

**LA INFLUENCIA DE LA ARENA TRITURADA EN LA RESISTENCIA DE LA
MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE CON GRADACIÓN MDC2 INVIAS
(SEGUNDA PARTE)**

**MARIA CLARA POTES MAZUERA
NANCY BIBIANA SEPÚLVEDA OSPINA**

**Trabajo de Grado para optar por el Título de Especialistas en Vías y
Transporte**

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
SEDE MANIZALES
Mayo de 2006**

**LA INFLUENCIA DE LA ARENA TRITURADA EN LA RESISTENCIA DE LA
MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE CON GRADACIÓN MDC2 INVIAS
(SEGUNDA PARTE)**

**MARIA CLARA POTES MAZUERA
NANCY BIBIANA SEPÚLVEDA OSPINA**

**Modalidad:
Auxiliares de Investigación**

**Director:
LUIS CARLOS VÁSQUEZ TORRES
Ingeniero Civil**

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
SEDE MANIZALES
Mayo de 2006**

RESUMEN

El desempeño de los pavimentos de concreto asfáltico depende de las propiedades y proporciones de sus principales componentes como lo son los agregados, el cemento asfáltico y el volumen de vacíos.

Este trabajo contiene el estudio realizado a la variación del módulo de una mezcla asfáltica MDC2 INVIAS, según el porcentaje de trituración de la arena, mediante la realización de ensayos de Tensión Indirecta y de Carga Dinámica Uniaxial de Flujo o Creep.

Se elaboraron 33 briquetas variando su porcentaje de arena de trituración y de arena natural, desde un 100% de arena triturada hasta un 0%. A las 33 briquetas se les realizaron los ensayos de Tensión Indirecta a tres temperaturas de 20°C, 25°C y 30°C, y de Carga Dinámica Uniaxial de Flujo o Creep a una sola temperatura de 30°C.

ABSTRACT

Asphalt concrete pavements performance depends on its principal constitutive material's properties and proportions, as the aggregates asphalt and air contents.

This work is a study made to the variation that offers an Asphalt Mixture's (MDC2 INVIAS), modulus with respect to the percentage of crushed sand, by means of the accomplishment of the Indirect Tension and Creep tests.

They were elaborated 33 briquetts, changing the percentage of crushed and natural sand, from 100% to 0% of crushed sand.

Both the Indirect Tension Test and Creep Test were made to the 33 briquetts, the first at three temperatures of 20°C, 25°C and 30°C, and the second at a temperature of 30°C.

TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN.....	1
2	ANTECEDENTES.....	2
3	DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.....	4
4	JUSTIFICACIÓN.....	6
5	OBJETIVOS.....	7
5.1	Objetivo General.....	7
5.2	Objetivos Específicos	7
6	ALCANCE.....	8
7	MARCO REFERENCIAL	10
7.1	Sistema SUPERPAVE:.....	10
7.2	Deformación Permanente:.....	12
7.3	Ensayo de Tensión Indirecta:	13
7.4	Ensayo de Carga Dinámica Uniaxial de Flujo o CREEP:	14
7.4.1	Verificación del ensayo de Creep:.....	16
7.5	Equipo UTM (Universal Testing Machine):	17
7.5.1	Tensión Indirecta:.....	17
7.5.2	Ensayo de Carga Dinámica Uniaxial de Flujo o Creep:.....	19
8	METODOLOGÍA.....	21
8.1	Obtención de Materiales:.....	21
8.2	Descripción de los Ensayos Realizados:	21
8.2.1	Análisis Granulométrico:.....	21
8.2.2	Peso Específico y Absorción de Agregados Finos:	21
8.2.3	Peso Específico y Absorción de Agregados Gruesos:	22

8.2.4	Contenido de Vacíos de la Fracción Fina:	23
8.2.5	Elaboración de Briquetas:	23
	Ensayos Realizados a las Briquetas:.....	24
8.2.6	24
	Ensayo de Tensión Indirecta:.....	24
8.2.6.1	24
8.2.6.2	Ensayo de Carga Dinámica Uniaxial de Flujo o CREEP: .	25
8.2.6.3	Ensayo de Contenido de Vacíos:	26
9	RECOPILOACIÓN Y PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN	27
9.1	Generalidades	27
9.2	Resultados de los Ensayos Realizados.....	27
9.2.1	Materiales Granulares:	27
9.2.1.1	Peso Específico de la Arena:	27
9.2.1.2	Peso Específico del Agregado Grueso:.....	28
9.3	Briquetas:	28
9.3.1	Peso Específico Bulk:.....	28
9.3.2	Contenido de Vacíos de las Briquetas:.....	29
9.3.3	Ensayo de Tensión Indirecta (20°):	32
9.3.4	Ensayo de Tensión Indirecta (25°):	34
9.3.5	Ensayo de Tensión Indirecta (30°):	36
9.3.6	Módulos de Tensión Indirecta a Diferentes Temperaturas:	38
9.3.7	Resultados del Ensayo de Carga Dinámica Uniaxial o Creep: 40	
10	CONCLUSIONES	45
11	BIBLIOGRAFÍA	47

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Pesos de los materiales (gr) para la gradación MDC2.....	24
Tabla 2. Peso Específico de la Arena.....	27
Tabla 3. Peso Específico del Agregado Grueso	28
Tabla 4. Peso Específico Bulk	29
Tabla 5. Contenido de Vacíos de las Briquetas	31
Tabla 6. Ensayo de Tensión Indirecta (20°).....	33
Tabla 7. Ensayo de Tensión Indirecta (25°).....	35
Tabla 8. Ensayo de Tensión Indirecta (30°).....	37
Tabla 9. Módulos de Tensión Indirecta a Diferentes Temperaturas.....	39
Tabla 10. Resultados del Ensayo de Carga Dinámica Uniaxial o CREEP	41

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Briqueta de Control	19
Figura 2. Montaje Briqueta para el Ensayo Creep	20
Figura 3. Contenido de Vacíos Vs. Porcentaje de Trituración	31
Figura 4. Módulo de Tensión Indirecta Vs Porcentaje de Trituración (20°) ...	33
Figura 5. Módulo de Tensión Indirecta Vs Porcentaje de Trituración (25°) ...	35
Figura 6. Módulo de tensión Indirecta Vs. Porcentaje de Trituración (30°) ...	37
Figura 7. Módulo de Tensión Indirecta Vs. Temperatura	39
Figura 8. Módulos de Tensión Vs. Temperatura	40
Figura 9. Módulo Resiliente Vs. Deformación Resiliente	42
Figura 10. Creep Stiffness Vs. Deformación Resiliente	42
Figura 11. Módulo Resiliente Vs. Porcentaje de Trituración	43
Figura 12. Deformación Acumulada Vs. Porcentaje de Trituración.....	43
Figura 13. Deformación Acumulada (Promedio) Vs. Porcentaje de Trituración	44

1 INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de grado es la continuación de la investigación realizada en el año 2005 por las Ingenieras Diana Mercedes Castaño Martínez Y Lina María Ochoa Lozano, como parte del estudio que adelanta el Ingeniero Luis Carlos Vásquez Torres.

Éste contiene el estudio realizado a la variación del modulo de una mezcla asfáltica MDC2 INVIAS, según el porcentaje de trituración de la arena, mediante la realización de los ensayos de Tensión Indirecta y de Carga Dinámica Uniaxial de Flujo o Creep.

2 ANTECEDENTES

Las especificaciones de construcción de 1970 del Ministerio de Obras Públicas vigentes para las obras públicas nacionales hasta el año 1996, establecen en su sección 23 CONCRETO ASFÁLTICO numeral 2.6 Agregado Fino que *“La porción de agregado que pasa el tamiz # 4 se denominará agregado fino y consistirá de arena natural, material de trituración o de una combinación de ambos”*. El Ministerio de Obras Públicas y Transportes fue sustituido en 1992 mediante el decreto 2171, por el Instituto Nacional de Vías (INVIAS) en la conservación y construcción de vías del orden nacional, instituto que publicó en 1996 unas nuevas normas de construcción que reemplazaron a las mencionadas del año 1970.

En las normas 400 y 450 de 1996 aparecía la exigencia de utilizar arenas trituradas en las mezclas asfálticas o una mezcla con arenas naturales estableciendo que en cada especificación se fijaría la composición *“El agregado fino estará constituido por arena de trituración o una mezcla de ella con arena natural. La proporción admisible de ésta última dentro del conjunto se encuentra definida en la respectiva especificación”*.

En el 2003 éstas normas fueron complementadas con la reglamentación de valores explícitos: *“El agregado fino deberá proceder en su totalidad de la trituración de piedra de cantera o de grava natural, o parcialmente de fuentes naturales de arena. La proporción de arena natural no podrá exceder del quince por ciento (15%) de la masa total del agregado combinado, cuando el*

tránsito de diseño sea superior a cinco millones ($>5 \times 10^6$) ejes equivalentes de 80 kN en el carril de diseño, ni exceder de veinticinco por ciento (25%) para tránsitos de menor intensidad. En todo caso, la proporción de agregado fino no triturado no podrá exceder la del agregado fino triturado”.

Además se reglamenta que los granos del agregado fino deberán ser duros, limpios y de superficie rugosa y angular y deberá estar exento de cualquier sustancia que impida la adhesión del asfalto.

3 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Las especificaciones de construcción vigentes en el momento, fueron publicadas por el Instituto Nacional de Vías (INVIAS) en el año 2003, dentro de las cuales en las normas 400 y 450 establecieron que las mezclas asfálticas debían contener un alto porcentaje de arena proveniente de la trituración, quitando casi por completo la presencia de arenas naturales en la mezcla.

El método de diseño Marshall para mezclas asfálticas es el establecido por las normas como el método de diseño de mezclas asfálticas en Colombia, método para el que éste requerimiento de trituración es completamente ajeno, además de no estar respaldado por alguna investigación conocida, y es proveniente del método de diseño SUPERPAVE, el cual tiene poca o ninguna aplicación en el país.

Por ésta razón se realizó una investigación al respecto en años pasados por las estudiantes de la Especialización en Vías y Transportes, Lina María Ochoa y Diana Mercedes Castaño.

Realizar ésta investigación sobre el proceso constructivo y el comportamiento directamente sobre la vía está fuera del alcance económico de un estudio académico, por lo que una forma es conocer si el mayor o menor porcentaje de arena de trituración presente en la mezcla tiene alguna influencia en la resistencia de las mezclas asfálticas.

