

**UNIVERSIDAD MILITAR  
NUEVA GRANADA**



**ESTABLECER LA INFLUENCIA DE LOS PARÁMETROS DE DISEÑO EN  
LA VIDA ÚTIL DE UN PAVIMENTO FLEXIBLE.**

⋮  
**Edgar Leonardo Pineda Baez**

**Trabajo de grado**

**Asesor: Ing. Oscar Javier Reyes Ortiz Ph.D.  
Jefe del área de Geotecnia, Docente, Investigador Programa de Ingeniería Civil  
Universidad Militar Nueva Granada**

**UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESPECIALIZACIÓN EN INGENIERÍA DE PAVIMENTOS  
BOGOTÁ D.C.  
2011**

**AUTORIDADES DE LA UNIVERSIDAD**

**MAYOR GENERAL (R) EDUARDO ANTONIO HERRERA BERBEL**  
Rector

**BRIGADIER GENERAL (R) ALBERTO BRAVO SILVA**  
Vicerrector General

**DOCTORA MARTHA LUCIA BAHAMÓN JARA**  
Vicerrectora Académica

**MAYOR GENERAL (R) EDGAR CEBALLOS MENDOZA**  
Vicerrector Administrativo

**ING. JESUS ERNESTO VILLAREAL SILVA PhD.**  
Decano Facultad de Ingeniería.

## APROBACIÓN

El trabajo de grado titulado **“ESTABLECER LA INFLUENCIA DE LOS PARÁMETROS DE DISEÑO EN LA VIDA ÚTIL DE UN PAVIMENTO FLEXIBLE.”**, presentado por el Ing. Edgar Leonardo Pineda Báez en cumplimiento parcial de los requisitos para optar al título de “Especialista en Ingeniería de Pavimentos”, fue aprobado por el Asesor.

---

Ing. OSCAR JAVIER REYES ORTIZ PhD.  
Asesor

---

Ing. DIEGO CORREAL MEDINA Ms.C.  
Coordinador Programa de Especialización  
en Ingeniería de Pavimentos.  
Universidad Militar Nueva Granada.

Bogotá D.C., Julio de 2011

### Advertencia

La Universidad Militar “Nueva Granada” no se hace responsable por la opiniones y conceptos expresados por lo autores en sus respectivos trabajos de grado; sólo vela porque no se publique nada contrario al dogma ni a la moral católica y porque el trabajo no contenga ataques personales y únicamente se vea en él el anhelo de buscar la verdad científica.

## TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
TABLA DE CONTENIDO	5
RESUMEN	6
INTRODUCCIÓN	7
1. EL PROBLEMA	
1.1 DESCRIPCIÓN Y FORMULACIÓN	8
1.2 ANTECEDENTES	8
1.3 JUSTIFICACIÓN	9
1.4 OBJETIVOS	9
2. MARCO TEÓRICO	
2.1 PAVIMENTO FLEXIBLE	10
2.2 FUNCIÓN DE LAS COMPONENTES ESTRUCTURALES DE LOS PAVIMENTOS FLEXIBLES	10
2.3 DISEÑO DE PAVIMENTO FLEXIBLE	11
2.4 VARIABLES QUE AFECTAN EL DISEÑO, LA CONSTRUCCIÓN Y EL COMPORTAMIENTO DE LOS PAVIMENTOS	12
2.5 FATIGA DE LOS MATERIALES DE PAVIMENTO	14
3. METODOLOGÍA	
3.1 ESTRUCTURA PATRÓN DE PAVIMENTO	16
3.2 VARIABLES DE DISEÑO PARA EL DEPAV Y MODELACIÓN	17
3.3 GRAFICACIÓN Y ANÁLISIS DE DATOS	18
3.3.1 ESPESOR DE MEZCLA ASFALTICA 5 cm	20
3.3.2 ESPESOR DE MEZCLA ASFALTICA 7,5 cm	33
3.3.3 ESPESOR DE MEZCLA ASFALTICA 10 cm	46
3.3.4 ESPESOR DE MEZCLA ASFALTICA 12,5 cm	58
3.4 ANÁLISIS DE GRÁFICAS CONJUNTAS DE LOS ESPESORES DE MEZCLA ASFÁLTICA	70
4. CONCLUSIONES	72
5. BIBLIOGRAFÍA	74

## RESUMEN

El uso de software para determinar los espesores de pavimento es frecuentemente utilizado, sin embargo los parámetros para determinar los espesores en múltiples oportunidades son teóricos o en algunos casos establecidos a partir de datos empíricos poco aproximados u obtenidos de cálculos de baja confiabilidad, es por esto que se pretende establecer la influencia de los parámetros de presión de contacto, distancia entre ejes, radio de carga y módulo de las capas en el espesor final de la estructura de pavimento, en este caso flexible.

Por tal motivo se inició con la aplicación del software DEPAV, tomando como referencia algunos datos de los parámetros que se aproximen más a la realidad de el uso de los pavimentos flexible en Colombia y analizar su comportamiento basado en la expresión gráfica que ellos reflejen, así mismo se analizarán características en algunos escenarios similares en las que se mantengan algunas condiciones y se varíen otras. Así las cosas se pueden llegar a obtener resultados que permitan otorgar a los diseñadores herramientas necesarias para entregar estudios y diseños de pavimentos más adaptados al tráfico circulante en Colombia.

## INTRODUCCIÓN

Teniendo en cuenta que Colombia es un país donde la mayoría de transporte de carga y de pasajeros se realiza por vía terrestre, es preciso tener en cuenta diversos factores que permitan que la movilización tanto de pasajeros como de carga se efectúe en las mejores condiciones. Si bien es cierto en materia de asfaltos no existe en Colombia una normatividad lo suficientemente concisa que permita trabajar con un asfalto de la mejor calidad comparado con el de otros países de área, se requiere entonces trabajar con mayor precisión de datos en los parámetros que hacen parte del análisis de la estructura de pavimento flexible.

La falta de precisión de datos se puede encontrar al momento de revisar una estructura de pavimento flexible que se encuentre actualmente en servicio y que presente algún tipo de daño prematuro; se ha evidenciado en estas revisiones que en algunos casos los diseñadores trabajan sobre una base de datos hipotética proveniente de datos teóricos o en algunos casos establecidos a partir de datos empíricos poco aproximados u obtenidos de cálculos de baja confiabilidad que no permiten establecer el verdadero comportamiento de la estructura de pavimento flexible una vez éste entra al servicio.

Esta deficiencia de datos genera que al momento de aplicarlos a los diferentes software de diseño se encuentren con espesores de capa de granulares y mezcla deficientes que no soporten el nivel de servicio al que realmente debería estar diseñado y que genera un detrimento de la estructura de pavimento y obviamente del patrimonio invertido toda vez que se requeriría efectuar un mantenimiento correctivo, situación que pocas veces se presenta ya que es el Estado quien debe intervenir directamente con sus recursos financieros, que por demás son limitados para este fin.

Así las cosas, se pretende obtener un marco de referencia general de los parámetros de diseño con los que trabaja en la actualidad, con el fin de determinar primero el tipo de estructura, sus espesores y llegar así a formar una idea general de diseño que permita ejecutar una obra civil de calidad que garantice un nivel de servicialidad esperado.

## **1. EL PROBLEMA**

### **1.1 DESCRIPCIÓN Y FORMULACIÓN**

El uso de software para determinar los espesores de pavimento es frecuentemente utilizado, sin embargo los parámetros para determinar los espesores en múltiples oportunidades son teóricos o en algunos casos establecidos a partir de datos empíricos poco aproximados u obtenidos de cálculos de baja confiabilidad, es por esto que se pretende establecer la influencia de los parámetros de presión de contacto, distancia entre ejes, radio de carga y módulo de las capas en el espesor final de la estructura de pavimento en este caso flexible.

Este tipo de parámetros que en la actualidad se han venido utilizando por parte de los diseñadores de pavimentos flexibles de forma no muy precisa o acorde con la realidad, influyen significativamente en el período de vida de la estructura de pavimento y en oportunidad de sobrecostos en la misma.

Es por esto que algunos de los parámetros mencionados anteriormente se confrontaron en estudios anteriores en campo, encontrando resultados significativamente distintos tales como el ancho de las llantas, ya que los encontrados en el mercado son más anchos variando así el área de presión de contacto con la capa de rodadura; por otra parte se tiene en cuenta diferentes distancias entre ejes, distintos módulos de capa de rodadura y distintos espesores de capa asfáltica con el fin de mirar el comportamiento de cada variable cuando se plasma gráficamente.

### **1.2 ANTECEDENTES.**

La Universidad Militar Nueva Granada ha venido formando diferentes grupos de investigación y con base en la necesidad de correlacionar los conocimientos y emplear las herramientas tecnológicas, tales como el software, con condiciones que actualmente soportan las vías, puesto que los datos que algunas veces utilizan los diseñadores no corresponden con los que realmente se utilizan.

El Ingeniero Oscar Javier Reyes Ortiz, jefe del área de Geotecnia con énfasis en pavimentos se ha planteado este interrogante, puesto que es de anotar que no todos los vehículos, así tengan la misma clasificación, cumplen con la configuración de diseño originalmente planteada.

La idea es llegar a reglamentar parámetros o normas mucho más precisas y ajustadas a nuestra realidad nacional, para de esta forma informar a los diseñadores y constructores de la influencia de parámetros algunas veces



tomados a la ligera y que terminan influyendo negativamente en el periodo de vida de un pavimento.

### **1.3 JUSTIFICACIÓN.**

Teniendo en cuenta el comportamiento de los pavimentos flexibles que se encuentran en servicio en la actualidad y que presentan deterioro prematuro, bien valdría la pena en primera instancia determinar si su deterioro se debe a motivos de diseño a causa de la no contemplación de los parámetros mínimos a tener en cuenta, o la carencia de datos más puntuales y precisos que brindaran mayor información al diseñador para tomar las decisiones más acertadas.

Esto se determina cuando al revisar el proceso constructivo o la calidad de los materiales que componen la estructura, no se encuentran motivos que lleguen a cuestionar gravemente la deficiencia del pavimento instalado, por tal motivo se ha llegado a replantear si los parámetros de diseño son los verdaderamente adecuados o los ajustados a nuestra realidad. Así las cosas se ha planteado el interrogante sobre la influencia de ciertos parámetros que no son tenidos en cuenta de manera seria y precisa y que al final terminan arrojando diseños que no corresponden con el nivel de servicio y con la vida útil que se espera.

Por lo anterior se pretende analizar el comportamiento interactivo de estos parámetros a través de un software de diseño para ver la influencia del mismo sobre la estructura de pavimento y garantizar un pavimento de alta durabilidad y que minimice los costos de operación y mantenimiento.

### **1.4 OBJETIVOS**

#### **Objetivo General**

Establecer la influencia de los parámetros de diseño de una estructura de pavimento flexible tales como presión de contacto, distancia entre ejes, radio de carga y módulo de capa granular y asfáltica en los espesores de una estructura de pavimento flexible.

#### **Objetivos Específicos**

- Adelantar investigación Nacional e Internacional para establecer los parámetros que se utilizan en una estructura de pavimento flexible.
- Mediante uso de software que emplea los parámetros de la estructura de pavimento flexible, se establecerá la influencia en el cambio de espesor de la misma estructura.

## **2. MARCO TEÓRICO**

El objetivo de este capítulo es desarrollar la teoría relacionada con los pavimentos flexibles para contrastarla con algunos parámetros que son tenidos en cuenta en el diseño de los mismos, así mismo hacer referencia a la fatiga que se presenta en estos materiales por el tráfico al cual se somete durante su vida útil.

### **2.1 PAVIMENTO FLEXIBLE.**

Teniendo en cuenta el alcance sobre el cual se desarrolla el presente trabajo, es preciso hacer referencia al pavimento flexible, el cual está compuesto generalmente por una estructura granular de sub base, base y carpeta de rodadura, la cual tiene como compuesto principal el asfalto y se diferencia de otros tipos de pavimento como el rígido y el articulado en su grado de flexibilidad.

Desde el punto de vista analítico el pavimento flexible tiene un sentido de distribución de cargas en el cual se involucra toda la estructura, ya que su flexibilidad trasmite la carga disipándola a todo lo largo de su componente estructural, empleando una superficie de desgaste relativamente delgada que va de la mano con una estructura granular de espesor mayor que ayuda a disipar los efectos de las cargas a las que se somete.

### **2.2 FUNCIÓN DE LAS COMPONENTES ESTRUCTURALES DE LOS PAVIMENTOS FLEXIBLES**

#### **a. Subrasante**

Servir de fundación para la estructura de pavimento.

#### **b. Subbase.**

Una de las principales funciones de esta capa es netamente económica; en efecto, el espesor total que se requiere para que el nivel de esfuerzos en la subrasante sea igual o menor que su propia resistencia, puede ser construido con materiales de alta calidad; sin embargo, es preferible distribuir las capas más calificadas en la parte superior y colocar en la parte inferior del pavimento la capa de menor calidad, la cual es frecuentemente la más económica. Esta solución puede traer consigo un aumento en el espesor total del pavimento y, no obstante, resultar más económica.

Así mismo una subbase bien diseñada impide la penetración de los materiales que constituyen la base con los de la subrasante y, por otra parte, actúa como filtro de la base, impidiendo que la subrasante la contamine y menoscaben su calidad.

Es de anotar que algunos cambios volumétricos de la capa de subrasante, generalmente asociados a cambios en su contenido de

humedad (expansiones) o a cambios extremos de temperaturas (heladas), pueden absorberse con la capa de la subbase, impidiendo que dichas deformaciones se reflejen en la superficie de rodamiento.

Es función de la subbase recibir y transmitir adecuadamente la continua disipación de esfuerzos verticales remitidas por la base granular, de manera tal que dichos esfuerzos a nivel de subrasante sean menores a las admisibles para no afectar su capacidad y funcionamiento.

### **c. Base**

Respecto a la carpeta asfáltica, la base tiene una función económica análoga a la que tiene la subbase; en muchos casos la base granular debe drenar el agua que se introduzca a través de la carpeta o por la bermas, así como impedir la ascensión capilar.

La función principal de la base es la de absorber los esfuerzos horizontales de tracción generados en la fibra inferior de la capa asfáltica, así mismo proporcionar un elemento resistente que transmita a la subbase y a la subrasante los esfuerzos producidos por el tránsito en una intensidad apropiada.

### **d. Carpeta asfáltica**

Proporciona una superficie uniforme, estable y segura al tránsito, de textura y color conveniente y resistir los efectos abrasivos del tránsito, impidiendo además el paso del agua al interior del pavimento.

Dado que esta carpeta se encuentra directamente sometida a los esfuerzos de compresión y tensión, tiene implícita la función de disipar los esfuerzos horizontales producidos por las cargas de los vehículos, pasando de un valor positivo (de compresión) en la superficie a uno negativo (de tracción) en la fibra interior; de manera que se logre mantener la uniformidad de la capa sin presentar agrietamientos. Brinda además resistencia a la tensión, la cual complementa la capacidad estructural del pavimento.

## **2.3 DISEÑO DE PAVIMENTO FLEXIBLE**

El procedimiento de diseño de pavimento flexible va desde los métodos empíricos que relacionan el grosor de algunas de sus capas con algunas propiedades de materiales que componen su sistema de apoyo, hasta el análisis matemático detallado de la naturaleza de los materiales y de todos los factores socio ambientales en los cuales van ser aplicados. En Colombia predomina el uso de los métodos sencillos y convencionales por su facilidad de uso y porque los métodos complejos no tienen una base confiable en la caracterización de los materiales donde se van aplicar en nuestro país.

La determinación de los espesores de las capas granulares y de la carpeta de rodadura son los factores más predominantes para el diseño de pavimento flexible comoquiera que en esta etapa se establece la resistencia necesaria que satisfaga la combinación de materiales, carga y ambiente. Así las cosas se deben llegar a definir la deformación que va a sufrir la estructura en su vida útil y consecuentemente la capacidad de carga admisible de cada una de las capas.

Durante la historia se han desarrollado diferentes modelos de diseño estructural de pavimentos flexibles tomándose para algunos casos el modelo de Burmister (1945) en la cual se tenían en cuenta la estratificación y las propiedades mecánicas que conformaban la masa del suelo, para calcular el estado de esfuerzos, deformaciones y deflexiones a cualquier profundidad y así tener en cuenta que si la relación de módulos de la subrasante y el asfalto es cercana a la unidad, es posible aplicar de forma sencilla este modelo, de no ser así, la modelación es más compleja.

Generalizando estos modelos, se llegó a la aplicación de modelos multicapa en la que se pretende analizar el comportamiento de la presión ejercida por una rueda sobre la estructura de pavimento, con el fin de analizar su impacto sobre la misma para llegar a determinar la mitigación de la distribución de carga hasta la fundación de la misma. Así las cosas la solución del problema se basa en hallar la profundidad  $z$  de la estructura en la cual se disipan los esfuerzos producidos por la presión de las llantas.

Ilustrando de una forma mucho más simplificada el factor del espesor en relación con la distribución de cargas, supone que la carga impuesta por cada rueda se distribuye en forma cónica cuya inclinación se acerca a los  $45^\circ$  aproximadamente. El aplanamiento del neumático reparte dicha carga en un área reducida supuestamente circular y de radio  $r$ , esto en el caso de vehículos y camiones livianos, para el escenario de vehículos pesados, las cargas suponen un área de contacto mayor proyectada en forma elíptica cuya anchura es igual a la anchura nominal del neumático.

## **2.4 VARIABLES QUE AFECTAN EL DISEÑO, LA CONSTRUCCIÓN Y EL COMPORTAMIENTO DE LOS PAVIMENTOS.**

Las principales que deben considerarse para el diseño, la construcción y el comportamiento de las estructuras de pavimento son:

### **a. Estructurales**

- Terreno de fundación o subrasante
- Subbase granular
- Base granular
- Mezcla asfáltica
- Estructuras de drenaje

### **b. El tránsito**

- Tipo de vehículo
- Peso del vehículo
- Clases de ejes
- Cargas por eje
- Presión y área de contacto de las llantas
- Velocidad de aplicación de la carga
- Impacto
- Número de aplicación de la carga

#### c. Clima y condiciones regionales

- Lluvia
- Cambios de temperatura
- Topografía
- Índices regionales (humedad, presión atmosférica, vientos, nubosidad, etc.)

#### d. Los costos

- Costos de construcción
- Costos de mantenimiento

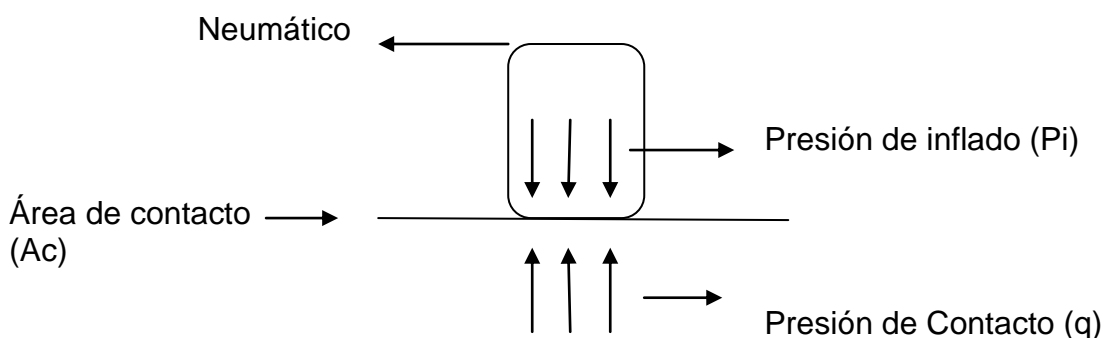
#### e. Factores intrínsecos

- Resistencia estructural
- Deformidad
- Durabilidad

Toda vez que este trabajo contempla dentro de las variables de diseño el área y presión de contacto, es preciso definir estos términos de la siguiente manera:

Los métodos de diseño de pavimentos actuales asumen una carga de neumático estática aplicada sobre la superficie de pavimento (Yoder y Witzak, 1975; Huang, 2004). Definiendo la presión de contacto como una carga ( $q$ ), la presión de inflado del neumático ( $P_i$ ) y el área de contacto ( $A_c$ ).

