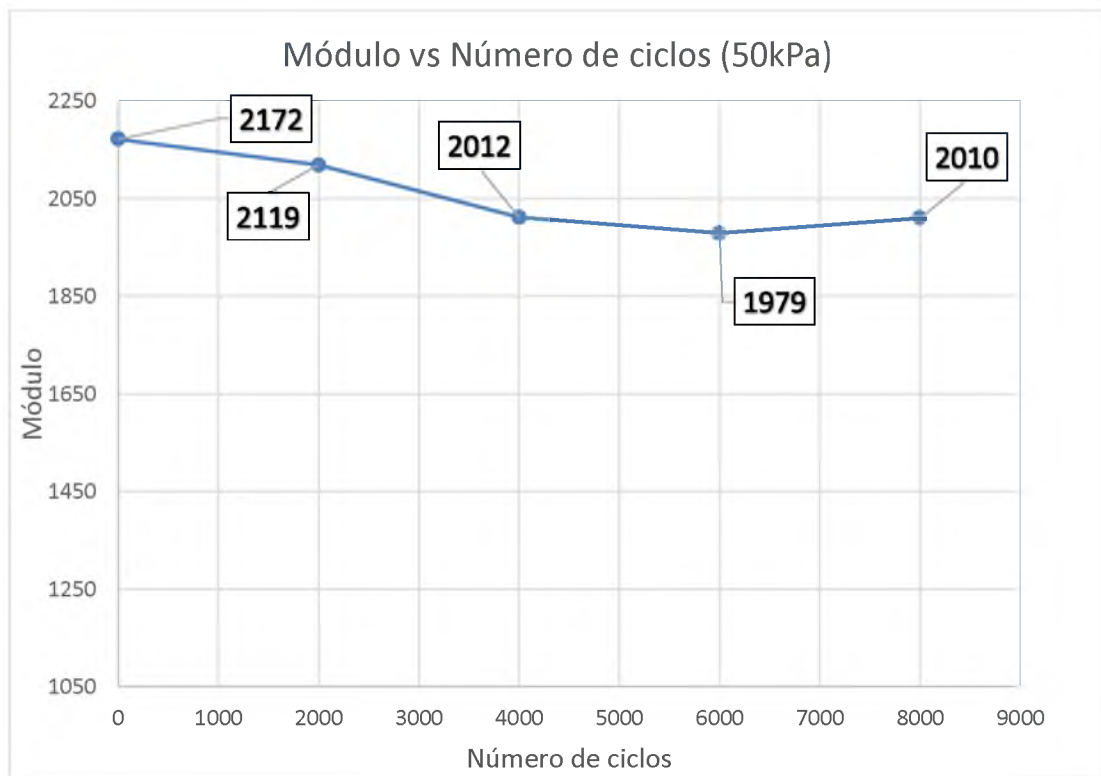
Inicialmente se comenzó a ensayar con esfuerzo de 50 kPa una briqueta (N° 2) en los cuales se encontraron los módulos de rigidez, detallados a continuación, en los diferentes ciclos de carga que van en intervalos de 2000 ciclos.

**Tabla 6: Valores del módulo cada 2000 ciclos de carga en el ensayo a fatiga ( $\sigma = 50$  KPa, Briqueta 2)**

Esfuerzo (kPa)	Ciclos de carga	Módulo (MPa)
50	0	2423
	2000	2119
	4000	2012
	6000	1979
	8000	2010

Elaboración propia

**Gráfico 1: Módulo Vs Número de ciclos ( $\sigma = 50$  KPa, Briqueta 2)**



Elaboración propia

Si se analizan los resultados de la tabla 6 puede observarse que al no existir una disminución consistente en el módulo, implica que la muestra no se ha dañado de manera que puede continuarse ensayando la muestra hasta ver una caída consistente en el módulo de rigidez, con el fin de visualizar por donde está el límite de durabilidad.

Para ello se procedió a incrementar paulatinamente los esfuerzos desde 50 kPa hasta 150 kPa, realizándose para cada esfuerzo un procedimiento aproximadamente similar.

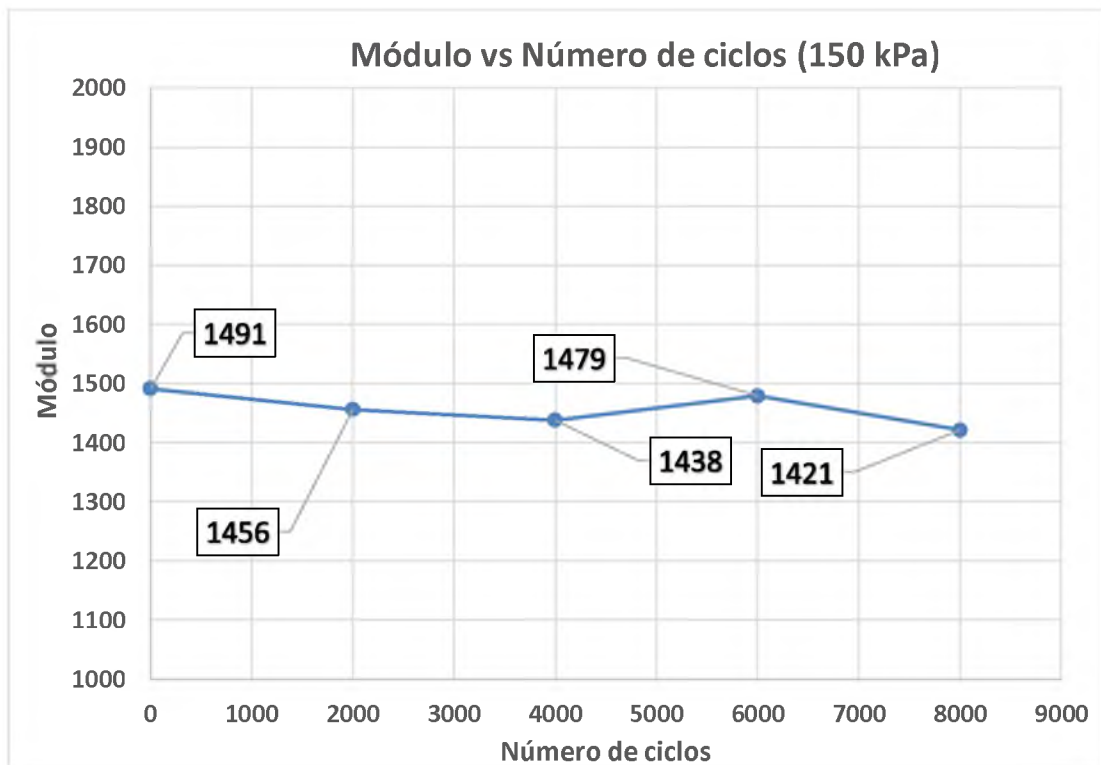
A continuación se presenta el análisis realizado con el último esfuerzo aplicado de 150 kPa.

**Tabla 7: Valores del módulo cada 2000 ciclos de carga en el ensayo a fatiga ( $\sigma = 150$  KPa, Briqueta 2)**

Esfuerzo (kPa)	Ciclos de carga	Módulo (MPa)
150	0	1491
	2000	1456
	4000	1438
	6000	1479
	8000	1421

Elaboración propia

**Gráfico 2: Módulo Vs Número de ciclos (esfuerzo de 150 kPa)**



Elaboración propia

Se determinó que las briquetas en los ensayos de fatiga a este nivel de esfuerzo de 150 KPa ya se estaban fisurando internamente debido a su caída en el módulo pero para visualizarlo se realizara el proceso que está a continuación.

#### 4.3.2. Desviación estándar

Para poder obtener conclusiones, se necesitan en detalle un grupo de valores o módulos de rigidez. Es necesario utilizar la fórmula de desviación estándar para representar los valores que están distribuidos en relación a la media aritmética, de manera que se pueda lograr una visión más real de los valores y así poder interpretarlos.

La desviación estándar es un índice numérico de la dispersión de un grupo de valores. Se puede asumir que mientras mayor es la desviación estándar, mayor es la dispersión del grupo de valores. Se llama desviación estándar a un promedio de las desviaciones individuales de cada observación con respecto a la media de una distribución.

Una vez que se obtuvo los valores del módulo cada 2000 ciclos de carga, se realizó la desviación estándar con los 5 valores que proporcionó el software para hallar el módulo de rigidez a esfuerzo constante para saber el rango de valores que se dispersan con relación al valor promedio.

Cómo no se pretendía sacar conclusiones con un solo dato del módulo de rigidez cada 2000 ciclos de carga, se procedió con la desviación estándar a tener un rango de comparación para cada 2000 ciclos de carga viendo si está igual o está fuera del rango. En esta investigación, se utilizó como rango una desviación estándar esto significa que todos los valores dentro de este rango se distribuyen de manera normal y están dentro del 68% de los Datos de la distribución.

Se empezó hallando la media de los valores que nos da el software para cada 2000 ciclo de carga.

**Tabla 8: Media de valores para cada 2000 ciclos de carga ( $\sigma = 50$  KPa, Briqueta 2)**

0 ciclos de carga		
Esfuerzo (kPa)	Smix Ajustado (MPa)	Promedio (MPa)
50	2170	2172
	2190	
	2183	
	2157	
	2161	

Elaboración propia

Se alcanzó la media a través de la siguiente fórmula:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}$$

$$\bar{X} = \frac{X_1 + X_2 + \dots + X_n}{n}$$

$$\bar{X} = \frac{2170 + 2190 + 2183 + 2157 + 2161}{5}$$

$$\bar{X} = \frac{10861}{5}$$

$$\bar{X} = 2172$$

Luego se halla la varianza usando el dato de la media encontrada anteriormente:

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n - 1}$$

$$S^2 = \frac{(2170 - 2172)^2 + (2190 - 2172)^2 + (2183 - 2172)^2 + (2157 - 2172)^2 + (2161 - 2172)^2}{5 - 1}$$

$$S^2 = 199$$

Una vez encontrada la varianza se pudo calcular la desviación estándar para el grupo de datos, la cual será la raíz de la varianza.

$$S = \sqrt{S^2}$$

$$S = 14,10$$

Como ya se tiene la desviación estándar, se podrá asumir un rango de +/- de una desviación con el fin de tener un rango de aceptación para el módulo de rigidez y con esto visualizar el comportamiento del módulo de rigidez cada 2000 ciclos de carga, determinando con mayor exactitud si el rango de aceptación del módulo de la muestra está decayendo o no cada 2000 ciclos de carga.

Para el módulo obtenido cada 2000 ciclos de carga aplicando fatiga, se realizó este proceso de la desviación estándar detallado a continuación:

**Tabla 9: Media, varianza y desviación estándar de los módulos de rigidez cada 2000 ciclos ( $\sigma = 50$  KPa, Briqueta 2)**

0 ciclos de carga				
Esfuerzo (kPa)	Smix Ajustado (MPa)	X	S <sup>2</sup>	S
50	2170	2172	199	14,10
	2190			<b>X + 1S</b>
	2183			2186,10
	2157			<b>X - 1S</b>
	2161			2157,90

2000 ciclos de carga				
Esfuerzo (kPa)	Smix Ajustado (MPa)	X	S <sup>2</sup>	S
50	2165	2119	801	28,29
	2124			<b>X + 1S</b>
	2113			2147,29
	2099			<b>X - 1S</b>
	2094			2090,71



4000 ciclos de carga				
Esfuerzo (kPa)	Smix Ajustado (MPa)	X	S <sup>2</sup>	S
50	1996	2012	987	31,42
	2030			<b>X + 1S</b>
	1996			2043,42
	1979			<b>X - 1S</b>
	2057			1980,58

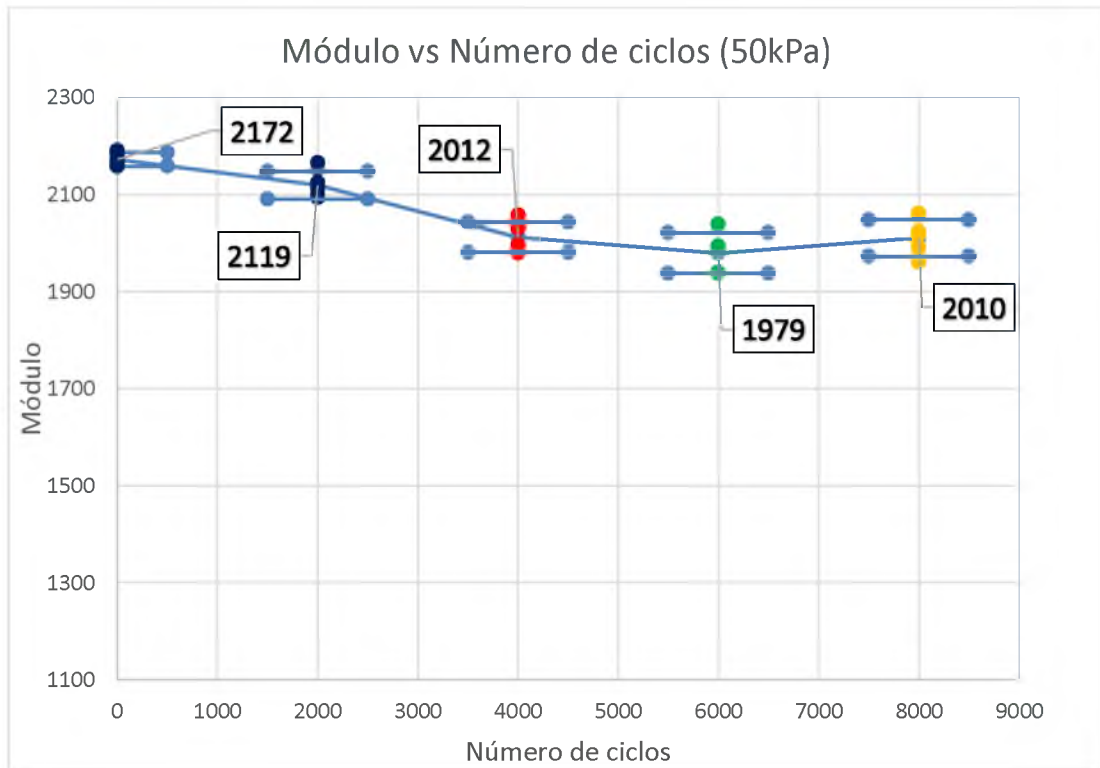
6000 ciclos de carga				
Esfuerzo (kPa)	Smix Ajustado (MPa)	X	S <sup>2</sup>	S
50	1940	1979	1757	41,91
	1985			<b>X + 1S</b>
	1937			2020,91
	1994			<b>X - 1S</b>
	2038			1937,09

8000 ciclos de carga				
Esfuerzo (kPa)	Smix Ajustado (MPa)	X	S <sup>2</sup>	S
50	2016	2010	1401	37,43
	2023			<b>X + 1S</b>
	1990			2047,43
	1960			<b>X - 1S</b>
	2060			1972,57

Elaboración propia

Con estos datos se pudo obtener una imagen más clara del daño que se presenta en la muestra. Esto se lo representa en un gráfico con sus respectivas desviaciones estándar.

**Gráfico 3: Módulo Vs Número de ciclos ( $\sigma = 50$  KPa, Briqueta 2) incluyendo desviación estándar.**



Elaboración propia

Como se observa en la gráfica el rango de comparación de módulo inicial comienza a decaer a los 2000 ciclos de carga, pero a partir de los 4000 ciclos de carga el rango del módulo hasta los 8000 ciclos de carga el rango de aceptación del módulo se mantiene constante sin presentarse alguno fuera de esa tendencia.

Anteriormente se mencionó que se realizó pruebas de fatiga hasta llegar a un esfuerzo de 150 kPa en la que mediante el mismo método usado de la desviación estándar, se logró determinar que la muestra asfáltica a este nivel de 150 kPa la tendencia del rango era decreciente sin mantenerse constante.

Tabla 10: Media, varianza y desviación estándar de los módulos de rigidez cada 2000 ciclos ( $\sigma = 150$  KPa, Briqueta 2)

0 ciclos de carga				
Esfuerzo (kPa)	Smix Ajustado (MPa)	$X$	$S^2$	$S$
150	1508	1491	107	10,33
	1492			$X + 1S$
	1484			1501,33
	1486			$X - 1S$
	1483			1480,67

2000 ciclos de carga				
Esfuerzo (kPa)	Smix Ajustado (MPa)	$X$	$S^2$	$S$
150	1453	1456	14	3,70
	1458			$X + 1S$
	1461			1459,70
	1457			$X - 1S$
	1452			1452,30

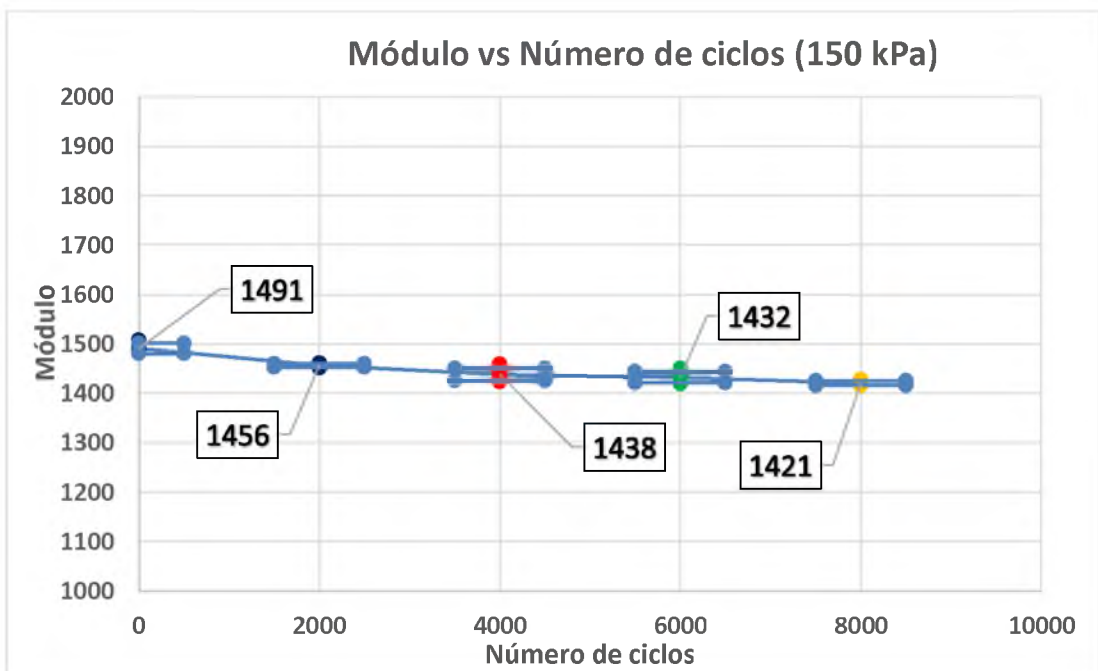
4000 ciclos de carga				
Esfuerzo (kPa)	Smix Ajustado (MPa)	$X$	$S^2$	$S$
150	1459	1438	163	12,76
	1437			$X + 1S$
	1436			1450,76
	1424			$X - 1S$
	1435			1425,24

6000 ciclos de carga				
Esfuerzo (kPa)	Smix Ajustado (MPa)	$X$	$S^2$	$S$
150	1432	1432	127	11,28
	1419			$X + 1S$
	1432			1443,48
	1428			$X - 1S$
	1450			1420,92

8000 ciclos de carga				
Esfuerzo (kPa)	Smix Ajustado (MPa)	X	S <sup>2</sup>	S
150	1428	1421	22	4,64
	1419			<b>X + 1S</b>
	1419			1425,64
	1416			<b>X - 1S</b>
	1423			1416,36

Elaboración propia

**Gráfico 4: Módulo Vs Número de ciclos ( $\sigma = 150$  KPa, Briqueeta 2) incluyendo desviación estándar.**



Elaboración propia

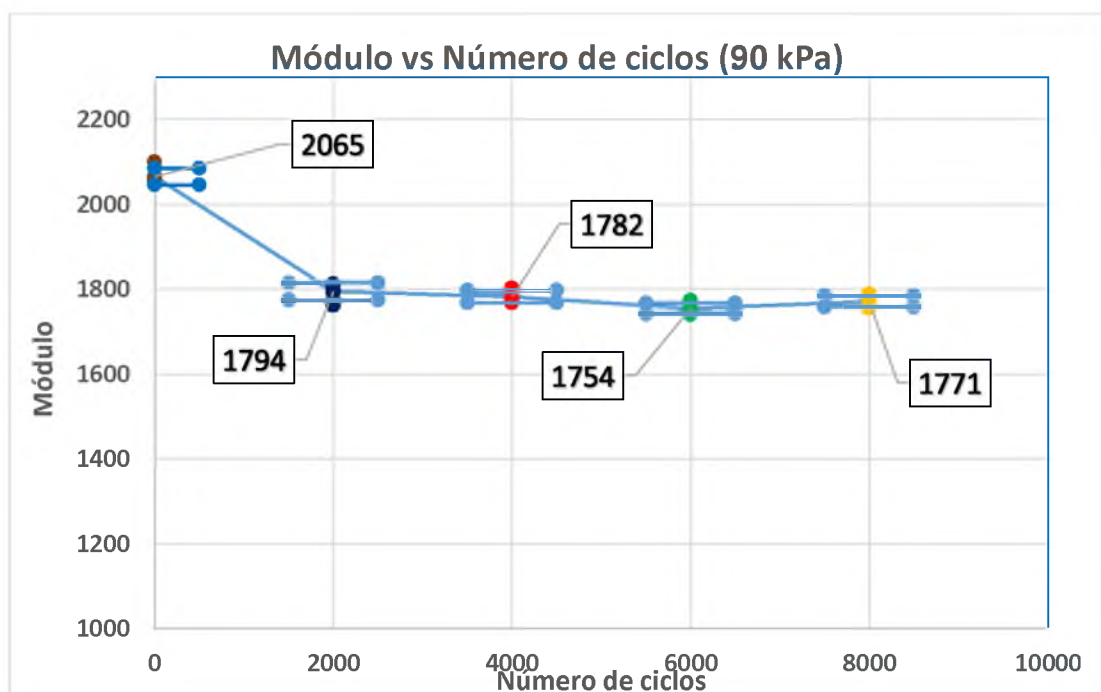
Como se observa en el gráfico 4 el módulo inicial tiene una caída el cual desde el inicio no se recuperó, por este motivo se asumió que la deformación unitaria ya se había estado aumentando y obviamente generando micro fisuras a niveles de esfuerzos más bajos a este. En los anexos se podrán ver los resultados del ensayo de la briqueeta a esfuerzos entre los 60 y 140 KPa, con escalas de carga de 10 kPa.