Al evaluar la resistencia de mezclas asfálticas con diferentes porcentajes de arena triturada mediante los ensayos de tensión indirecta (BS 213-96) y por el “Método para la resistencia a la deformación permanente de mezclas asfálticas sujetas a una carga uniaxial inconfiada” (BS 185-1990) denominado “CREEP”, se podría obtener resultados que indiquen la posibilidad de tener un menor contenido de arena de trituración en las mezclas asfálticas sin esto afectar la calidad de las mismas o por el contrario ratificar la exigencia de un alto contenido de arena de trituración como lo especifican las normas.

La investigación anteriormente realizada no es suficiente para una recomendación adecuada, por lo que se le pretende dar continuación y así tener un estudio más completo sobre el tema.

Los resultados de ésta investigación pueden ser muy útiles para el sector público de la construcción, en especial para el INVIAS, ya que puede resultar en menores costos y una buena calidad en la construcción de las mezclas asfálticas.

En pocas palabras lo que se pretende es conocer como varía la resistencia de las mezclas asfálticas, con los diferentes porcentajes de arena de trituración y así obtener una combinación de porcentajes entre la arena triturada y arena sin trituración que de una alta resistencia a un menor costo.

4 JUSTIFICACIÓN

El desempeño de los pavimentos de concreto asfáltico depende de las propiedades y proporciones de sus principales componentes, como lo son los agregados, el cemento asfáltico y el volumen de vacíos.

El incremento de la resistencia de las mezclas asfálticas puede ser alcanzado a través de la exigencia de mejores propiedades para los agregados, como tamaño, forma, angulosidad y textura superficial de las partículas y granulometría.

Hasta el momento en Colombia solamente se ha realizado un estudio conocido sobre este tema, razón por la cual se pretende darle continuación mediante este trabajo de grado.

5 OBJETIVOS

5.1 Objetivo General

Encontrar la influencia de la arena triturada en la resistencia de la mezcla asfáltica en caliente con gradación MDC2 INVIAS.

5.2 Objetivos Específicos

- Elaborar 33 briquetas con diferentes porcentajes de arena pasante tamiz No. 8 y retenida en el tamiz No. 100 producto de la trituración.
- Realizar en las briquetas los ensayos de Tensión Indirecta (BS 213-96) a tres temperaturas (20, 25 y 30°C).
- Realizar el ensayo Método para la resistencia a la deformación permanente de mezclas asfálticas sujetas a una carga uniaxial inconfiada (BS 185-1990) (Creep) a una temperatura de 30°C o más.
- Determinar el contenido de vacíos en estado suelto de la fracción arena para las mezclas de material triturado y arena natural (C1252-98 ASTM).

6 ALCANCE

Establecer la influencia de la arena triturada en los agregados de las mezclas asfálticas tipo MDC2 de las normas INVIAS en el módulo evaluado mediante los ensayos de Tensión Indirecta (BS 213-96) ejecutados en tres niveles de temperatura (20°, 25°, 30°) para considerar la influencia de la misma y el ensayo Método para la resistencia a la deformación permanente de mezclas asfálticas sujetas a una carga uniaxial inconfiada (BS 185-1990) a una temperatura de 30°C o mayor.

Se realizarán las briquetas con agregados obtenidos de la cantera de Combia y Agregados el Cairo y asfalto obtenido de la Agregados El Cairo y se empleará el diseño de la mezcla utilizado en la primera parte de esta investigación realizada por las ingenieras Lina María Ochoa y Diana Mercedes Castaño para la cantidad de asfalto y temperaturas de compactación.

Las labores realizadas serán como auxiliares de investigación colaborando en la realización de ensayos, recolección de datos y análisis primario de la información producida, los cuales harán parte de la investigación que adelanta el Ingeniero Luís Carlos Vásquez Torres.

Se empleará el ensayo para determinar el contenido de vacíos en estado suelto de la fracción arena para las mezclas de material triturado y arena

natural (C1252-98 ASTM) a las muestras de arena con los porcentajes de arena triturada y natural empleados en las gradaciones de las briquetas.

7 MARCO REFERENCIAL

En la última década ha tomado gran importancia el estudio de los materiales que componen los pavimentos debido a la necesidad de conocer los factores que influyen en éstos ocasionando daños que se podrían prevenir de tener estudios más detallados.

Uno de los factores que se ha estudiado especialmente desde la concepción del sistema SUPERPAVE es la influencia de la arena triturada en la resistencia del pavimento.

7.1 Sistema SUPERPAVE:

Un producto del Programa Estratégico de Investigación de Carreteras, SHRP, (Strategic Highway Research Program) fue el sistema de diseño de mezcla asfáltica en caliente (HMA). SUPERPAVE es un acrónimo del Superior Performing Asphalt Pavements. El sistema incluye la especificación de un ligante asfáltico que utiliza un nuevo procedimiento de ensayo de la propiedad física del ligante; una serie de ensayos y especificaciones para agregados (áridos) y un sistema de diseño de mezcla asfáltica en caliente (HMA).

Los ensayos que se realizan en cumplimiento con las nuevas especificaciones SHRP contenidas en el SUPERPAVE se basan en medir propiedades fundamentales de los asfaltos, esto es aquellas que pueden relacionar tensiones y deformaciones en el material. Los módulos complejo y

de rigidez del asfalto son medidos (no estimados) a las temperaturas de ensayo. Así mismo la deformación a baja temperatura y la viscosidad rotacional a alta temperatura son parte del conjunto de ensayos utilizados.

Por otro lado, los áridos a emplear deben reunir una serie de requisitos, unos obligatorios y otros opcionales. Entre los opcionales se encuentran:

- Angularidad de los elementos pétreos gruesos: caras de fractura para los elementos retenidos por el tamiz de 4.75 mm.
- Angularidad de los elementos finos: ensayo de contenido de vacíos de una muestra no compactada del material.
- Forma de las partículas: lascas y agujas.
- Calidad de los finos: equivalente de arena.
- Resistencia al desgaste: Máquina de Los Ángeles.
- Resistencia a los agentes climáticos: resistencia a los sulfatos.

La angularidad es evaluada colocando un requerimiento, que la angularidad del agregado grueso tenga un alto porcentaje de caras trituradas y requiriendo también agregados finos triturados, estos evaluados por el ensayo de angularidad de los finos. Los efectos destructivos del proceso de construcción y los efectos del clima son evaluados por medio del uso del ensayo de abrasión en la Máquina de Los Ángeles y del ensayo de durabilidad del Sulfato de Sodio.

La curva granulométrica se debe situar dentro de un huso definido únicamente mediante cuatro puntos: tamaño máximo (pasa 100%), tamaño máximo normal (primer tamiz que retiene, con un máximo del 10%), finos (pasa por el tamiz 2,36 Mm.) y polvo mineral (pasa por el tamiz 75 um). El sistema SUPERPAVE establece cinco usos granulométricos

correspondientes a tamaños máximos nominales de 37.5 mm, 25 mm, 19 mm, 12.5 mm y 9.5 mm.

7.2 Deformación Permanente:

Uno de los principales problemas en el desempeño de los pavimentos es la falta de resistencia a la deformación plástica, ésta es una consecuencia directa de la formación de deterioros y ahuellamientos, en las estructuras de las vías, que reduce su vida en servicio.

Una débil mezcla acumulará pequeñas pero permanentes deformaciones por cada vehículo que pase, formando un ahuellamiento caracterizado por un movimiento hacia abajo y lateral de la superficie del pavimento.

Para obtener una mezcla asfáltica en caliente que tenga una suficiente resistencia al corte es necesario considerar la contribución de los agregados a la resistencia de la mezcla asfáltica. Se cree que una de las formas de mejorar ésta es utilizando agregados con un alto de grado de fricción interna, es decir seleccionando un tipo de material de forma cúbica, con una textura superficial irregular y cuya gradación desarrolle un contacto cercano de partícula a partícula, esto se consigue con agregados triturados.

La resistencia de las mezclas asfálticas en caliente se relaciona directamente con la resistencia de los agregados, la cual depende en gran parte de los granos de la partícula o del proceso de trituración y explotación.

7.3 Ensayo de Tensión Indirecta:

El ensayo de Tensión Indirecta se emplea para evaluar el comportamiento relativo de las mezclas asfálticas para el diseño de pavimentos obteniéndose el valor del módulo resiliente, este se puede emplear para evaluar la calidad relativa de los materiales, así como generar datos de entrada para el diseño, la evaluación y el análisis de pavimentos.

El módulo resiliente es el módulo elástico utilizado en la teoría elástica. Aunque la mayoría de los materiales que componen el pavimento no son elásticos puesto que presentan alguna deformación permanente después de la aplicación de cada carga, si la carga es pequeña comparada con la fuerza del material y se repite en un número grande de aplicaciones, la deformación bajo cada repetición de carga es casi completamente recuperable proporcional a la carga y puede considerarse como elástica.

También puede emplearse para estudiar efectos de temperatura, rata de carga, períodos de reposo, etc. Puesto que el procedimiento es no destructivo los ensayos pueden repetirse sobre un espécimen para evaluar su condición en lo que respecta a temperatura y humedad. Este ensayo para la caracterización y diseño de los pavimentos está regido por la norma I.N.V.E – 749 del INVIAS.

La realización de dicho ensayo consiste en aplicar una carga repetida a compresión sobre el espécimen a ensayar, que actúa de forma paralela y a lo largo del plano diametral vertical del espécimen. Esta configuración desarrolla unos esfuerzos a tensión relativamente uniformes que causan la falla a lo largo de dicho plano.

Ensayo de Carga Dinámica Uniaxial de Flujo o CREEP:

Este ensayo se utiliza principalmente para determinar las propiedades visco elásticas lineales de los materiales que componen los pavimentos. En el ensayo un esfuerzo constante σ_0 es aplicado al espécimen y se mide el resultado de la deformación dependiente del tiempo.

En el análisis visco elástico de pavimentos, la caracterización resultante es usada como entrada similar al módulo elástico para modelos lineales elásticos. Sin embargo en lugar de usar un módulo, el valor del comportamiento del Creep es usado para expresar la relación entre esfuerzo, deformación y tiempo. El comportamiento está dado por:

$$J(t) = \frac{\epsilon_t}{\sigma_0}$$

Para materiales que exhiben el comportamiento viscoso, la deformación se incrementa con el tiempo bajo la acción del esfuerzo constante. Por lo tanto $J(t)$ se incrementa con el tiempo. Para un material elástico $J(t)$ es el inverso del módulo.