**Figura 1. Presión de contacto, presión de inflado del neumático y área de contacto**



En la mayoría de los casos se asumen dos supuestos: (1) la presión de contacto se distribuye de manera uniforme en toda el área de contacto y (2) la presión de contacto es igual a la presión de los neumáticos así:

$$q = P_i \quad \text{Ecuación 1}$$

El área de contacto se relaciona con la carga y la presión de los neumáticos así:

$$A_c = \frac{P}{q} \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde:

Ac: área de contacto

P: Carga aplicada

q: Presión de Contacto

Pi: Presión de inflado del neumático

Para el análisis se consideran dos tipos de huellas: (1) circular o redondeada y (2) rectangular con extremos redondeados.

#### 2.4.1 Huella circular o redondeada

Si se considera un plato de carga se tiene:

$$q = \frac{P}{A_c} \approx P_i \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde:

Ac: área de contacto.

Expresando el área de contacto (Ac), en función del radio de carga se tiene:

$$A_c = \pi a^2 \quad \text{Ecuación 4}$$

Luego de reemplazar Ac en la ecuación 3, se obtiene:

$$a = \sqrt{\frac{P}{\pi q}} \quad \text{Ecuación 5}$$

## 2.5 FATIGA EN LOS MATERIALES DE PAVIMENTO.

En todos los métodos de diseño se aceptan dos tipos de fallas asociados durante su periodo de funcionalidad, la funcional y la estructural. La falla funcional está relacionada con el paso no seguro y cómodo de los vehículos sobre la carpeta asfáltica, en contraste con la falla estructural la cual está

asociada a la falta de cohesión de la componente estructural llevando a una disminución de soporte de carga. (Montejo, 2001)

Para este caso se hablará sobre la falla estructural, la cual se presenta cuando la estructura de pavimento, al ser sometida a variadas repeticiones de carga por acción del tránsito, sufre un agrietamiento estructural relacionado con la deformación o la tensión horizontal por tracción de la base de cada capa; en este sentido la falla relaciona la deformación o la tensión producida con el número de repeticiones admisibles; esto se denomina falla por fatiga o por repeticiones de carga.

Toda vez que esta patología se presenta durante el periodo de operación del pavimento, bien pueden ser modelados en laboratorio a través de los llamados ensayos de fatiga; el agrietamiento producido en los materiales cuando se efectúan estas pruebas sobre las muestras de materiales o a escala natural, se asocia con la respuesta resiliente (recuperable) del pavimento ante las cargas dinámicas; en estos ensayos se ha determinado que las grietas se propagan de la base de cada capa hacia arriba.

Los materiales que forman parte de la estructura se consideran homogéneos e isotrópicos y se supone que las capas tienen una extensión infinita en sentido horizontal. En esta metodología se considera la estructura de pavimento como un sistema linealmente elástico, en el cual los materiales se encuentran caracterizados por:

1. Módulos elásticos (E)
2. Relación de Poisson ( $\mu$ )
3. Espesor de la capa (h)

La apropiada caracterización de los materiales constituye un aspecto de gran importancia en el diseño racional de pavimentos, por ende se consideran variadas forma de obtener resultados de las propiedades de los materiales:

- Ensayos de laboratorio combinados con ensayos no destructivos.
- Estimación o uso de nomogramas con correlaciones estadísticas.
- Comparación con materiales “estándar” de características similares.
- Medición “in situ” basándose en ensayos no destructivos.

Toda vez que los materiales que trabajan dentro de la estructura de pavimento trabajan bajo el rango elástico, se considera el número de repeticiones de carga (NE) producida por el tránsito como la principal causa de la fatiga de estos materiales; dicho comportamiento se refleja para cada una de las capas como la relación entre las repeticiones carga y su deformación. Así las cosas el pavimento puede fallar de dos formas:

1. Que la deformación horizontal por tracción  $\epsilon_t$  en la fibra inferior de las capas asfálticas, al flexionar ellas bajo la acción de las cargas, supere cierto límite admisible, en este caso se producirá agrietamiento o fisuras en dichas capas.

2. Que la deformación vertical  $\epsilon_z$  por compresión de la subrasante supere el límite admitido por ella, caso en el cual se presenta una deformación permanente, hundimiento y ahuellamiento en el pavimento.

### 3. METODOLOGÍA

El procedimiento empleado para llevar a cabo la modelación de las estructuras de los pavimentos flexibles es empleando el programa de computador para el diseño de pavimentos DEPAV, desarrollado por Universidad del Cauca. El análisis se realiza variando ciertos parámetros (presión de contacto, radio de carga y distancia entre ejes de las llantas, espesores de asfalto y módulos de la subrasante), correlacionarlos entre sí para obtener el valor de la deformación horizontal  $\epsilon_t$  para de esta forma obtener el valor de los ejes equivalentes (N) utilizando la ecuación de la Universidad de Nottingham ( $\epsilon_t = 3,48 * 10^{-3} * N^{-0,204}$ ) conocido y utilizado también por el método SHELL.

Obtenido este valor de N se comienzan a graficar dentro de cada espesor de asfalto dado, dos relaciones de la siguiente forma:

1. El valor de los ejes equivalentes (N) vs el valor de los módulos de CBR de la subrasante en cada condición especialmente descrita.
2. El valor de los módulos de la mezcla asfáltica vs el valor de los ejes equivalentes (N) en cada condición particularmente descrita.

#### 3.1 ESTRUCTURA PATRÓN DE PAVIMENTO FLEXIBLE

##### CARPETA ASFÁLTICA

$E = 30591, 40788, 50985, 61182 \text{ Kg} \cdot \text{cm}^{-2}$  ( $\approx 3000, 4000, 5000, 6000 \text{ MPa}$ )

$h = 5; 7,5; 10; 12,5 \text{ cm}$        $\mu = 0,35$

##### BASE GRANULAR

CBR 80%

$E = 8438 \text{ Kg} \cdot \text{cm}^{-2}$  ( $\approx 830 \text{ MPa}$ )

$h = 20 \text{ cm}$        $\mu = 0,35$



## SUBRASANTE

CBR = 2%, 5%, 10%, 20%

$E = 211, 527, 1054, 2109 \text{ Kg}\cdot\text{cm}^{-2}$  ( $\approx 21, 52, 106, 211 \text{ MPa}$ )

$h = \infty$        $\mu = 0,45$

### 3.2 VARIABLES DE DISEÑO PARA EL DEPAV Y MODELACIÓN

Para cada una de los escenarios en los cuales se desarrolla el presente trabajo, se modeló cada diseño correlacionando cada una de los siguientes parámetros contenidos dentro del software DEPAV:

Radio de carga: 10, 12,5 y 15 cm.

Presión de contacto: 5,65; 6,62  $\text{Kg} \cdot \text{cm}^{-2}$

Distancia entre ejes: 10,5; 11,5; 12,5 cm.

Módulo de la subrasante: 211, 527, 1054, 2109  $\text{Kg}\cdot\text{cm}^{-2}$

Módulo de la mezcla asfáltica: 30591, 40788, 50985, 61182  $\text{Kg}\cdot\text{cm}^{-2}$

Espesores de la mezcla asfáltica: 5; 7,5; 10; 12,5 cm

Inicialmente se modeló cada estructura en el software, relacionando cada una de las variables entre si, por ejemplo el primer diseño contemplaba las siguientes variables ingresadas en la primera condición:

Número de capas: 3

Radio de carga: 10 cm.

Presión de contacto: 5,65  $\text{Kg} \cdot \text{cm}^{-2}$

Distancia entre ejes: 10, 5 cm

Mezcla asfáltica: módulo 30591  $\text{Kg}\cdot\text{cm}^{-2}$ ;  $\mu = 0,35$ ; espesor: 5 cm; ligada

Base granular: módulo 8438  $\text{Kg}\cdot\text{cm}^{-2}$ ;  $\mu = 0,35$ ; espesor: 20 cm; no ligada

Subrasante: módulo 211  $\text{Kg}\cdot\text{cm}^{-2}$ ;  $\mu = 0,45$

Se continuó así sucesivamente ingresando los datos anteriormente descritos en el programa; una vez corrido el programa se obtuvo el valor de la deformación horizontal  $\epsilon_t$  para cada modelo llegando a obtener un total 1148 deformaciones horizontales, obtenido este valor se calculó el valor de N (ejes equivalentes) acorde con la ecuación de la Universidad de Nottingham ( $\epsilon_t = 3,48 \cdot 10^{-3} \cdot N^{-0,204}$ ).

Posteriormente se inició la modelación gráfica de los datos del valor de los ejes equivalentes (N) vs el valor de los módulos de CBR de la subrasante en cada condición especialmente descrita.

Por ende se tomó como referencia el comportamiento de la estructura en el escenario del espesor de la capa asfáltica, por ende se relaciona inicialmente el espesor a 5 cm., luego a 7,5 cm, 10 cm y 12,5 cm.

### 3.3 GRAFICACIÓN Y ANÁLISIS DE DATOS

Toda vez que el volumen de figuras es bastante amplio, se pretende ilustrar y orientar desde un rango general hasta un rango específico el alcance general de los grupos de estas figuras, iniciando desde el espesor de mezcla asfáltica menor (5 cm) hasta el mayor (12,5 cm) utilizados en este estudio.

Seguidamente se hablará de las interacciones de las condiciones generales (o rango de datos) utilizadas en cada grupo de espesor de mezcla asfáltica, que corresponden a los valores de los números de ejes equivalentes (N) vs los módulos de subrasante y los valores de módulo de la mezcla asfáltica vs los valores de ejes equivalentes (N).

Por último se discrimina la interacción algunas clases de parámetros utilizados en el estudio agrupados en condiciones similares, permitiendo de esta forma entregar un análisis particular de las figuras en grupos de a tres o cuatro según corresponda.

Esta información está contenida en el siguiente cuadro:

Figura No.	Espesor Mezcla Asfáltica	Rango datos	Parámetros utilizados
1-4	5 cm.	N vs Módulo subrasante	Distancia ejes: 10,5 cm Módulo mezcla: 3000 a 6000 PSI
5-8			Distancia ejes: 11,5 cm Módulo mezcla: 3000 a 6000 PSI
9-12			Distancia ejes: 11,5 cm Módulo mezcla: 3000 a 6000 PSI
13-15			Distancia ejes: 10,5 cm Radio 10,5; 12,5 y 15 cm.
16-18	7,5 cm.	N vs Módulo mezcla	Distancia ejes: 11,5 cm Radio 10,5; 12,5 y 15 cm.
19-21			Distancia ejes: 12,5 cm Radio 10,5; 12,5 y 15 cm.
22-25			Distancia ejes: 10,5 cm Módulo mezcla: 3000 a 6000 PSI
26-29		N vs Módulo subrasante	Distancia ejes: 11,5 cm

			Módulo mezcla: 3000 a 6000 PSI
30-33			Distancia ejes: 11,5 cm Módulo mezcla: 3000 a 6000 PSI
34-36			Distancia ejes: 10,5 cm Radio 10,5; 12,5 y 15 cm.
37-39		N vs Módulo mezcla	Distancia ejes: 11,5 cm Radio 10,5; 12,5 y 15 cm.
40-42			Distancia ejes: 12,5 cm Radio 10,5; 12,5 y 15 cm.
43-46			Distancia ejes: 10,5 cm Módulo mezcla: 3000 a 6000 PSI
47-50		N vs Módulo subrasante	Distancia ejes: 11,5 cm Módulo mezcla: 3000 a 6000 PSI
51-54			Distancia ejes: 11,5 cm Módulo mezcla: 3000 a 6000 PSI
55-57	10 cm.		Distancia ejes: 10,5 cm Radio 10,5; 12,5 y 15 cm.
58-60		N vs Módulo mezcla	Distancia ejes: 11,5 cm Radio 10,5; 12,5 y 15 cm.
61-63			Distancia ejes: 12,5 cm Radio 10,5; 12,5 y 15 cm.
64-67	12,5 cm.		Distancia ejes: 10,5 cm Módulo mezcla: 3000 a 6000 PSI
68-71		N vs Módulo subrasante	Distancia ejes: 11,5 cm Módulo mezcla: 3000 a 6000 PSI
72-75			Distancia ejes: 11,5 cm Módulo mezcla: 3000 a 6000 PSI
76-78			Distancia ejes: 10,5 cm Radio 10,5; 12,5 y 15 cm.
79-81		N vs Módulo mezcla	Distancia ejes: 11,5 cm Radio 10,5; 12,5 y 15 cm.
82-84			Distancia ejes: 12,5 cm Radio 10,5; 12,5 y 15 cm.

*Tabla No. 1 relación de figuras según sus componentes*

- Es de anotar que para todas las figuras descritas anteriormente se aplicó el mismo valor de presión de inflado de neumáticos (5,65 y 6,62 Kg/cm<sup>2</sup>)

### 3.3.1 ESPESOR DE LA MEZCLA ASFÁLTICA 5 cm.

#### GRÁFICAS DEL VALOR DE N vs MÓDULO SUBRASANTE.

DISTANCIA EJES 10,5 cm; MÓDULO 3000 PSI;

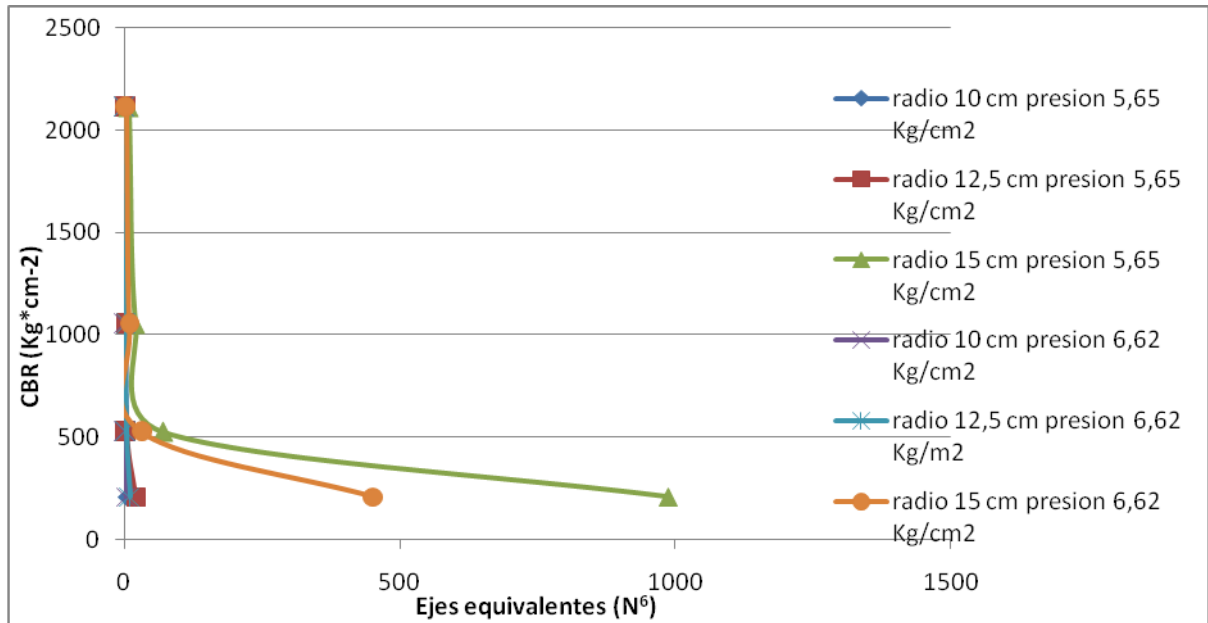


Figura No. 1

MÓDULO 4000 PSI

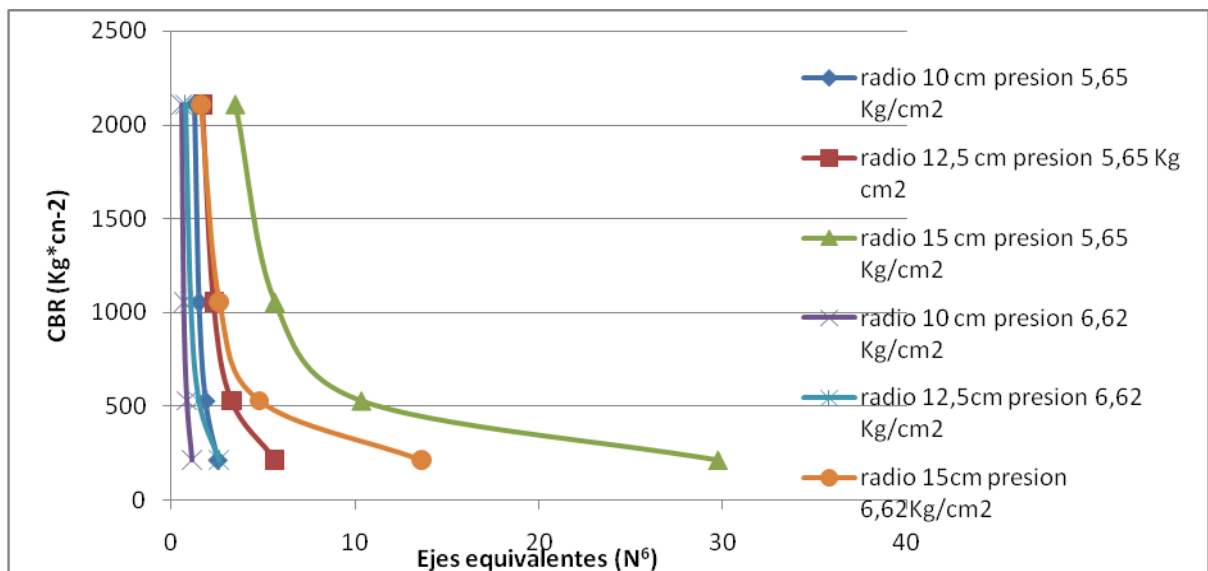
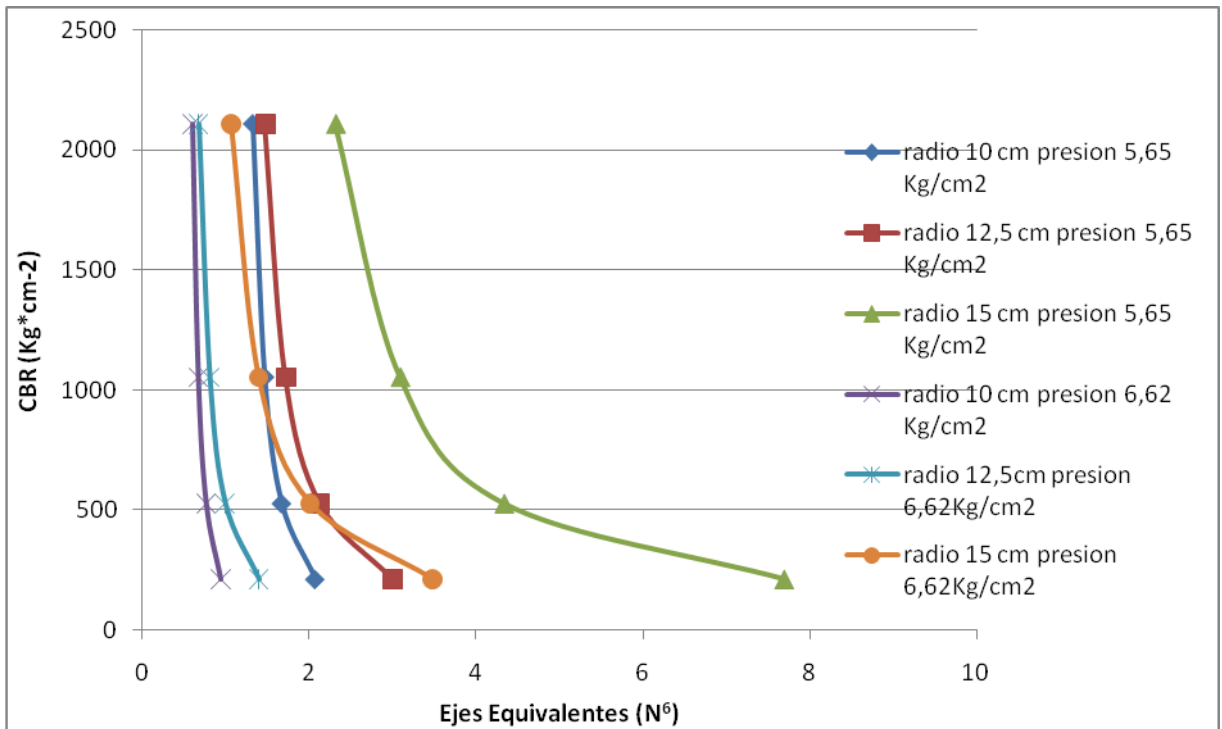