Al final teniendo el dato de la briqueta ensayada a varios esfuerzos se visualizó que esfuerzo a partir del esfuerzo de 90 kPa tendía a bajar el módulo a los 8000 ciclos de carga como podemos ver a continuación.

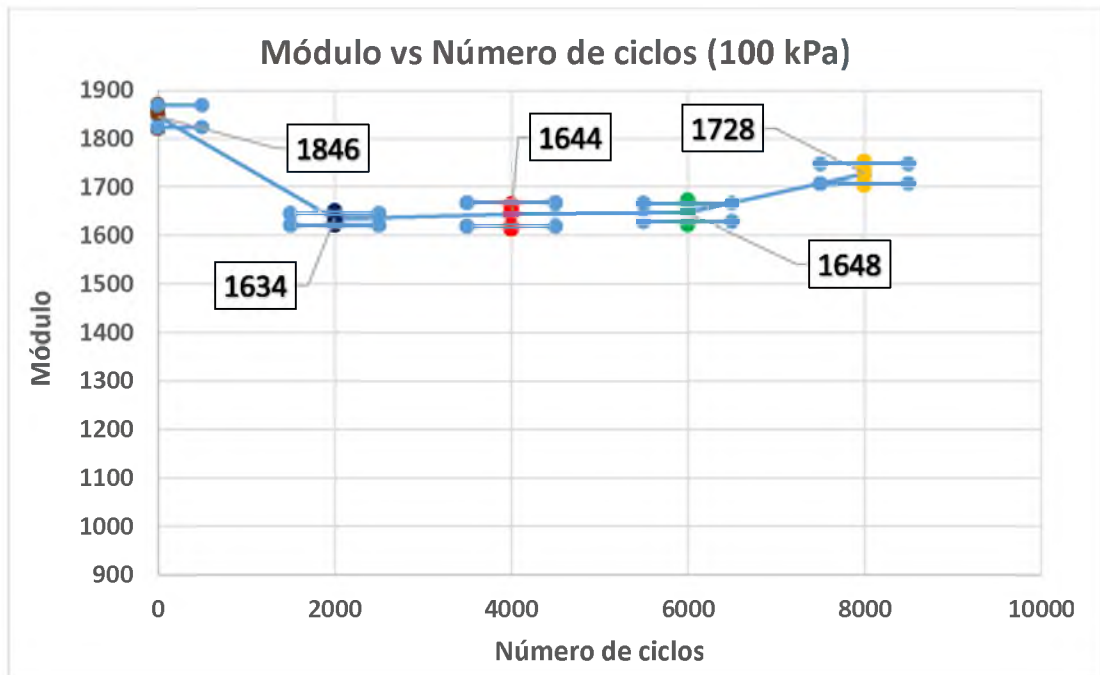
#### 4.3.3. Análisis de briqueta N°2

Como se puede apreciar en las gráficas 5 y 6 a partir al nivel de esfuerzo aplicado en la briqueta de 90 kPa y 100 kPa, los rangos de aceptación de módulo se mantienen constantes, esto se da debido al concepto de que al no presentar disminución en el módulo de rigidez las deformaciones unitarias se mantienen igual sin presentar daños en la muestra.

**Gráfico 5: Módulo Vs Número de ciclos ( $\sigma = 90$  KPa, Briqueta 2) incluyendo desviación estándar.**

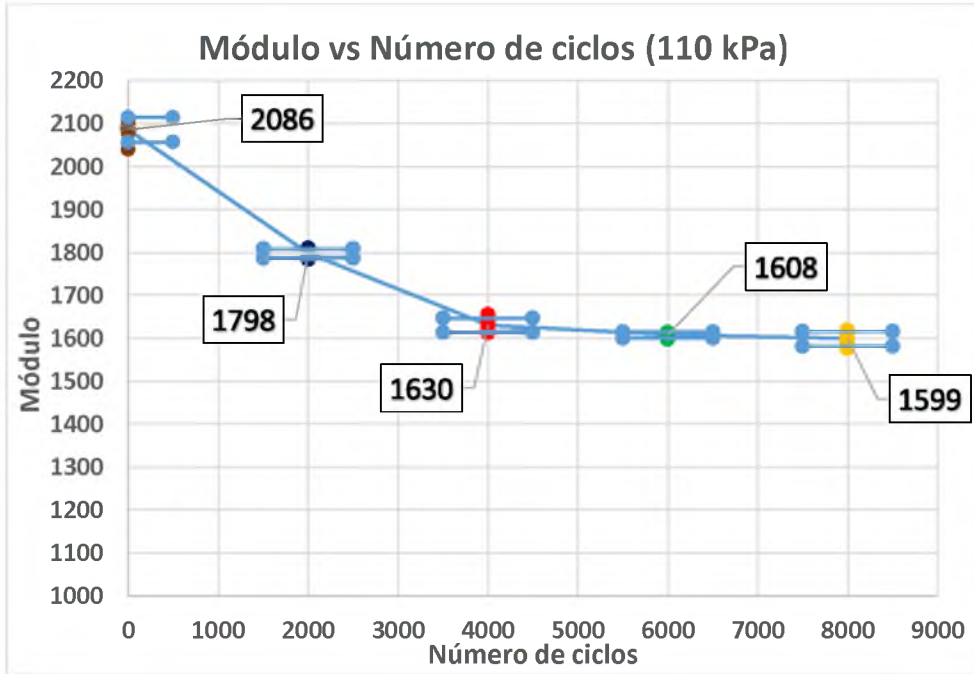


**Gráfico 6: Módulo Vs Número de ciclos ( $\sigma = 100$  KPa, Briqueta 2) incluyendo desviación estándar.**

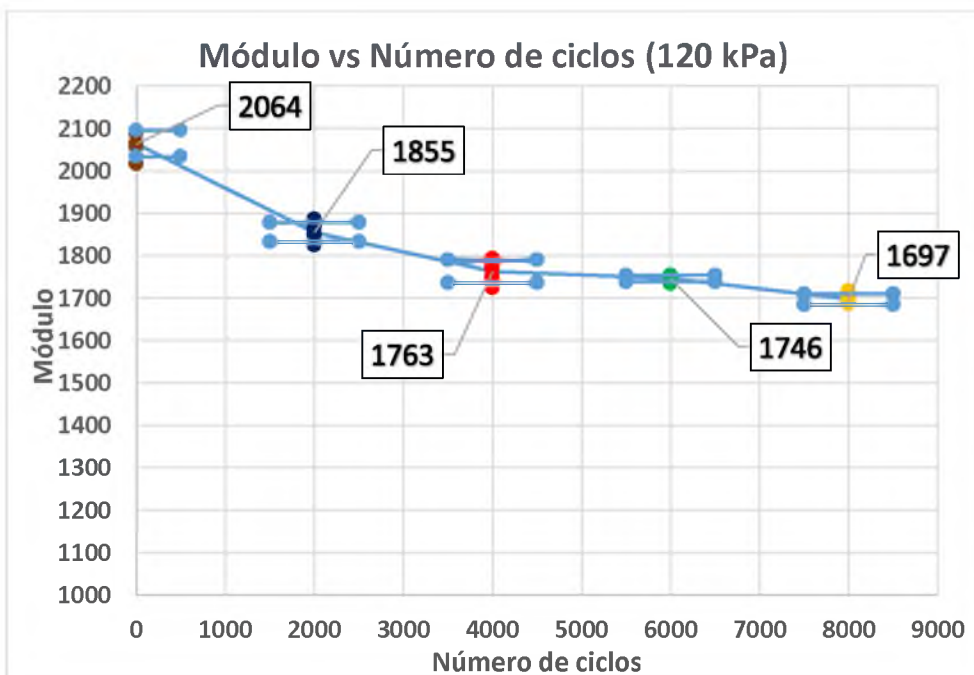


Pero a partir de la aplicación de niveles de esfuerzos de 110 y 120 kPa, se puede apreciar visualmente en los gráficos 7 y 8, como este módulo de rigidez cada 2000 ciclos de carga comienza a quedar fuera del rango de aceptación para el módulo de rigidez teniendo una caída en el módulo.

**Gráfico 7: Módulo Vs Número de ciclos ( $\sigma = 110$  KPa, Briqueta 2) incluyendo desviación estándar.**



**Gráfico 8: Módulo Vs Número de ciclos ( $\sigma = 120$  KPa, Briqueta 2) incluyendo desviación estándar.**



Entonces para verificar si era verdad que el módulo de rigidez empezaba a disminuir en el rango de esfuerzo aplicado de 90 kPa a 110 kPa, se empezó a ensayar a fatiga varias muestras con esfuerzo de 90 KPa, con esfuerzo de 100 KPa y con esfuerzo de 110 kPa, pero como se pudo visualizar anteriormente como se estaba comportando las briquetas a estos niveles de esfuerzo, se decidió aumentar el número de ciclos de cargas al que se estaba usando entonces de 8000 ciclos de carga a 25000 ciclos de carga.

#### **4.3.4. Fatiga bajo esfuerzo de 90 kPa**

En los datos obtenidos por la primera muestra se decidió empezar a ensayar muestras con un mayor número de repeticiones al esfuerzo que, aparentemente se podría encontrar el límite de durabilidad.

Para esta parte, los ensayos ya no se realizaron cada 2000 ciclos de carga sino que se aumentó a 5000 ciclos de carga y cada vez se medía el módulo de rigidez, hasta completar el ensayo y llegar a las 25000 repeticiones que se considera ciclos de carga considerables para la muestra. Cabe recalcar que cada ensayo en el N.A.T. aplicando fatiga llegado hasta los 5000 ciclos de carga duraba aproximadamente 2 horas, así que cada muestra para llegar a los 25000 ciclos de carga se las ensayó aproximadamente 10 horas.

Para esta etapa se usó 5 briquetas (N° 1, 3, 5, 7,8) para poder ver como se comportaban cada una y si se llegaba con las 5 a una misma conclusión, los demás ensayos se encuentran en los ANEXOS. En estos ensayos se volvió a aplicar la desviación estándar para tener una mejor visión de cómo se estaba comportando la mezcla asfáltica.



Tabla 11: Media, varianza y desviación estándar de los módulos de rigidez cada 5000 ciclos ( $\sigma = 90$  KPa, Briqueta 1)

0 ciclos de carga				
Esfuerzo (kPa)	Smix Ajustado (MPa)	X	S <sup>2</sup>	S
90	2277	2251	520	22,80
	2224			<b>X + 1S</b>
	2264			2273,80
	2259			<b>X - 1S</b>
	2230			2228,20

5000 ciclos de carga				
Esfuerzo (kPa)	Smix Ajustado (MPa)	X	S <sup>2</sup>	S
90	1694	1683	344	18,53
	1709			<b>X + 1S</b>
	1662			1701,53
	1673			<b>X - 1S</b>
	1677			1664,47

10000 ciclos de carga				
Esfuerzo (kPa)	Smix Ajustado (MPa)	X	S <sup>2</sup>	S
90	1739	1743	115	10,74
	1746			<b>X + 1S</b>
	1727			1753,74
	1752			<b>X - 1S</b>
	1753			1732,26

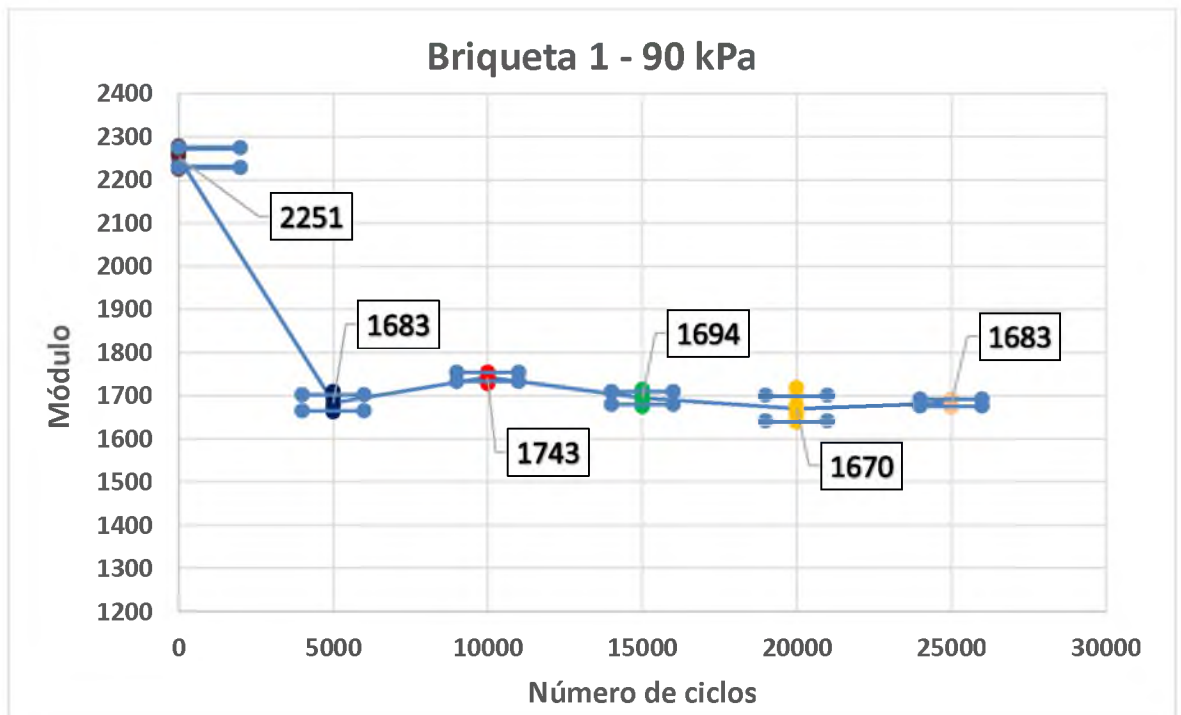
15000 ciclos de carga				
Esfuerzo (kPa)	Smix Ajustado (MPa)	X	S <sup>2</sup>	S
90	1674	1694	218	14,77
	1714			<b>X + 1S</b>
	1695			1708,77
	1701			<b>X - 1S</b>
	1689			1679,23

20000 ciclos de carga				
Esfuerzo (kPa)	Smix Ajustado (MPa)	X	S <sup>2</sup>	S
90	1717	1670	882	29,69
	1638			<b>X + 1S</b>
	1656			1699,69
	1663			<b>X - 1S</b>
	1677			1640,31

25000 ciclos de carga				
Esfuerzo (kPa)	Smix Ajustado (MPa)	X	S <sup>2</sup>	S
90	1686	1683	64	8,00
	1690			<b>X + 1S</b>
	1673			1691,00
	1676			<b>X - 1S</b>
	1690			1675,00

Elaboración Propia

Gráfico 9: Módulo Vs Número de ciclos ( $\sigma = 90$  KPa, Briqueta 1)



Elaboración Propia

Utilizando la fórmula de deformación, se pudo encontrar los valores de deformación que había en la muestra cada 5000 ciclos de carga.

$$\epsilon = \frac{(3\mu + 1)\sigma}{S_{mix}}$$

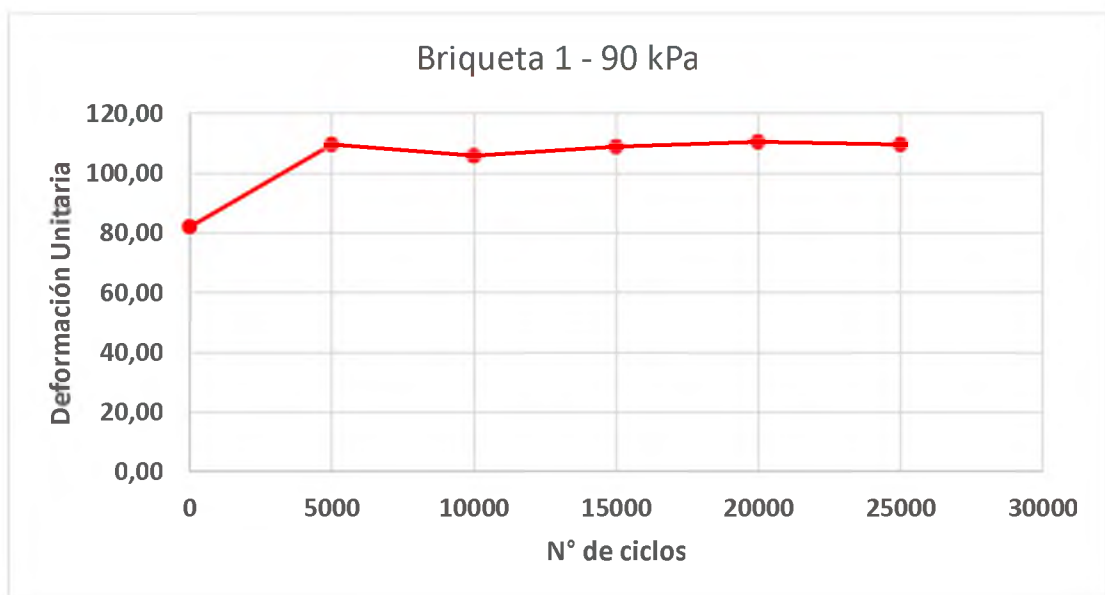
**Tabla 12: Tabla de deformación unitaria de la mezcla cada 5000 ciclos ( $\sigma = 90$  KPa, Briqueta 1)**

N° de ciclos	$\epsilon$ ( $\mu$ strain)
0	81,96
5000	109,63
10000	105,85
15000	108,91
20000	110,48
25000	109,63

Elaboración propia

Se lo representará gráficamente para analizar el comportamiento de la deformación:

**Gráfico 10: Deformación Vs Número de ciclos ( $\sigma = 90$  KPa, Briqueta 1)**



Elaboración Propia

#### 4.3.5. Fatiga bajo esfuerzo de 100 kPa

Para esta etapa se usó 3 briquetas (N° 6, 9,10) para poder ver como se comportaban cada una y si se llegaba con las 5 a una misma conclusión. Los demás ensayos se encuentran en los ANEXOS.