El ensayo de Creep puede ser usado también para estimar la profundidad del ahuellamiento causado por la deformación permanente de la capa asfáltica. Van de Loo desarrolló un método para calcular la profundidad de la huella que utiliza la siguiente formula:

$$\text{Rut depth} = C m h l \left(\frac{\sigma_{av}}{S_{mix}} \right)$$

Donde C_m es un factor de corrección por efecto dinámico con un rango de valores entre 1 y 2 que depende del tipo de mezcla, h_1 es el espesor de la capa asfáltica y S_{mix} es el modulo de rigidez de la mezcla. Se debe hacer una modificación en el valor de S_{mix} debido a que se obtiene del ensayo de Creep que incluye componentes elásticos y viscosos, mientras la deformación permanente es causada sólo por componentes viscosos.

En 1983 Finn sugiere un procedimiento simplificado en el cual este valor se halla directamente del ensayo y se asume el valor de C_m como 1. Si el número de aplicaciones de carga es N entonces el tiempo de Creep en segundos correspondiente a este valor es $0.1N$ porque la duración de cada aplicación de carga es 0.1 segundos.

Cuando se desarrolla un ensayo de Creep el espécimen esta sujeto a un esfuerzo dado y a una temperatura que permanece constante durante el ensayo. Se verifica que la temperatura y los esfuerzos no varíen durante el ensayo monitoreándose constantemente. Se mide la deformación axial y se calcula la pendiente mínima de la deformación contra el número de ciclos de carga. Ésta pendiente también es llamada estado secundario, el cual ocurre después de que ha tomado lugar la densificación inicial.

La pendiente de la curva es también llamada rata de deformación. Una curva de Creep usualmente tiene tres diferentes secciones:

- SECCIÓN 1: La rata de deformación se estabiliza y luego decrece. (Estado primario o Creep transitorio).
- SECCIÓN 2: La curva es lineal, la rata de deformación es constante y mínima. (Estado secundario o Creep estable). Esta sección permite

estimar cuanto tiempo es necesario para que un componente alcance una cierta deformación.

- SECCIÓN 3: La rata de deformación se incrementa gradualmente mientras la muestra se fractura. (Creep terciario).

7.4.1 Verificación del ensayo de Creep:

Uno de los principales propósitos del ensayo ALF (Accelerated Loading Facility) era determinar si el ensayo de Creep utilizado clasifica correctamente el desarrollo del ahuellamiento de mezclas bajo la carga de los vehículos.

Los análisis de resultados del ensayo indicaron que:

- La clasificación del ensayo Creep de mezclas con la misma gradación pero diferente ligante concuerda con el ensayo ALF.
- Para mezclas con diferente gradación la clasificación del ensayo Creep no concuerda con el ALF.

Ya que un requerimiento crítico para un método de ensayo en un procedimiento de diseño de una mezcla es que es capaz de clasificar correctamente mezclas con diferentes gradaciones, este resultado generó dudas sobre la conveniencia de utilizar un ensayo de Creep como herramienta de diseño.

Una investigación de laboratorio posterior fue enfocada a tratar de determinar porque la clasificación de los dos ensayos era diferente. Las

conclusiones del estudio fue que la versión actual del ensayo dinámico de Creep presenta deficiencias que comprometen su uso como herramienta de diseño de mezclas. Estas deficiencias incluyen:

La clasificación de mezclas con diferentes gradaciones del ensayo Creep es diferente a la del ensayo ALF.

El ensayo de Creep puede indicar una mayor susceptibilidad de la deformación permanente ante el contenido de vacíos y su grado de compactación, que es el caso actual en campo.

El ensayo de Creep parece indicar que las mezclas con bajos contenidos de vacíos de aire (menos del 3%) pueden tener mayor resistencia al ahuellamiento que mezclas con contenidos de Vacíos superiores al 3%. Un conocimiento convencional sugiere lo opuesto: que es más factible que mezclas con contenidos de aire menores al 3% fallen rápidamente bajo las cargas vehiculares, debido a los efectos de la presión de poros.

Estas deficiencias pueden estar asociadas principalmente al uso de especímenes inconfiados en el ensayo Creep, resultando en un régimen de esfuerzos diferente al que se presenta en los pavimentos.

7.5 Equipo UTM (Universal Testing Machine):

7.5.1 Tensión Indirecta:

En el ensayo, una fuerza de carga diametral se aplica en forma de pulsos a un espécimen, midiéndose la deformación unitaria diametral horizontal

resultante a 90° de la fuerza aplicada. Debido a que no se mide la deformación unitaria en el eje, se asume el valor de la relación de Poisson como una constante para anular el valor por defecto de 0.35.

La secuencia del ensayo consiste en una aplicación de cinco pulsos de carga, durante los cuales el sistema automáticamente ajusta la magnitud de la fuerza para que la deformación unitaria horizontal diametral transitoria pico se alcance. Después son aplicados los cinco pulsos de carga del ensayo para la adquisición de datos.

El ensayo de los siguientes cálculos después de la aplicación de los cinco pulsos de carga:

- Módulo de rigidez del espécimen.
- Módulo de rigidez ajustado por temperatura y relación de área cargada.
- Tiempo de carga de pulso de fuerza, medido en fuerza cero.
- Tiempo de incremento del pulso de fuerza, medido desde fuerza cero al pico.
- Fuerza de carga pico.
- Deformación unitaria diametral horizontal transitoria pico del espécimen.
- Factor del área de carga.

Además utilizando los datos de los cinco pulsos se calculan los valores de la media, la desviación estándar y el coeficiente de variación.

Para caracterizar completamente un material como el concreto asfáltico, se deben tener al menos tres temperaturas de ensayo, en este caso se utilizaron 20, 25 y 30° .

En el ensayo con temperatura controlada, las temperaturas de la superficie y del núcleo del espécimen, se estiman por transductores insertados en un espécimen de control, y localizado cerca del espécimen de ensayo.



Figura 1. Briqueta de Control

7.5.2 Ensayo de Carga Dinámica Uniaxial de Flujo o Creep:

El ensayo inicialmente aplica un esfuerzo estático de condicionamiento al espécimen y mide el esfuerzo acumulado restante. La magnitud y la duración de la aplicación del esfuerzo de condicionamiento tienen valores por defecto de 10kPa y 600 segundos.

Luego del tiempo de condicionamiento, se programa un tiempo de 20 segundos en el cual el esfuerzo aplicado es cero. Una vez pasado el intervalo de tiempo, el espécimen es sujeto a pulsos repetidos de carga durante 1800 ciclos con un nivel de esfuerzo por defecto de 100kPa. Durante la aplicación de los pulsos de carga, se mide la deformación unitaria acumulada y es mostrada mediante una gráfica con ejes en escala lineal.

La deformación del espécimen se mide en el mismo eje que el esfuerzo aplicado durante el período de condicionamiento y la aplicación de los pulsos de carga del ensayo. La fuerza aplicada es de ciclo abierto controlado de forma rectangular esencialmente.



Figura 2. Montaje Briqueta para el Ensayo Creep

8 METODOLOGÍA

8.1 Obtención de Materiales:

Los materiales utilizados para el desarrollo de éste trabajo de grado fueron obtenidos de Agregados el Cairo: La arena natural, el asfalto y la fracción fina y de la Cantera de Combia: La fracción gruesa triturada.

Agregados el Cairo se encuentra ubicado el la vía La Virginia - Viterbo, y la Cantera de Combia en la ciudad de Pereira.

8.2 Descripción de los Ensayos Realizados:

8.2.1 Análisis Granulométrico:

Inicialmente se separaron por tamaños los materiales mediante tamizado tanto de la fracción gruesa como de la fracción fina (arena natural y triturada).

8.2.2 Peso Específico y Absorción de Agregados Finos:

Generalmente se utiliza el desplazamiento del agua para medir el volumen total de las formas irregulares que componen la muestra de ensayo. El ensayo es en cierto grado indirecto por el problema mayor de remover el aire que pueda quedar atrapado en el volumen de suelo, como el aire ocupa un

volumen de peso despreciable, el aire atrapado reducirá el valor calculado del peso específico a menos que sea reducido.

El procedimiento a seguir se establece en la norma I.N.V.E – 222 del INVIAS que consiste en seguir los siguientes pasos:

Seleccionar una cantidad de material aproximada de 1000 gramos.

Secar al horno a una temperatura entre 100-110°C.

Dejar enfriar por tres horas.

Cubrir la mezcla completamente con agua por 24 ± 4 horas.

Remover el agua con cuidado de no perder los finos.

Extender el material sobre una bandeja y secarlo con aire caliente hasta que las partículas fluyan libremente. Cuando se observa que se está llegando a esta condición, se coloca una parte del material en el molde cónico apisonando con 25 golpes de una varilla.

Se levanta el molde en forma vertical, si la muestra está húmeda conservará su forma, por el contrario si ya está en condición seca se produce desmoronamiento.

Una vez el material alcance la condición seca, se introduce en el picnómetro 500 gramos de agregado fino y se le añade agua hasta un 90% de su capacidad, eliminando el aire agitando e invirtiendo el picnómetro.

8.2.3 Peso Específico y Absorción de Agregados Gruesos:

El procedimiento a seguir se establece en la norma I.N.V.E – 223 del INVIAS que consiste en seguir los siguientes pasos:

Lavar el material hasta eliminar el polvo.

Dejar la muestra inmersa en agua por 24 horas.

Secar las partículas frotándolas con un paño absorbente hasta eliminar el agua superficial visible.

Pesar la muestra obteniéndose el peso saturado superficialmente seco.

Colocar el material en una canastilla metálica y determinar el peso sumergido.

Secar la muestra en el horno y pesar para obtener el peso seco.

8.2.4 Contenido de Vacíos de la Fracción Fina:

La angularidad del agregado fino es evaluada a través de la determinación de vacíos en un material no compactado, cuando una mezcla ha fluido de una altura ya establecida dentro de un cilindro de volumen conocido (100 cm^3).

8.2.5 Elaboración de Briquetas:

Después de separar el agregado grueso y el fino por tamaños mediante tamizado y de realizar los ensayos anteriores, se realizó el diseño de la mezcla mediante el método Marshall, utilizando la granulometría media especificada por la Norma 450 del INVIAS para una mezcla MDC2, el contenido de asfalto fue del 5% pues es el mismo porcentaje utilizado en el diseño de la mezcla de la primera parte de esta investigación realizada por las ingenieras Lina María Ochoa y Diana Mercedes Castaño.