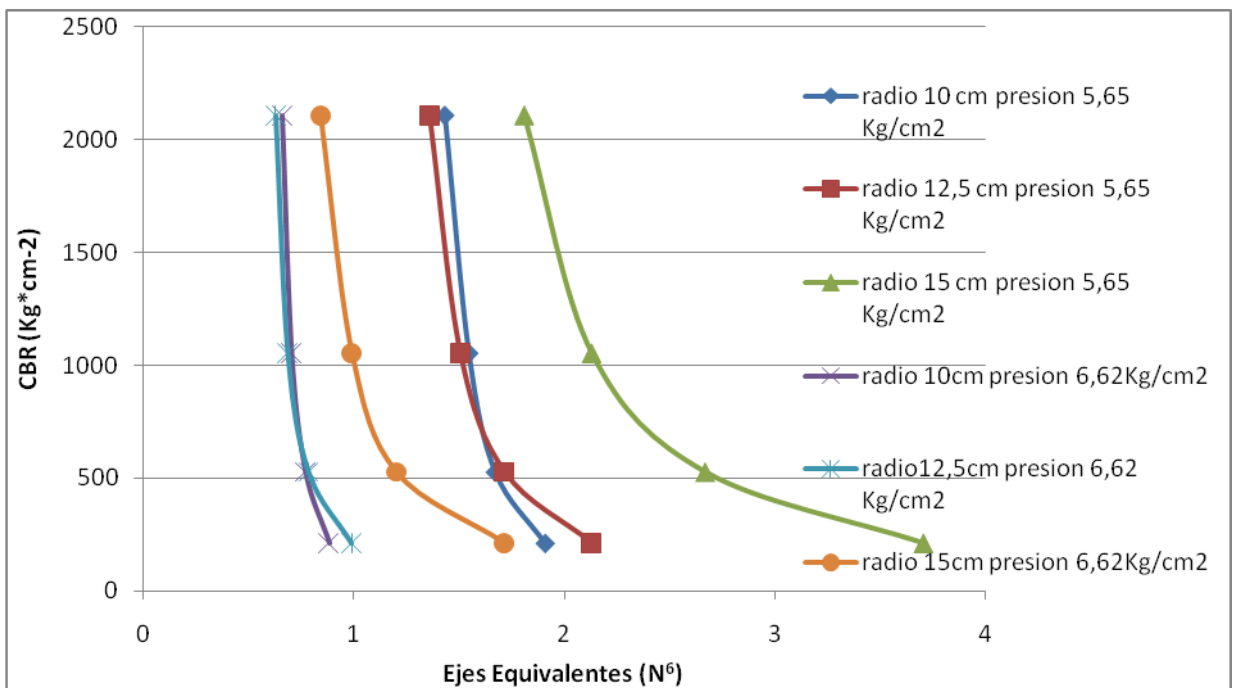
Figura No. 2

MÓDULO 5000 PSI



**Figura No. 3**

**MÓDULO 6000 PSI**

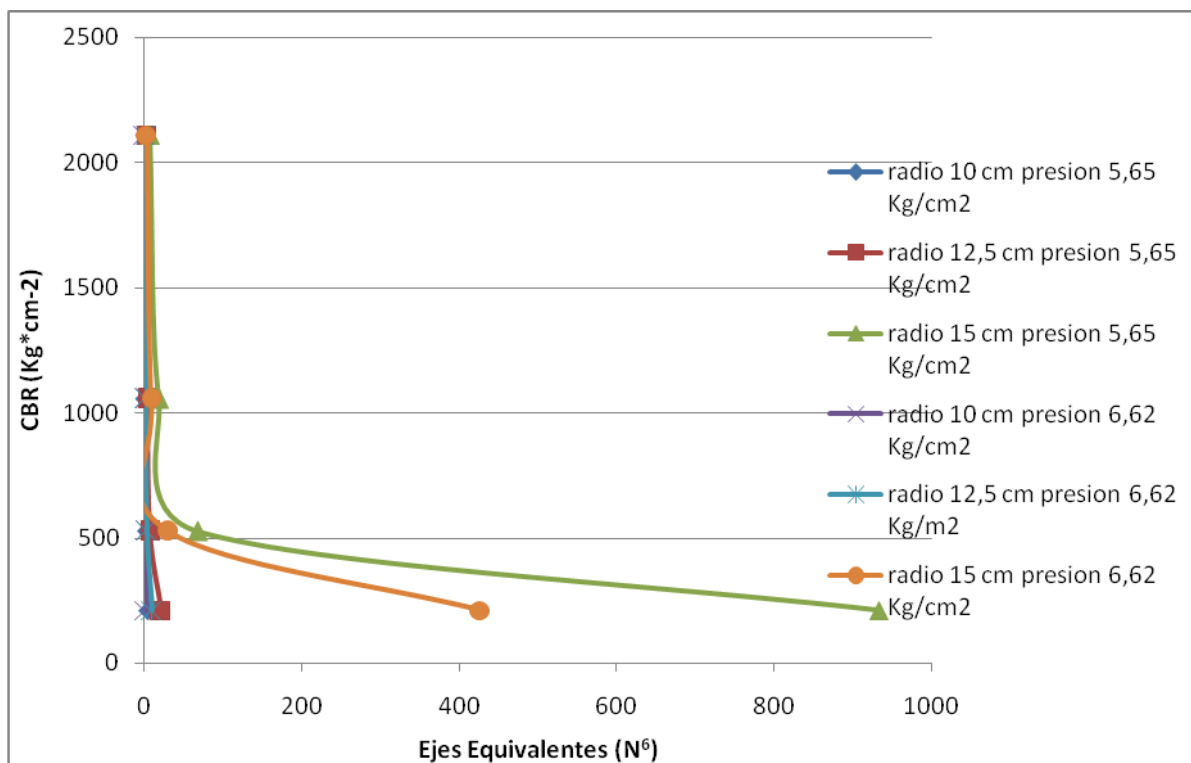


**Figura No. 4**

- De las anteriores cuatro (4) figuras se puede observar un comportamiento excesivamente amplio en cuanto a cantidad de ejes equivalentes obtenidos cuando el radio es más grande

- Cuando el radio y la presión de inflado son las menores, sobrepasan incluso los mil millones de ejes
- Se destaca el hecho que a medida que aumenta el módulo disminuye la cantidad de ejes cuando la presión de inflado mayor.

**DISTANCIA EJES 11,5 cm; MÓDULO 3000 PSI;**



**Figura No. 5**

**MÓDULO 4000 PSI;**

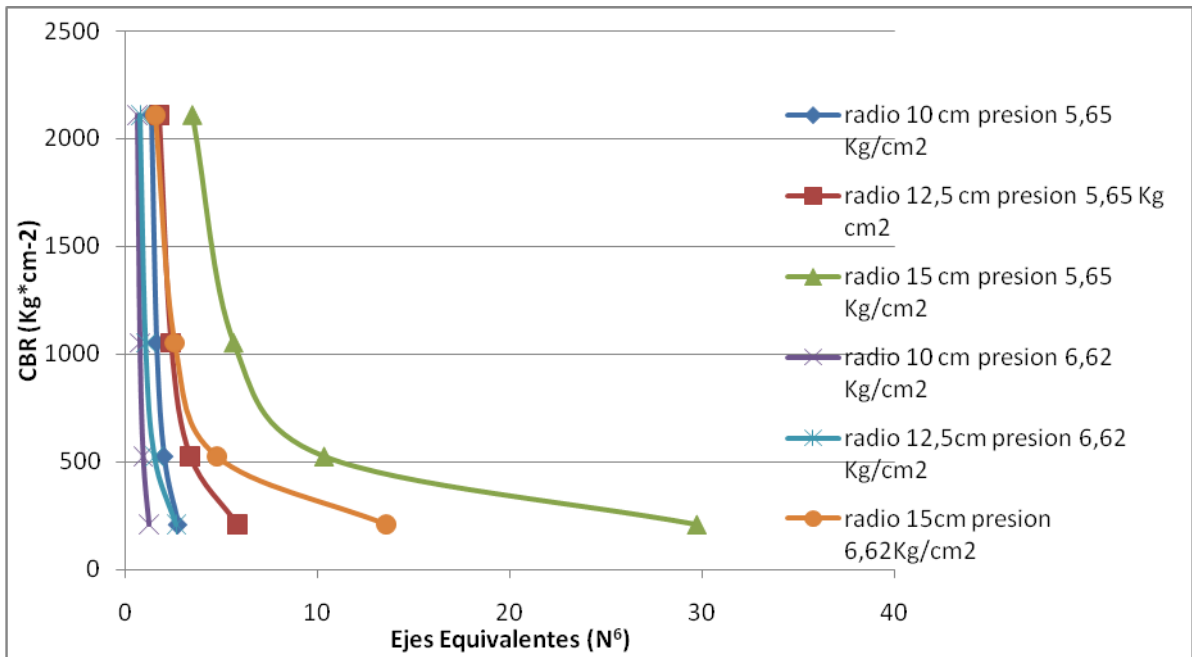


Figura No. 6

MÓDULO 5000 PSI;

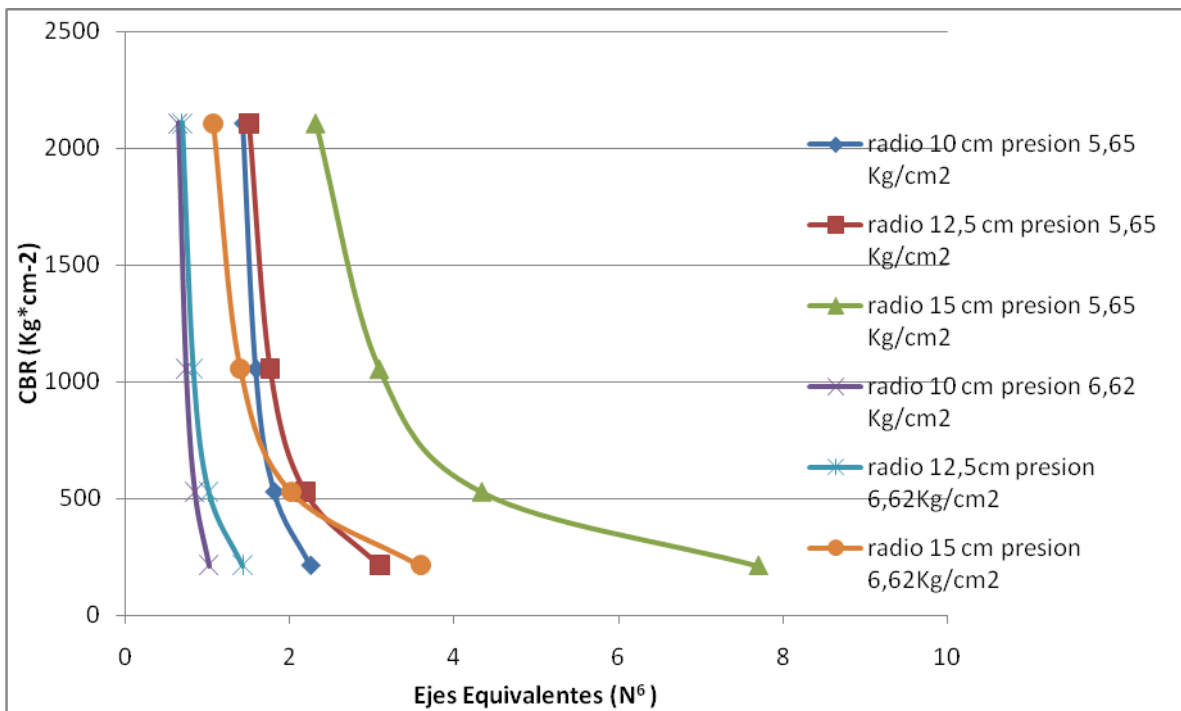
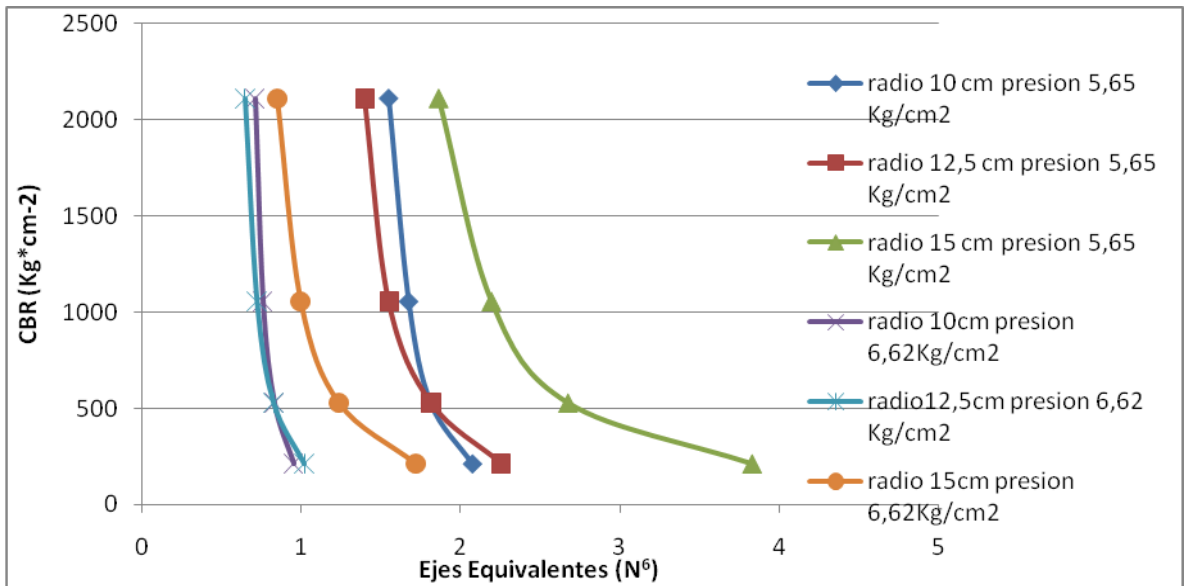


Figura No. 7

MÓDULO 6000 PSI;



**Figura No. 8**

- En estas cuatro (4) figuras se ha podido encontrar un comportamiento igual al observado en las primeras cuatro, en cada uno de sus componentes.
- se resalta el hecho de la disminución de las cantidades de ejes de una forma sustancial a medida que aumenta el módulo de la mezcla iniciando en casi mil millones hasta los 4 millones.