**Tabla 13: Media, varianza y desviación estándar de los módulos de rigidez cada 5000 ciclos ( $\sigma = 100$  KPa, Briqueta 9)**

0 ciclos de carga				
Esfuerzo (kPa)	Smix Ajustado (MPa)	X	S <sup>2</sup>	S
100	2217	2264	807	28,41
	2277			<b>X + 1S</b>
	2283			2292,41
	2257			<b>X - 1S</b>
	2285			2235,59

5000 ciclos de carga				
Esfuerzo (kPa)	Smix Ajustado (MPa)	X	S <sup>2</sup>	S
100	1919	1920	220	14,83
	1895			<b>X + 1S</b>
	1926			1934,83
	1933			<b>X - 1S</b>
	1927			1905,17

10000 ciclos de carga				
Esfuerzo (kPa)	Smix Ajustado (MPa)	X	S <sup>2</sup>	S
100	1812	1818	191	13,83
	1834			<b>X + 1S</b>
	1814			1831,83
	1831			<b>X - 1S</b>
	1801			1804,17

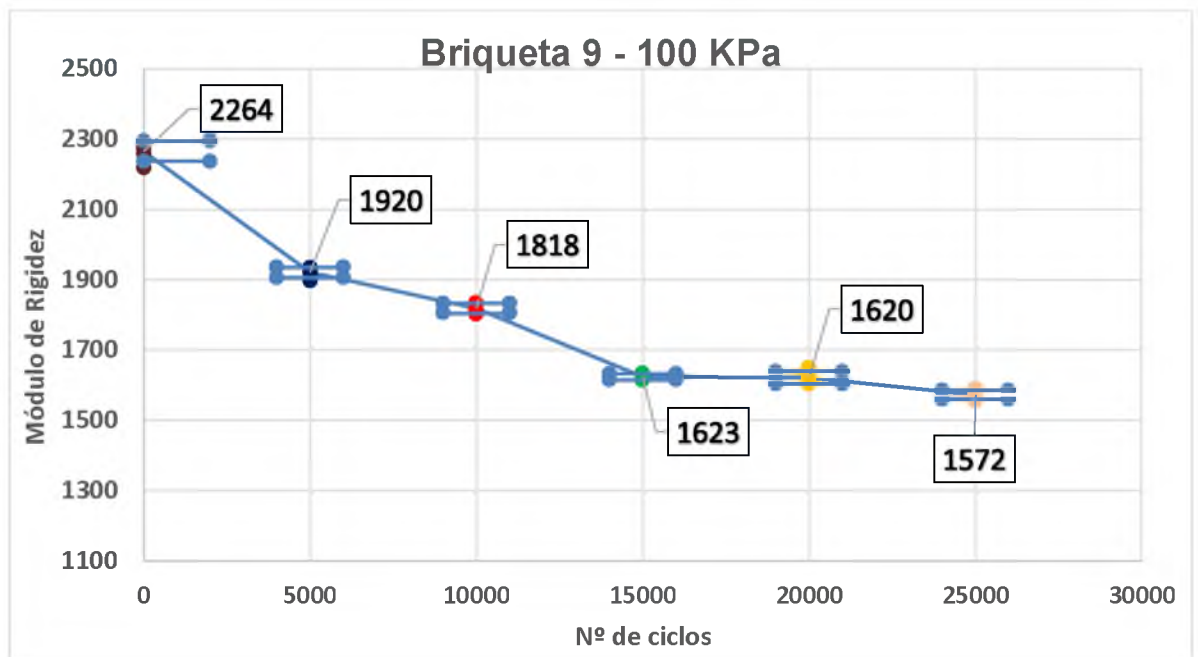
15000 ciclos de carga				
Esfuerzo (kPa)	Smix Ajustado (MPa)	X	S <sup>2</sup>	S
100	1618	1623		8,58
	1618			<b>X + 1S</b>
	1631			1631,58
	1614			<b>X - 1S</b>
	1633			1614,42

20000 ciclos de carga				
Esfuerzo (kPa)	Smix Ajustado (MPa)	X	S <sup>2</sup>	S
100	1609	1620	323	17,97
	1627			<b>X + 1S</b>
	1603			1637,97
	1648			<b>X - 1S</b>
	1613			1602,03

25000 ciclos de carga				
Esfuerzo (kPa)	Smix Ajustado (MPa)	X	S <sup>2</sup>	S
100	1589	1572	161	12,68
	1577			<b>X + 1S</b>
	1575			1584,68
	1554			<b>X - 1S</b>
	1577			1559,32

Elaboración propia

Gráfico 11: Módulo Vs Número de ciclos ( $\sigma = 100$  KPa, Briqueta 9)



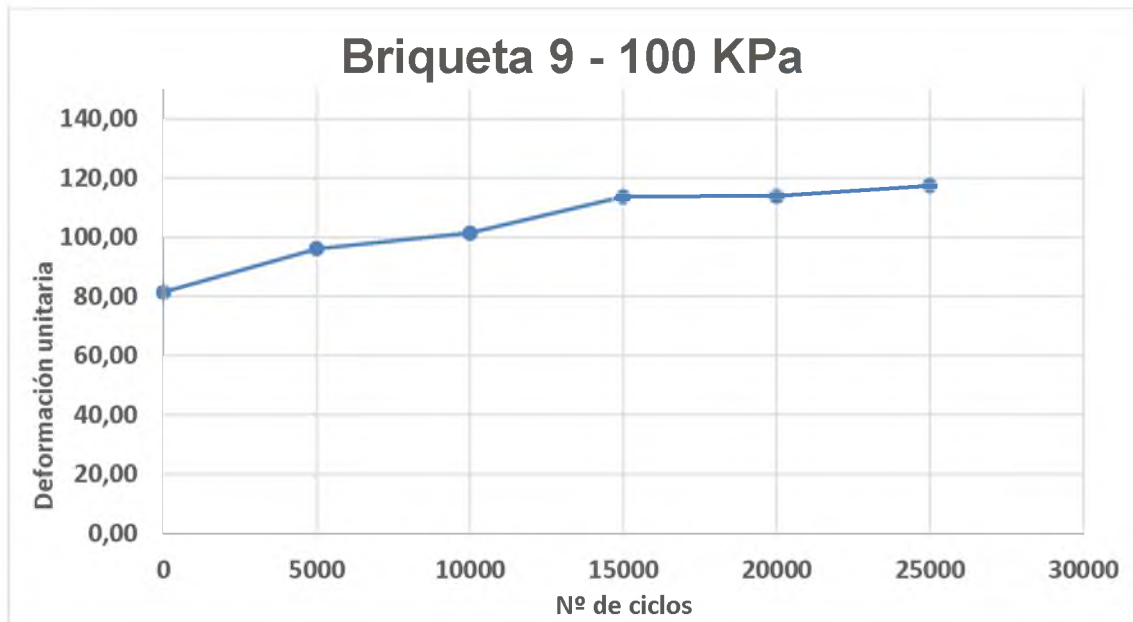
Elaboración propia

Tabla 14: Tabla de deformación unitaria de la mezcla cada 5000 ciclos ( $\sigma = 100$  KPa, Briqueta 9)

Nº de ciclos	$\epsilon$ ( $\mu$ strain)
0	81,49
5000	96,09
10000	101,49
15000	113,68
20000	113,89
25000	117,37

Elaboración propia

**Gráfico 12: Deformación Vs Número de ciclos ( $\sigma = 100$  KPa, Briqueta 9)**



Elaboración propia

#### 4.3.6. Fatiga bajo esfuerzo de 110 kPa

Para esta etapa se usó 1 briquetas (Nº 4) para poder ver como se comportaban la muestra a 110 kPa de esfuerzo.

**Tabla 15: Media, varianza y desviación estándar de los módulos de rigidez cada 5000 ciclos ( $\sigma = 110$  KPa, Briqueta 4)**

0 ciclos de carga				
Esfuerzo (kPa)	Smix Ajustado (MPa)	X	S <sup>2</sup>	S
90	2266	2235	754	27,45
	2261			<b>X + 1S</b>
	2214			2262,45
	2205			<b>X - 1S</b>
	2229			2207,55

5000 ciclos de carga				
Esfuerzo (kPa)	Smix Ajustado (MPa)	X	S <sup>2</sup>	S
90	1837	1830	104	10,21
	1842			<b>X + 1S</b>
	1825			1840,21
	1816			<b>X - 1S</b>
	1832			1819,79

10000 ciclos de carga				
Esfuerzo (kPa)	Smix Ajustado (MPa)	X	S <sup>2</sup>	S
90	1782	1774	55	7,40
	1765			<b>X + 1S</b>
	1781			1781,40
	1769			<b>X - 1S</b>
	1774			1766,60

15000 ciclos de carga				
Esfuerzo (kPa)	Smix Ajustado (MPa)	X	S <sup>2</sup>	S
90	1661	1650	40	6,28
	1646			<b>X + 1S</b>
	1649			1656,28
	1646			<b>X - 1S</b>
	1648			1643,72



Gráfico 13: Módulo Vs Número de ciclos ( $\sigma = 110$  KPa, Briqueta 4)

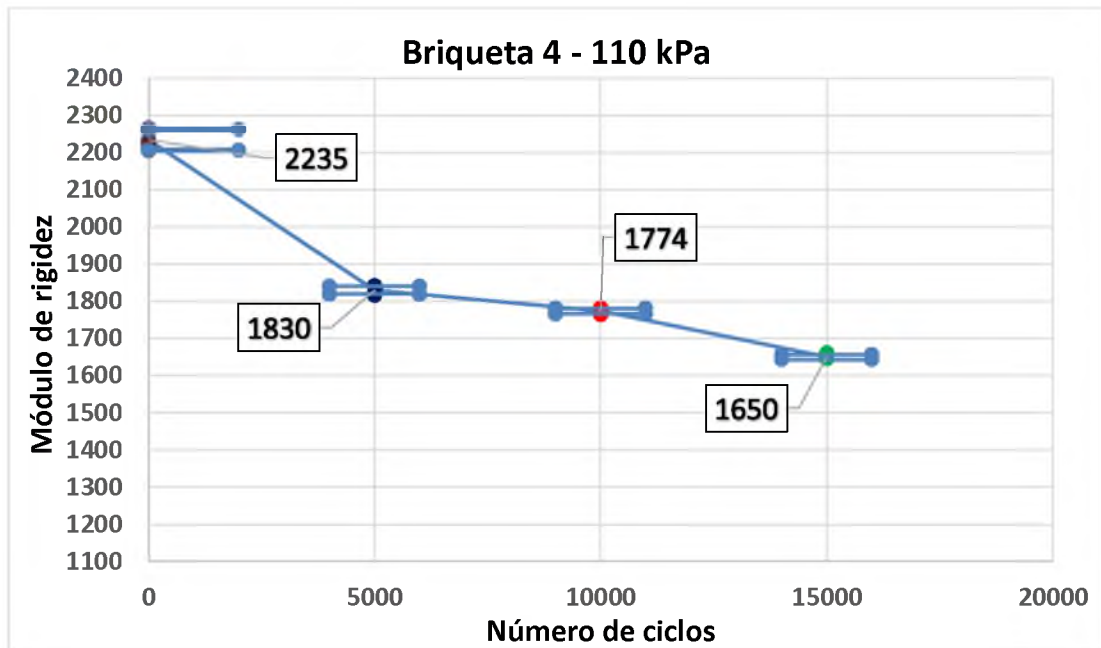
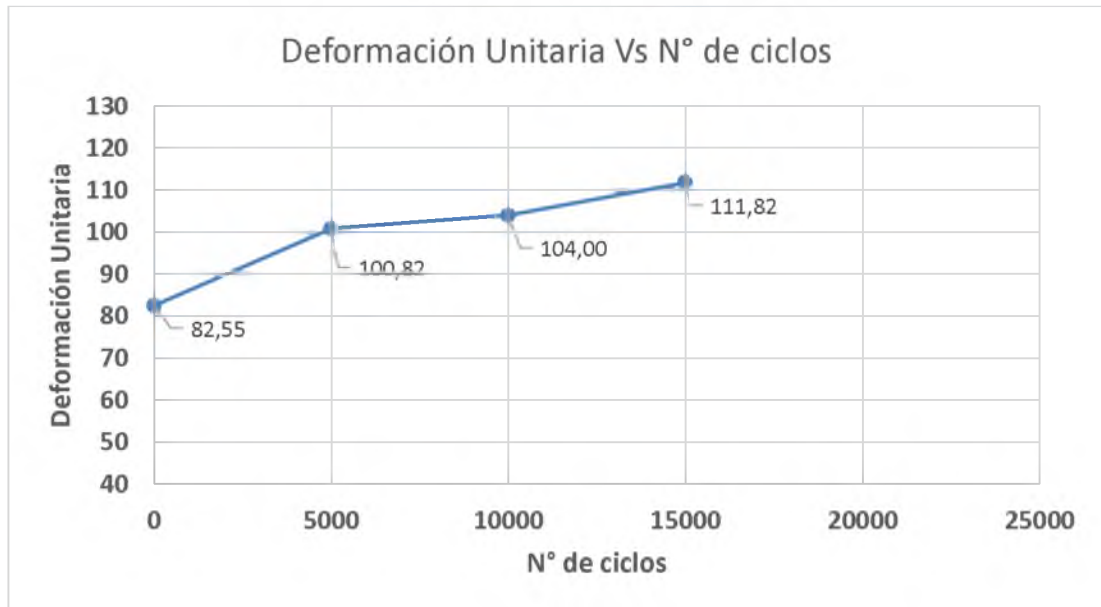


Tabla 16: Tabla de deformación unitaria de la mezcla cada 5000 ciclos ( $\sigma = 110$  KPa, Briqueta 4)

N° de ciclos	Deformación Unitaria ( $\mu$ strain)
0	82,55
5000	100,82
10000	104,00
15000	111,82

**Gráfico 14: Deformación Vs Número de ciclos ( $\sigma = 110$  KPa, Briqueta 4)**



Numero de ciclos	Briquetas									
	1		3		5		7		8	
	Smix (Mpa)	ε	Smix (Mpa)	ε	Smix (Mpa)	ε	Smix (Mpa)	ε	Smix (Mpa)	ε
0	2251	81,96	2251	81,96	2071	89,09	2278	80,99	2134	86,46
5000	1683	109,63	1739	106,10	1732	106,52	1860	99,19	1563	118,04
10000	1743	105,85	1904	96,90	1629	113,26	1836	100,49	1653	111,62
15000	1694	108,91	1863	99,03	1671	110,41	1858	99,30	1490	123,83
20000	1670	110,48	1794	102,84	1524	121,06	1720	107,27	1535	120,20
25000	1683	109,63	1697	108,72	1507	122,43	1783	103,48	1574	117,22

Tabla 17: Tabla de Módulos y deformaciones unitaria de la mezcla cada 5000 ciclos ( $\sigma = 90$  KPa)

A continuación se quiso saber el rango de aceptación de módulo conociendo la desviación estándar pero esta vez se lo realizó el valor del módulo inicial de la cinco muestras (briquetas N° 1, 3, 5, 7, 8). Para esto se realizó un promedio de Módulos y su respectiva desviación estándar.

**Tabla 18: Promedio de Módulo y Desviación Estándar**

<b>Smix (MPa)</b>	<b>Smix Promedio (MPa)</b>	<b>Desviación Estándar</b>
2251	2197	89,77
2251		
2071		
2278		
2134		

Como se sabe los valores de desviación estándar para cada muestra por separado tenían rangos de 10 a 20, pero hallando la desviación a las 5 muestras se tuvo un rango aproximadamente de 90. Se usara este valor como un rango patrón como un valor de comparación.

Numero de ciclos	Briquetas														
	1			3			5			7			8		
	Smix (MPa)	ε	Δ Smix	Smix (MPa)	ε	Δ Smix	Smix (MPa)	ε	Δ Smix	Smix (MPa)	ε	Δ Smix	Smix (MPa)	ε	Δ Smix
0	2251	81,96		2251	81,96		2071	89,09		2278	80,99		2134	86,46	
5000	1683	109,63	-568,00	1739	106,10	-512,00	1732	106,52	-339,00	1860	99,19	-418,00	1563	118,04	-571,00
10000	1743	105,85	60,00	1904	96,90	165,00	1629	113,26	-103,00	1836	100,49	-24,00	1653	111,62	90,00
15000	1694	108,91	-49,00	1863	99,03	-41,00	1671	110,41	42,00	1858	99,30	22,00	1490	123,83	-163,00
20000	1670	110,48	-24,00	1794	102,84	-69,00	1524	121,06	-147,00	1720	107,27	-138,00	1535	120,20	45,00
25000	1683	109,63	13,00	1697	108,72	-97,00	1507	122,43	-17,00	1783	103,48	63,00	1574	117,22	39,00

**Tabla 19: Tabla de diferencia en Módulos de rigidez de la mezcla cada 5000 ciclos ( $\sigma = 90$  KPa)**

$$\Delta S_{mix_1} = S_{mix_0} - S_{mix_{5000}}$$

$$\Delta S_{mix_2} = S_{mix_{5000}} - S_{mix_{10000}}$$

$$\Delta S_{mix_3} = S_{mix_{10000}} - S_{mix_{15000}}$$

$$\Delta S_{mix_4} = S_{mix_{15000}} - S_{mix_{20000}}$$

$$\Delta S_{mix_5} = S_{mix_{20000}} - S_{mix_{25000}}$$

Como se observa en la tabla 19 se hizo un resumen de como varía el Módulo de rigidez entre cada 5000 ciclos de carga a 90 kPa, con el fin de comparar en cada muestra que tan lejos se encuentra del rango patrón hallado anteriormente que es igual a 90.

Se observa que cuando se ha aplicado 5000 ciclos de carga el módulo cae consistentemente duplicando el rango patrón, esto se debe posiblemente a:

- Variabilidad en la posición en la que se midió el Módulo de rigidez.
- Variabilidad en las muestras.
- Variabilidad en 2 muestras extraídas del mismo cilindro.

Entonces si  $\Delta S_{mix}$  o diferencia de Módulo de rigidez después de 5000 ciclos de carga varía en ambos sentidos en valores inferiores a 90, se considera que no hay daño real en la mezcla y se estaría en niveles de deformación unitaria por debajo del límite de durabilidad.

Por el contrario si  $\Delta S_{mix}$  después de los 5000 ciclos de carga es superior a 90 y siempre es negativo se considera que se está aplicando niveles de deformación unitaria superiores al límite de durabilidad y se considera que hay daño en la mezcla.

También se realizó esta comparación en la diferencia del módulo a los esfuerzos de 100 kPa y 110 kPa, usando el mismo patrón de 90 usado anteriormente.

**Tabla 20: Tabla de diferencia en Módulos de rigidez de la mezcla cada 5000 ciclos ( $\sigma = 100$  KPa)**

Numero de ciclos	Briquetas								
	6			9			10		
	Smix (Mpa)	$\epsilon$	$\Delta$ Smix	Smix (Mpa)	$\epsilon$	$\Delta$ Smix	Smix (Mpa)	$\epsilon$	$\Delta$ Smix
0	2257	90,83		2264	90,55		2345	87,42	
5000	1906	107,56	-351,00	1920	106,77	-344,00	1952	105,02	-393,00
10000	1824	112,39	-82,00	1818	112,76	-102,00	1864	109,98	-88,00
15000	1787	114,72	-37,00	1623	126,31	-195,00	1846	111,05	-18,00
20000	1723	118,98	-64,00	1620	126,54	-3,00	1787	114,72	-59,00
25000	1585	129,34	-138,00	1572	130,41	-48,00	1786	114,78	-1,00

**Tabla 21: Tabla de diferencia en Módulos de rigidez de la mezcla cada 5000 ciclos ( $\sigma = 110$  KPa)**

Numero de ciclos	Briquetas		
	4		
	Smix (Mpa)	$\epsilon$	$\Delta$ Smix
0	2235	100,89	
5000	1830	123,22	-405,00
10000	1774	127,11	-56,00
15000	1650	136,67	-124,00

Según los valores vistos en las tablas el valor real de módulo y de deformación unitaria sería los valores a partir de los 5000 ciclos de carga, debido a que en todos los niveles de esfuerzo hay una caída brusca en el módulo esto debido a la variabilidad del ensayo y de las muestras mismas.

Entonces como se observa que todos los valores que se mantienen constantes son los del esfuerzo de 90 kPa. Se puede sacar promedio en la deformación unitaria y sacar un rango con la desviación estándar con los datos de los valores de 5000 ciclos de carga.

**Tabla 22: Tabla de deformaciones y desviación estándar**

<b>€</b>	<b>€ promedio</b>	<b>Desviación Estándar</b>
109,63	107,90	6,83
106,10		
106,52		
99,19		
118,04		

Se puede decir que los valores del límite de durabilidad se encuentran en el rango del promedio de deformación unitaria +/- una desviación.

**Tabla 23: Media +/- Desviación Estándar**

<b>€</b>	<b>€ + 1 desviación</b>	<b>€ - 1 desviación</b>
107,90	114,73	101,06



## CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 6.1. Conclusiones

- Con esta investigación bajo el ensayo de fatiga por tracción indirecta, para la mezcla asfáltica usada se puede concluir que
  - Cuando se tiene valores de deformación unitaria igual a 101  $\mu$ strain, se estaría por debajo del límite de durabilidad.
  - Cuando se tiene valores de deformación unitaria igual a 108  $\mu$ strain, se estaría posiblemente sobre el límite de durabilidad.
  - Cuando se tiene valores de deformación unitaria igual a 114  $\mu$ strain, se estaría por encima del límite de durabilidad.
- Hablando en términos de esfuerzo podemos concluir que el límite de durabilidad se lo encuentra en el rango de esfuerzo de 90 kPa. Con lo visto en los ensayos pasando este esfuerzo se comienza a ver una disminución en el módulo de rigidez y un aumento en la deformación unitaria provocando micro-fisuras.
- Los valores de la recuperación en la mezcla asfáltica quedan en duda porque no podemos determinarlos de una forma concluyente, aunque si podemos comprobar la existencia de esta recuperación como se observa en el gráfico de módulos de rigidez en el Anexo 12.
- A pesar de que se realizaran ensayos bajo las mismas condiciones a 5 muestras (ensayos a fatigas a 25000 ciclos de carga), no se comportaron completamente igual aunque su módulo al final se estabiliza sin presentar caídas bruscas en el módulo de rigidez.
- Para finalizar podemos concluir que el ensayo de fatiga a tracción indirecta puede considerarse un ensayo útil para encontrar el límite de durabilidad en mezclas asfálticas, la desventaja de este ensayo es que para verificar la existencia de este límite se necesitan largas horas de ensayo bajo el procedimiento el procedimiento que se ha usado.

## 6.2. Recomendaciones

- Se recomienda hacer futuras investigaciones con diferentes mezclas asfálticas que tengan diferentes módulos de rigidez a los usados en esta investigación para poder comparar el comportamiento del módulo con los resultados obtenidos en esta investigación.
- Se debe de estudiar más sobre cómo se recupera la mezcla asfáltica en los periodos de descanso y poder saber con exactitud cómo puede ayudar para los diseños de pavimentos asfálticos.
- Se puede investigar en los procedimientos de Kim y West, para iniciar los trabajos a partir de la deformación unitaria máxima en los ensayos monotónicos de tracción indirecta.
- Como se encuentra una cierta variabilidad en los resultados en la medición de los módulos, se pudiera sacar módulos a tres o dos diferentes generatrices en la mezcla para promediarlos y disminuir esa variabilidad.

## Bibliografía

(s.f.).

Al-Qadi y Nassar. (2013). *Fatigue Shift Factors to Predict HMA Performance*.

Austrroads. (2009). *Asphalt Fatigue Endurance Limit*. Sydney: 1.

Barret, C. R. (1973). *The principles of engineering materials*. Englewood Cliffs: Prentice-Hall.

Bateman, D. (2012). *Laboratory Investigaston of Fatigue Endurance Limits in Asphalt Concrete*. Albuquerque.