La dosificación se realizó al peso con los siguientes valores:

	100%	90%	80%	70%	60%	50%	40%	30%	20%	10%	0%
1/2	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120
3/8	132	132	132	132	132	132	132	132	132	132	132
No. 4	234	234	234	234	234	234	234	234	234	234	234
No.10	174 0	156.6 17.4	139.2 34.8	121.8 52.2	104.4 69.6	87 87	69.6 104.4	52.2 121.8	34.8 139.2	17.4 156.6	0 174
No.40	270 0	243 27	216 54	189 81	162 108	15 135	108 162	81 189	54 216	27 243	0 270
No.80	120 0	108 12	96 24	84 36	72 48	60 60	48 72	36 84	24 96	12 108	0 120
No.200	78	78	78	78	78	78	78	78	78	78	78
Pasa200	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72

Tabla 1. Pesos de los materiales (gr) para la gradación MDC2

Nota: Los valores en rojo son los pesos de la arena natural.

8.2.6 Ensayos Realizados a las Briquetas:

Los ensayos de Tensión Indirecta a 20°, 25° y 30°C y de Carga Dinámica Uniaxial de Flujo o Creep a 30°C fueron realizados en las 33 briquetas.

8.2.6.1 Ensayo de Tensión Indirecta:

En general los especímenes deben estar como mínimo 24 horas a la temperatura de ensayo. Se debe realizar un chequeo constante de esta temperatura.

Una vez controlada la temperatura se coloca la briqueta libremente en el soporte entre las platinas de carga y se localiza este en la base del marco, se sube el eje de carga y se asegura con los miembros de soporte roscados del marco para conseguir la trayectoria libre necesaria. Se coloca la platina de carga superior y se baja el soporte, se ajustan los transductores entre menos cien y más cien y por último se desciende el eje de carga para colocar el extremo esférico sobre el orificio dispuesto para tal fin en la platina.

Después de este procedimiento se puede dar inicio al ajuste de fuerza que consiste en la aplicación de pulsos de carga, éstos pueden desajustar los transductores y muestran en pantalla sus valores para una nueva calibración, luego de este procedimiento se realiza el ensayo definitivo.

8.2.6.2 Ensayo de Carga Dinámica Uniaxial de Flujo o CREEP:

El soporte consta de dos platinas de carga una superior y otra inferior, las cuales distribuyen la carga uniformemente en los extremos del espécimen. Se ubica el espécimen centrado en la platina inferior del soporte y se coloca la platina superior igualmente centrada. Se baja el eje de carga hasta que asiente completamente en el orificio en la platina superior. Los transductores están montados en unas varillas que se apoyan adheridas a la placa de base del soporte de carga, con el extremo de sondeo en la superficie de la placa superior, éstos se deben ajustar hasta que se encuentren entre los valores de menos cien y más cien. Posteriormente se puede dar inicio al ensayo que realiza un ajuste de fuerza los primeros diez minutos y luego continúa con el ensayo.

Al igual que en el ensayo de Tensión Indirecta se debe conservar los especímenes por 24 horas como mínimo a la temperatura de ensayo y se debe chequear constantemente.

8.2.6.3 Ensayo de Contenido de Vacíos:

Consiste en pesar las briquetas en el aire, posteriormente se parafina las superficies porosas para evitar que el agua penetre hasta el interior de la briqueta, se pesan nuevamente registrándose el peso de la briqueta más 7 canastilla ubicada en un recipiente con agua para tomar el peso sumergido.

9 RECOPIACIÓN Y PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

9.1 Generalidades

El trabajo como auxiliares de investigación, fue la preparación de las muestras, elaboración de las briquetas y la realización de los ensayos con su respectiva interpretación de los resultados.

Se elaboraron 33 briquetas, a las cuales se les realizó el ensayo de Peso Específico Bulk, el ensayo de Tensión Indirecta a 20°, 25°, 30° de temperatura y el ensayo de Carga Dinámica Uniaxial de Flujo ó Creep a 30ª de temperatura.

9.2 Resultados de los Ensayos Realizados

9.2.1 Materiales Granulares:

9.2.1.1 Peso Específico de la Arena:

ARENA	PESO ESPECÍFICO BULK	
	1	2
Triturada (Cantera de Combia)	2.656	2.635
Natural (Agregados El Cairo)	2.596	2.577

Tabla 2. Peso Específico de la Arena

9.2.1.2 Peso Específico del Agregado Grueso:

AGREGADO GRUESO	PESO ESPECÍFICO BULK	
	1	2
Triturado (Cantera de Combia)	2.507	2.491

Tabla 3. Peso Específico del Agregado Grueso

9.3 Briquetas:

9.3.1 Peso Específico Bulk:

Briqueta No.	Peso briqueta seca sin parafina (g)	Peso briqueta seca más parafina (g)	Peso sumergido briqueta más parafina (g)	Volumen briqueta más parafina (cm3)	Peso parafina (g)	Volumen parafina (cm3)	Volumen briqueta (cm3)	Peso específico Bulk
1	1215.5	1219.9	703.7	516.2	4.4	4.9	511.3	2.377
2	1245.9	1252.4	716.4	536	6.5	7.2	528.8	2.356
3	1224.1	1231	710.2	520.8	6.9	7.7	513.1	2.386
4	1241.4	1248.1	702.1	546	6.7	7.4	538.6	2.305
5	1243.1		704.2					2.307
6	1249.1	1254.4	703.5	550.9	5.3	5.9	545	2.292
7	1227.7	1234.3	696.3	538	6.6	7.3	530.7	2.313
8	1254.3	2159.9	719.4	540.5	5.6	6.2	534.3	2.348
9	1241.4	1246.3	713.9	532.4	4.9	5.4	527	2.356
10	1225.4	1231.4	692.7	538.7	6	6.7	532	2.303
11	1255.9	1232.4	692.9	539.5	6.5	7.2	532.3	2.303
12	1259.2	1267.5	712.4	555.1	8.3	9.2	545.9	2.307
13	1236.7	1241.9	697	544.9	5.2	5.8	539.1	2.294
14	1248.4	1254.7	701.2	553.5	6.3	7	546.5	2.284
15	1235.3	1247.3	701	546.3	12	13.3	533	2.318

16	1236.4	1244.5	703.8	540.7	8.1	9	531.7	2.325
17	1240.8	1249.6	702.3	547.3	8.8	9.8	537.5	2.308
18	1231.5	1243.2	695.7	547.5	11.7	13	534.5	2.304
19	1240.5	1247.9	701.7	546.2	7.4	8.2	538	2.306
20	1237.5	1249.9	699.5	550.4	12.4	13.8	536.6	2.306
21	1224.8	1232.7	698.5	534.2	7.9	8.8	525.4	2.331
22	1251.1	1257.9	713.7	544.2	6.8	7.6	536.6	2.332
23	1236	1237.5	704.5	533	1.5	1.7	531.3	2.326
24	1244.4	1248.5	712	536.5	4.1	4.6	531.9	2.34
25	1249.4	1255.2	711.3	543.9	5.8	6.4	537.5	2.324
26	1246.6	1252.1	711.1	541	5.5	6.1	534.9	2.331
27	1241.7	1246.9	709.1	537.8	5.2	5.8	532.0	2.334
28	1245.7	1249.4	715.5	533.9	3.7	7.6	526.2	2.367
29	1237.3	1242	711.6	530.4	4.7	5.2	525.2	2.356
30	1240.9	1243.7	713.4	530.3	2.8	3.1	527.2	2.354
31	136.8	1241.7	713.9	527.8	4.9	5.4	522.4	2.368
32	1225.6	1234.4	704.1	530.3	8.8	9.8	520.5	2.355
33	1226.7	1232	707.2	524.8	5.3	5.9	518.9	2.364

Tabla 4. Peso Específico Bulk

9.3.2 Contenido de Vacíos de las Briquetas:

Gravedad Específica Arena Natural = 2.587 gr/cm^3

Gravedad Específica Arena Triturada = 2.646 gr/cm^3

Gravedad Específica Grava = 2.499 gr/cm^3

Contenido de Asfalto = 5%

Briqueta No.	% Grava	% Arena Triturada	% Arena Natural	Gravedad Especifica Ponderada Agregados	Densidad Bulk Briqueta	Contenido Vacíos
4	40.5	0	100	2.550	2.305	2.614
5	40.5	0	100	2.550	2.307	2.529
6	40.5	0	100	2.550	2.292	3.163
10	40.5	10	90	2.554	2.303	2.810
11	40.5	10	90	2.554	2.303	2.810
12	40.5	10	90	2.554	2.307	2.642
13	40.5	20	80	2.557	2.294	3.302
14	40.5	20	80	2.557	2.284	3.724
15	40.5	20	80	2.557	2.318	2.290
16	40.5	30	70	2.560	2.325	2.109
17	40.5	30	70	2.560	2.308	2.824
18	40.5	30	70	2.560	2.304	2.993
19	40.5	40	60	2.564	2.306	3.021
20	40.5	40	60	2.564	2.306	3.021
21	40.5	40	60	2.564	2.331	1.970
7	40.5	50	50	2.567	2.313	2.839
8	40.5	50	50	2.567	2.348	1.369
9	40.5	50	50	2.567	2.356	1.033
22	40.5	60	40	2.571	2.332	2.155
23	40.5	60	40	2.571	2.362	0.896
24	40.5	60	40	2.571	2.34	1.819
25	40.5	70	30	2.574	2.324	2.604
26	40.5	70	30	2.574	2.331	2.310
27	40.5	70	30	2.574	2.334	2.185
28	40.5	80	20	2.577	2.349	1.671
29	40.5	80	20	2.577	2.356	1.378
30	40.5	80	20	2.577	2.354	1.461
31	40.5	90	10	2.581	2.368	0.991
32	40.5	90	10	2.581	2.355	1.534
33	40.5	90	10	2.581	2.364	1.158
1	40.5	100	0	2.584	2.377	0.730

Briqueta No.	% Grava	% Arena Triturada	% Arena Natural	Gravedad Especifica Ponderada Agregados	Densidad Bulk Briqueta	Contenido Vacíos
2	40.5	100	0	2.584	2.356	1.607
3	40.5	100	0	2.584	2.386	0.354