**DISTANCIA EJES 12,5 cm; MÓDULO 3000 PSI;**



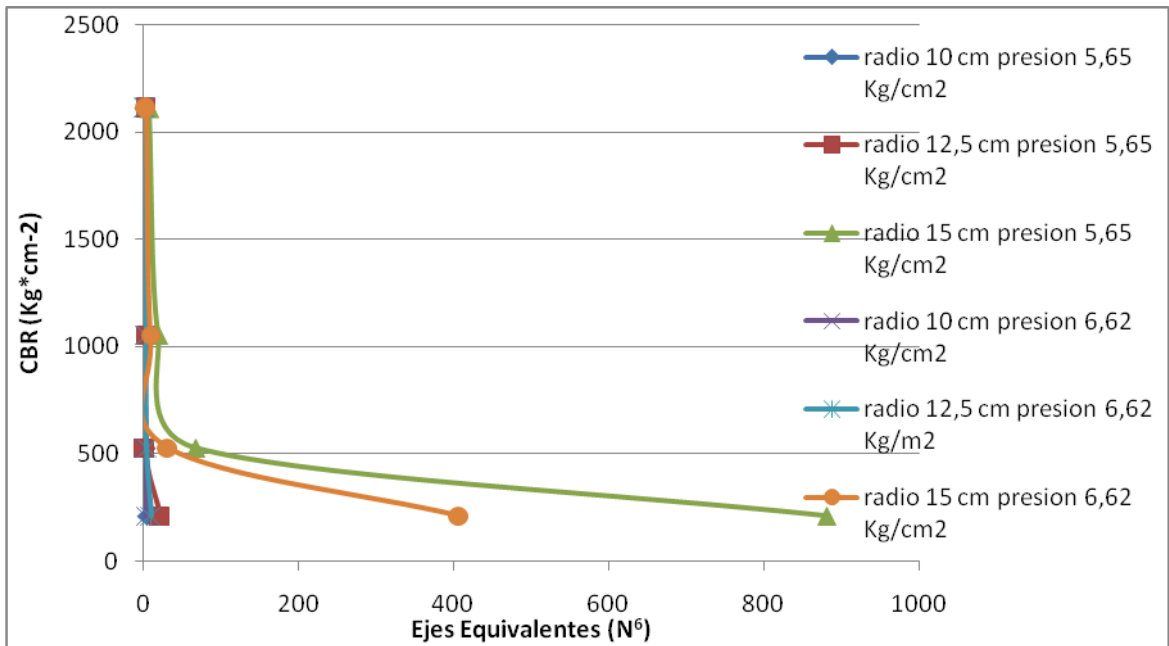


Figura No. 9

**MÓDULO 4000 PSI**

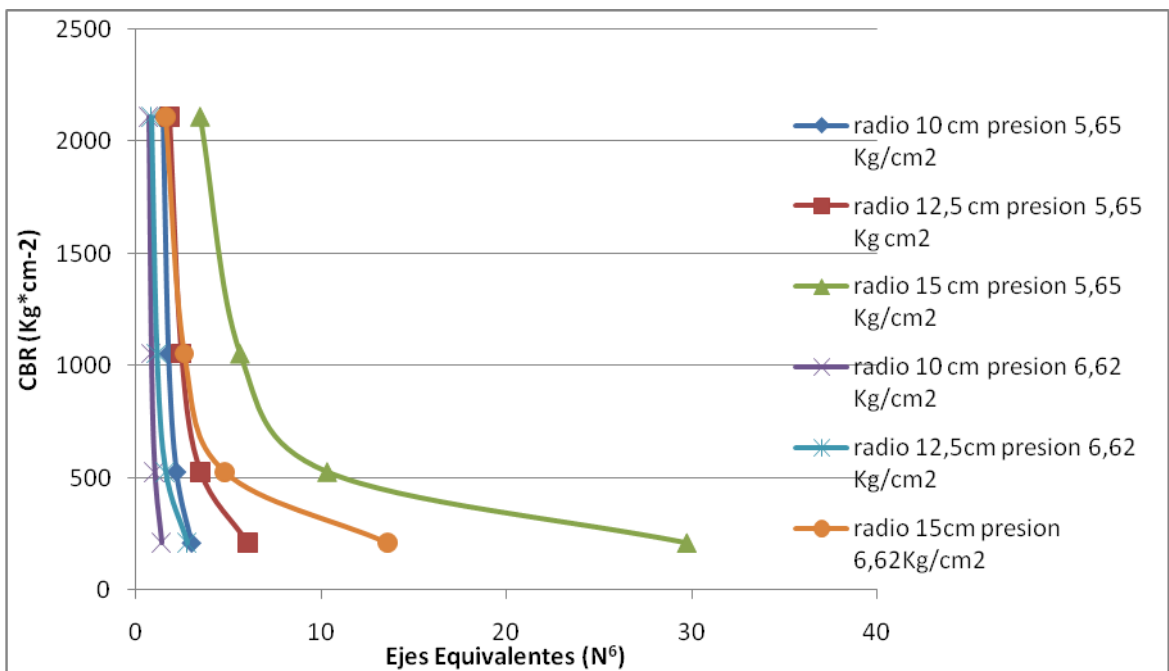


Figura No. 10

**MÓDULO 5000 PSI**

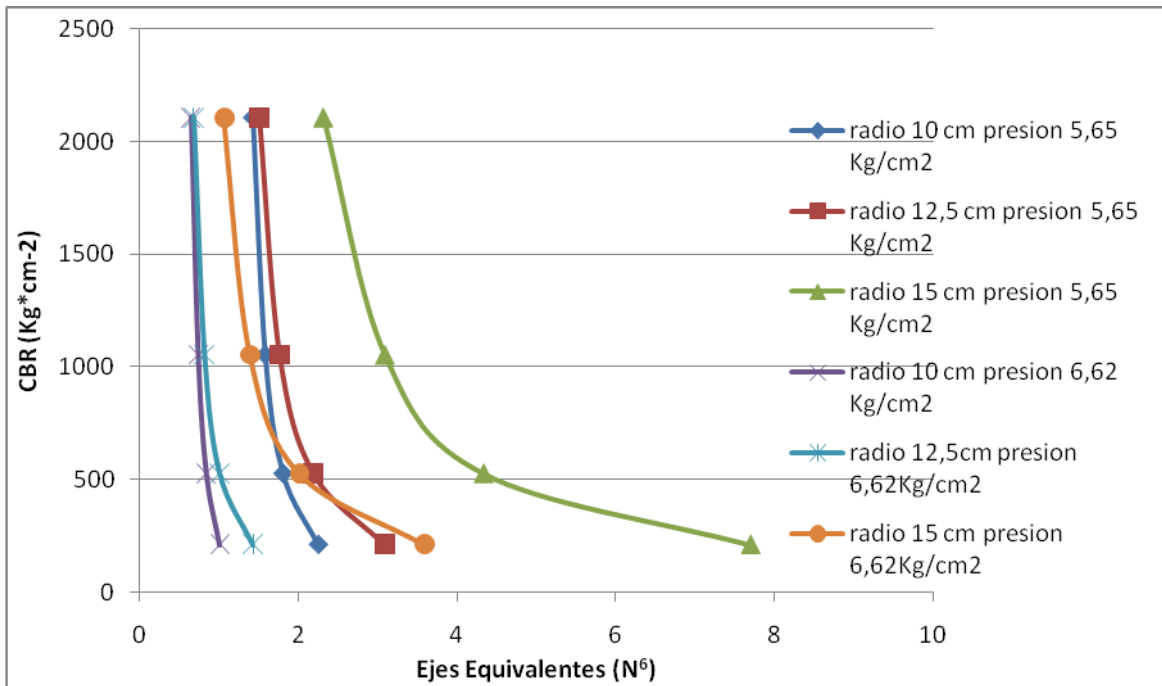


Figura No. 11

**MÓDULO 6000 PSI**

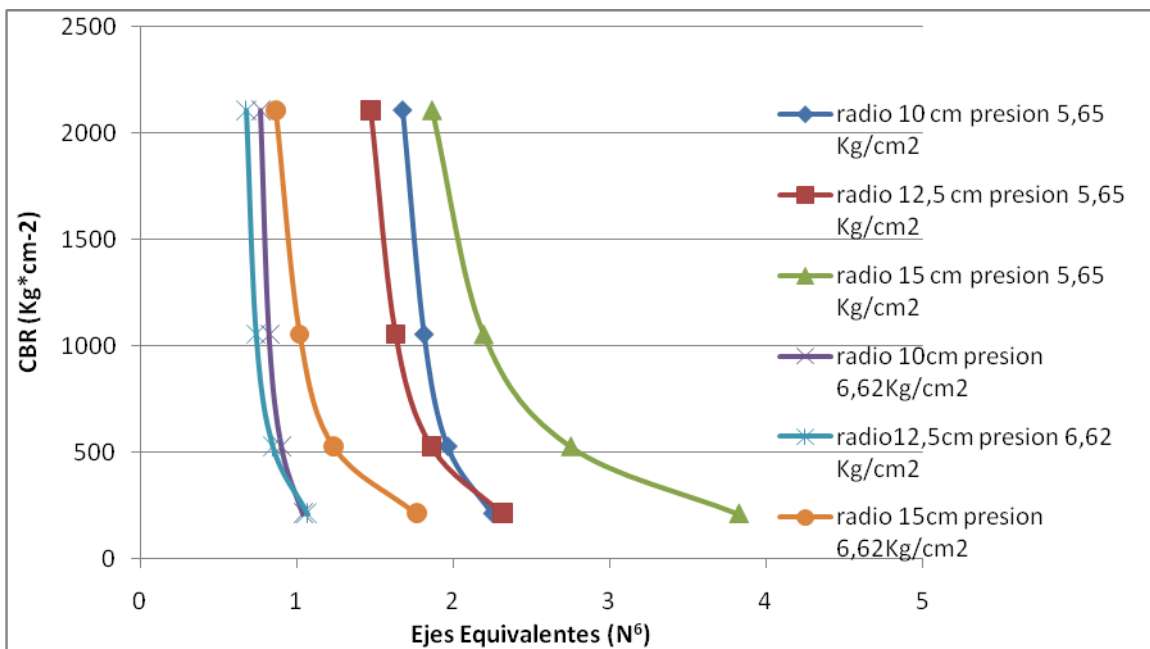


Figura No. 12

- En estas últimas cuatro figuras sigue marcada la tendencia a mantener el mismo comportamiento de cada una de los componentes tal como se pudo apreciar en las gráficas 1 a 8.

- Existe una disminución drástica de los valores de ejes equivalentes a medida que aumenta el módulo (de 3000 a 6000 PSI) llegando incluso a un tercio de cantidad de ejes observados cuando se trata del mismo módulo en distancias menores.
- Aunque se evidencia una tendencia a equilibrar los valores de ejes, se observa que la mayor cantidad de ejes se encuentra también mayor a medida que el CBR es menor, pero estas cantidades disminuyen o se mantienen casi parejas en la medida que el CBR es mayor para cada una de las componentes de la figura.

Ahora otra clase de análisis que se puede efectuar es manteniendo el valor del módulo de la mezcla constante y variando el valor de la distancia entre ejes el cual puede ser el caso de las figuras 1, 5 y 9 (módulo 3000 PSI) las cuales presentan un comportamiento igual pero que se diferencian en la cantidad de ejes equivalentes que estas disminuyen a medida que aumenta el valor de la distancia entre ejes, llegando a empezar desde mil millones de ejes hasta 900 millones en la condición más amplia que el radio más grande con la presión más baja.

Este mismo comportamiento se evidencia de manera un poco más diferenciado en los módulos mayores (4000, 5000 y 6000 PSI) con un comportamiento más ecuánime en cuanto a valores de ejes a medida que aumenta la mezcla.

**Módulos de la mezcla contra el valor de los ejes equivalentes (N).  
(Se mantiene constante los 5cm de espesor de la mezcla)**

**DISTANCIA EJES 10,5 cm; RADIO 10 cm**

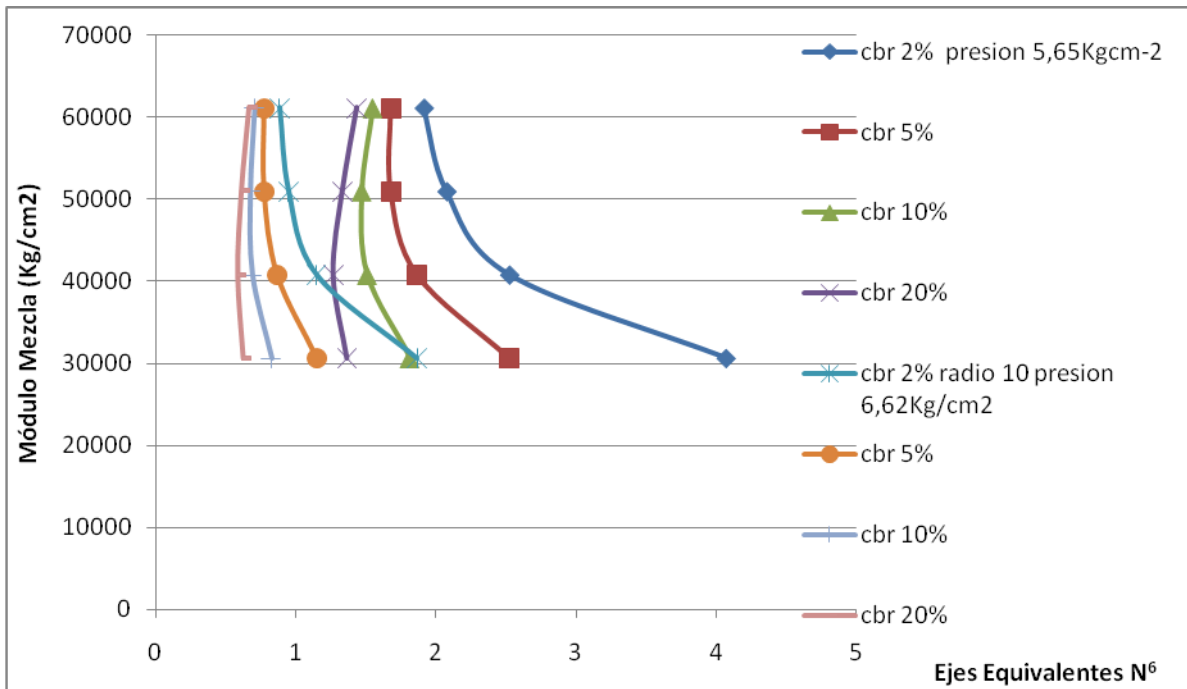


Figura No. 13

**RADIO 12,5 cm**

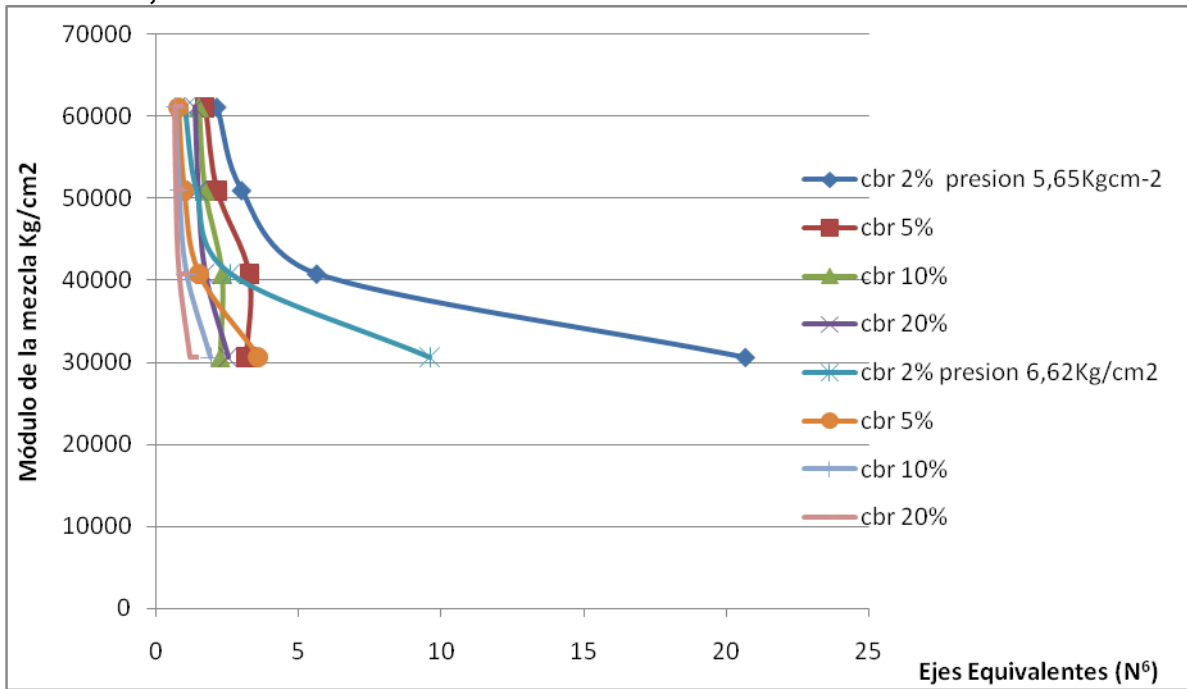
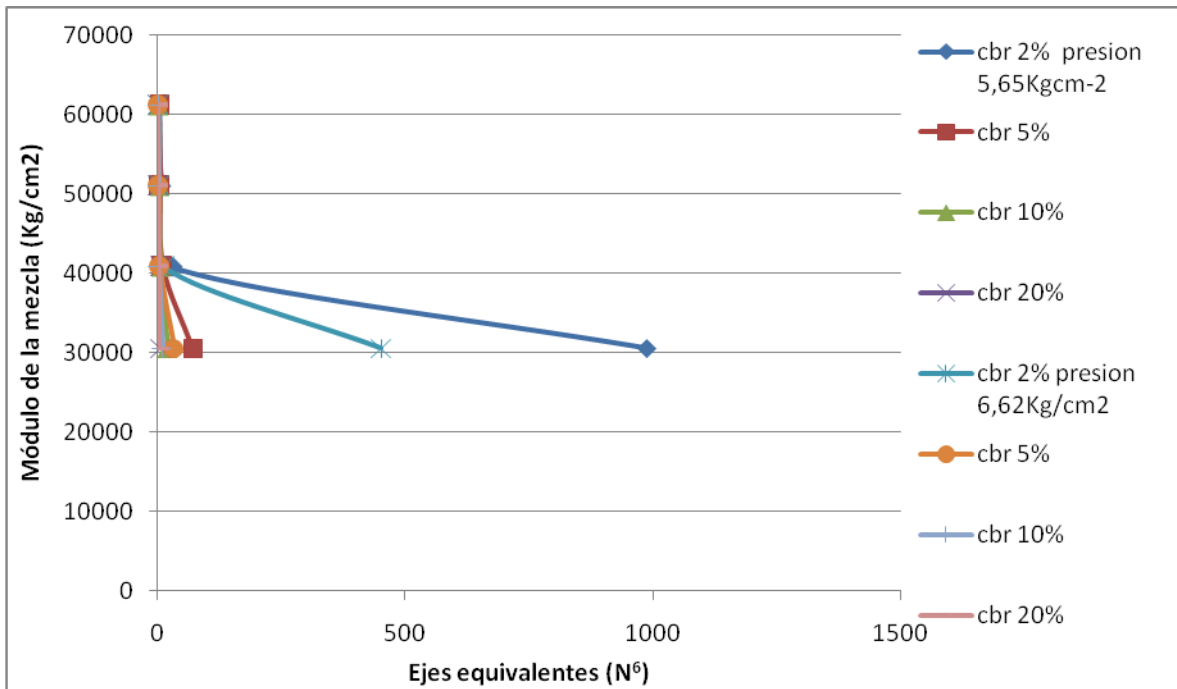


Figura No. 14

**RADIO 15 cm**



**Figura No. 15**

- En estas tres gráficas (13, 14 y 15) se mantienen constante las mayores cantidades de ejes equivalentes en los módulos de subrasante más bajos,
- Así mismo se observa un comportamiento no lineal de aumento de ejes equivalentes cuando el módulo de la mezcla es menor a 4000 PSI y es más notorio cuando el CBR es del 2%.
- Igualmente el valor de los ejes equivalentes aumenta a medida que aumenta el valor del radio pero disminuye en relación al aumento de la presión cualesquiera que sea el valor del CBR.