Brown, E. R. (2003). *Methods for Determining the Endurance Limit Using Beam Fatigue Tests*. Auburn.

Corredor, I. G. (Agosto de 2010). *Universidad Nacional de Ingeniería Facultad de Tecnología de la construcción Programa de Capacitación Académica*. Obtenido de <https://sjnavarro.files.wordpress.com/2008/08/fallas-en-pavimentos1.pdf>

*El asfalto*. (12 de 09 de 2012). Recuperado el 10 de 12 de 2015, de <http://asfaltoenobracivil.blogspot.com/2012/07/5-obtencion-del-asfalto-en-refinerias.html>

ELÍAS, M. P. (2013). *COMPORTAMIENTO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA*. QUITO .

Fernández-Gómez, W., Rondón Quintan, H., & Reyes Lascano, F. (2011). *ENVEJECIMIENTO DE ASFALTOS Y MEZCLAS ASFÁLTICAS: ESTADO DE CONOCIMIENTO*. \*Universidad Distrital Francisco José de Caldas grupo de Topografía e Infraestructura Vial TOPOVIAL, \*\*Pontificia Universidad Javeriana, Centro de estudios en carreteras, transportes y afines CECATA.

FRANCO, J. R. (2012). *ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO A FATIGA DE LAS MEZCLAS BITUMINOSAS A PARTIR DEL NUEVO PROCEDIMIENTO DE ENSAYO EBADE*. Cataluña. Recuperado el 2015

- Maldonado, J. F. (2015). *ESTUDIO COMPARATIVO DE PRUEBAS DE FATIGA DINÁMICAS Y PRUEBAS DE TRACCIÓN INDIRECTA BAJO CARGAS MONOTÓNICAS EN MEZCLAS ASFÁLTICAS*. Guayaquil.
- Maupin, G. W. (1976). *Simple Procedure for Fatigue Characterization of Bituminous Concrete*. Washington D.C.
- National Cooperative Highway Research Program. (2010). *Validating the Fatigue Endurance Limit for Hot Mix Asphalt*. WASHINGTON, D.C.: TRANSPORTATION RESEARCH BOARD.
- Paul Garnica, M. F. (2005). *Caracterización Geomecánica de mezclas asfálticas*. Sanfadila: Publicación Técnica No 267.
- Program, N. C. (2008). *Developing a Plan for Validating an Endurance Limit for HMA Pavements: HMA Endurance Limit Validation Study*. Advanced Asphalt Technologies.
- Shen, C. a. (2005). Application of the Dissipated Energy Concept in Fatigue Endurance Limit Testing. En C. a. Shen, *Application of the Dissipated Energy Concept in Fatigue Endurance Limit Testing* (págs. pp. 165-173). Transportation Research Record.
- Suresh, F. a. (2003). *Thin Film Materials: Stress, Defect Formation and Surface Evolution*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Thompson, M. R. (2004). *Considering Hot-Mix-Asphalt Fatigue Endurance Limit in Full-Depth Mechanistic-Empirical Pavemente Design*.
- Universidad de Piura. (2015). Obtenido de [http://www.biblioteca.udep.edu.pe/bibvirudep/tesis/pdf/1\\_130\\_181\\_83\\_1181.pdf](http://www.biblioteca.udep.edu.pe/bibvirudep/tesis/pdf/1_130_181_83_1181.pdf)
- Valenzuela, M. (2003). *El asfalto, en la conservación de pavimento*. Recuperado el 10 de 12 de 2015, de <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2003/bmfciv161a/doc/bmfciv161a.pdf>

## ANEXO 1: Ensayos en briqueta 2 con esfuerzo de 60 KPa

### Media, varianza y desviación estándar del módulo de rigidez

0 ciclos de carga				
Esfuerzo (kPa)	Smix Ajustado (MPa)	$X$	$S^2$	$S$
60	2016	2010	1401	37,43
	2023			$X + 1S$
	1990			2047,43
	1960			$X - 1S$
	2060			1972,57

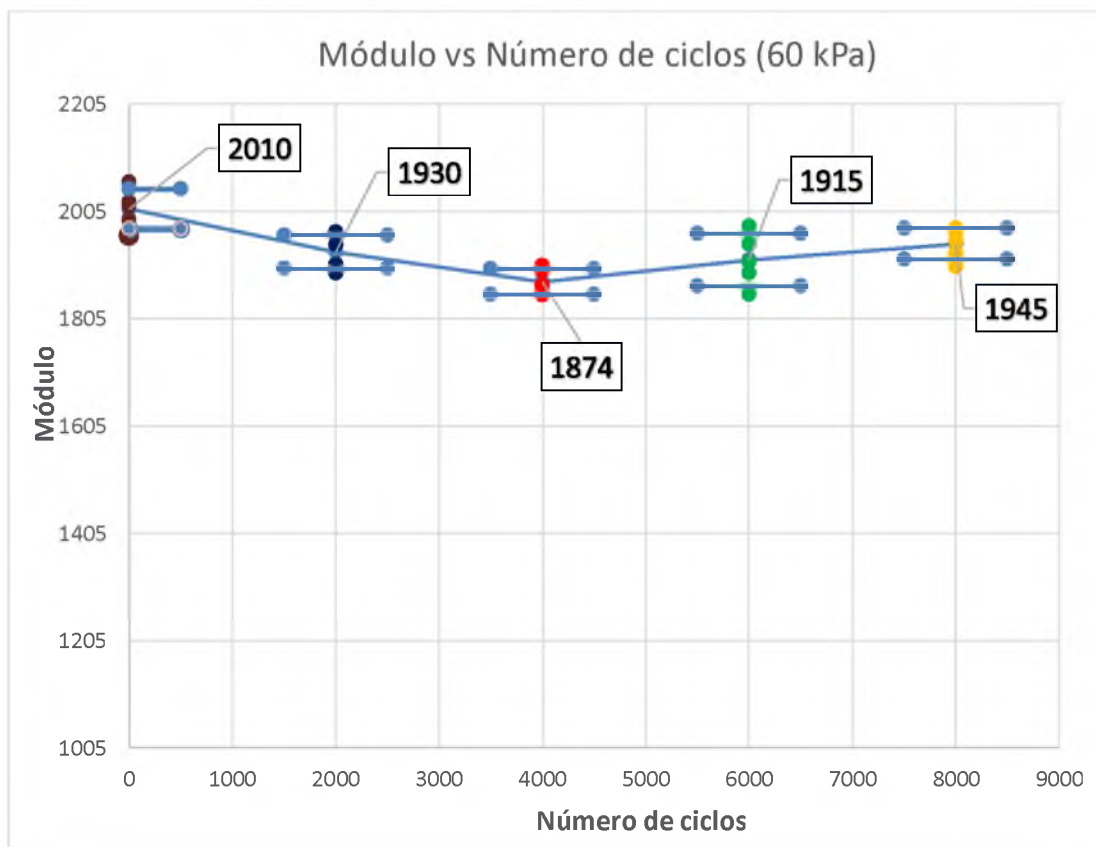
2000 ciclos de carga				
Esfuerzo (kPa)	Smix Ajustado (MPa)	$X$	$S^2$	$S$
60	1890	1930	971	31,16
	1943			$X + 1S$
	1906			1961,16
	1967			$X - 1S$
	1943			1898,84

4000 ciclos de carga				
Esfuerzo (kPa)	Smix Ajustado (MPa)	$X$	$S^2$	$S$
60	1850	1874	572	23,91
	1894			$X + 1S$
	1904			1897,91
	1855			$X - 1S$
	1867			1850,09

6000 ciclos de carga				
Esfuerzo (kPa)	Smix Ajustado (MPa)	$X$	$S^2$	$S$
60	1911	1915	2387	48,85
	1851			$X + 1S$
	1978			1963,85
	1890			$X - 1S$
	1944			1866,15

8000 ciclos de carga				
Esfuerzo (kPa)	Smix Ajustado (MPa)	$X$	$S^2$	$S$
60	1974	1945	855	29,25
	1929			$X + 1S$
	1902			1974,25
	1966			$X - 1S$
	1951			1915,75

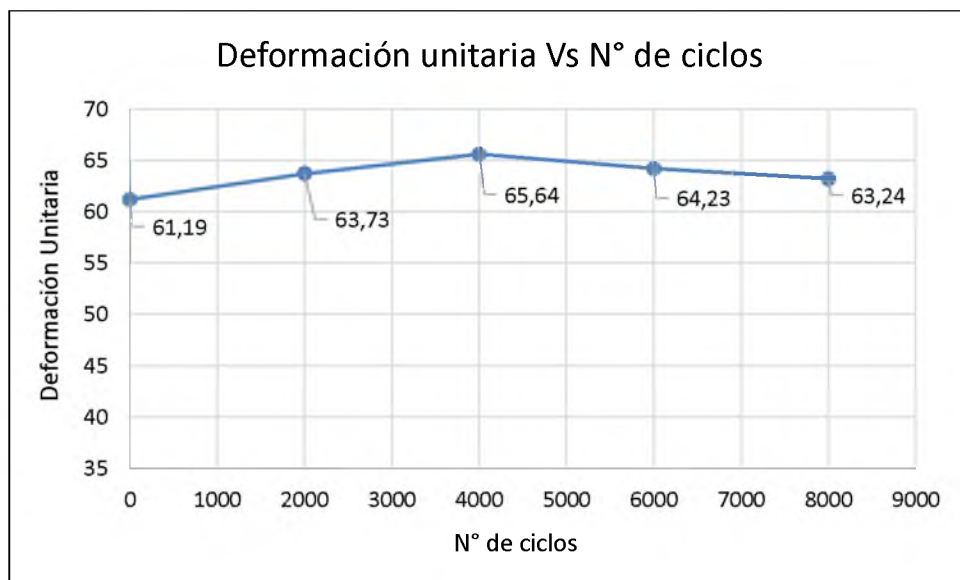
**Módulo Vs Número de ciclos**



### Deformación unitaria

N° de ciclos	Deformación Unitaria ( $\mu$ strain)
0	61,19
2000	63,73
4000	65,64
6000	64,23
8000	63,24

### Deformación Vs Número de ciclos



## ANEXO 2: Ensayos en briqueta 2 con esfuerzo de 70 KPa

### Media, varianza y desviación estándar del módulo de rigidez

0 ciclos de carga				
Esfuerzo (kPa)	Smix Ajustado (MPa)	$X$	$S^2$	$S$
70	1974	1945	855	29,25
	1929			$X + IS$
	1902			1974,25
	1966			$X - IS$
	1951			1915,75

2000 ciclos de carga				
Esfuerzo (kPa)	Smix Ajustado (MPa)	$X$	$S^2$	$S$
70	1943	1948	240	15,49
	1963			$X + IS$
	1955			1963,49
	1954			$X - IS$
	1923			1932,51

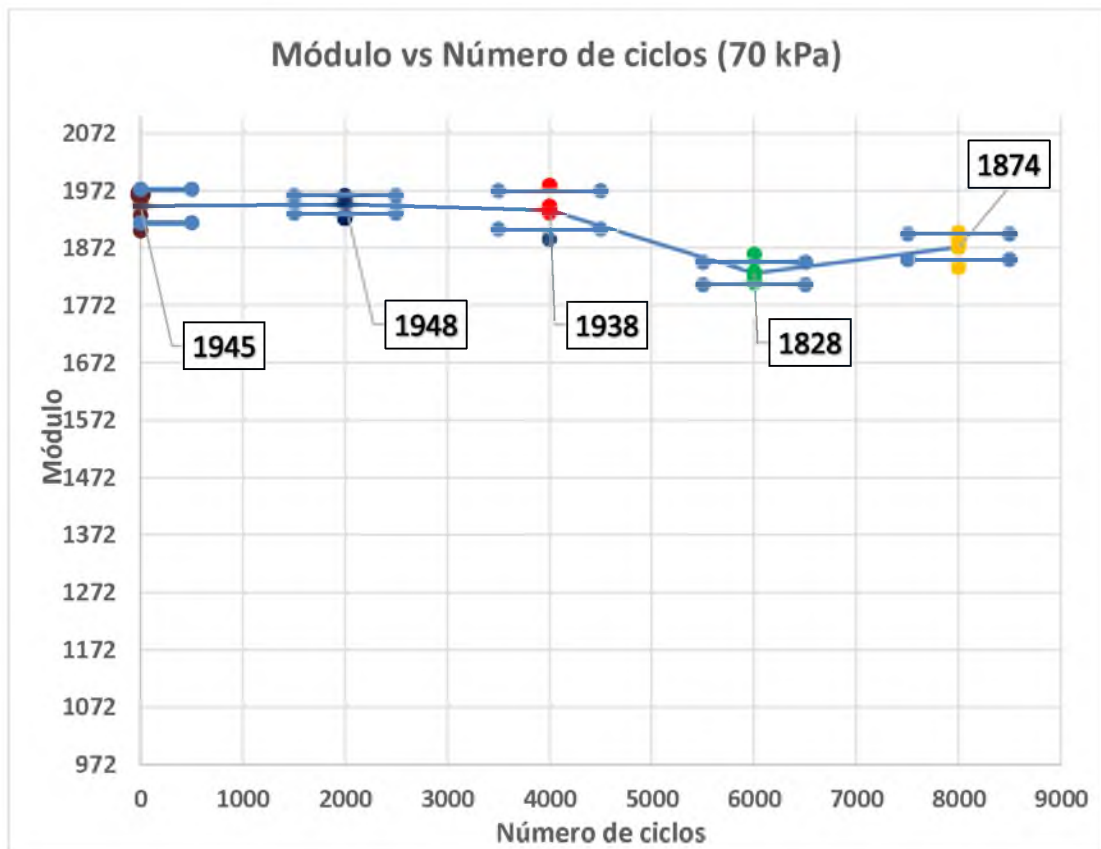
4000 ciclos de carga				
Esfuerzo (kPa)	Smix Ajustado (MPa)	$X$	$S^2$	$S$
70	1887	1938	1133	33,66
	1934			$X + IS$
	1981			1971,66
	1942			$X - IS$
	1945			1904,34

6000 ciclos de carga				
Esfuerzo (kPa)	Smix Ajustado (MPa)	$X$	$S^2$	$S$
70	1816	1828	381	19,53
	1861			$X + IS$
	1826			1847,53
	1829			$X - IS$
	1811			1808,47



8000 ciclos de carga				
Esfuerzo (kPa)	Smix Ajustado (MPa)	$\bar{X}$	$S^2$	$S$
70	1878	1874	509	22,57
	1884			$\bar{X} + 1S$
	1873			1896,57
	1838			$\bar{X} - 1S$
	1899			1851,43

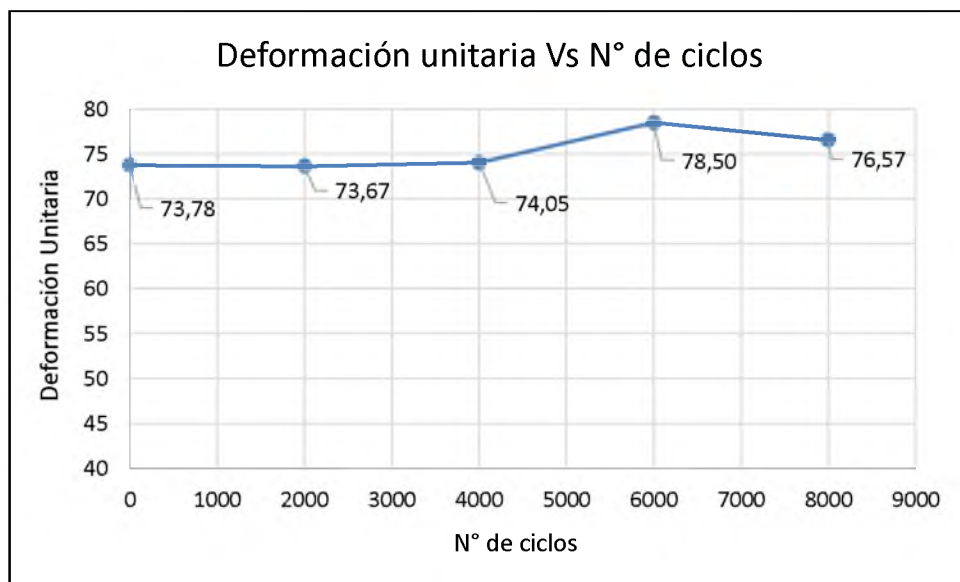
**Módulo Vs Número de ciclos**



### Deformación unitaria

N° de ciclos	Deformación Unitaria ( $\mu$ strain)
0	73,78
2000	73,67
4000	74,05
6000	78,50
8000	76,57

### Deformación Vs Número de ciclos



### ANEXO 3: Ensayos en briqueta 2 con esfuerzo de 80 KPa

#### Media, varianza y desviación estándar del módulo de rigidez

0 ciclos de carga				
Esfuerzo (kPa)	Smix Ajustado (MPa)	$\bar{X}$	$S^2$	$S$
80	2185	2179	913	30,21
	2181			$\bar{X} + 1S$
	2224			2209,21
	2160			$\bar{X} - 1S$
	2144			2148,79

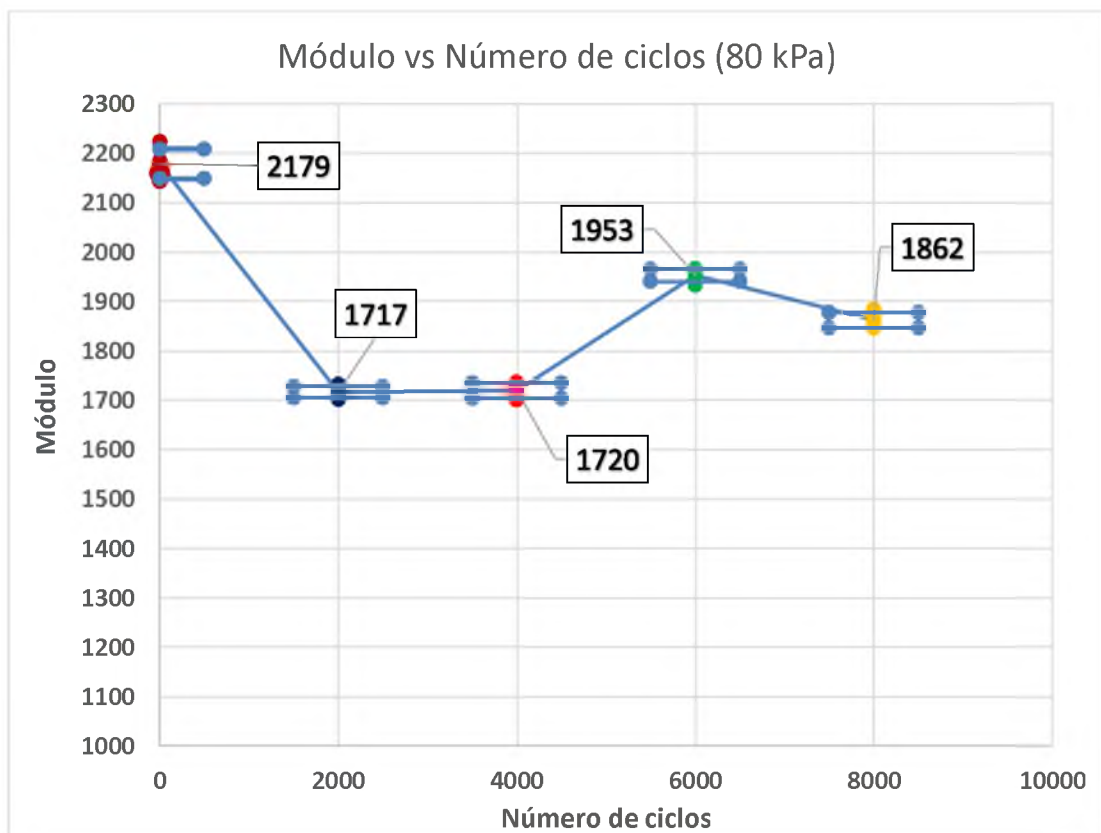
2000 ciclos de carga				
Esfuerzo (kPa)	Smix Ajustado (MPa)	$\bar{X}$	$S^2$	$S$
80	1716	1717	125	11,19
	1722			$\bar{X} + 1S$
	1712			1728,19
	1702			$\bar{X} - 1S$
	1732			1705,81

4000 ciclos de carga				
Esfuerzo (kPa)	Smix Ajustado (MPa)	$\bar{X}$	$S^2$	$S$
80	1708	1720	240	15,50
	1732			$\bar{X} + 1S$
	1725			1735,50
	1737			$\bar{X} - 1S$
	1701			1704,50

6000 ciclos de carga				
Esfuerzo (kPa)	Smix Ajustado (MPa)	$\bar{X}$	$S^2$	$S$
80	1952	1953	162	12,72
	1933			$\bar{X} + 1S$
	1954			1965,72
	1960			$\bar{X} - 1S$
	1967			1940,28

8000 ciclos de carga				
Esfuerzo (kPa)	Smix Ajustado (MPa)	$X$	$S^2$	$S$
80	1847	1862	248	15,75
	1856			$X + 1S$
	1885			1877,75
	1851			$X - 1S$
	1871			1846,25