Tabla 5. Contenido de Vacíos de las Briquetas

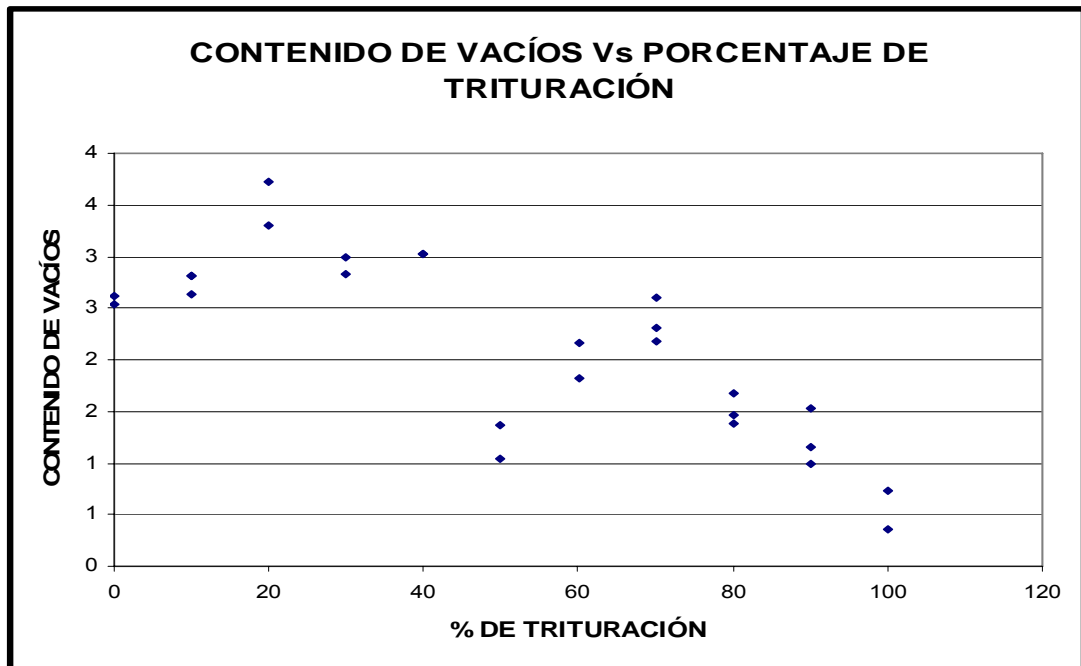


Figura 3. Contenido de Vacíos Vs. Porcentaje de Trituración

NOTA: Para realizar esta gráfica se eliminaron los valores atípicos.

9.3.3 Ensayo de Tensión Indirecta (20°):

Briqueta	% Triturado	Espesor	Temperatura			Módulo de tensión		
			Sin Girar	Girada	Media individual	Sin Girar	Girada	Media individual
4	0	6.7	20.35	20.35	20.35	2148	2115	2131.5
5	0	6.6	20.30	20.40	20.35	2039	2059	2049.0
6	0	6.6	20.25	20.25	20.25	2007	1876	1941.5
10	10	6.6	19.55	19.55	19.55	2851	2846	2848.5
11	10	6.6	19.60	19.65	19.63	3328	2894	3111.0
12	10	6.6	19.60	19.65	19.63	2643	2534	2588.5
13	20	6.6	19.50	19.55	19.53	2913	2817	2865.0
14	20	6.7	19.55	19.45	19.5	2981	2910	2945.5
15	20	6.6	19.45	19.50	19.48	2582	2717	2649.5
16	30	6.6	19.50	19.45	19.48	2705	2731	2718.0
17	30	6.7	19.40	19.50	19.45	2543	2772	2657.5
18	30	6.6	19.55	19.50	19.53	2280	1971	2125.5
19	40	6.67	19.55	19.50	19.53	2382	2507	2444.5
20	40	6.6	19.55	19.65	19.60	2938	2920	2929.0
21	40	6.6	19.60	19.70	19.65	2867	2764	2815.5
7	50	6.6	20.20	20.20	20.20	2831	3028	2929.5
8	50	6.6	20.25	20.15	20.20	3171	2893	3032.0
9	50	6.6	20.05	20.10	20.08	2725	2249	2487.0
22	60	6.6	19.70	19.80	19.75	2715	2656	2685.5
23	60	6.6	19.85	19.80	19.83	2679	2731	2705.0
24	60	6.6	19.95	19.95	19.95	2922	2422	2672.0
25	70	6.6	20.05	20.00	20.03	2343	2530	2436.5
26	70	6.6	20.10	20.05	20.08	3045	2992	3018.5
27	70	6.6	20.10	20.00	20.05	2594	2596	2595.0
28	80	6.6	20.00	20.10	20.05	3419	3168	3293.5
29	80	6.7	20.00	20.05	20.03	3326	2707	3016.5
30	80	6.6	20.00	20.00	20.00	2369	2225	2297.0
31	90	6.6	20.10	20.10	20.10	3004	2740	3004.0
32	90	6.6	20.00	20.00	20.00	3469	3555	3512.0

Briqueta	% Triturado	Espesor	Temperatura			Módulo de tensión		
			Sin Girar	Girada	Media individual	Sin Girar	Girada	Media individual
33	90	6.6	20.00	20.00	20.00	4129	3372	3750.5
1	100	6.3	20.45	20.40	20.43	2544	2348	2446.0
2	100	6.3	20.45	20.40	20.43	3508	3119	3313.5
3	100	6.3	20.40	20.30	20.35	4201	3749	3975.0

Tabla 6. Ensayo de Tensión Indirecta (20°)

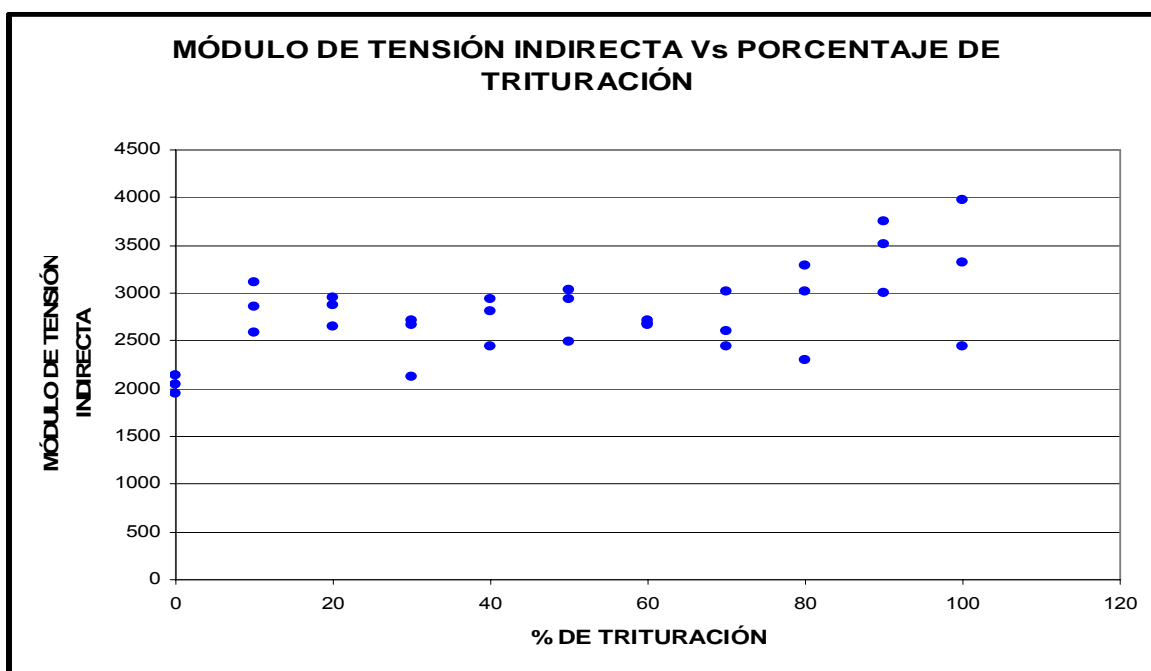


Figura 4. Módulo de Tensión Indirecta Vs Porcentaje de Trituración (20°)

9.3.4 Ensayo de Tensión Indirecta (25°):

Briqueta	% Triturado	Espesor	Temperatura			Módulo de tensión		
			Sin girar	Girada	Media individual	Sin girar	Girada	Media individual
4	0	6.7	24.65	24.65	24.65	1499	1470	1484.5
5	0	6.6	24.65	24.75	24.70	1342	1100	1221.0
6	0	6.6	24.70	24.65	24.68	1467	1466	1466.5
10	10	6.6	24.65	24.70	24.68	1397	1451	1424.0
11	10	6.6	24.70	24.75	24.73	1621	1779	1700.0
12	10	6.6	24.70	24.70	24.70	1464	1510	1487.0
13	20	6.6	24.70	24.75	24.73	1775	1640	1707.5
14	20	6.7	24.75	24.80	24.78	1681	1523	1602.0
15	20	6.6	21.20	22.05	21.63	2225	1784	2004.5
16	30	6.7	22.40	22.85	22.63	2308	2151	2229.5
17	30	6.6	25.50	25.45	25.48	1545	1443	1494.0
18	30	6.67	25.00	25.50	25.25	1345	1337	1341.0
19	40	6.6	25.50	25.45	25.48	1522	1294	1408.0
20	40	6.6	25.50	25.65	25.58	1796	1883	1839.5
21	40	6.6	25.60	25.65	25.63	1575	1472	1523.5
7	50	6.6	24.70	24.60	24.65	1713	1856	1784.5
8	50	6.6	24.70	24.70	24.70	1813	1727	1770.0
9	50	6.6	24.75	24.70	24.73	1500	1553	1526.5
22	60	6.6	25.60	25.70	25.65	1373	1368	1370.5
23	60	6.6	25.80	25.75	25.78	1442	1308	1375.0
24	60	6.6	25.70	25.80	25.75	1714	1605	1659.5
25	70	6.6	25.80	25.80	25.80	1676	1344	1510.0
26	70	6.6	25.85	25.80	25.83	1796	1769	1782.5
27	70	6.6	25.75	25.70	25.73	1553	1370	1461.5
28	80	6.7	25.10	25.20	25.15	1742	1869	1805.5
29	80	6.6	25.15	25.25	25.20	1623	1489	1556.0
30	80	6.6	25.25	25.30	25.28	1636	1592	1614.0
31	90	6.6	25.25	25.35	25.30	1850	1628	1739.0
32	90	6.6	25.30	25.40	25.35	1602	1670	1636.0

Briqueta	% Triturado	Espesor	Temperatura			Módulo de tensión		
			Sin girar	Girada	Media individual	Sin girar	Girada	Media individual
33	90	6.6	25.45	25.45	25.45	1909	1856	1882.5
1	100	6.3	24.50	24.50	24.50	1338	1250	1294.0
2	100	6.3	24.55	24.60	24.58	2172	2274	2223.0
3	100	6.3	24.60	24.65	24.63	2418	2354	2386.0

Tabla 7. Ensayo de Tensión Indirecta (25°)