**DISTANCIA EJES 11,5 cm; RADIO 10 cm**

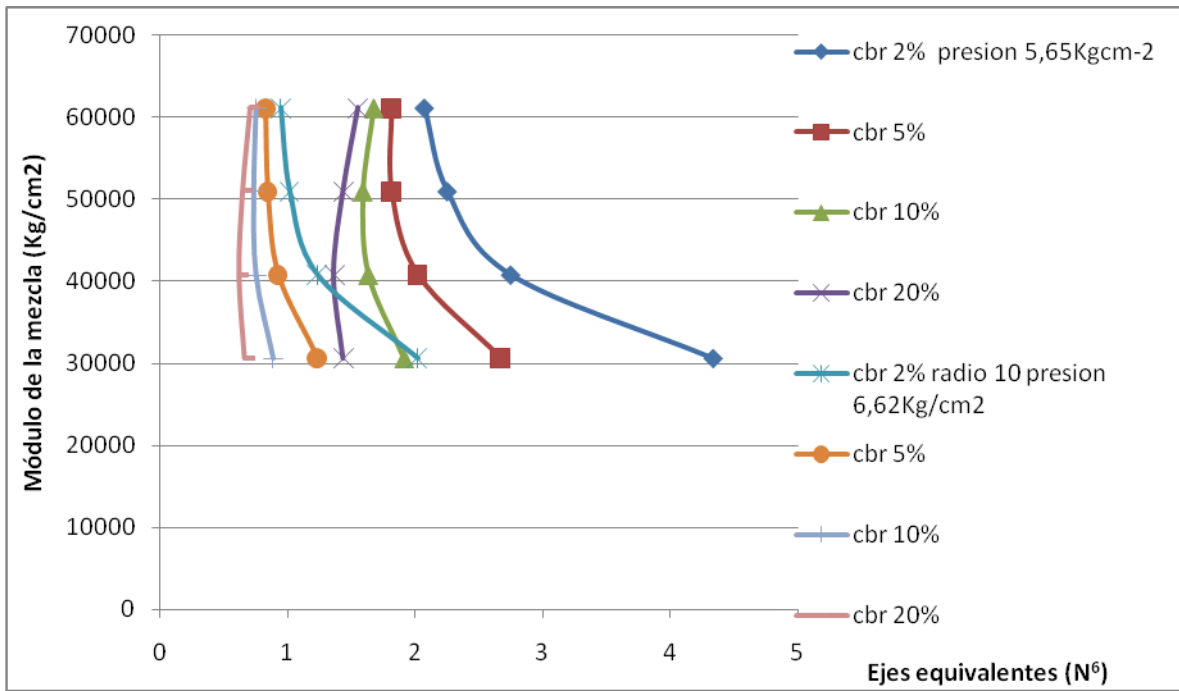


Figura No. 16

**RADIO 12,5 cm**

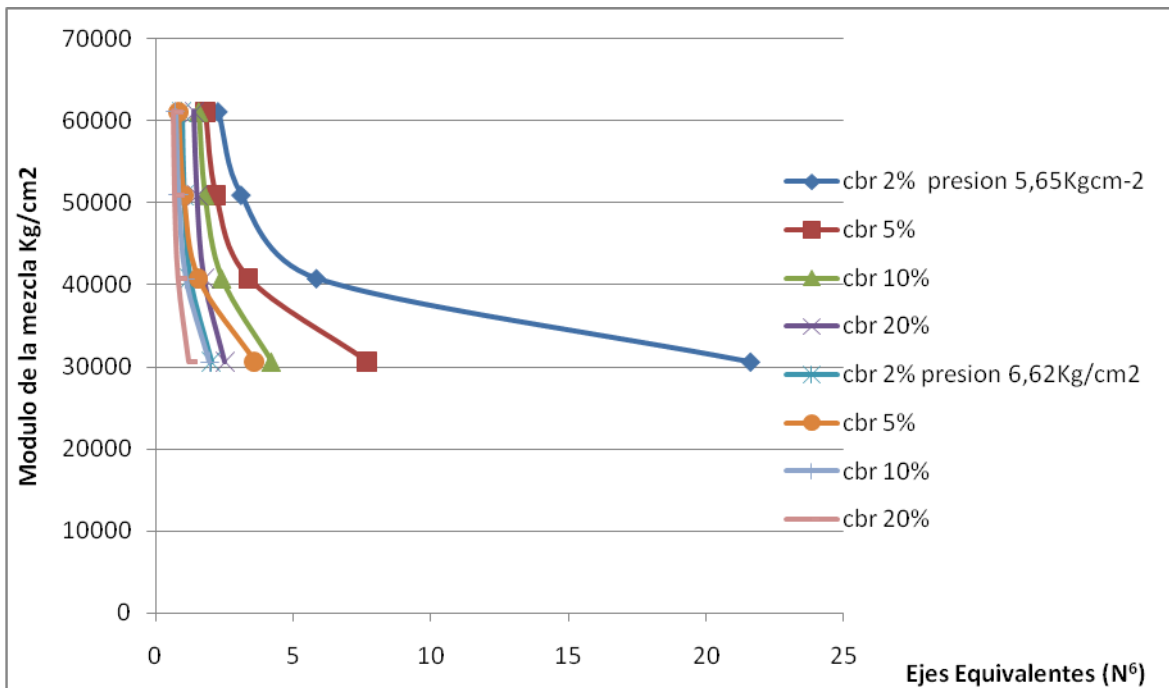


Figura No. 17

**RADIO 15 cm**



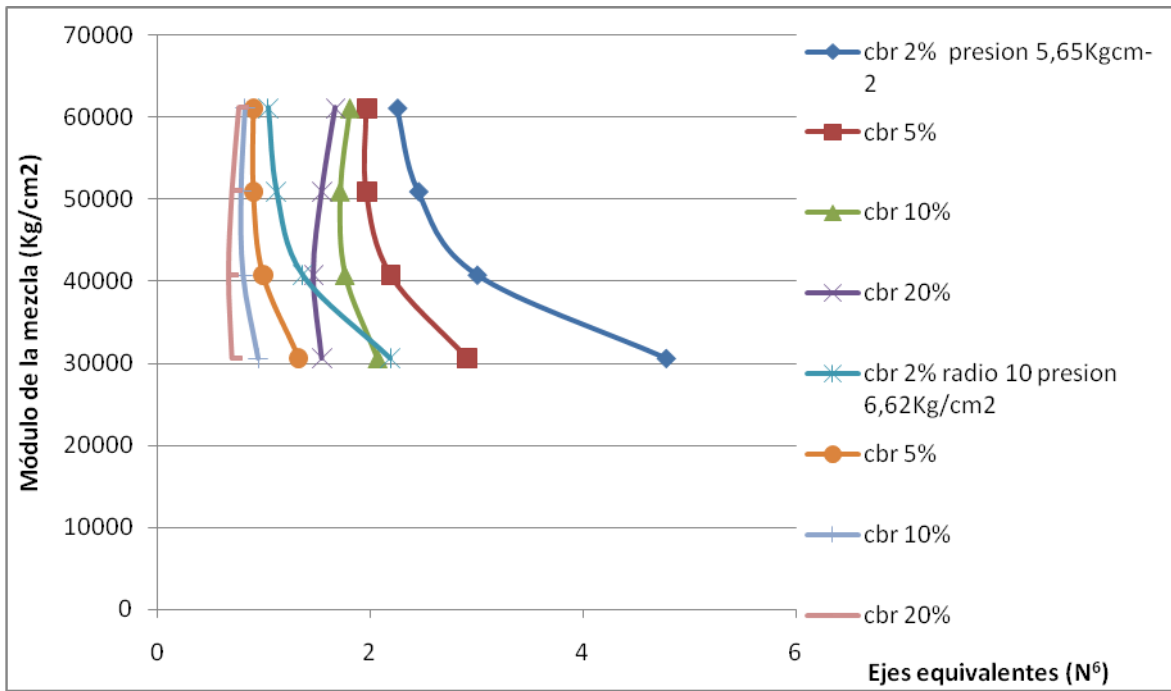


Figura No. 19

**RADIO 12,5 cm**

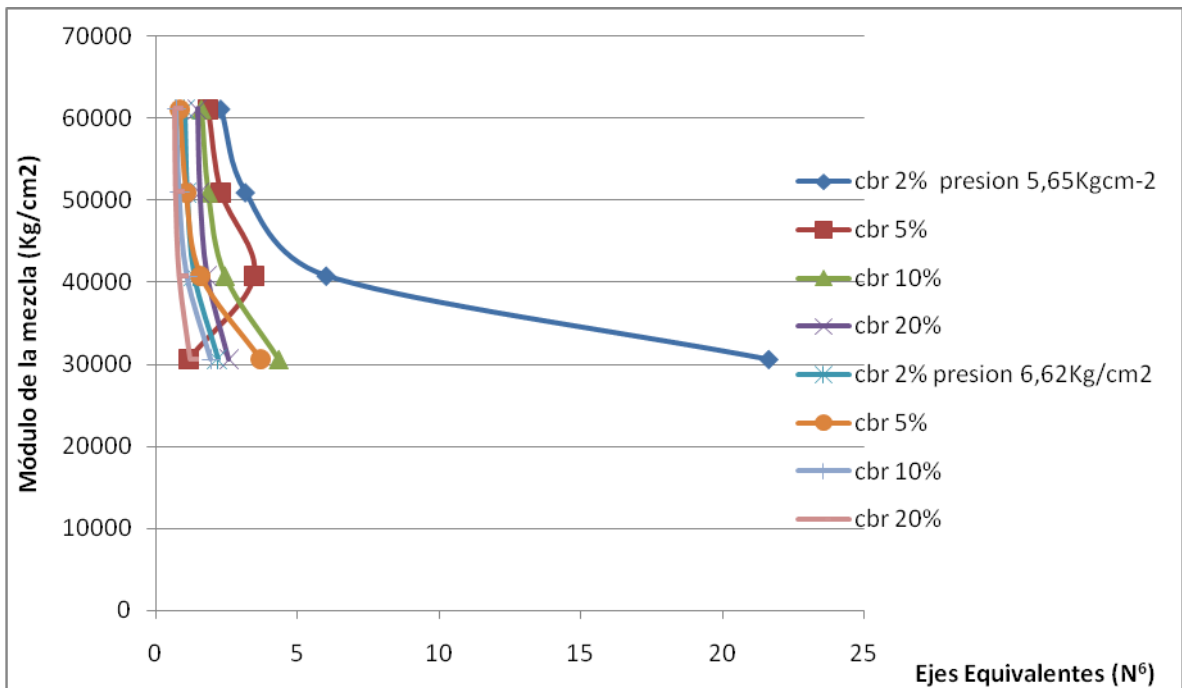
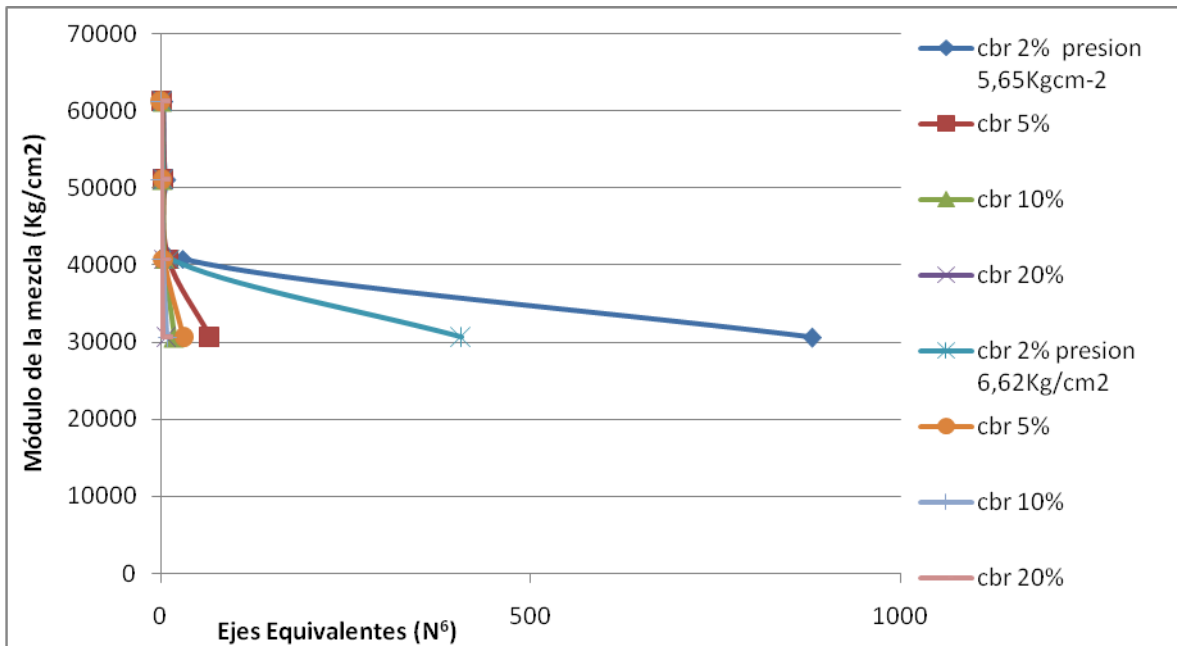


Figura No. 20

**RADIO 15 cm**





**Figura No. 21**

Estas tres últimas graficas muestran un comportamiento muy similar a los 6 graficas anteriores salvo una pequeña disminucion del valor de los ejes equivalentes a medida que aumenta el valor del radio.

Ahora otra forma de efectuar el análisis de estas graficas procede de mantener constante el valor del radio y variando el valor de la distancia entre ejes (graficas 13, 16 y 19) donde se observa un comportamiento similar en cada una de sus componentes pero con la tendencia a ser más elásticas las graficas de sus componentes comoquiera que las cantidades de ejes equivalentes se mantienen constantes salvo en el módulo de mezcla menor (3000 PSI).

De otra parte se resalta el hecho que el valor de las cantidades de ejes es igual o similar en cada una de las distancias de ejes, por lo que se demuestra que este parámetro no influye notoriamente en este escenario.

### 3.3.2 ESPESOR DE CAPA ASFALTICA 7,5 cm

Continuando con la metodología aplicada para el espesor de mezcla anterior (5cm), se pretende seguir ilustrando la influencia de los parámetros estudiados a medida que la mezcla asfáltica aumenta en espesor.