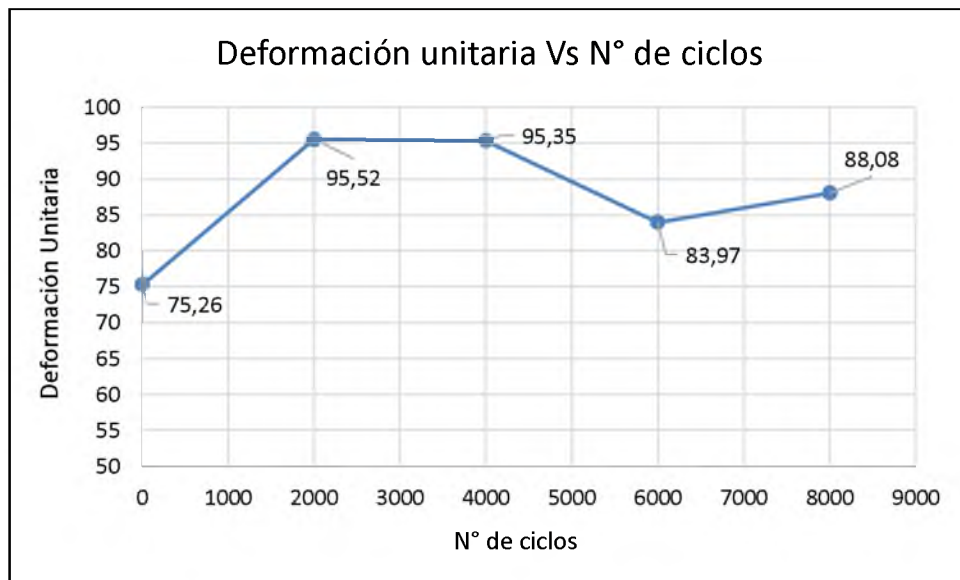
### Módulo Vs Número de ciclos



### Deformación unitaria

N° de ciclos	Deformación Unitaria ( $\mu$ strain)
0	75,26
2000	95,52
4000	95,35
6000	83,97
8000	88,08

### Deformación Vs Número de ciclos



## ANEXO 4: Ensayos en briqueta 2 con esfuerzo de 90 KPa

### Media, varianza y desviación estándar del módulo de rigidez

0 ciclos de carga				
Esfuerzo (kPa)	Smix Ajustado (MPa)	$X$	$S^2$	$S$
90	2062	2065	380	19,48
	2057			$X + 1S$
	2099			2084,48
	2057			$X - 1S$
	2050			2045,52

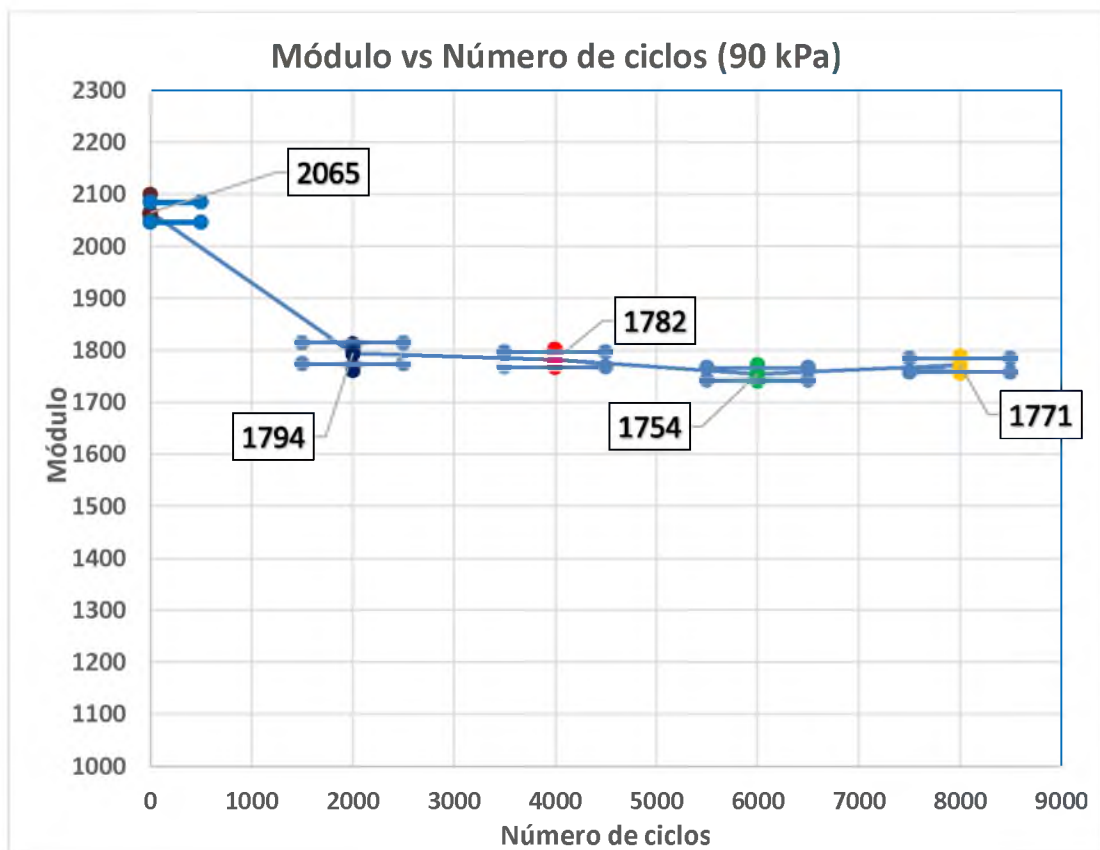
2000 ciclos de carga				
Esfuerzo (kPa)	Smix Ajustado (MPa)	$X$	$S^2$	$S$
90	1809	1794	413	20,32
	1792			$X + 1S$
	1812			1814,32
	1797			$X - 1S$
	1761			1773,68

4000 ciclos de carga				
Esfuerzo (kPa)	Smix Ajustado (MPa)	$X$	$S^2$	$S$
90	1767	1782	205	14,31
	1791			$X + 1S$
	1775			1796,31
	1774			$X - 1S$
	1802			1767,69

6000 ciclos de carga				
Esfuerzo (kPa)	Smix Ajustado (MPa)	$X$	$S^2$	$S$
90	1740	1754	152	12,34
	1756			$X + 1S$
	1745			1766,34
	1756			$X - 1S$
	1772			1741,66

8000 ciclos de carga				
Esfuerzo (kPa)	Smix Ajustado (MPa)	$X$	$S^2$	$S$
90	1770	1771	173	13,14
	1762			$X + 1S$
	1788			1784,14
	1755			$X - 1S$
	1779			1757,86

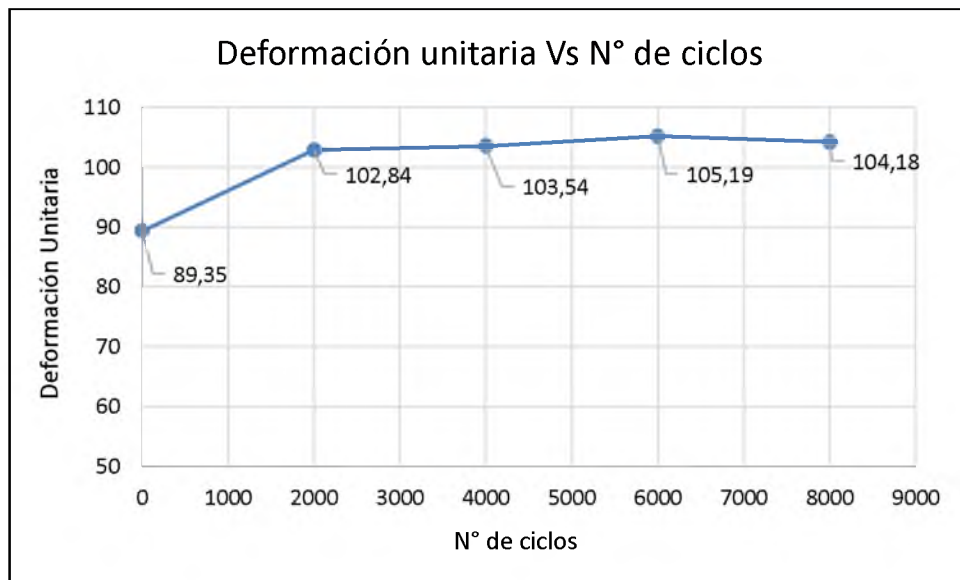
### Módulo Vs Número de ciclos



### Deformación unitaria

N° de ciclos	Deformación Unitaria ( $\mu$ strain)
0	89,35
2000	102,84
4000	103,54
6000	105,19
8000	104,18

### Deformación Vs Número de ciclos





## ANEXO 5: Ensayos en briqueta 2 con esfuerzo de 100 KPa

### Media, varianza y desviación estándar del módulo de rigidez

0 ciclos de carga				
Esfuerzo (kPa)	Smix Ajustado (MPa)	$X$	$S^2$	$S$
100	1825	1846	504	22,45
	1852			$X + 1S$
	1821			1868,45
	1871			$X - 1S$
	1863			1823,55

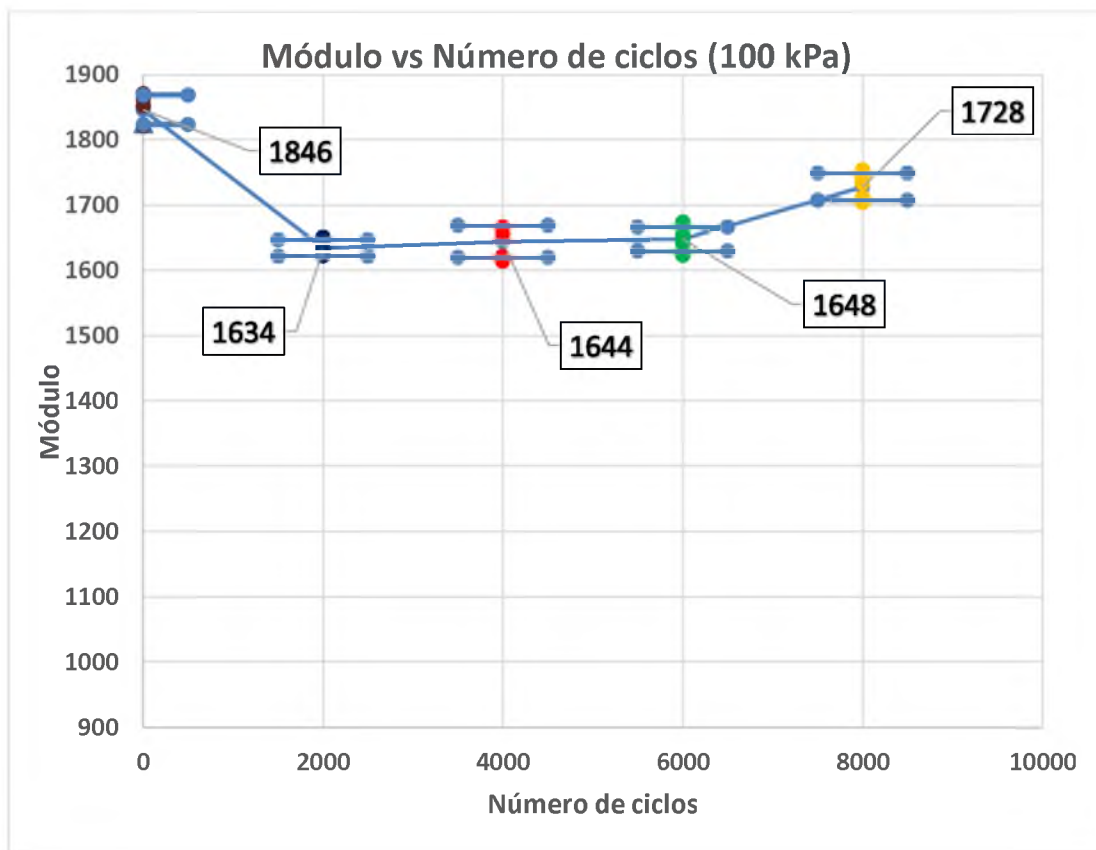
2000 ciclos de carga				
Esfuerzo (kPa)	Smix Ajustado (MPa)	$X$	$S^2$	$S$
100	1642	1634	153	12,38
	1624			$X + 1S$
	1622			1646,38
	1630			$X - 1S$
	1651			1621,62

4000 ciclos de carga				
Esfuerzo (kPa)	Smix Ajustado (MPa)	$X$	$S^2$	$S$
100	1666	1644	595	24,40
	1656			$X + 1S$
	1614			1668,40
	1662			$X - 1S$
	1621			1619,60

6000 ciclos de carga				
Esfuerzo (kPa)	Smix Ajustado (MPa)	$X$	$S^2$	$S$
100	1654	1648	347	18,64
	1641			$X + 1S$
	1646			1666,64
	1674			$X - 1S$
	1623			1629,36

8000 ciclos de carga				
Esfuerzo (kPa)	Smix Ajustado (MPa)	$X$	$S^2$	$S$
100	1711	1728	422	20,54
	1704			$X + 1S$
	1739			1748,54
	1733			$X - 1S$
	1754			1707,46

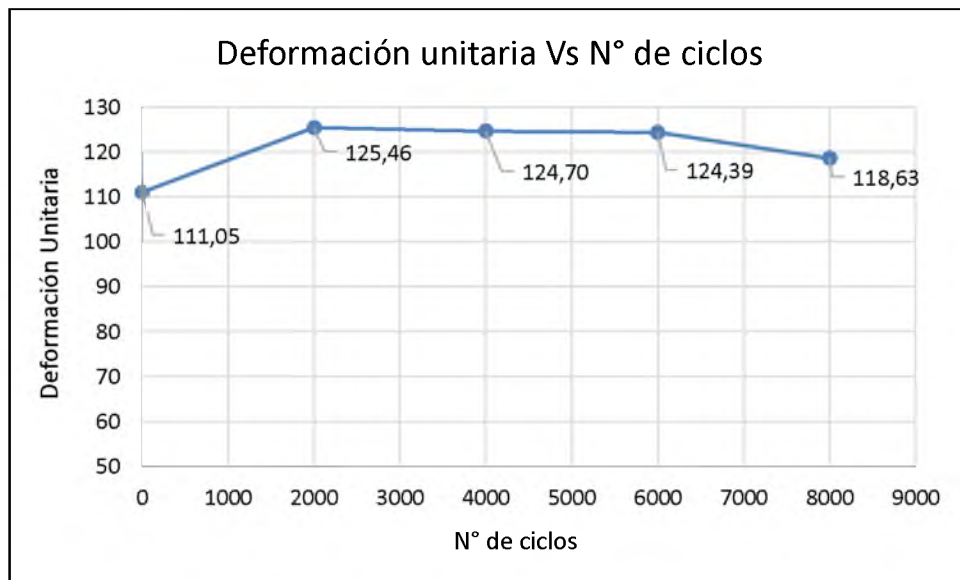
**Módulo Vs Número de ciclos**



### Deformación unitaria

N° de ciclos	Deformación Unitaria ( $\mu$ strain)
0	111,05
2000	125,46
4000	124,70
6000	124,39
8000	118,63

### Deformación Vs Número de ciclos



## ANEXO 6: Ensayos en briqueta 2 con esfuerzo de 110 KPa

### Media, varianza y desviación estándar del módulo de rigidez

0 ciclos de carga				
Esfuerzo (kPa)	Smix Ajustado (MPa)	$\bar{X}$	$S^2$	$S$
110	2079	2086	809	28,44
	2104			$\bar{X} + 1S$
	2097			2114,44
	2040			$\bar{X} - 1S$
	2111			2057,56

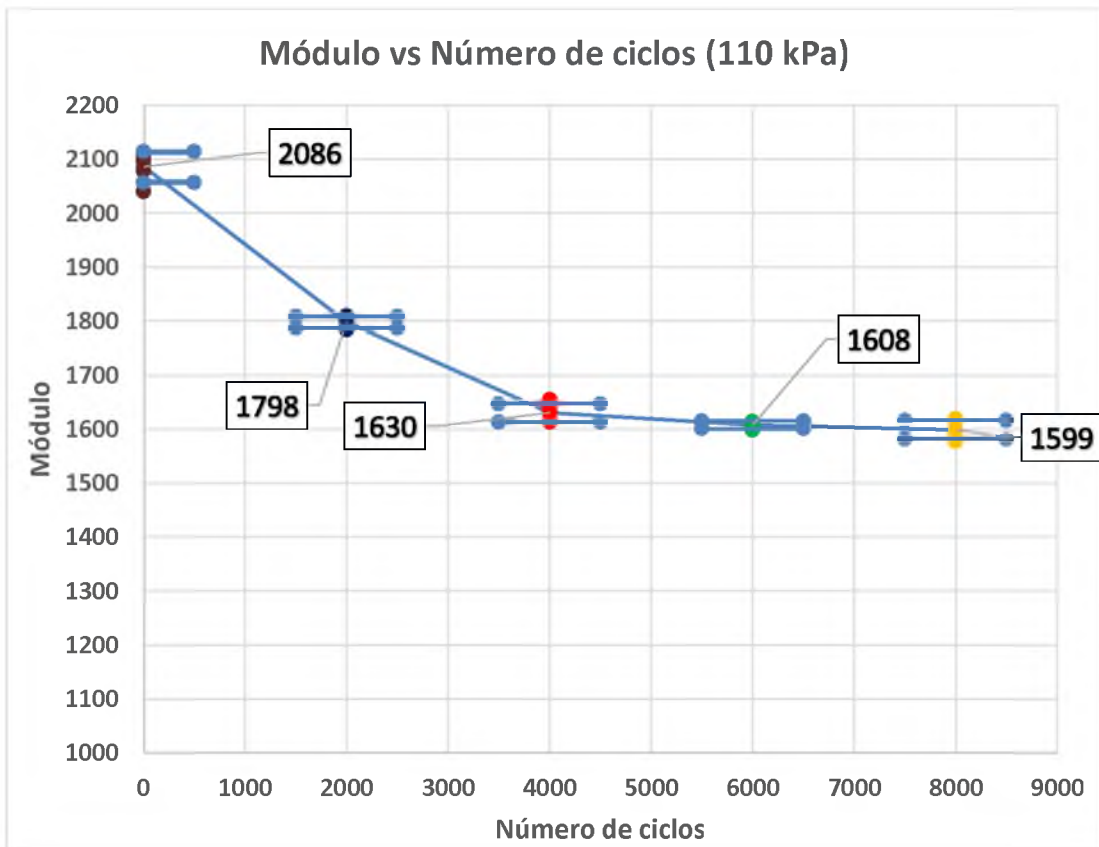
2000 ciclos de carga				
Esfuerzo (kPa)	Smix Ajustado (MPa)	$\bar{X}$	$S^2$	$S$
110	1810	1798	119	10,89
	1784			$\bar{X} + 1S$
	1793			1808,89
	1808			$\bar{X} - 1S$
	1795			1787,11

4000 ciclos de carga				
Esfuerzo (kPa)	Smix Ajustado (Mpa)	$\bar{X}$	$S^2$	$S$
110	1637	1630	283	16,82
	1613			$\bar{X} + 1S$
	1630			1646,82
	1655			$\bar{X} - 1S$
	1617			1613,18

6000 ciclos de carga				
Esfuerzo (kPa)	Smix Ajustado (MPa)	$\bar{X}$	$S^2$	$S$
110	1604	1608	53	7,27
	1598			$\bar{X} + 1S$
	1613			1615,27
	1614			$\bar{X} - 1S$
	1614			1600,73

8000 ciclos de carga				
Esfuerzo (kPa)	Smix Ajustado (MPa)	$\bar{X}$	$S^2$	$S$
110	1590	1599	298	17,27
	1614			$\bar{X} + 1S$
	1597			1616,27
	1619			$\bar{X} - 1S$
	1577			1581,73

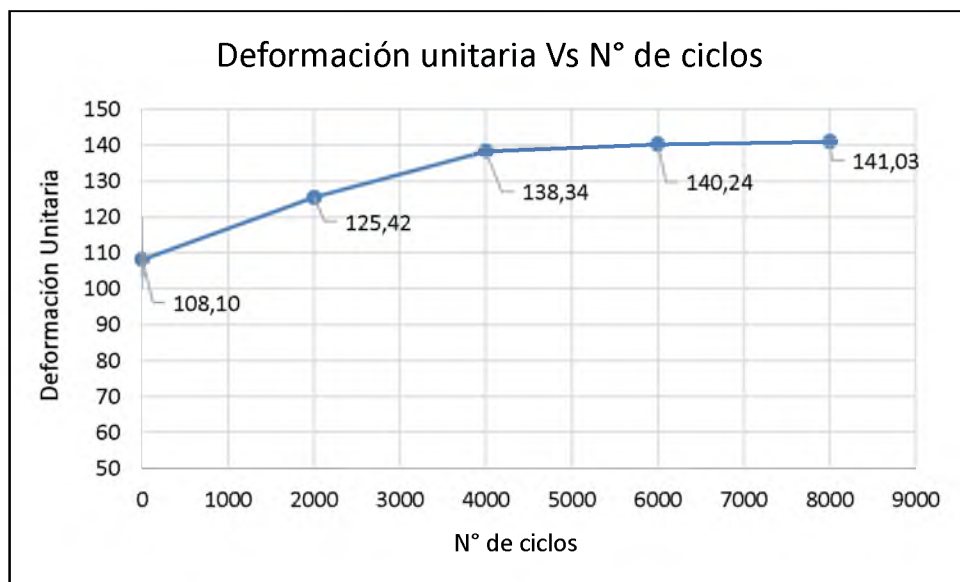
### Módulo Vs Número de ciclos



### Deformación unitaria

N° de ciclos	Deformación Unitaria ( $\mu$ strain)
0	108,10
2000	125,42
4000	138,34
6000	140,24
8000	141,03