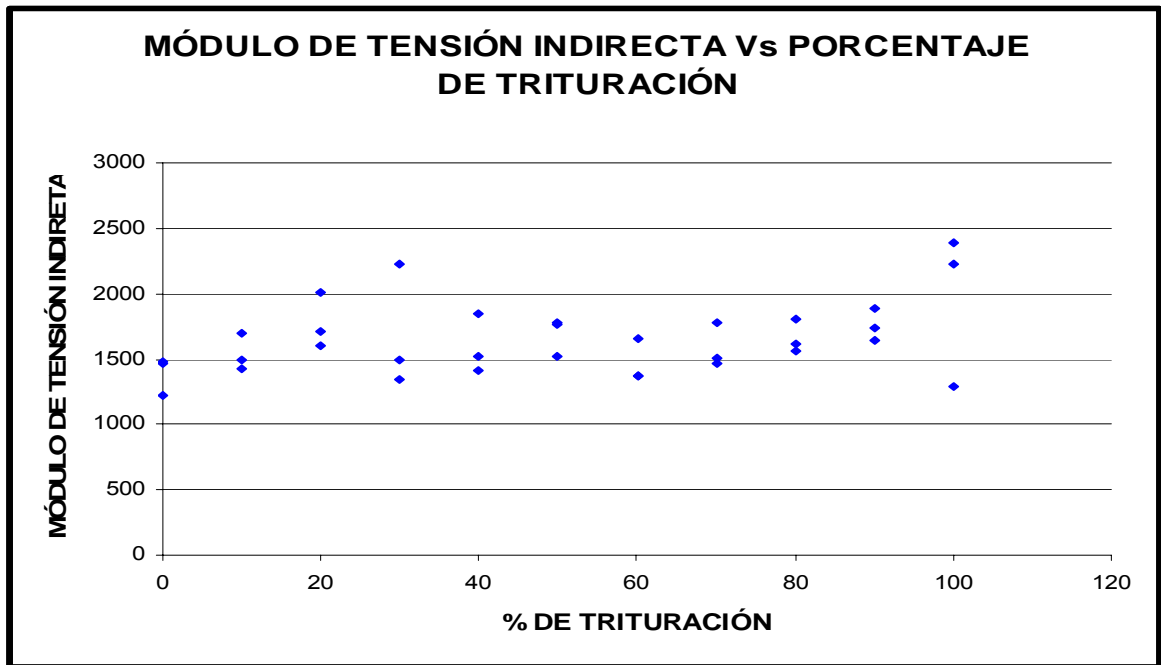


Figura 5. Módulo de Tensión Indirecta Vs Porcentaje de Trituración (25°)

9.3.5 Ensayo de Tensión Indirecta (30°):

Briqueta	% Triturado	Espesor	Temperatura			Módulo de tensión		
			Sin Girar	Girada	Media Individual	Sin girar	Girada	Media individual
4	0	6.7	30.25	30.25	30.25	703.2	630.5	666.85
5	0	6.6	30.30	30.30	30.30	650.5	658.5	654.65
6	0	6.6	30.35	30.35	30.35	612.9	644.4	628.65
10	10	6.6	30.55	30.60	30.58	837.2	827.8	832.5
11	10	6.6	30.40	30.50	30.45	877.8	888.7	883.25
12	10	6.6	30.50	30.35	30.43	649.1	593.6	621.35
13	20	6.6	30.35	30.25	30.30	840.9	934.0	887.45
14	20	6.7	30.35	30.25	30.30	658.5	684.9	671.70
15	20	6.6	30.20	30.15	30.18	758.7	650.0	704.35
16	30	6.6	30.25	30.10	30.18	787.2	647.8	717.50
17	30	6.7	29.90	29.85	29.88	1073.0	1078.0	1075.50
18	30	6.6	30.00	30.20	30.10	895.1	920.1	907.60
19	40	6.67	29.90	29.85	29.88	986.3	817.3	901.80
20	40	6.6	29.60	29.50	29.55	1392.0	1242.0	1317.00
21	40	6.6	29.50	29.70	29.60	1189.0	1109.0	1149.00
7	50	6.6	30.50	30.50	30.50	853.6	832.9	843.25
8	50	6.6	30.55	30.60	30.58	855.6	804.1	829.85
9	50	6.6	30.60	30.60	30.60	769.8	724.3	747.05
22	60	6.6	29.70	29.75	29.73	944.6	782.6	863.60
23	60	6.6	29.85	29.95	29.90	940.4	770.6	855.50
24	60	6.6	30.00	30.10	30.05	1045.0	885.2	965.10
25	70	6.6	30.10	29.80	29.95	804.3	797.6	800.95
26	70	6.6	29.75	30.25	30.00	1245.0	1041.0	1143.00
27	70	6.6	30.05	30.00	30.03	839.4	785.2	812.30
28	80	6.6	30.05	30.15	30.10	908.8	951.3	930.05
29	80	6.7	30.15	30.25	30.20	1070.0	944.0	1007.00
30	80	6.6	30.30	30.30	30.30	893.9	832.3	863.10

Briqueta	% Triturado	Espesor	Temperatura			Módulo de tensión		
			Sin Girar	Girada	Media Individual	Sin girar	Girada	Media individual
31	90	6.6	30.30	30.30	30.30	1067.0	892.6	979.80
32	90	6.6	30.40	30.45	30.43	998.6	892.3	945.45
33	90	6.6	30.40	30.35	30.38	1110.0	1142.0	1126.00
1	100	6.3	30.05	30.05	30.05	726.5	647.8	687.15
2	100	6.3	30.00	30.10	30.05	957.9	856.9	907.40
3	100	6.3	30.15	30.25	30.20	1229.0	1236.0	1232.50

Tabla 8. Ensayo de Tensión Indirecta (30°)

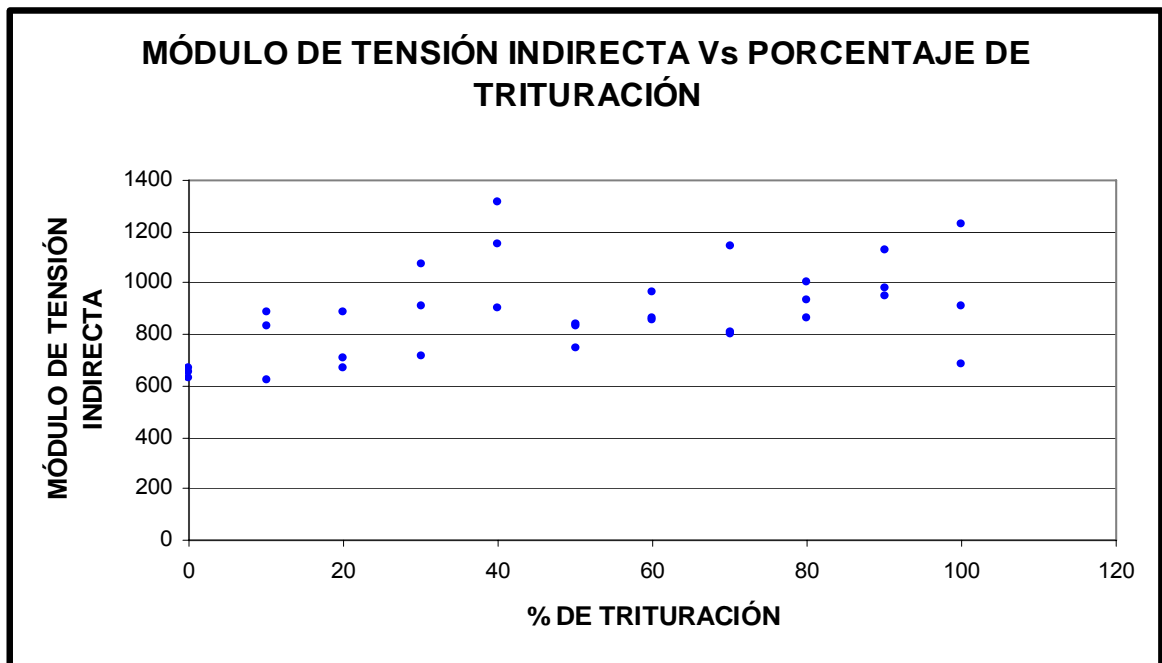


Figura 6. Módulo de tensión Indirecta Vs. Porcentaje de Trituración (30°)

9.3.6 Módulos de Tensión Indirecta a Diferentes Temperaturas:

Briqueta No.	% Triturado	Temperatura promedio	Módulo	Temperatura promedio	Módulo	Temperatura promedio	Módulo
4	0	20.35	2131.5	24.650	1484.5	30.25	666.85
5	0	20.35	2049.0	24.700	1221.0	30.30	654.65
6	0	20.25	1941.5	24.675	1466.5	30.35	628.65
10	10	19.55	2848.5	24.675	1424.0	30.58	832.50
11	10	19.63	3111.0	24.725	1700.0	30.45	883.25
12	10	19.63	2588.5	24.700	1487.0	30.43	621.35
13	20	19.53	2865.0	24.725	1707.5	30.30	887.45
14	20	19.50	2945.5	24.775	1602.0	30.30	671.70
15	20	19.48	2649.5	21.625	2004.5	30.18	704.35
16	30	19.48	2718.0	22.625	2229.5	30.18	717.50
17	30	19.45	2657.5	25.475	1494.0	29.88	1075.50
18	30	19.53	2125.5	25.250	1341.0	30.10	907.60
19	40	19.53	2444.5	25.475	1408.0	29.88	901.80
20	40	19.60	2929.0	25.575	1839.5	29.55	1317.00
21	40	19.65	2815.5	25.625	1523.5	29.60	1149.00
7	50	20.20	2929.5	24.650	1784.5	30.50	843.25
8	50	20.20	3032.0	24.700	1770.0	30.58	829.85
9	50	20.08	2487.0	24.725	1526.5	30.60	747.05
22	60	19.75	2685.5	25.650	1370.5	29.73	863.60
23	60	19.83	2705.0	25.775	1375.0	29.90	855.50
24	60	19.95	2672.0	25.750	1659.5	30.05	965.10
25	70	20.03	2436.5	25.800	1510.0	29.95	800.95
26	70	20.08	3018.5	25.825	1782.5	30.00	1143.00
27	70	20.05	2595.0	25.725	1461.5	30.03	812.30
28	80	20.05	3293.5	25.150	1805.5	30.10	930.05
29	80	20.03	3016.5	25.200	1556.0	30.20	1007.00
30	80	20.00	2297.0	25.275	1614.0	30.30	863.10
31	90	20.10	3004.0	25.300	1739.0	30.30	979.80
32	90	20.00	3512.0	25.350	1636.0	30.43	945.45