#### GRÁFICAS DEL VALOR DE N vs CBR

**DISTANCIA EJES 10,5 cm; MÓDULO 3000 PSI;**

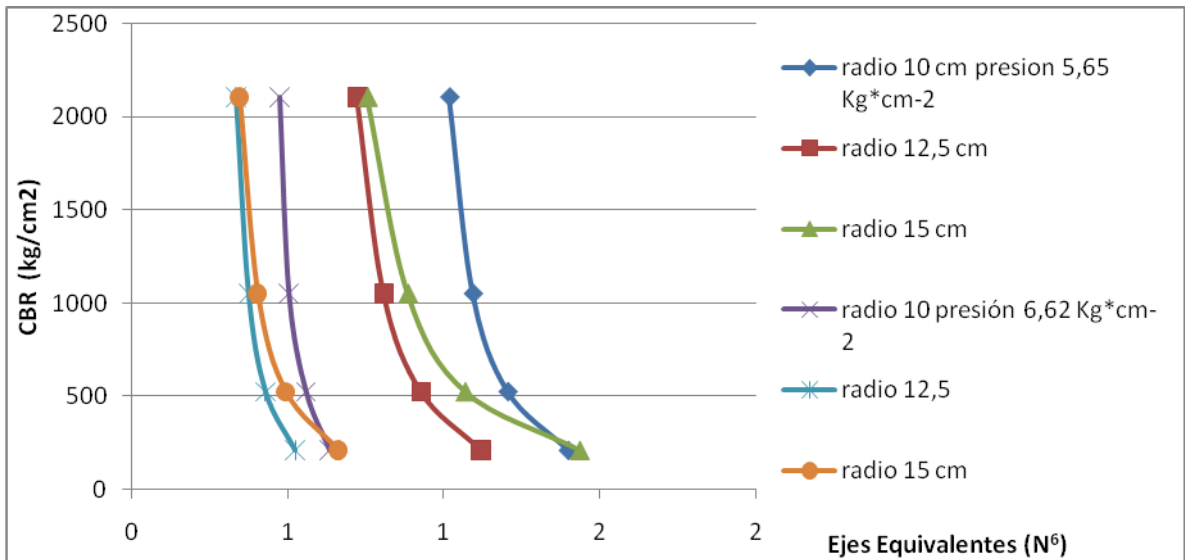


Figura No. 22

**MÓDULO 4000 PSI**

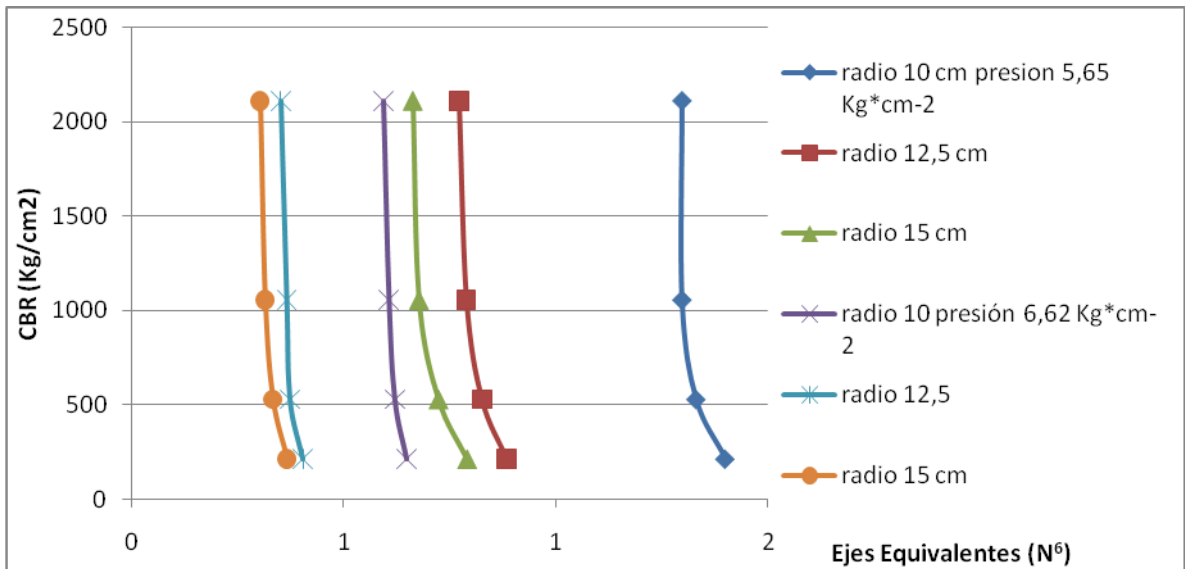


Figura No. 23

**MÓDULO 5000 PSI**

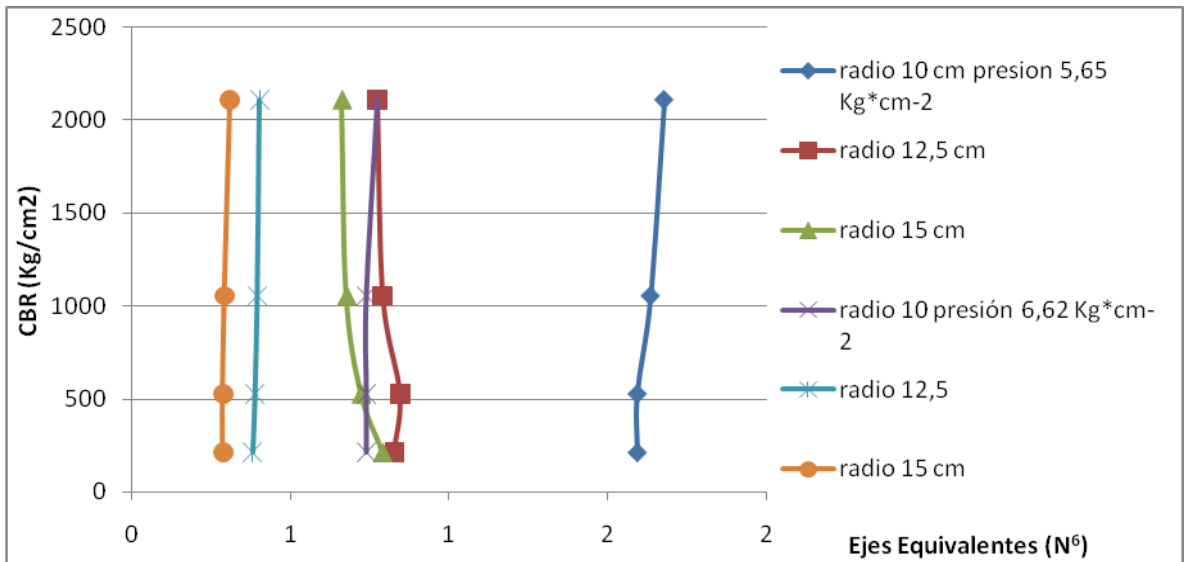


Figura No. 24

### MÓDULO 6000 PSI

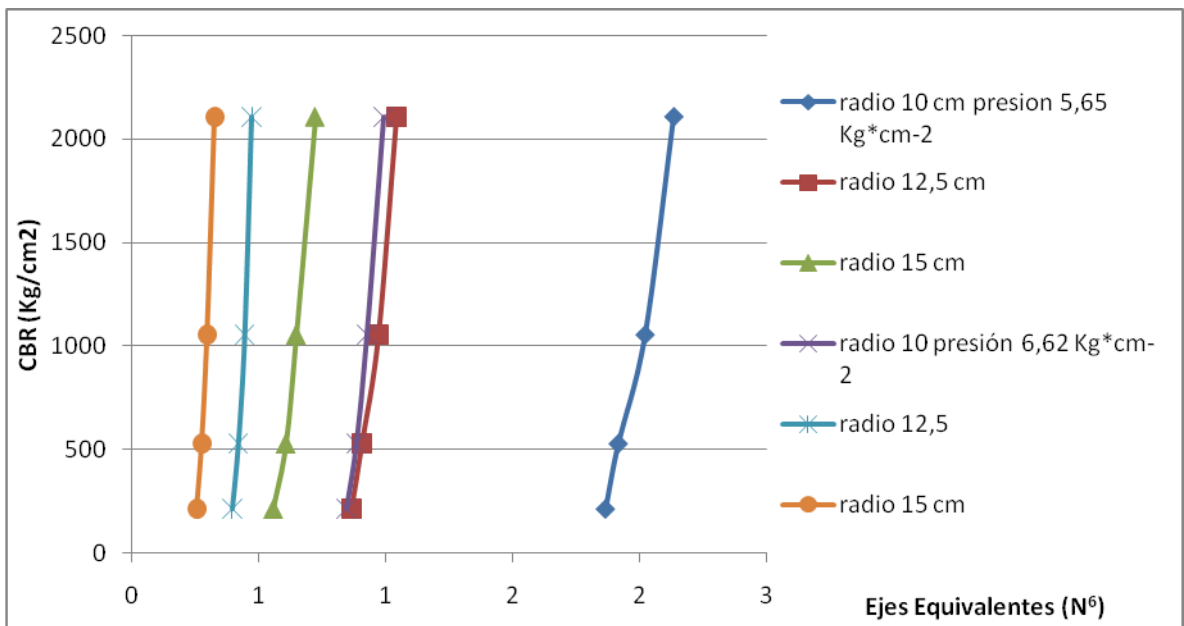
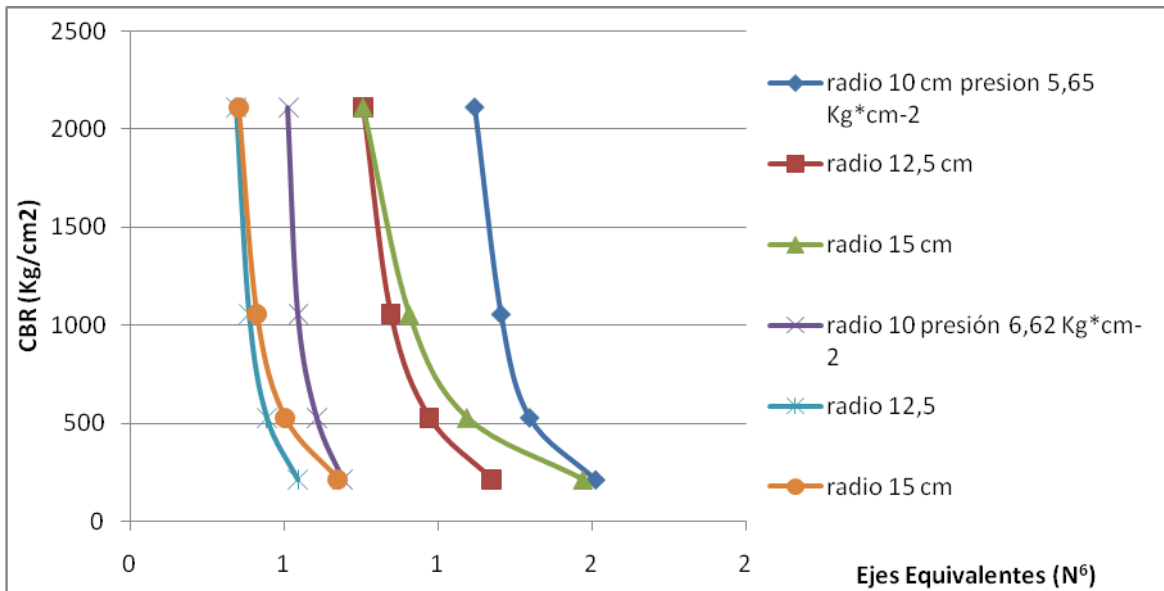


Figura No. 25

- En las anteriores cuatro gráficas se evidencia un comportamiento muy parecido en cada componente en relación a la cantidad de ejes equivalentes las cuales oscilan entre 750 mil y millón doscientos mil ejes,

- Su comportamiento incrementando el módulo de la mezcla tiende a ser totalmente lineal con un pequeño incremento de ejes a medida que aumenta el módulo de subrasante.
- Se mantiene el rango de mayor cantidad de ejes equivalentes a medida que disminuye el radio y la presión.

**DISTANCIA EJES 11,5 cm; MÓDULO 3000 PSI;**



**Figura No. 26**

**MÓDULO 4000 PSI**

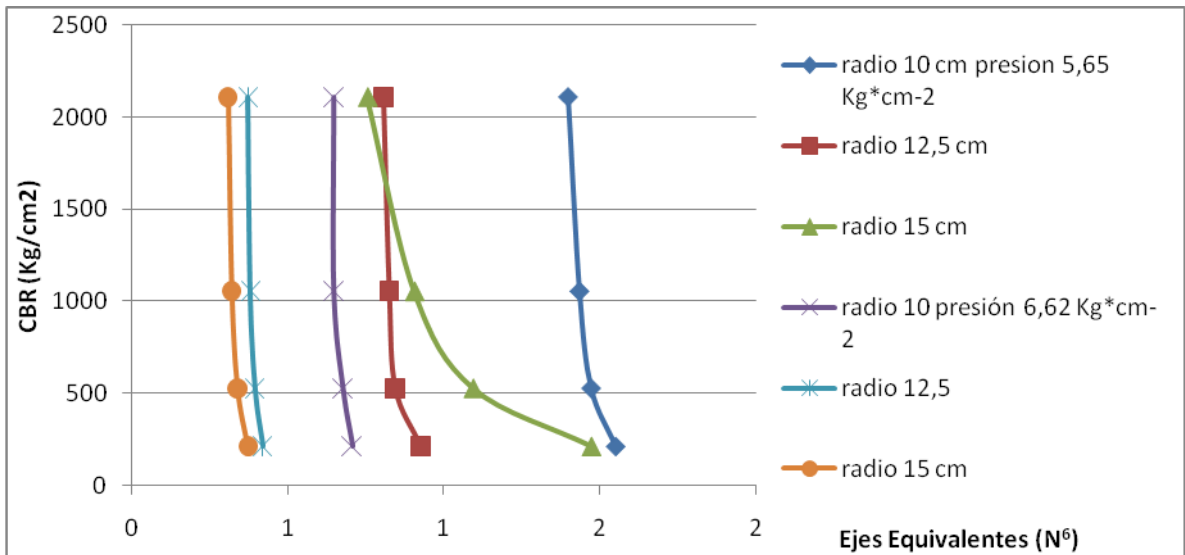


Figura No. 27

**MÓDULO 5000 PSI**

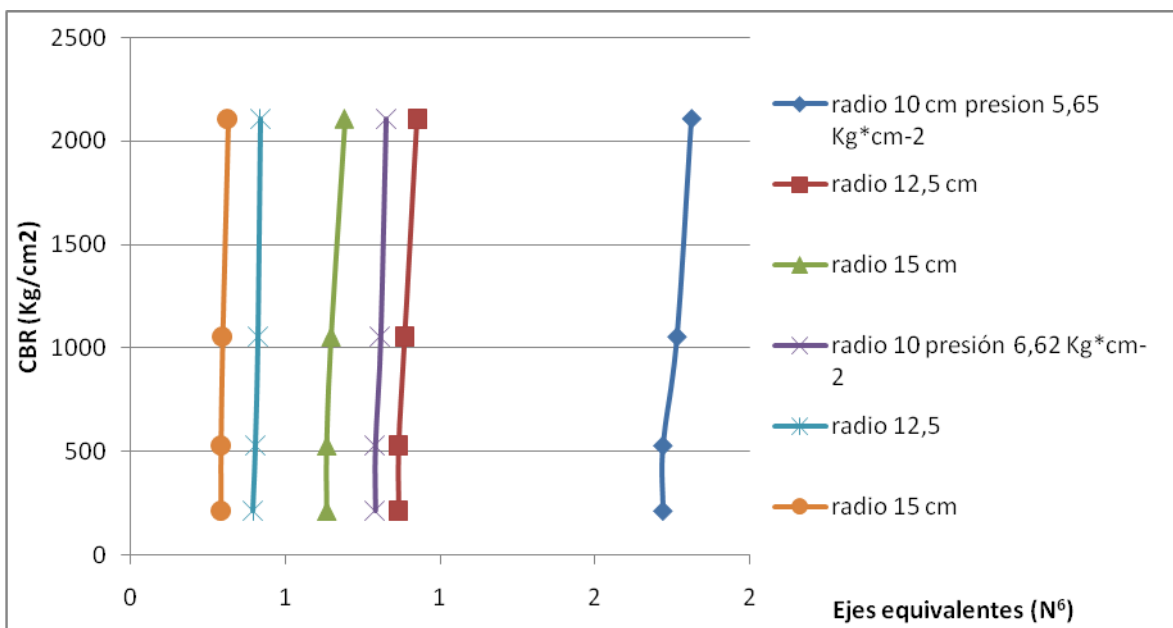
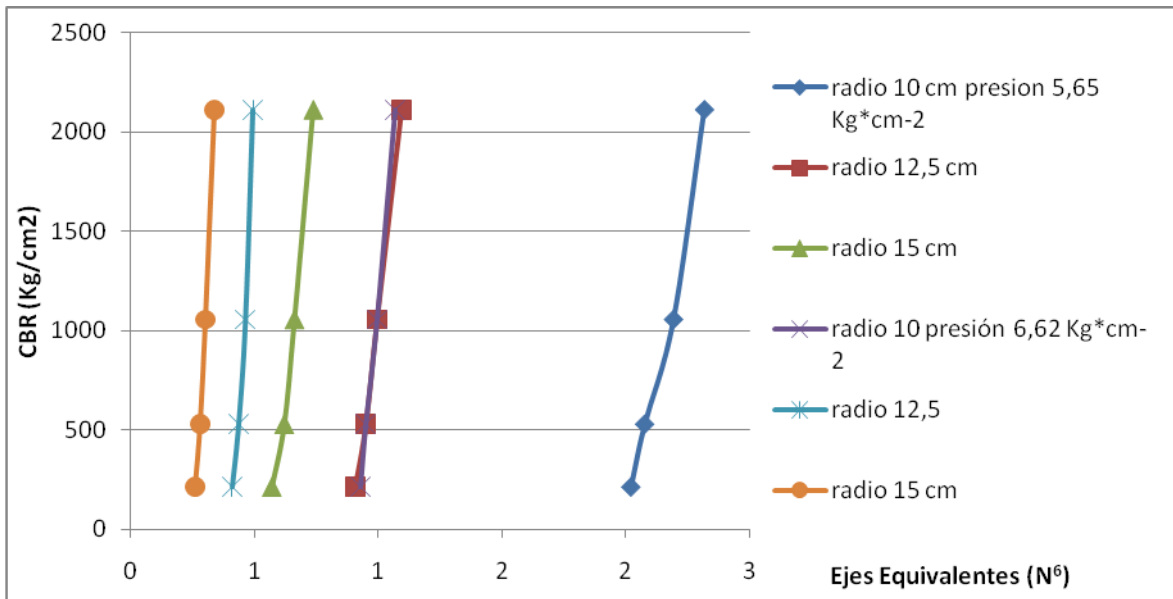


Figura No. 28

**MÓDULO 6000 PSI**



**Figura No. 29**

- En estas cuatro gráficas se evidencia un comportamiento similar a las 4 gráficas anteriores salvo en las cantidades de ejes equivalentes obtenidos para cada componente las cuales tienen tendencia al alza.