### Deformación Vs Número de ciclos



## ANEXO 7: Ensayos en briqueta 2 con esfuerzo de 120 KPa

### Media, varianza y desviación estándar del módulo de rigidez

2000 ciclos de carga				
Esfuerzo (kPa)	Smix Ajustado (MPa)	$\bar{X}$	$S^2$	$S$
120	2064	2064	934	30,56
	2087			$\bar{X} + 1S$
	2056			2094,56
	2016			$\bar{X} - 1S$
	2093			2033,44

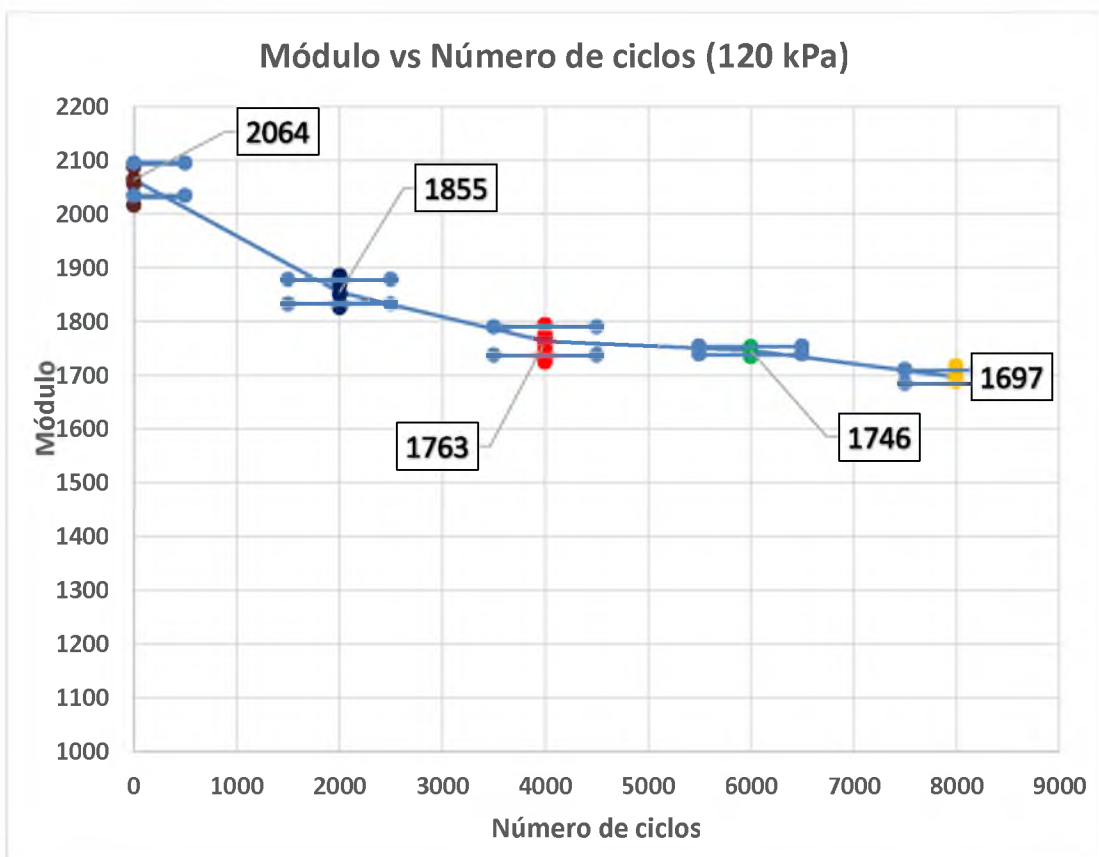
2000 ciclos de carga				
Esfuerzo (kPa)	Smix Ajustado (MPa)	$\bar{X}$	$S^2$	$S$
120	1825	1855	510	22,59
	1849			$\bar{X} + 1S$
	1885			1877,59
	1868			$\bar{X} - 1S$
	1849			1832,41

4000 ciclos de carga				
Esfuerzo (kPa)	Smix Ajustado (MPa)	$\bar{X}$	$S^2$	$S$
120	1770	1763	709	26,62
	1793			$\bar{X} + 1S$
	1750			1789,62
	1777			$\bar{X} - 1S$
	1724			1736,38

6000 ciclos de carga				
Esfuerzo (kPa)	Smix Ajustado (MPa)	$\bar{X}$	$S^2$	$S$
120	1734	1746	58	7,64
	1745			$\bar{X} + 1S$
	1753			1753,64
	1748			$\bar{X} - 1S$
	1752			1738,36

8000 ciclos de carga				
Esfuerzo (kPa)	Smix Ajustado (MPa)	$\bar{X}$	$S^2$	$S$
120	1687	1697	161	12,68
	1717			$\bar{X} + 1S$
	1701			1709,68
	1689			$\bar{X} - 1S$
	1689			1684,32

### Módulo Vs Número de ciclos

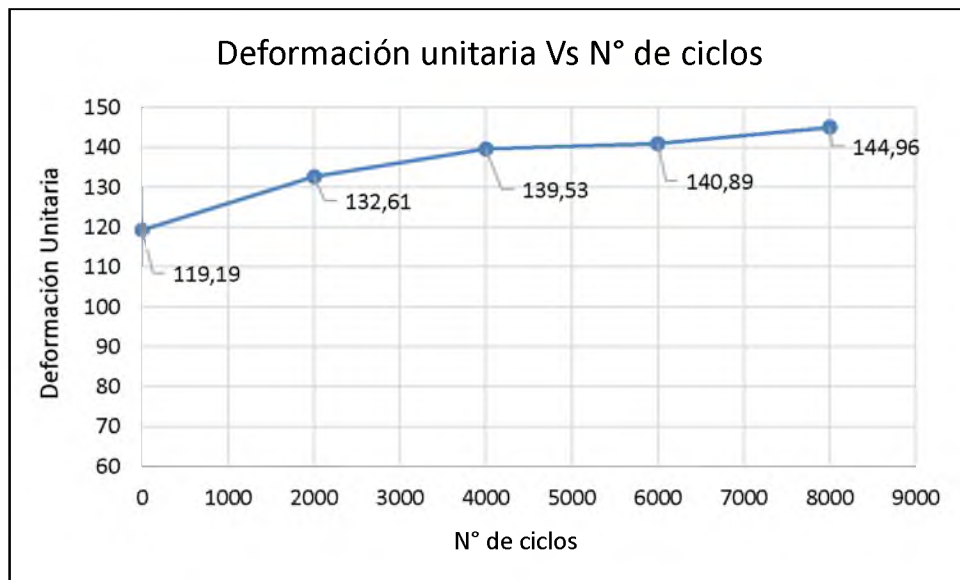




### Deformación unitaria

N° de ciclos	Deformación Unitaria ( $\mu$ strain)
0	119,19
2000	132,61
4000	139,53
6000	140,89
8000	144,96

### Deformación Vs Número de ciclos



## ANEXO 8: Ensayos en briqueta 2 con esfuerzo de 130 KPa

### Media, varianza y desviación estándar del módulo de rigidez

0 ciclos de carga				
Esfuerzo (kPa)	Smix Ajustado (MPa)	$X$	$S^2$	$S$
130	1700	1707	70	8,38
	1720			$X + 1S$
	1707			1715,38
	1700			$X - 1S$
	1711			1698,62

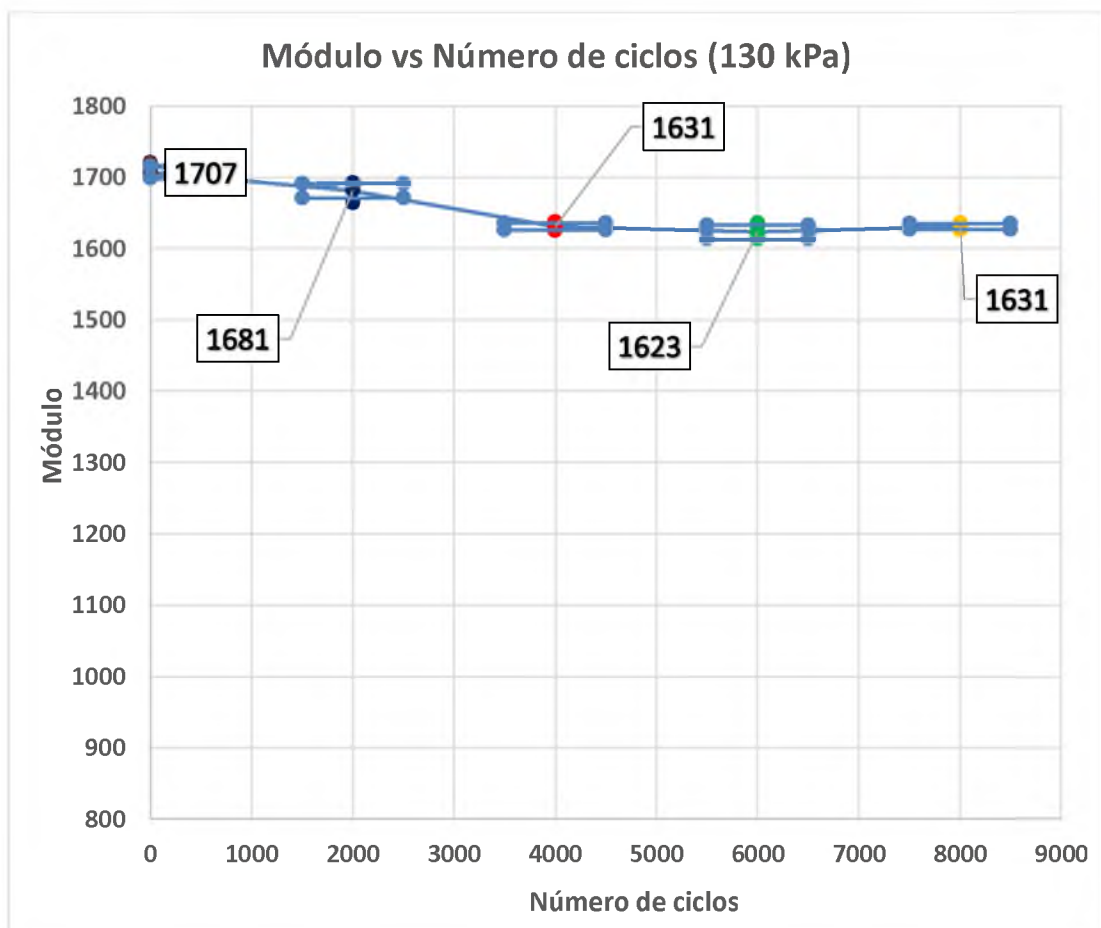
2000 ciclos de carga				
Esfuerzo (kPa)	Smix Ajustado (MPa)	$X$	$S^2$	$S$
130	1683	1681	108	10,38
	1664			$X + 1S$
	1692			1691,38
	1684			$X - 1S$
	1684			1670,62

4000 ciclos de carga				
Esfuerzo (kPa)	Smix Ajustado (MPa)	$X$	$S^2$	$S$
130	1625	1631	25	5,02
	1629			$X + 1S$
	1635			1636,02
	1628			$X - 1S$
	1637			1625,98

6000 ciclos de carga				
Esfuerzo (kPa)	Smix Ajustado (MPa)	$X$	$S^2$	$S$
130	1636	1623	99	9,96
	1622			$X + 1S$
	1631			1632,96
	1615			$X - 1S$
	1613			1613,04

8000 ciclos de carga				
Esfuerzo (kPa)	Smix Ajustado (MPa)	$X$	$S^2$	$S$
130	1636	1631	17	4,09
	1629			$X + 1S$
	1626			1635,09
	1634			$X - 1S$
	1629			1626,91

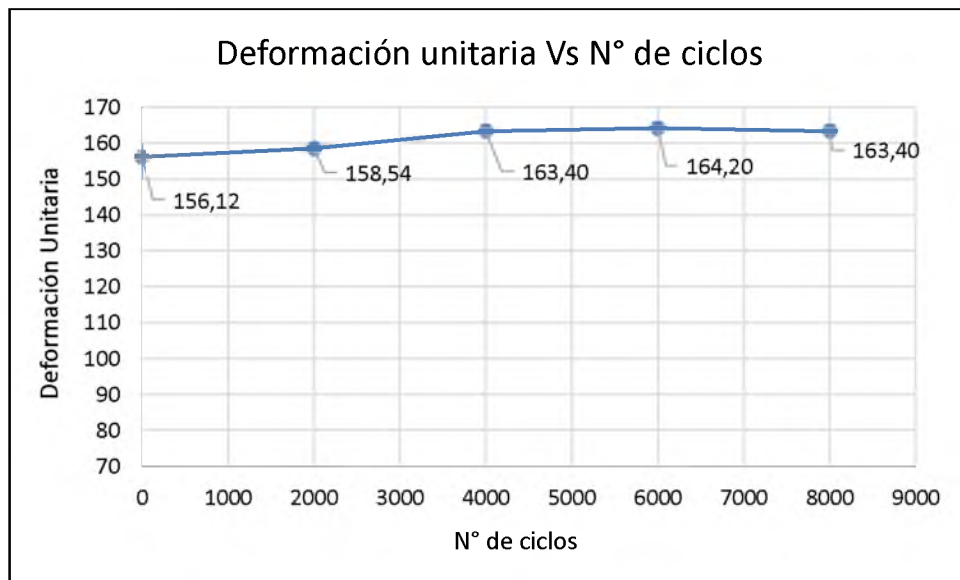
### Módulo Vs Número de ciclos



### Deformación unitaria

N° de ciclos	Deformación Unitaria ( $\mu$ strain)
0	156,12
2000	158,54
4000	163,40
6000	164,20
8000	163,40

### Deformación Vs Número de ciclos



## ANEXO 9: Ensayos en briqueta 2 con esfuerzo de 140 KPa

### Media, varianza y desviación estándar del módulo de rigidez

0 ciclos de carga				
Esfuerzo (kPa)	Smix Ajustado (MPa)	$\bar{X}$	$S^2$	$S$
140	2015	2031	91	9,56
	2028			$\bar{X} + 1S$
	2037			2040,56
	2035			$\bar{X} - 1S$
	2038			2021,44

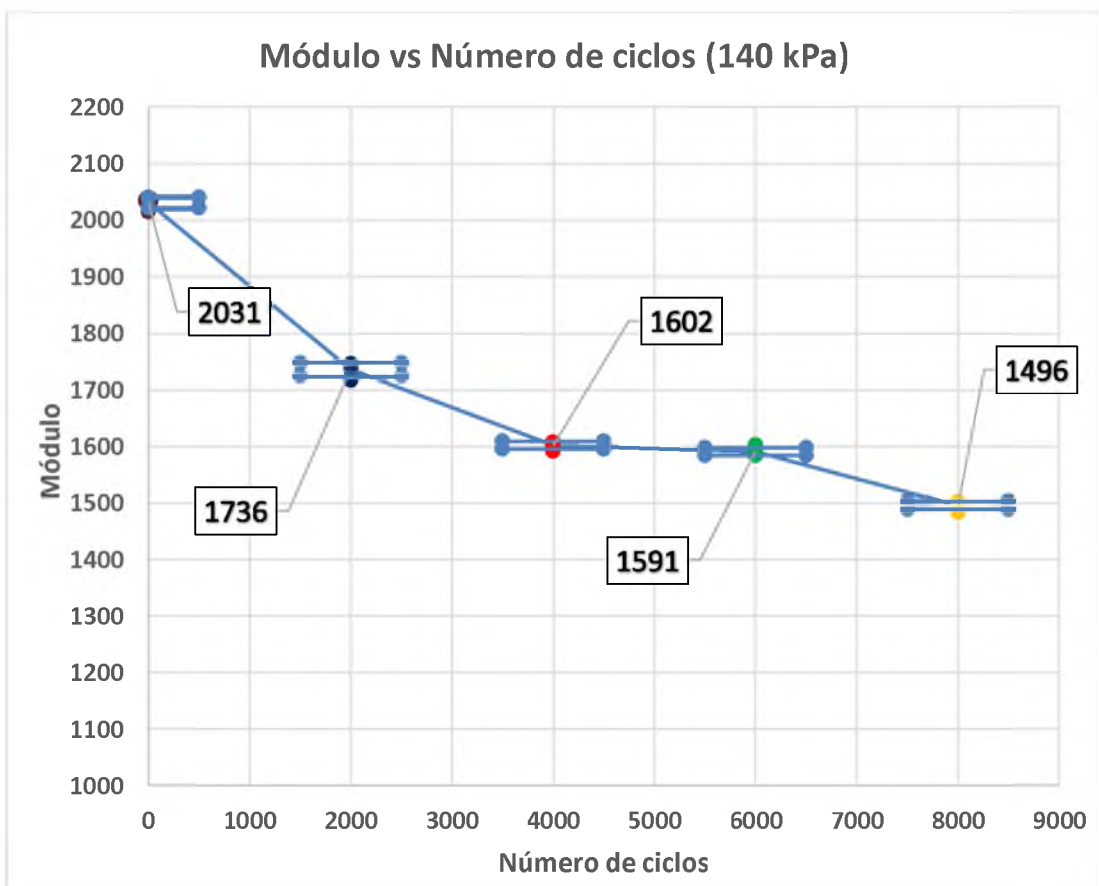
2000 ciclos de carga				
Esfuerzo (kPa)	Smix Ajustado (MPa)	$\bar{X}$	$S^2$	$S$
140	1717	1736	146	12,10
	1733			$\bar{X} + 1S$
	1742			1748,10
	1745			$\bar{X} - 1S$
	1746			1723,90

4000 ciclos de carga				
Esfuerzo (kPa)	Smix Ajustado (MPa)	$\bar{X}$	$S^2$	$S$
140	1600	1602	46	6,75
	1606			$\bar{X} + 1S$
	1607			1608,75
	1606			$\bar{X} - 1S$
	1591			1595,25

6000 ciclos de carga				
Esfuerzo (kPa)	Smix Ajustado (MPa)	$\bar{X}$	$S^2$	$S$
140	1584	1591	52	7,23
	1591			$\bar{X} + 1S$
	1592			1598,23
	1603			$\bar{X} - 1S$
	1587			1583,77

8000 ciclos de carga				
Esfuerzo (kPa)	Smix Ajustado (MPa)	$X$	$S^2$	$S$
140	1484	1496	53	7,27
	1500			$X + 1S$
	1502			1503,27
	1496			$X - 1S$
	1500			1488,73

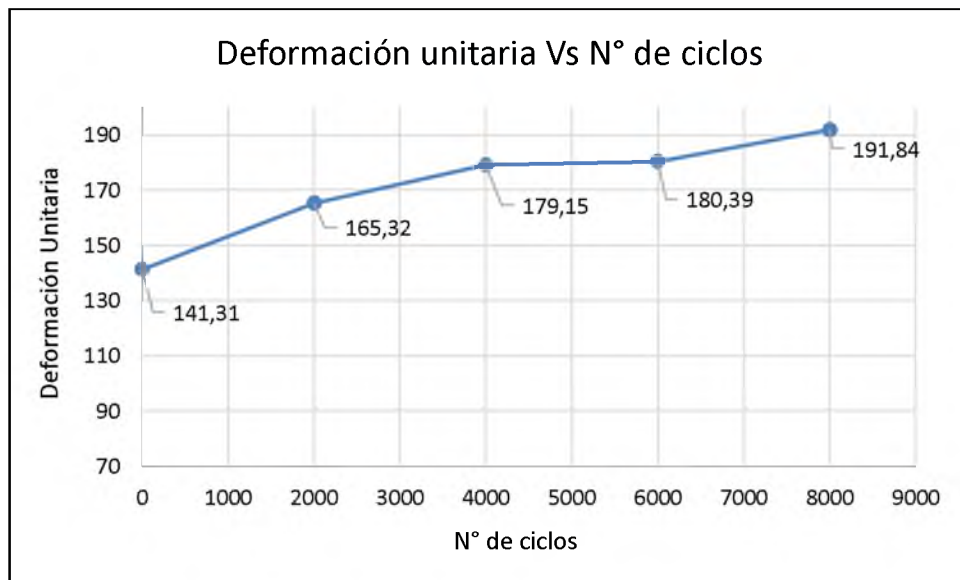
### Módulo Vs Número de ciclos



### Deformación unitaria

N° de ciclos	Deformación Unitaria ( $\mu$ strain)
0	141,31
2000	165,32
4000	179,15
6000	180,39
8000	191,84

### Deformación Vs Número de ciclos



## ANEXO 10: Ensayos en briqueta 3 con esfuerzo de 90 KPa

### Media, varianza y desviación estándar del módulo de rigidez

0 ciclos de carga				
Esfuerzo (kPa)	Smix Ajustado (MPa)	$X$	$S^2$	$S$
90	2277	2251	520	22,80
	2224			$X + IS$
	2264			2273,80
	2259			$X - IS$
	2230			2228,20

5000 ciclos de carga				
Esfuerzo (kPa)	Smix Ajustado (MPa)	$X$	$S^2$	$S$
90	1740	1739	94	9,68
	1755			$X + IS$
	1729			1748,68
	1736			$X - IS$
	1736			1729,32

10000 ciclos de carga				
Esfuerzo (kPa)	Smix Ajustado (MPa)	$X$	$S^2$	$S$
90	1934	1904	368	19,18
	1911			$X + IS$
	1885			1923,18
	1895			$X - IS$
	1895			1884,82