33	90	20.00	3750.5	25.450	1882.5	30.38	1126.00
1	100	20.43	2446.0	24.500	1294.0	30.05	687.15
2	100	20.43	3313.5	24.575	2223.0	30.05	907.40
3	100	20.35	3975.0	24.625	2386.0	30.20	1232.50

Tabla 9. Módulos de Tensión Indirecta a Diferentes Temperaturas

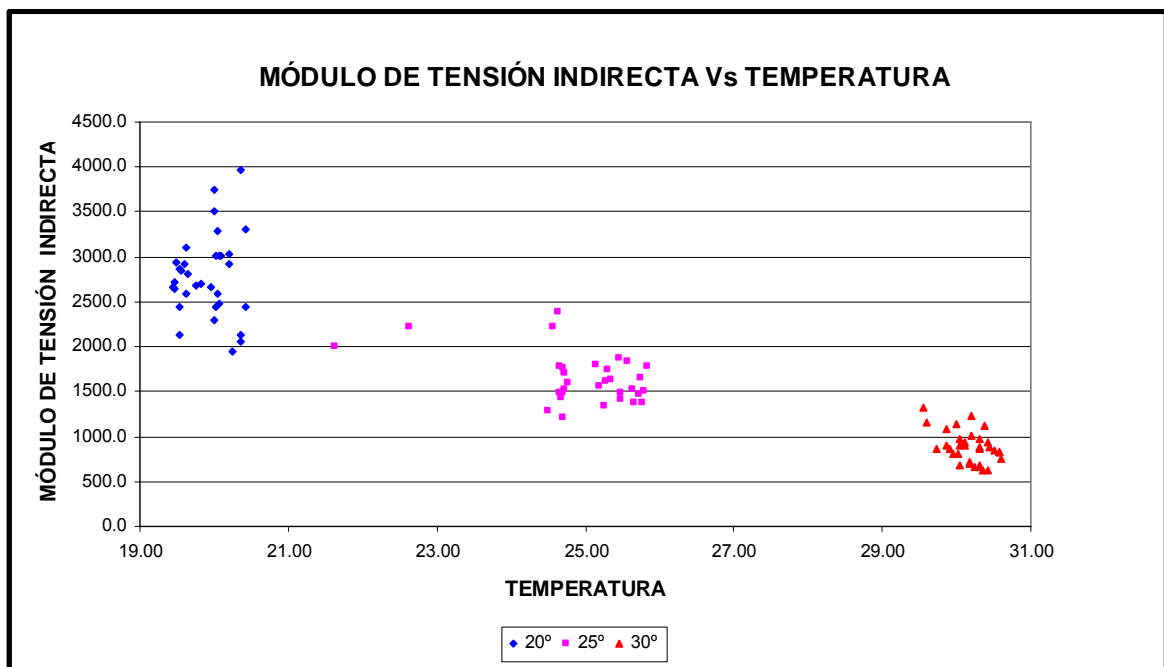


Figura 7. Módulo de Tensión Indirecta Vs. Temperatura

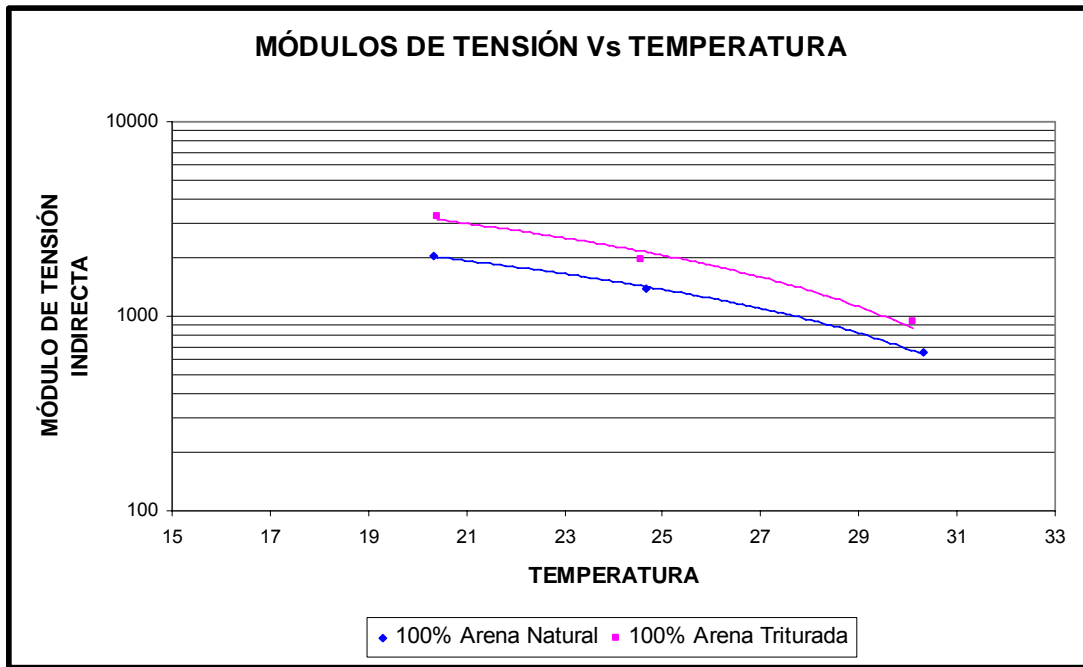


Figura 8. Módulos de Tensión Vs. Temperatura

9.3.7 Resultados del Ensayo de Carga Dinámica Uniaxial o Creep:

Briqueta No.	% Triturado	Deformación Resiliente (ϵ_i)	Fluencia Creep (MPa)	Módulo Resiliente (MPa)	Deformación Acumulada (ϵ_i)
4	0	72.972	99.143	142.360	1047.80
5	0	102.020	58.572	156.650	2728.70
6	0	111.220	11.727	215.540	2044.20
10	10	92.836	55.098	215.200	3626.00
11	10	92.668	57.302	112.100	1813.00
12	10	83.477	38.072	124.450	2728.70
13	20	185.440	9.233	120.650	2423.50
14	20	92.900	24.101	111.820	4310.50
15	20	83.475	59.174	191.460	2701.00

16	30	167.000	11.696	210.550	3006.20
17	30	74.197	47.997	172.320	2664.00
18	30	139.040	11.123	172.410	2155.20
19	40	102.090	28.639	93.933	3348.50
20	40	111.350	59.411	172.230	3228.20
21	40	194.660	20.393	225.780	2155.20
7	50	83.465	37.158	114.890	2580.70
8	50	92.724	56.057	146.510	2423.50
9	50	83.398	13.949	297.050	1776.00
22	60	92.698	7.106	163.790	2136.70
23	60	83.488	3.076	105.290	2858.2
24	60	92.691	50.364	112.080	2062.70
25	70	120.570	41.997	92.792	2664.00
26	70	92.758	6.028	180.920	2784.20
27	70	102.200	3.082	133.160	2673.20
28	80	139.480	4.403	166.150	5263.20
29	80	148.510	7.200	166.810	3441.00
30	80	120.640	6.381	172.220	3256.00
31	90	83.400	9.304	201.220	1803.70
32	90	111.230	6.732	129.310	2136.70
33	90	74.127	8.361	194.050	1720.50
1	100	79.463	11.016	170.960	1233.20
2	100	85.580	11.787	177.420	1288.10
3	100	91.717	21.129	357.240	1550.60