**DISTANCIA EJES 12,5 cm; MÓDULO 3000 PSI;**

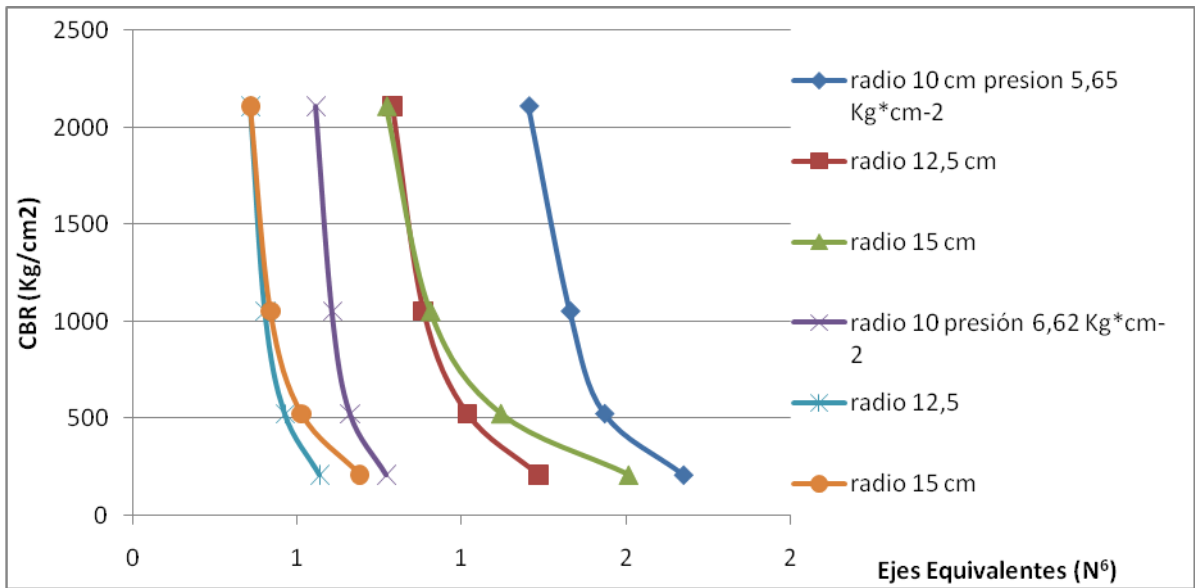


Figura No. 30

**MÓDULO 4000 PSI**

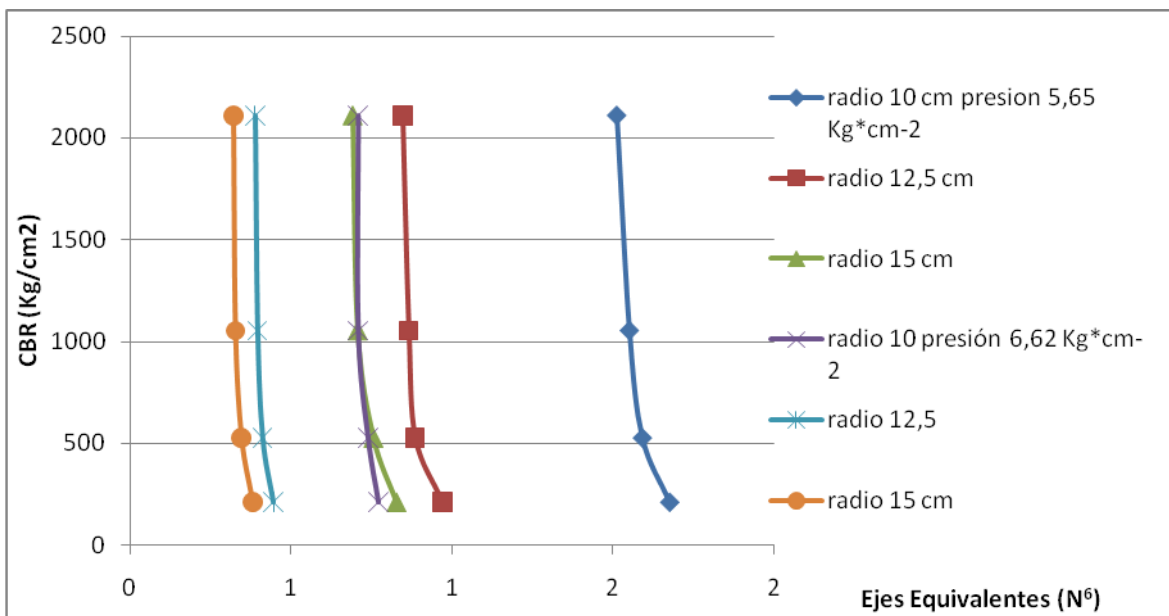


Figura No. 31

**MÓDULO 5000 PSI**

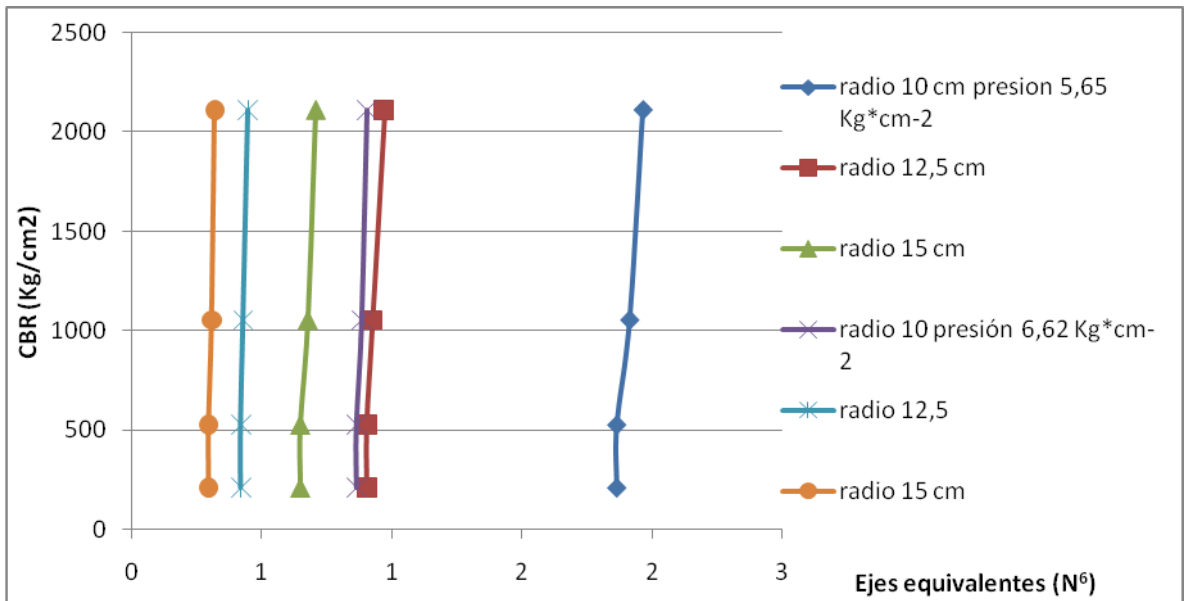


Figura No. 32

### MÓDULO 6000 PSI

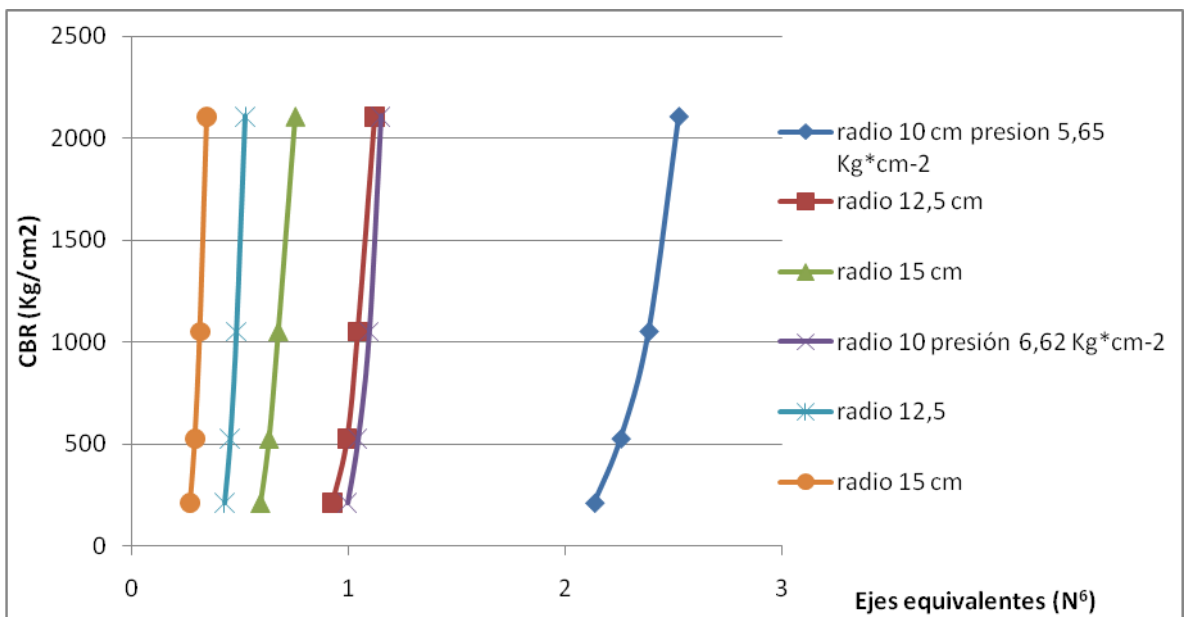


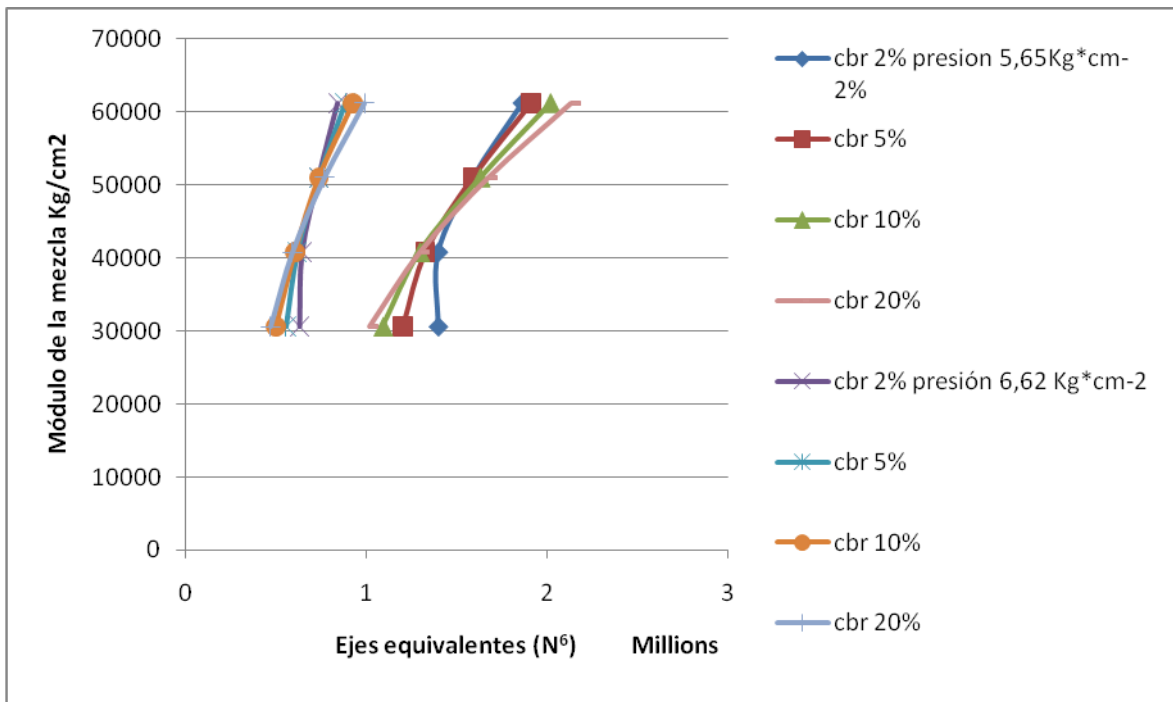
Figura No. 33

La tendencia es igual salvo que es preciso indicar que el valor de los ejes se mantiene relativamente igual en cualquiera de los módulos relacionados.

### GRÁFICAS DEL VALOR DE N vs MÓDULO MEZCLA ASFALTICA

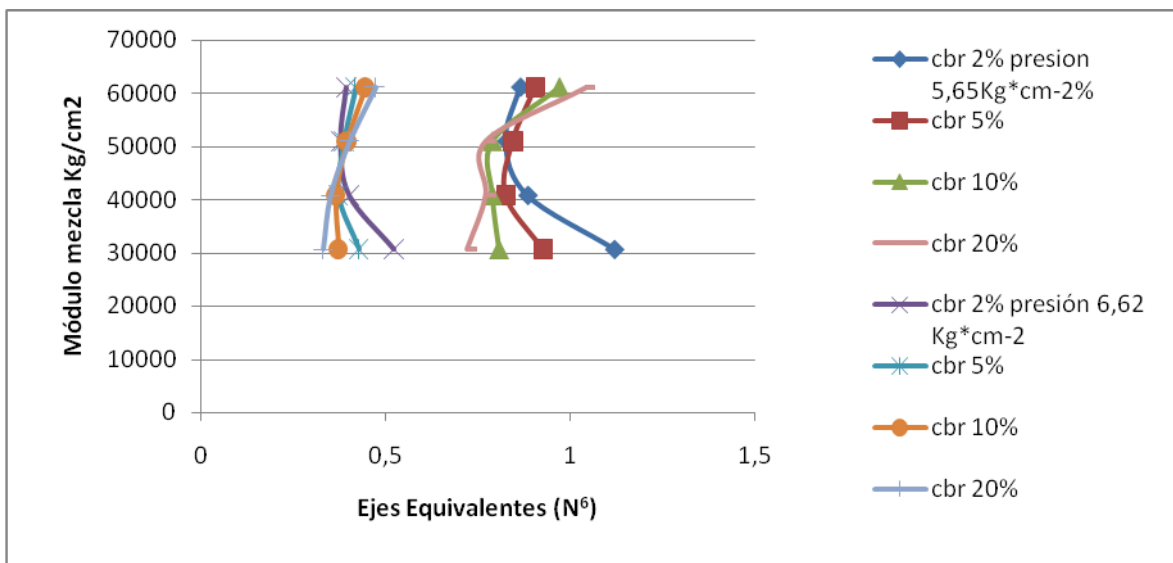


**DISTANCIA EJES 10,5 cm; RADIO 10 cm.**



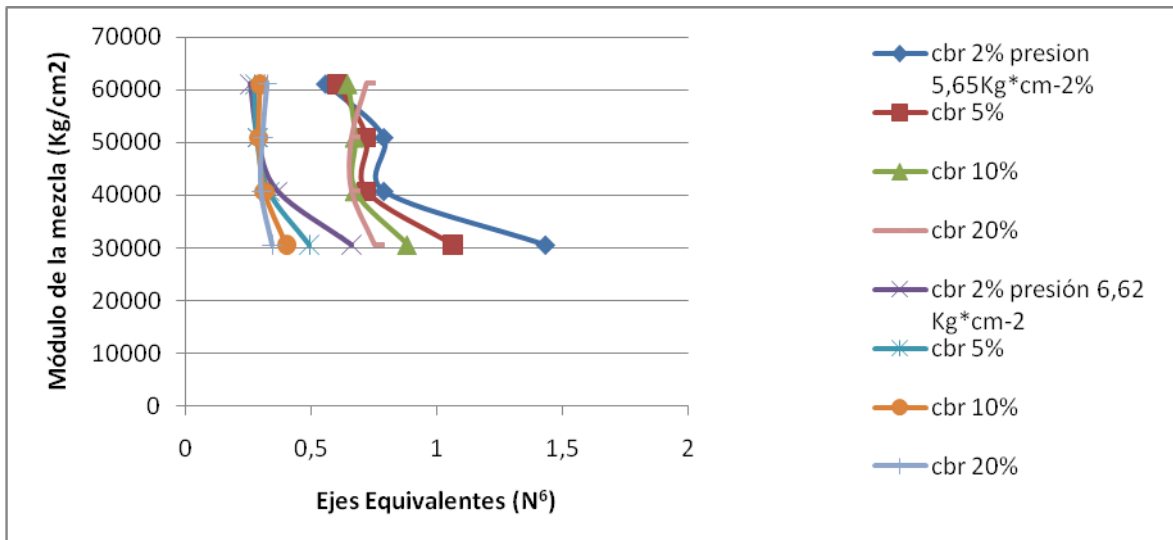
**Figura No. 34**

**RADIO 12,5 cm.**



**Figura No. 35**

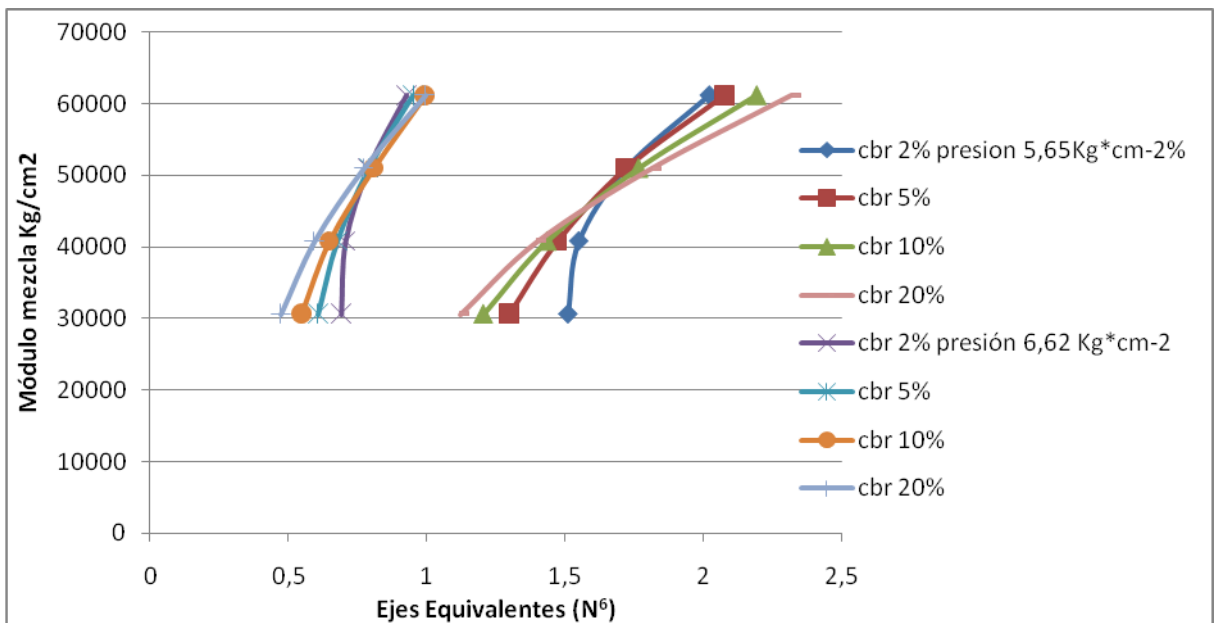
**RADIO 15 cm.**



**Figura No. 36**

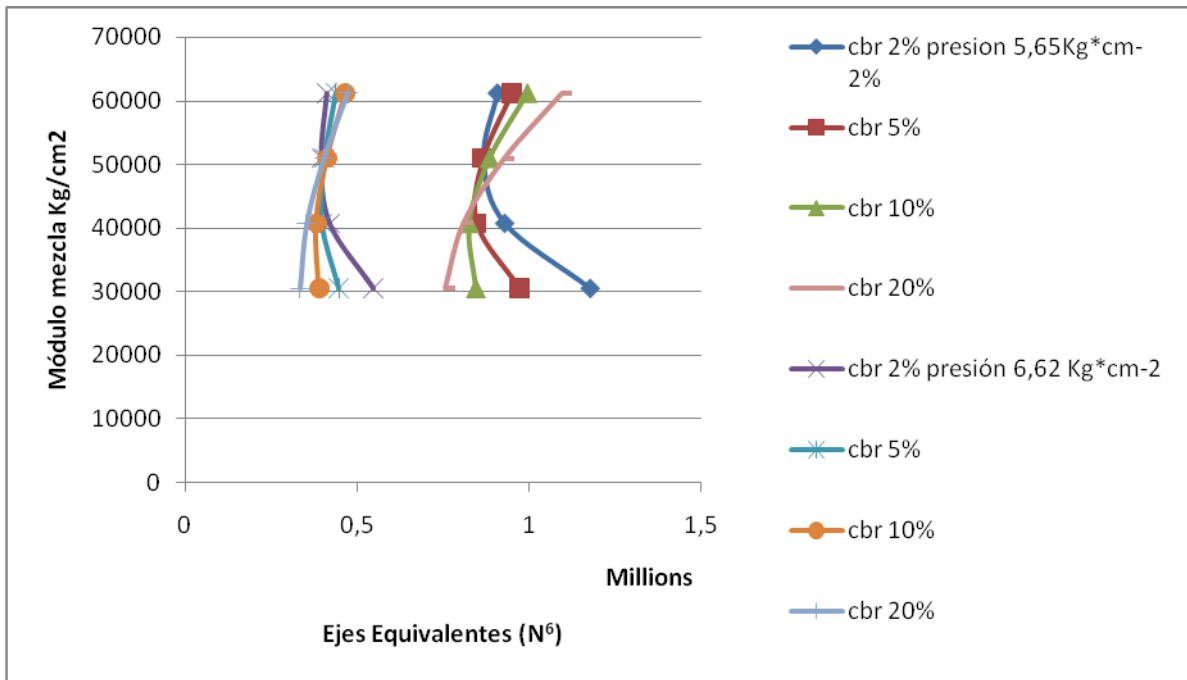
- A medida que la presión de contacto es menor, se obtiene una mayor cantidad de ejes.
- Existe una agrupación de componentes acordes con el valor de su presión.
- De otra parte el aumento de ejes equivalentes aumenta proporcional al incremento del valor del radio.

**DISTANCIA EJES 11,5 cm; RADIO 10 cm.**



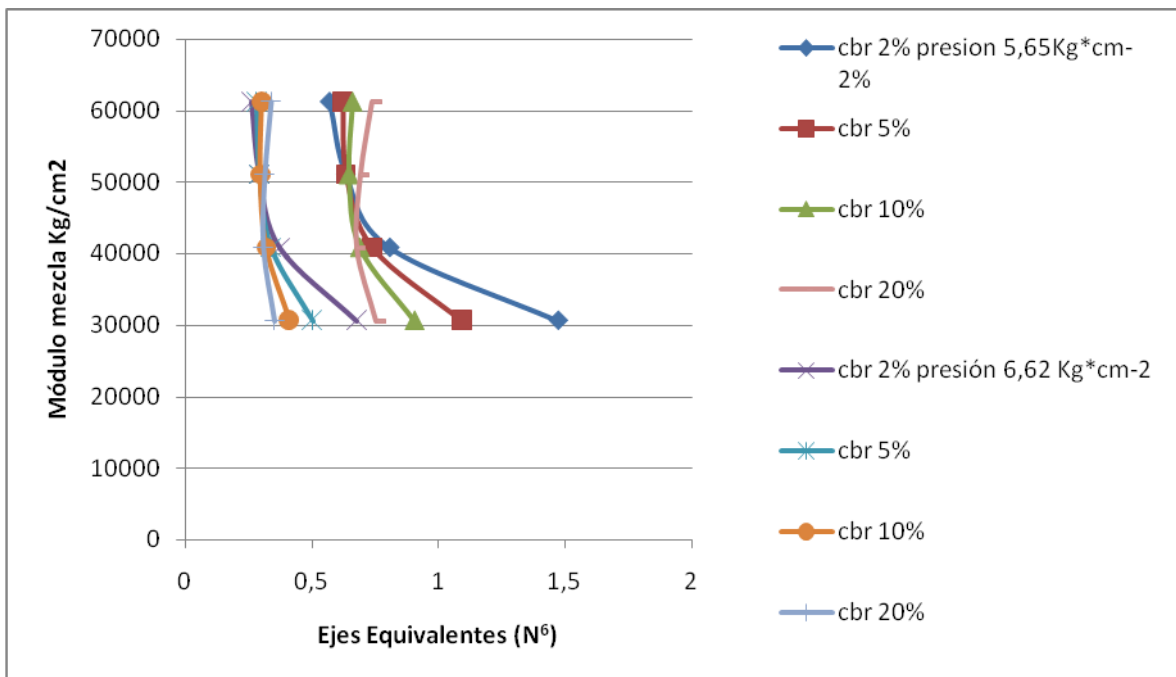
**Figura No. 37**

**RADIO 12,5 cm.**



**Figura No. 38**

**RADIO 15 cm.**



**Figura No. 39**

Se mantiene la misma tendencia de las tres gráficas anteriores en cuanto a cantidad de ejes equivalentes pero se encuentra un punto medio de encuentro de ejes equivalentes en cada uno de los grupos de presión de contacto el cual se ubica aproximadamente en los 4500 PSI.