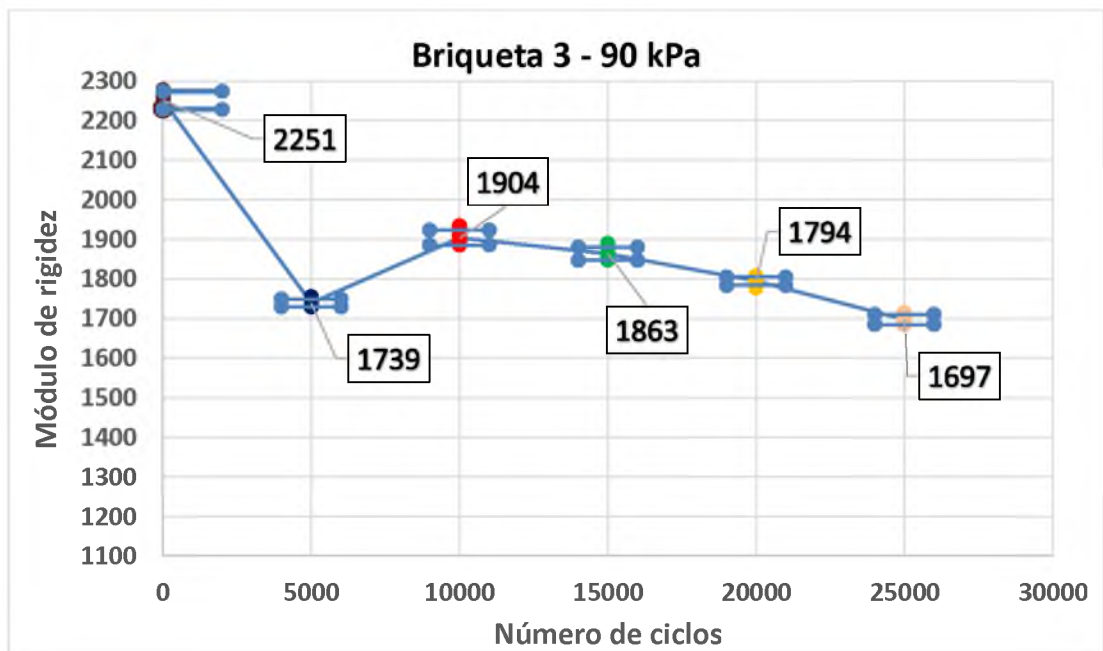
15000 ciclos de carga				
Esfuerzo (kPa)	Smix Ajustado (MPa)	$X$	$S^2$	$S$
90	1864	1863	277	16,63
	1849			$X + IS$
	1866			1879,63
	1848			$X - IS$
	1889			1846,37



20000 ciclos de carga				
Esfuerzo (kPa)	Smix Ajustado (MPa)	$X$	$S^2$	$S$
90	1807	1794	115	10,73
	1790			$X + 1S$
	1778			1804,73
	1798			$X - 1S$
	1796			1783,27

25000 ciclos de carga				
Esfuerzo (kPa)	Smix Ajustado (MPa)	$X$	$S^2$	$S$
90	1706	1697	160	12,64
	1714			$X + 1S$
	1685			1709,64
	1695			$X - 1S$
	1686			1684,36

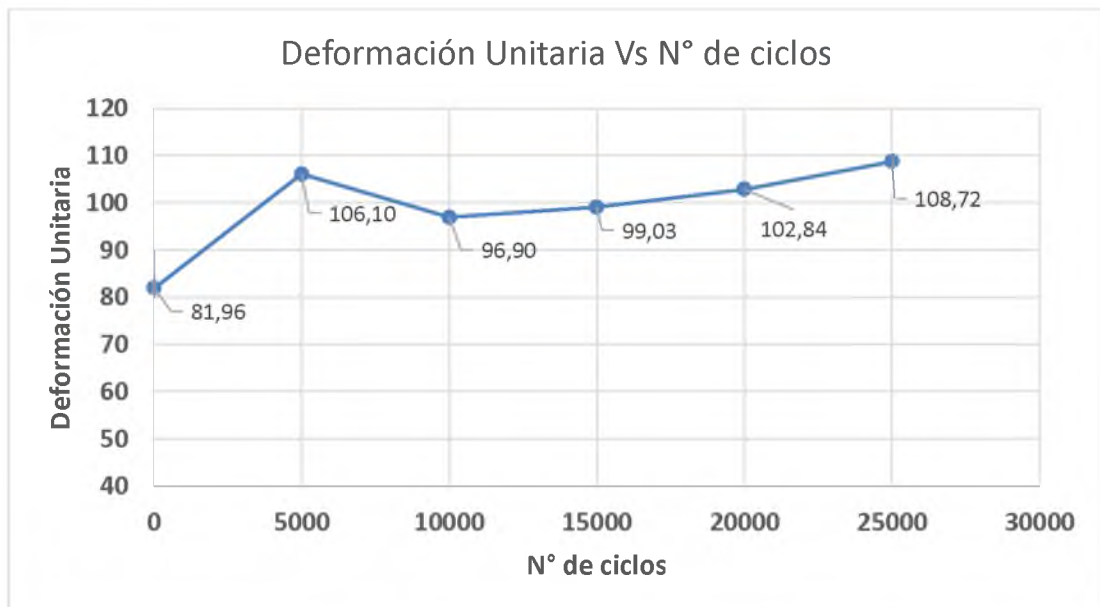
**Módulo Vs Número de ciclos**



### Deformación unitaria

N° de ciclos	Deformación Unitaria ( $\mu$ strain)
0	81,96
5000	109,63
10000	105,85
15000	108,91
20000	110,48
25000	109,63

### Deformación Vs Número de ciclos



## ANEXO 11: Ensayos en briqueta 5 con esfuerzo de 90 KPa

### Media, varianza y desviación estándar del módulo de rigidez

0 ciclos de carga				
Esfuerzo (kPa)	Smix Ajustado (MPa)	$X$	$S^2$	$S$
90	2096	2071	325	18,04
	2057			$X + 1S$
	2077			2089,04
	2073			$X - 1S$
	2050			2052,96

5000 ciclos de carga				
Esfuerzo (kPa)	Smix Ajustado (MPa)	$X$	$S^2$	$S$
90	1712	1732	313	17,70
	1743			$X + 1S$
	1753			1749,70
	1734			$X - 1S$
	1715			1714,30

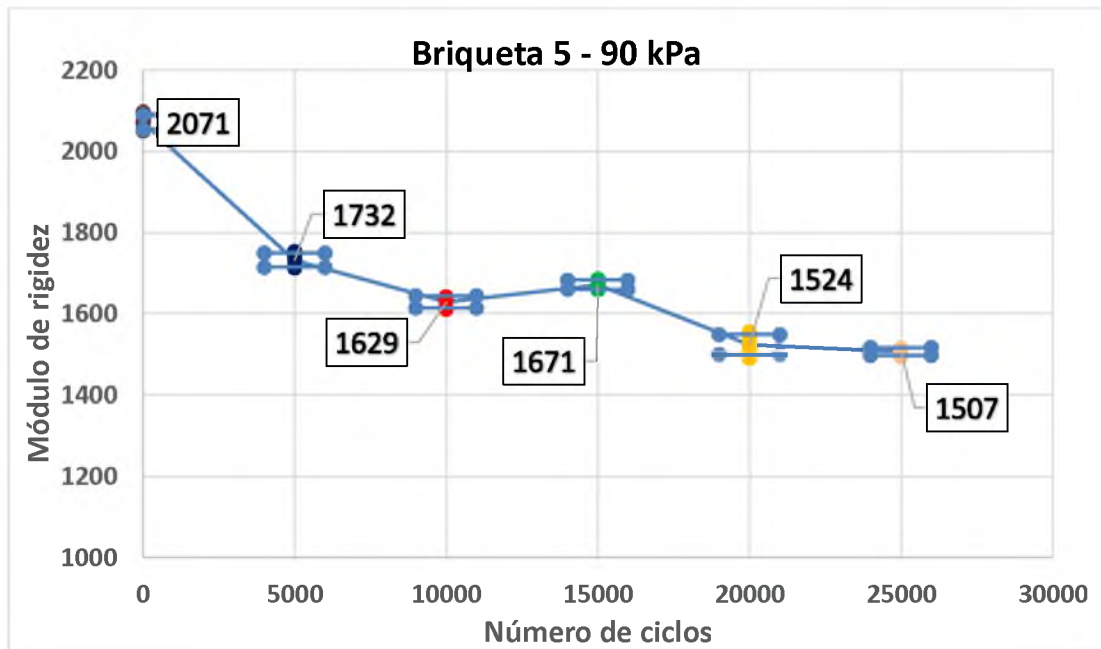
10000 ciclos de carga				
Esfuerzo (kPa)	Smix Ajustado (MPa)	$X$	$S^2$	$S$
90	1611	1629	219	14,81
	1640			$X + 1S$
	1614			1643,81
	1641			$X - 1S$
	1637			1614,19

15000 ciclos de carga				
Esfuerzo (kPa)	Smix Ajustado (MPa)	$X$	$S^2$	$S$
90	1659	1671	130	11,40
	1663			$X + 1S$
	1667			1682,40
	1681			$X - 1S$
	1685			1659,60

20000 ciclos de carga				
Esfuerzo (kPa)	Smix Ajustado (MPa)	$X$	$S^2$	$S$
90	1555	1524	609	24,67
	1536			$X + 1S$
	1528			1548,67
	1491			$X - 1S$
	1509			1499,33

25000 ciclos de carga				
Esfuerzo (kPa)	Smix Ajustado (MPa)	$X$	$S^2$	$S$
90	1499	1507	88	9,37
	1495			$X + 1S$
	1515			1516,37
	1516			$X - 1S$
	1507			1497,63

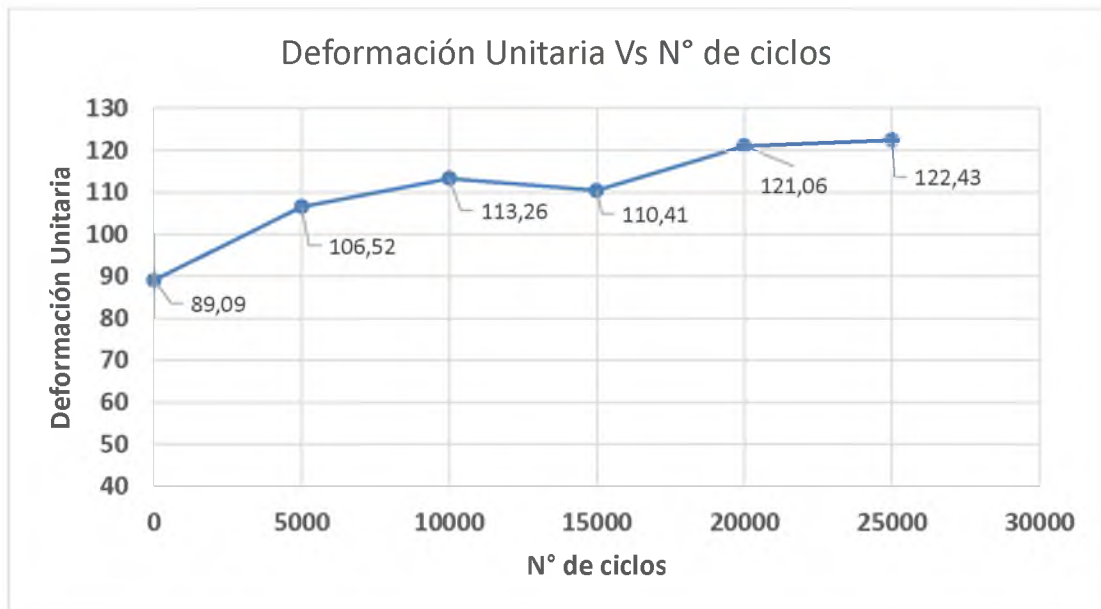
### Módulo Vs Número de ciclos



### Deformación unitaria

N° de ciclos	Deformación Unitaria ( $\mu$ strain)
0	89,09
5000	106,52
10000	113,26
15000	110,41
20000	121,06
25000	122,43

### Deformación Vs Número de ciclos



## ANEXO 12: Ensayos en briqueta 7 con esfuerzo de 90 KPa

### Media, varianza y desviación estándar del módulo de rigidez

0 ciclos de carga				
Esfuerzo (kPa)	Smix Ajustado (MPa)	$X$	$S^2$	$S$
90	2286	2278	1611	40,14
	2321			$X + 1S$
	2304			2318,14
	2262			$X - 1S$
	2218			2237,86

5000 ciclos de carga				
Esfuerzo (kPa)	Smix Ajustado (MPa)	$X$	$S^2$	$S$
90	1889	1860	471	21,70
	1833			$X + 1S$
	1868			1881,70
	1845			$X - 1S$
	1865			1838,30

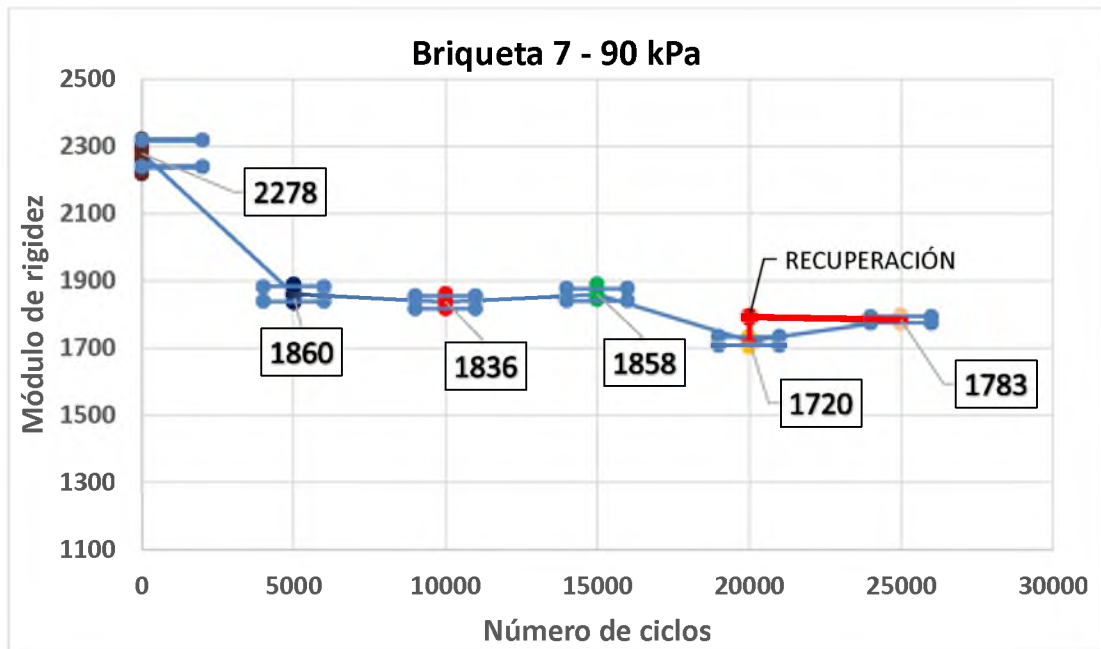
10000 ciclos de carga				
Esfuerzo (kPa)	Smix Ajustado (MPa)	$X$	$S^2$	$S$
90	1861	1836	365	19,09
	1816			$X + 1S$
	1848			1855,09
	1819			$X - 1S$
	1836			1816,91

15000 ciclos de carga				
Esfuerzo (kPa)	Smix Ajustado (MPa)	$X$	$S^2$	$S$
90	1889	1858	338	18,38
	1850			$X + 1S$
	1861			1876,38
	1844			$X - 1S$
	1847			1839,62

20000 ciclos de carga				
Esfuerzo (kPa)	Smix Ajustado (MPa)	$X$	$S^2$	$S$
90	1723	1720	174	13,18
	1734			$X + 1S$
	1703			1733,18
	1731			$X - 1S$
	1711			1706,82

25000 ciclos de carga				
Esfuerzo (kPa)	Smix Ajustado (MPa)	$X$	$S^2$	$S$
90	1781	1783	90	9,49
	1798			$X + 1S$
	1780			1792,49
	1772			$X - 1S$
	1784			1773,51

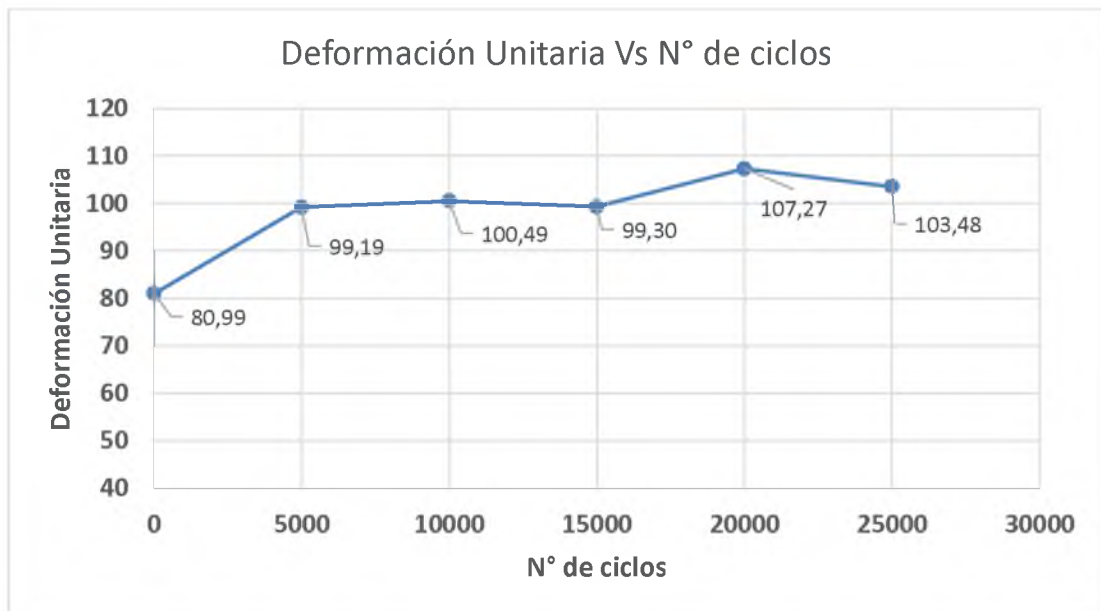
### Módulo Vs Número de ciclos



### Deformación unitaria

N° de ciclos	Deformación Unitaria ( $\mu$ strain)
0	80,99
5000	99,19
10000	100,49
15000	99,30
20000	107,27
25000	103,48

### Deformación Vs Número de ciclos





## ANEXO 13: Ensayos en briqueta 8 con esfuerzo de 90 KPa

### Media, varianza y desviación estándar del módulo de rigidez

0 ciclos de carga				
Esfuerzo (kPa)	Smix Ajustado (MPa)	$X$	$S^2$	$S$
90	2147	2134	625	25,01
	2122			$X + 1S$
	2166			2159,01
	2100			$X - 1S$
	2137			2108,99

5000 ciclos de carga				
Esfuerzo (kPa)	Smix Ajustado (MPa)	$X$	$S^2$	$S$
90	1569	1563	102	10,08
	1568			$X + 1S$
	1572			1573,08
	1547			$X - 1S$
	1560			1552,92

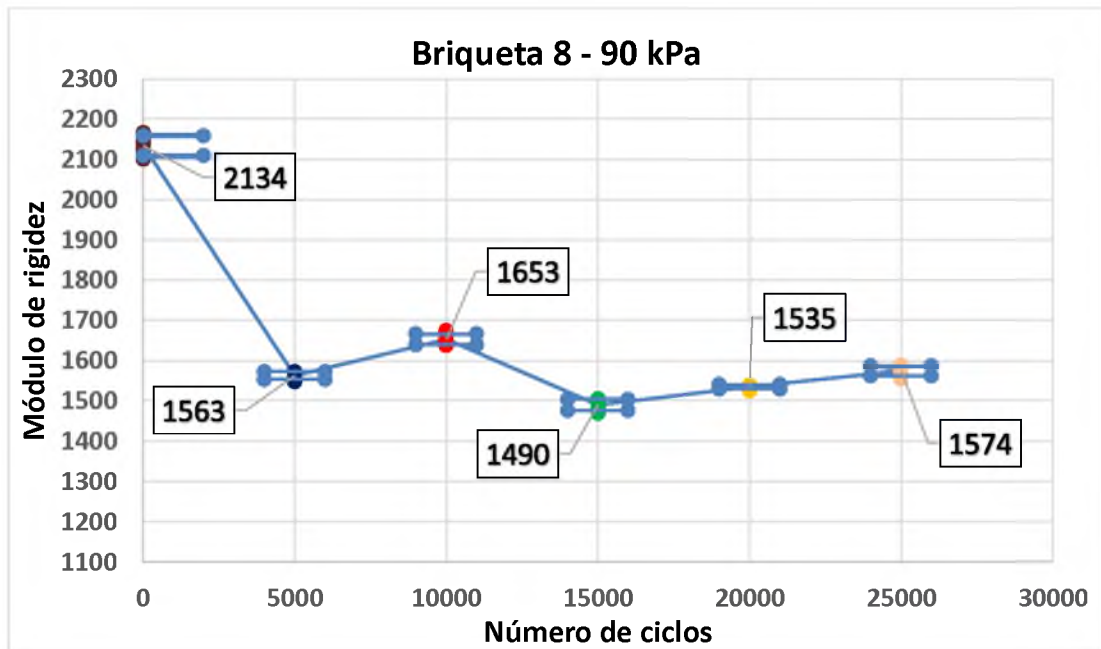
10000 ciclos de carga				
Esfuerzo (kPa)	Smix Ajustado (MPa)	$X$	$S^2$	$S$
90	1637	1653	187	13,67
	1674			$X + 1S$
	1654			1666,67
	1654			$X - 1S$
	1646			1639,33