Tabla 10. Resultados del Ensayo de Carga Dinámica Uniaxial o CREEP

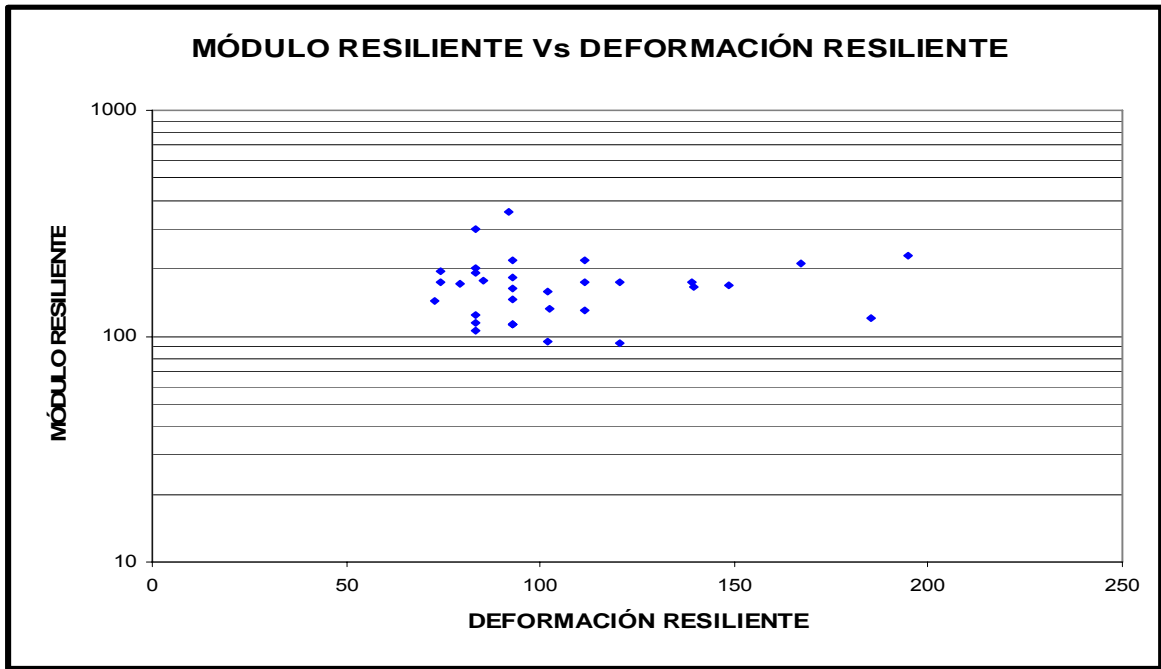


Figura 9. Módulo Resiliente Vs. Deformación Resiliente

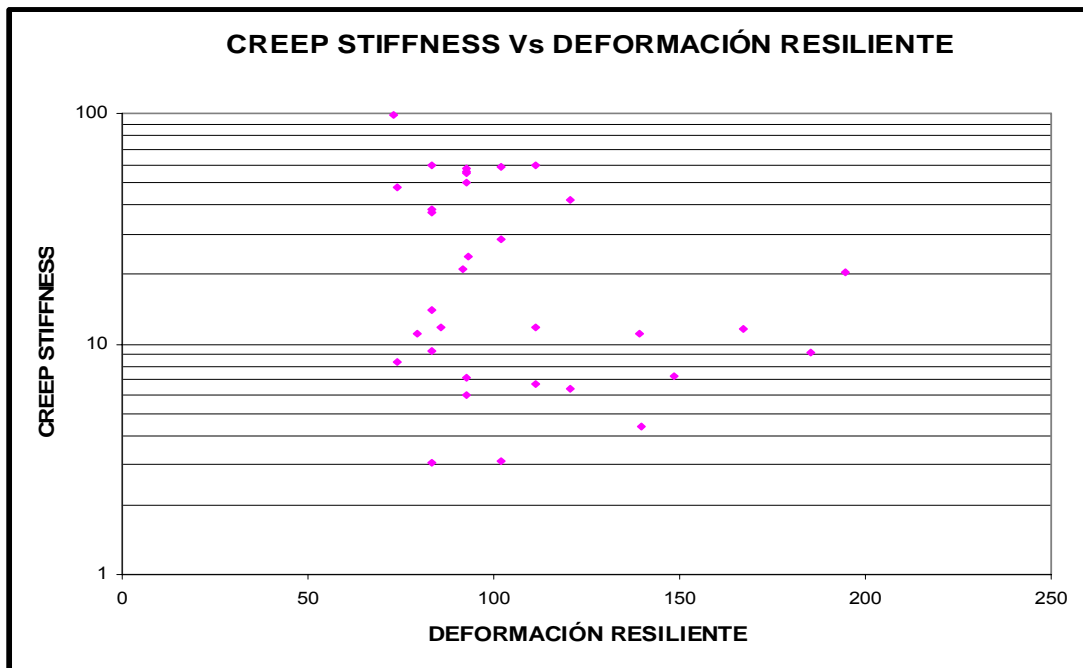


Figura 10. Creep Stiffness Vs. Deformación Resiliente

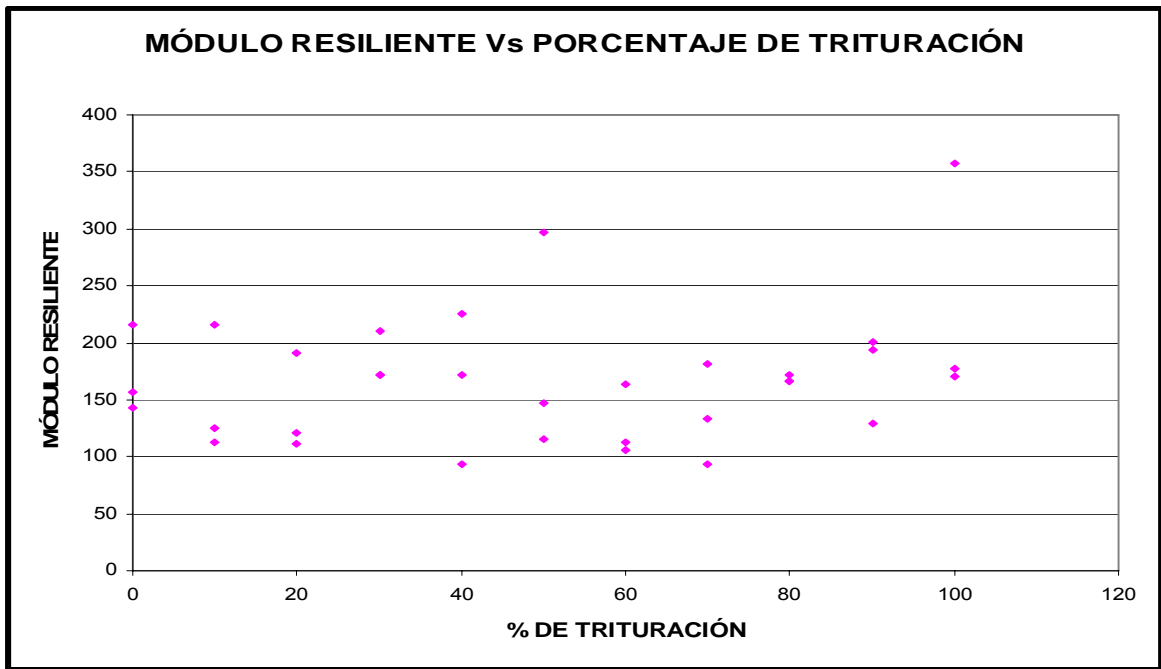


Figura 11. Módulo Resiliente Vs. Porcentaje de Trituración

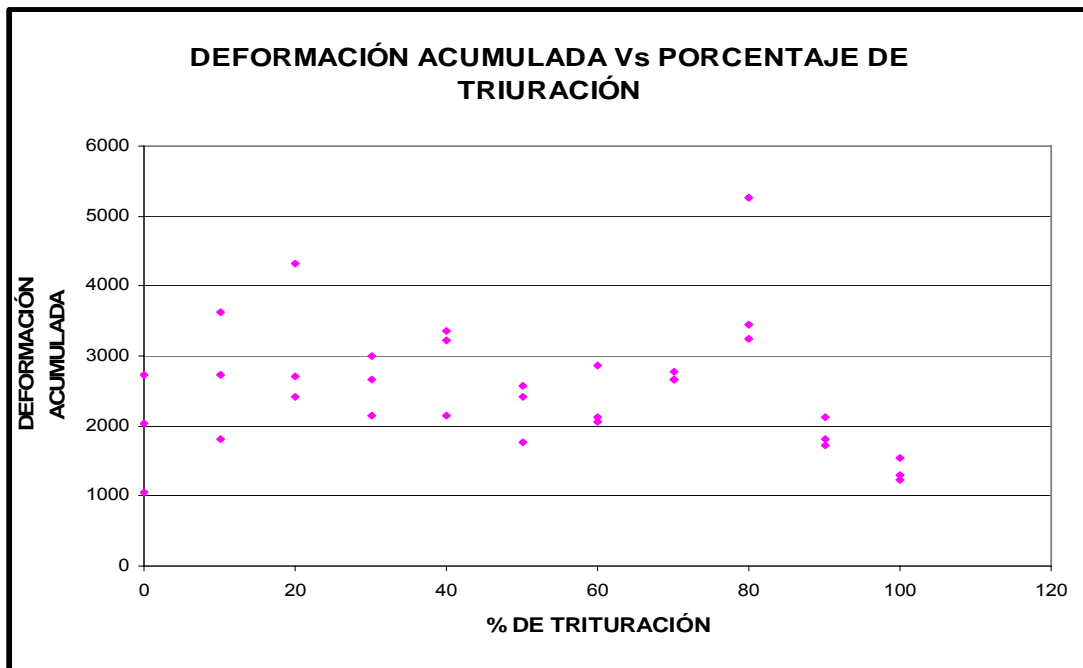


Figura 12. Deformación Acumulada Vs. Porcentaje de Trituración

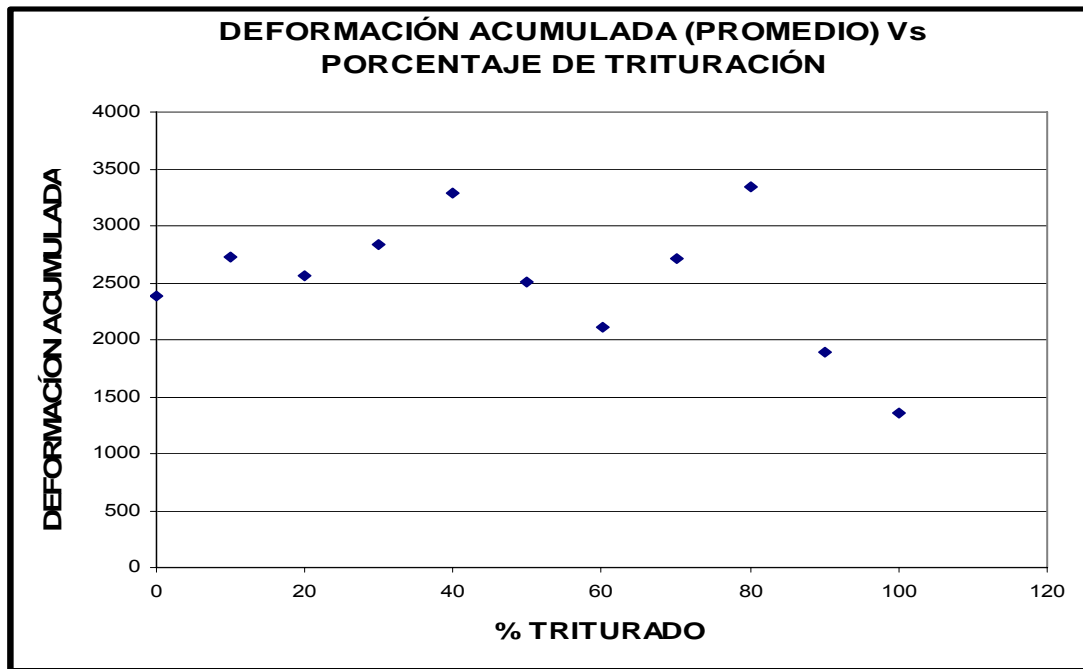


Figura 13. Deformación Acumulada (Promedio) Vs. Porcentaje de Trituración

10 CONCLUSIONES

- Se puede observar que el contenido de vacíos de las briquetas varía entre 0.5 y 3.0, observándose que no hay una tendencia definida de acuerdo con el porcentaje de trituración. Esta variación de los resultados, se debe principalmente al método Marshall, con el cual compactar a una temperatura constante las diferentes briquetas, se hace difícil.
- A una temperatura de 20°C se puede observar que hay una leve tendencia del módulo de tensión indirecta a aumentar con mayores porcentajes de arena de trituración. Ésta tendencia es muy similar en las otras dos temperaturas de ensayo 25°C y 30°C.
- En la gráfica de Módulo de Tensión Indirecta Vs. Temperatura, es claro que a medida que aumenta la temperatura, el módulo de tensión indirecta disminuye.
- La comparación de los módulos de tensión indirecta a las tres temperaturas de ensayo de las briquetas con 0% y 100% de arena triturada, mostró que las briquetas con un 100% de arena triturada tienen mayores módulos que las briquetas con 0% de arena triturada.

- El comportamiento del módulo resiliente y de la deformación acumulada que muestran las gráficas es a disminuir con el aumento en el porcentaje de arena triturada.

11 BIBLIOGRAFÍA

- INVIAS. Especificaciones generales de construcción de carreteras. Bogotá, 1996.
- Yang H. Huang. Pavement análisis and design. Prentice Hall. 1993.
- E.J Yoder, M.W Witczak. Principles of pavement design. Wiley-Interscience publication. 1975.