15000 ciclos de carga				
Esfuerzo (kPa)	Smix Ajustado (MPa)	$X$	$S^2$	$S$
90	1491	1490	198	14,07
	1500			$X + 1S$
	1469			1504,07
	1485			$X - 1S$
	1505			1475,93

20000 ciclos de carga				
Esfuerzo (kPa)	Smix Ajustado (MPa)	$X$	$S^2$	$S$
90	1535	1535	32	5,67
	1525			$X + 1S$
	1537			1540,67
	1539			$X - 1S$
	1538			1529,33

25000 ciclos de carga				
Esfuerzo (kPa)	Smix Ajustado (MPa)	$X$	$S^2$	$S$
90	1589	1574	161	12,68
	1577			$X + 1S$
	1575			1586,68
	1554			$X - 1S$
	1577			1561,32

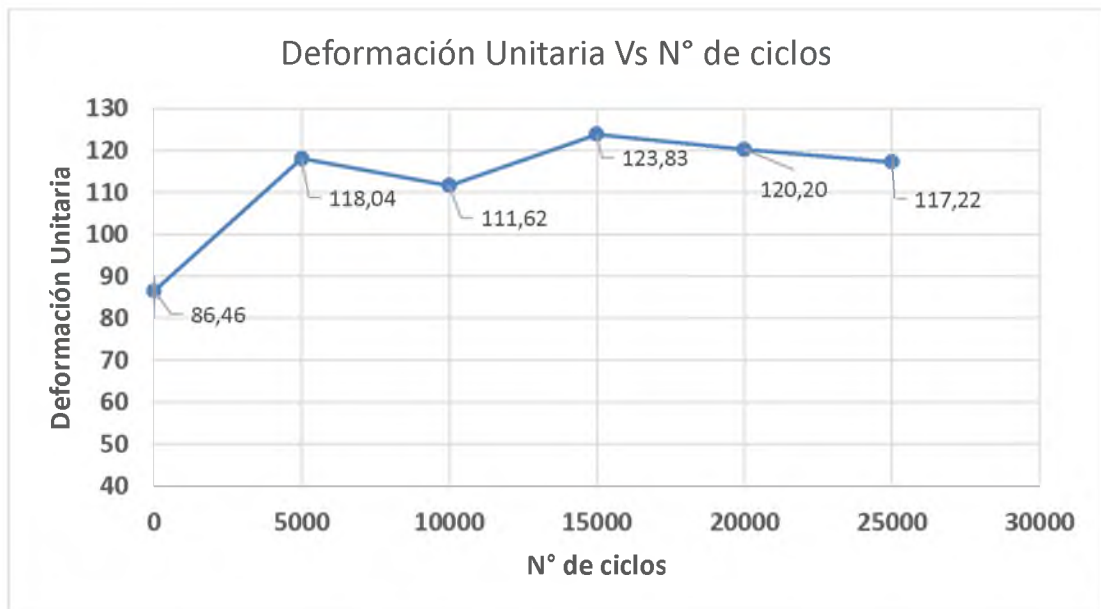
### Módulo Vs Número de ciclos



## Deformación unitaria

repeticiones	Deformación Unitaria ( $\mu$ strain)
0	86,46
5000	118,04
10000	111,62
15000	123,83
20000	120,20
25000	117,22

## Deformación Vs Número de ciclos



## ANEXO 14: Ensayos en briqueta 6 con esfuerzo de 100 KPa

### Media, varianza y desviación estándar del módulo de rigidez

0 ciclos de carga				
Esfuerzo (kPa)	Smix Ajustado (MPa)	$X$	$S^2$	$S$
100	2272	2257	276	16,61
	2259			$X + 1S$
	2234			2273,61
	2246			$X - 1S$
	2272			2240,39

5000 ciclos de carga				
Esfuerzo (kPa)	Smix Ajustado (MPa)	$X$	$S^2$	$S$
100	1932	1906	278	16,68
	1910			$X + 1S$
	1891			1922,68
	1907			$X - 1S$
	1892			1889,32

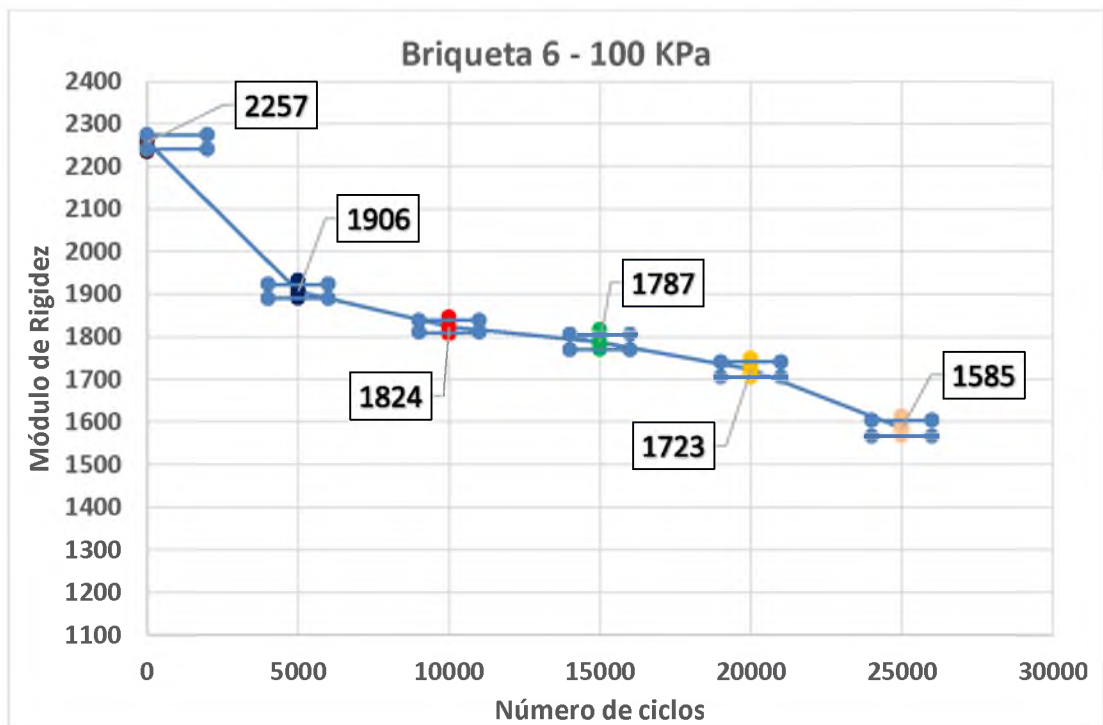
10000 ciclos de carga				
Esfuerzo (kPa)	Smix Ajustado (MPa)	$X$	$S^2$	$S$
100	1819	1824	198	14,06
	1824			$X + 1S$
	1825			1838,06
	1845			$X - 1S$
	1806			1809,94

15000 ciclos de carga				
Esfuerzo (kPa)	Smix Ajustado (MPa)	$X$	$S^2$	$S$
100	1817	1787	316	17,78
	1782			$X + 1S$
	1781			1804,78
	1770			$X - 1S$
	1783			1769,22

20000 ciclos de carga				
Esfuerzo (kPa)	Smix Ajustado (MPa)	$X$	$S^2$	$S$
100	1749	1723	303	17,40
	1733			$X + 1S$
	1715			1740,40
	1716			$X - 1S$
	1705			1705,60

25000 ciclos de carga				
Esfuerzo (kPa)	Smix Ajustado (MPa)	$X$	$S^2$	$S$
100	1580	1585	339	18,42
	1613			$X + 1S$
	1594			1603,42
	1573			$X - 1S$
	1567			1566,58

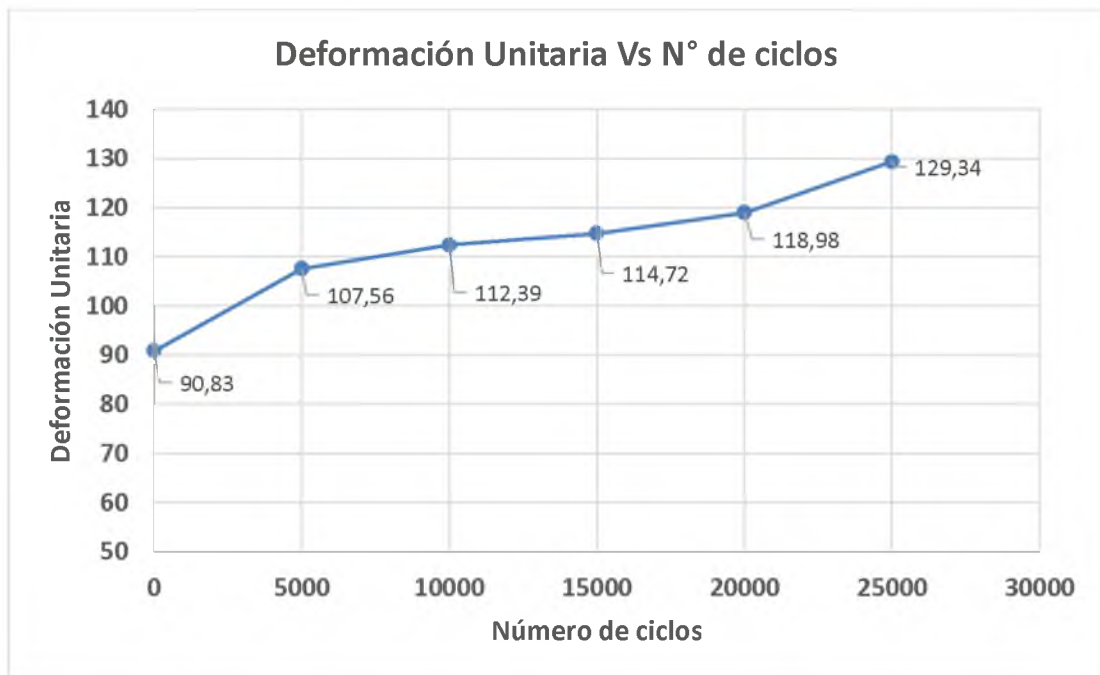
### Módulo Vs Número de ciclos



### Deformación unitaria

Nº de ciclos	Deformación Unitaria ( $\mu$ strain)
0	90,83
5000	107,56
10000	112,39
15000	114,72
20000	118,98
25000	129,34

### Deformación Vs Número de ciclos



## ANEXO 15: Ensayos en briqueta 10 con esfuerzo de 100 KPa

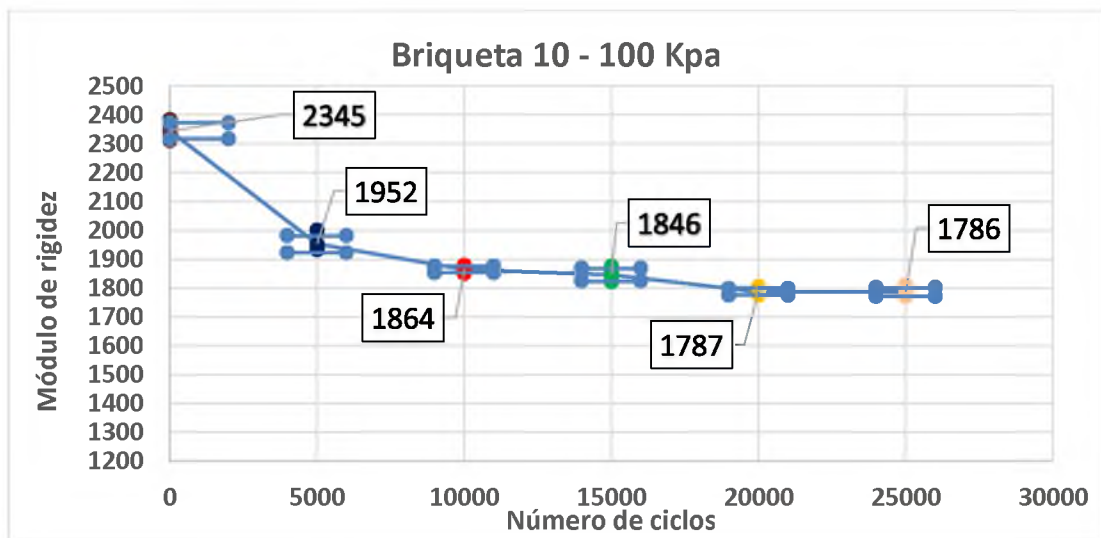
### Media, varianza y desviación estándar del módulo de rigidez

0 ciclos de carga				
Esfuerzo (kPa)	Smix Ajustado (MPa)	$X$	$S^2$	$S$
100	2311	2345	774	27,81
	2384			$X + 1S$
	2359			2372,81
	2331			$X - 1S$
	2340			2317,19

5000 ciclos de carga				
Esfuerzo (kPa)	Smix Ajustado (MPa)	$X$	$S^2$	$S$
100	2001	1952	831	28,82
	1933			$X + 1S$
	1941			1980,82
	1931			$X - 1S$
	1951			1923,18
10000 ciclos de carga				
Esfuerzo (kPa)	Smix Ajustado (MPa)	$X$	$S^2$	$S$
100	1875	1864	143	11,95
	1878			$X + 1S$
	1850			1875,95
	1857			$X - 1S$
	1861			1852,05
15000 ciclos de carga				
Esfuerzo (kPa)	Smix Ajustado (MPa)	$X$	$S^2$	$S$
100	1852	1846	474	21,78
	1875			$X + 1S$
	1827			1867,78
	1852			$X - 1S$
	1821			1824,22

20000 ciclos de carga				
Esfuerzo (kPa)	Smix Ajustado (MPa)	$X$	$S^2$	$S$
100	1794	1787	143	11,97
	1776			$X + 1S$
	1775			1798,97
	1803			$X - 1S$
	1789			1775,03
25000 ciclos de carga				
Esfuerzo (kPa)	Smix Ajustado (MPa)	$X$	$S^2$	$S$
100	1810	1786	233	15,25
	1777			$X + 1S$
	1770			1801,25
	1783			$X - 1S$
	1789			1770,75

### Módulo Vs Número de ciclos

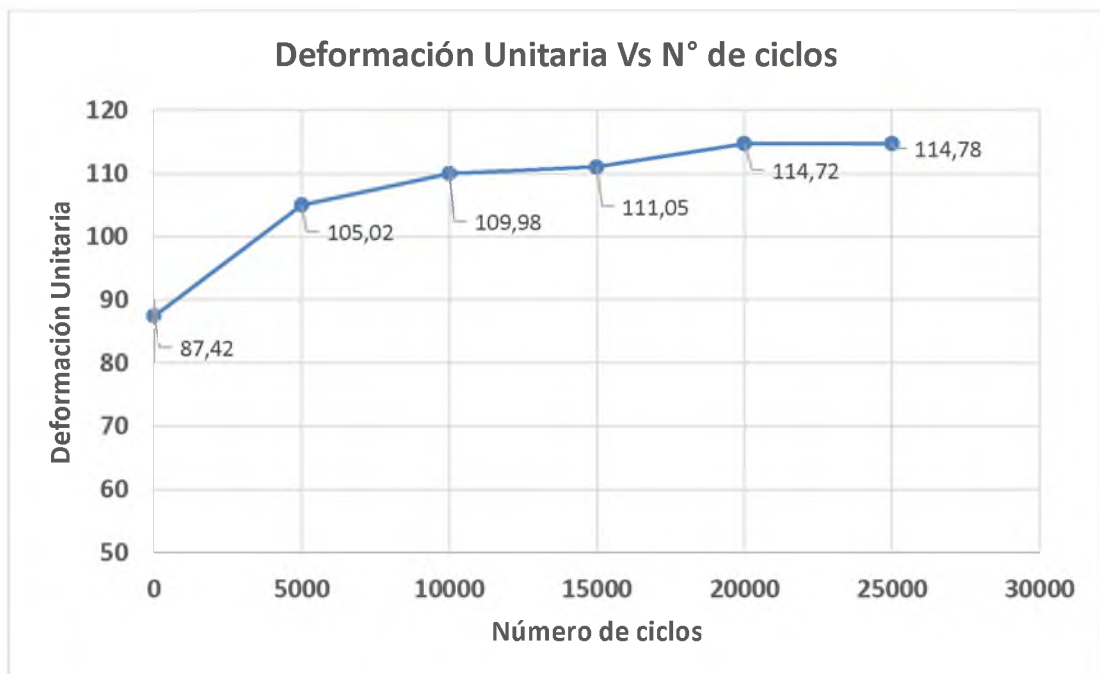




### Deformación unitaria

N° de ciclos	Deformación Unitaria ( $\mu$ strain)
0	87,42
5000	105,02
10000	109,98
15000	111,05
20000	114,72
25000	114,78

### Deformación Vs Número de ciclos





**Presidencia  
de la República  
del Ecuador**



**Plan Nacional  
de Ciencia, Tecnología,  
Innovación y Saberes**



**SENESCYT**  
Secretaría Nacional de Educación Superior,  
Ciencia, Tecnología e Innovación

## **DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN**

Yo, **FRANCISCO JAVIER VÉLEZ VERA**, con C.C: # 0922054895 autor del trabajo de titulación: **ESTUDIO PARA LA MEDICIÓN DEL LÍMITE DE DURABILIDAD (ENDURANCE LIMIT) EN LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS MEDIANTE EL ENSAYO DE FATIGA POR TRACCIÓN INDIRECTA**, previo a la obtención del título de **INGENIERO CIVIL** en la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.

1.- Declaro tener pleno conocimiento de la obligación que tienen las instituciones de educación superior, de conformidad con el Artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior, de entregar a la SENESCYT en formato digital una copia del referido trabajo de titulación para que sea integrado al Sistema Nacional de Información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública respetando los derechos de autor.

2.- Autorizo a la SENESCYT a tener una copia del referido trabajo de titulación, con el propósito de generar un repositorio que democratice la información, respetando las políticas de propiedad intelectual vigentes.

Guayaquil, 25 de marzo del 2016

f.

Nombre: **FRANCISCO JAVIER VÉLEZ VERA**  
C.C: 0922054895



Presidencia  
de la República  
del Ecuador



Plan Nacional  
de Ciencia, Tecnología,  
Innovación y Saberes



SENESCYT  
Secretaría Nacional de Educación Superior,  
Ciencia, Tecnología e Innovación

## **REPOSITORIO NACIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA**

### **FICHA DE REGISTRO DE TESIS/TRABAJO DE TITULACIÓN**

<b>TÍTULO Y SUBTÍTULO:</b>	ESTUDIO PARA LA MEDICIÓN DEL LÍMITE DE DURABILIDAD (ENDURANCE LIMIT) EN LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS MEDIANTE EL ENSAYO DE FATIGA POR TRACCIÓN INDIRECTA.		
<b>AUTOR(ES)</b>	VÉLEZ VERA, FRANCISCO JAVIER		
<b>REVISOR(ES)/TUTOR(ES)</b>	ING. GARCÍA CAPUTI, GUSTAVO		
<b>INSTITUCIÓN:</b>	UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL		
<b>FACULTAD:</b>	FACULTAD DE INGENIERÍA		
<b>CARRERA:</b>	INGENIERÍA CIVIL		
<b>TÍTULO OBTENIDO:</b>	INGENIERO CIVIL		
<b>FECHA DE PUBLICACIÓN:</b>	29 DE FEBRERO DEL 2016	<b>NO. DE PÁGINAS:</b>	137
<b>ÁREAS TEMÁTICAS:</b>	PAVIMENTOS		
<b>PALABRAS CLAVES/ KEYWORDS:</b>	LÍMITE DE DURABILIDAD, DEFORMACIÓN UNITARIA, FATIGA, TRACCIÓN INDIRECTA, MÓDULO DE RIGIDEZ, ESFUERZO.		
<b>RESUMEN/ABSTRACT</b>	<p>En la actualidad los pavimentos asfálticos tienen fallas por fatiga el cual lo controlan con espesores gruesos pero esto no es la manera más óptima de control este problema de fatiga.</p> <p>Este trabajo plantea estudiar la medición del límite de durabilidad en las mezclas asfálticas mediante el ensayo de fatiga por tracción indirecta, con solo un tipo de mezcla para mediante el ensayo de fatiga obtener valores de módulo de rigidez y deformación.</p> <p>Mediante las pruebas se definieron a que niveles de deformación unitaria se comienzan a presentar macro fisuras en la mezcla asfálticas bajo diferentes niveles de esfuerzo y compararlos.</p> <p>Toda la investigación se la realizo con el equipo N.A.T. facilitado por la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil en la cual se realizaron todos los ensayos de fatiga por tracción indirecta.</p>		
<b>ADJUNTO PDF:</b>	<input checked="" type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO	
<b>CONTACTO CON AUTOR/ES:</b>	<b>Teléfono:</b> +593- 993063631	<b>E-mail:</b> fco_velez25@hotmail.com	
<b>CONTACTO CON LA INSTITUCIÓN:</b>	<b>Nombre:</b> ING. GARCÍA CAPUTI, GUSTAVO		
	<b>Teléfono:</b> +593-4-202763		
	<b>E-mail:</b> gustavo.garcia@cu.uscg.edu.ec		

#### **SECCIÓN PARA USO DE BIBLIOTECA**

<b>Nº. DE REGISTRO (en base a datos):</b>	
<b>Nº. DE CLASIFICACIÓN:</b>	
<b>DIRECCIÓN URL (tesis en la web):</b>	