**DISTANCIA EJES 12,5 cm; RADIO 10 cm.**

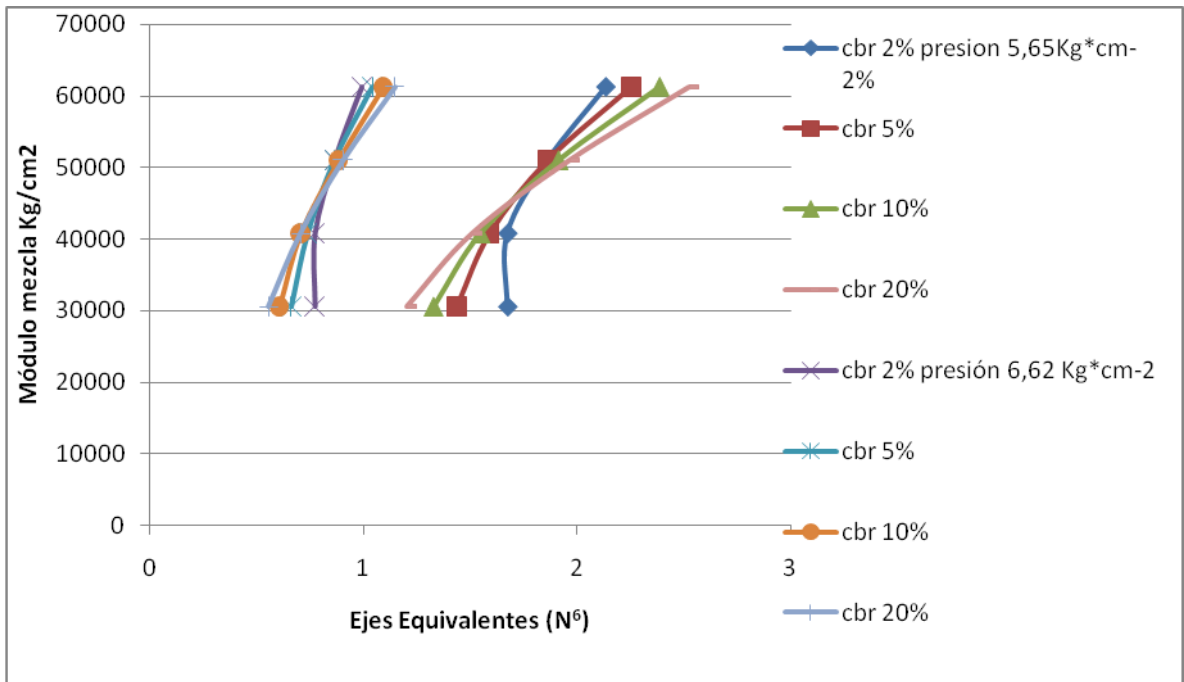


Figura No. 40

RADIO 12,5 cm

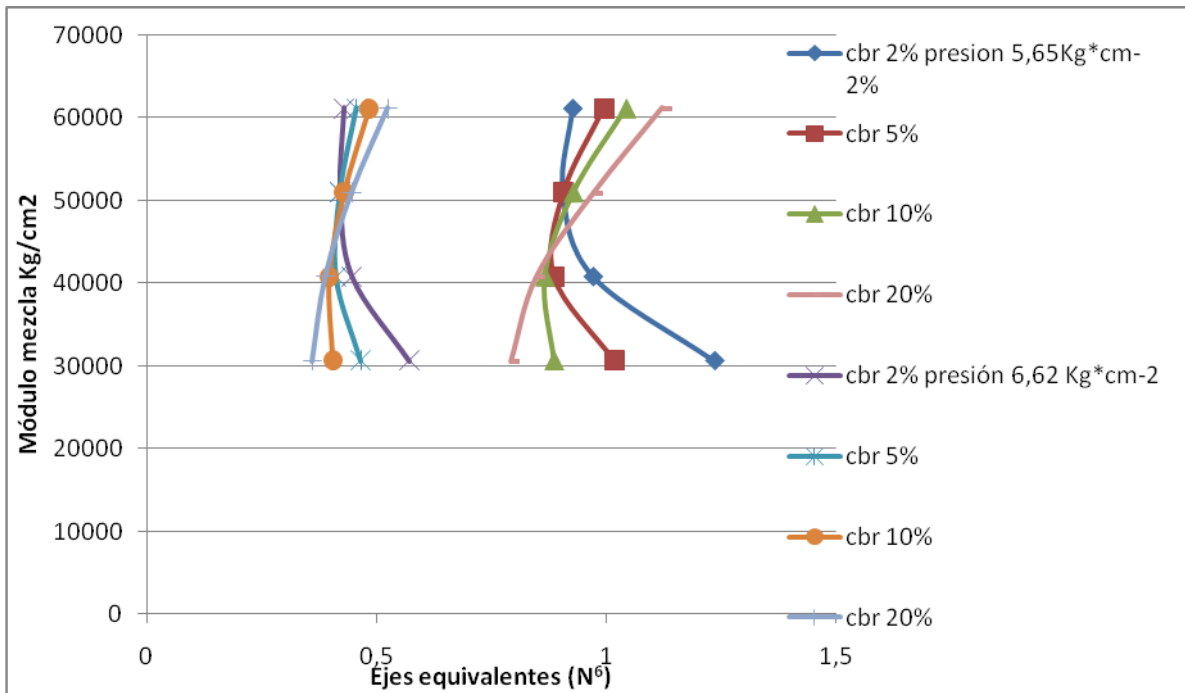


Figura No. 41

**RADIO 15 cm**

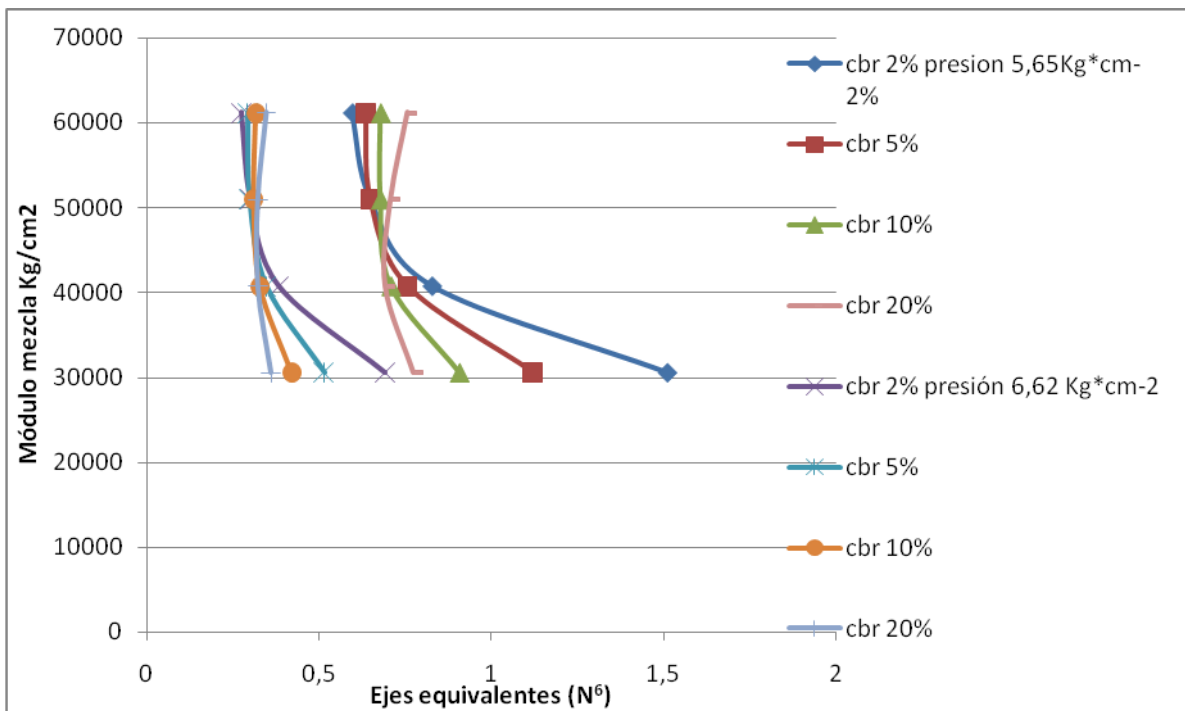


Figura No. 42

- Sigue la misma tendencia de agrupación y se encuentra que no hay un incremento o pérdida significativa de ejes a medida que se aumenta el radio
- Igualmente se encuentra que a medida que aumenta el radio y disminuye el módulo de la mezcla aumenta la cantidad de ejes.

Ahora manteniendo constante el valor del módulo y aumentando la distancia entre ejes (gráficas 34, 37 y 40) se encuentra que si hay un aumento de ejes equivalentes a medida que se incrementa la distancia entre los ejes y que el comportamiento de sus componentes se mantiene agrupado acorde con las presiones de contacto.

### 3.3.3 ESPESOR DE CAPA ASFALTICA 10 cm.

#### GRAFICAS DEL VALOR DE N vs CBR

DISTANCIA EJES 10,5 cm; MÓDULO 3000 PSI;

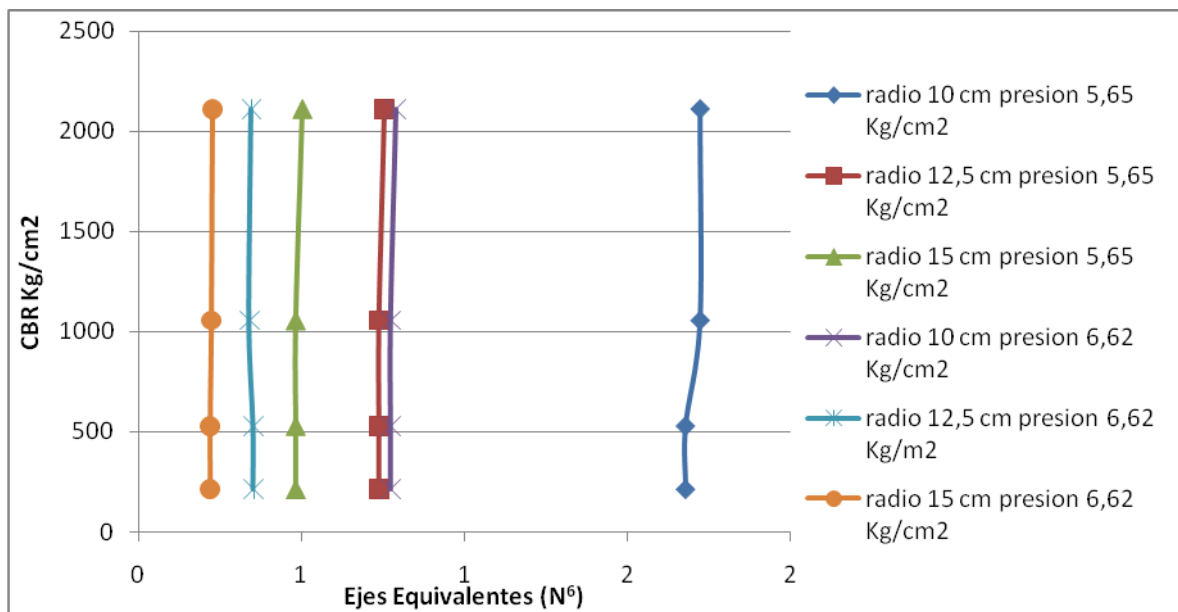


Figura No. 43

MÓDULO 4000 PSI

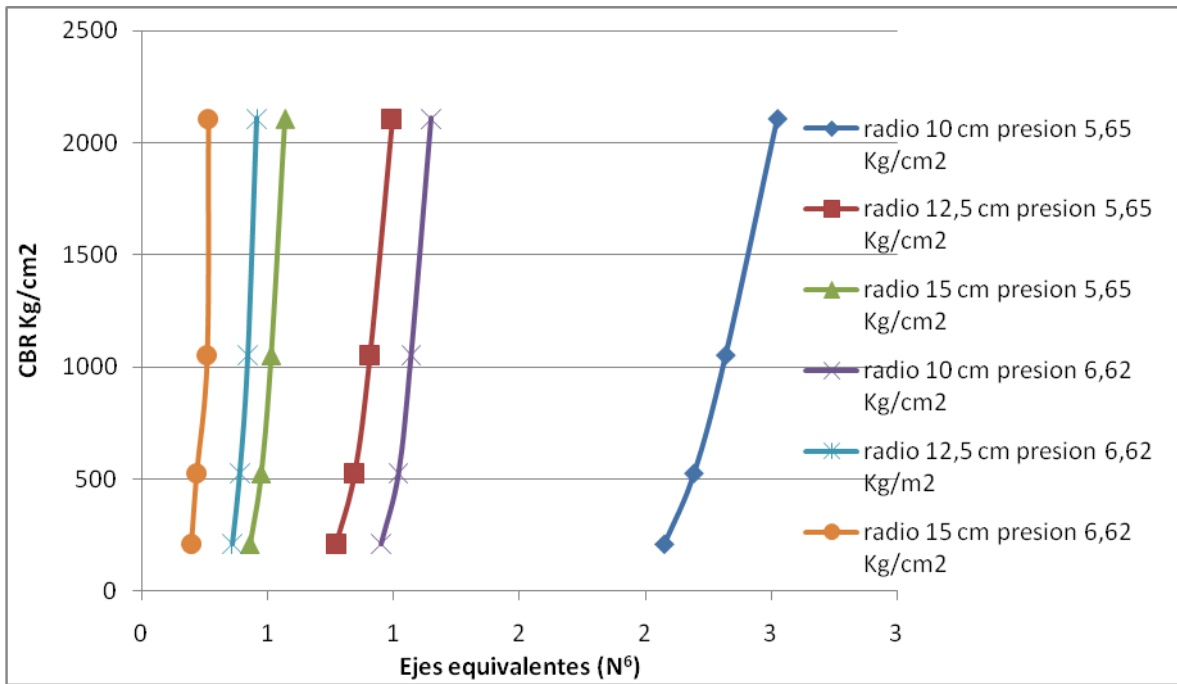


Figura No. 44

MÓDULO 5000 PSI

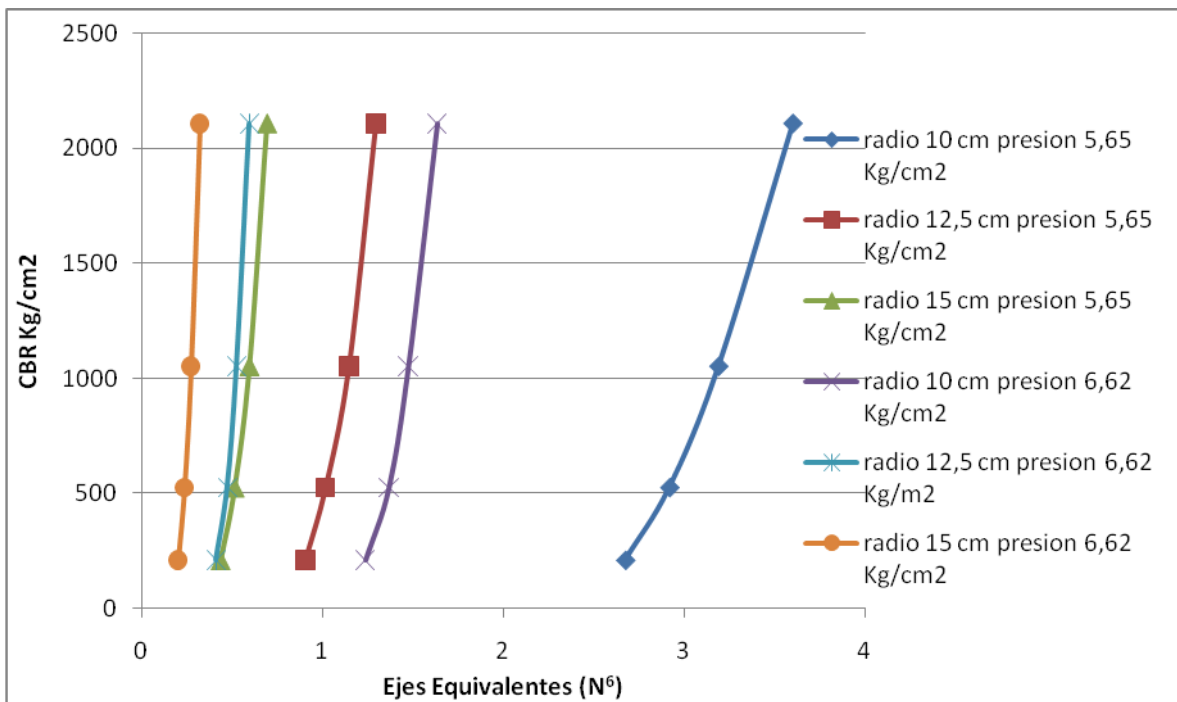
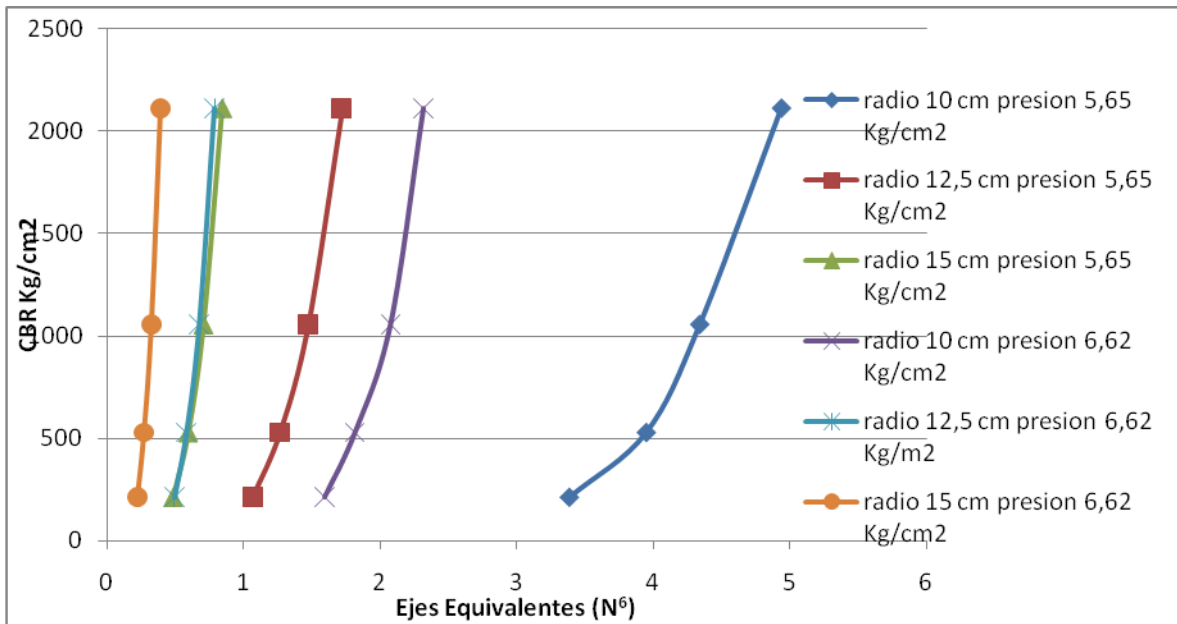


Figura No. 45

MÓDULO 6000 PSI



**Figura No. 46**

- En estas cuatro gráficas se evidencia un comportamiento casi vertical de cada una de las componentes con una leve tendencia a incrementarse a medida que aumenta el valor del módulo del CBR.
- Así mismo, la cantidad de ejes equivalentes aumenta en la medida en que aumenta el valor del módulo de la mezcla.
- Por último se diferencia la componente de menor radio y presión con la mayor cantidad de ejes en comparación con las demás componentes.

**DISTANCIA EJES 11,5 cm; MÓDULO 3000 PSI;**



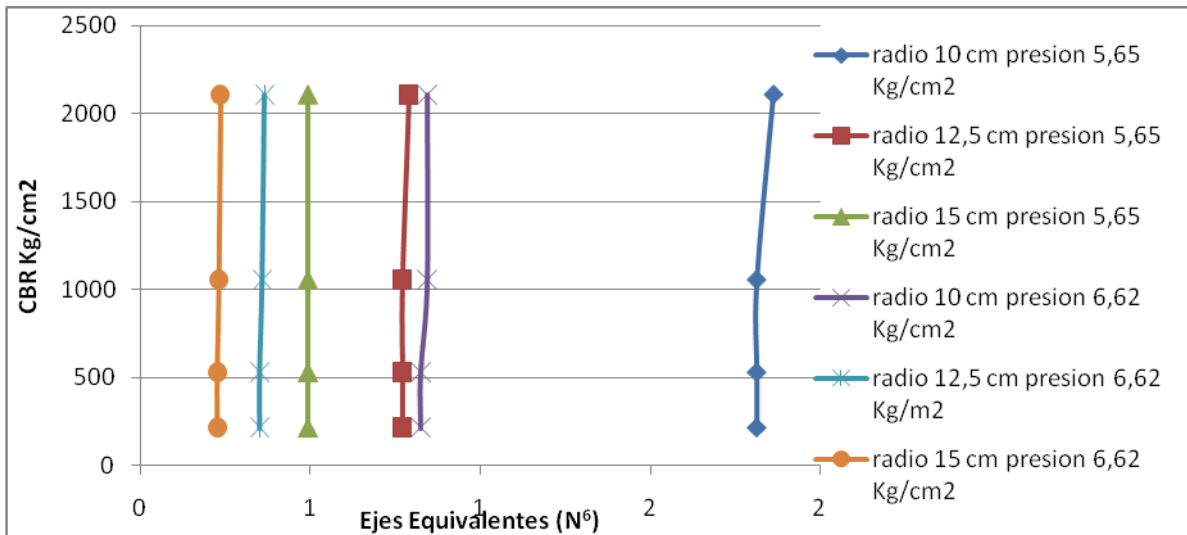


Figura No. 47

**MÓDULO 4000 PSI**

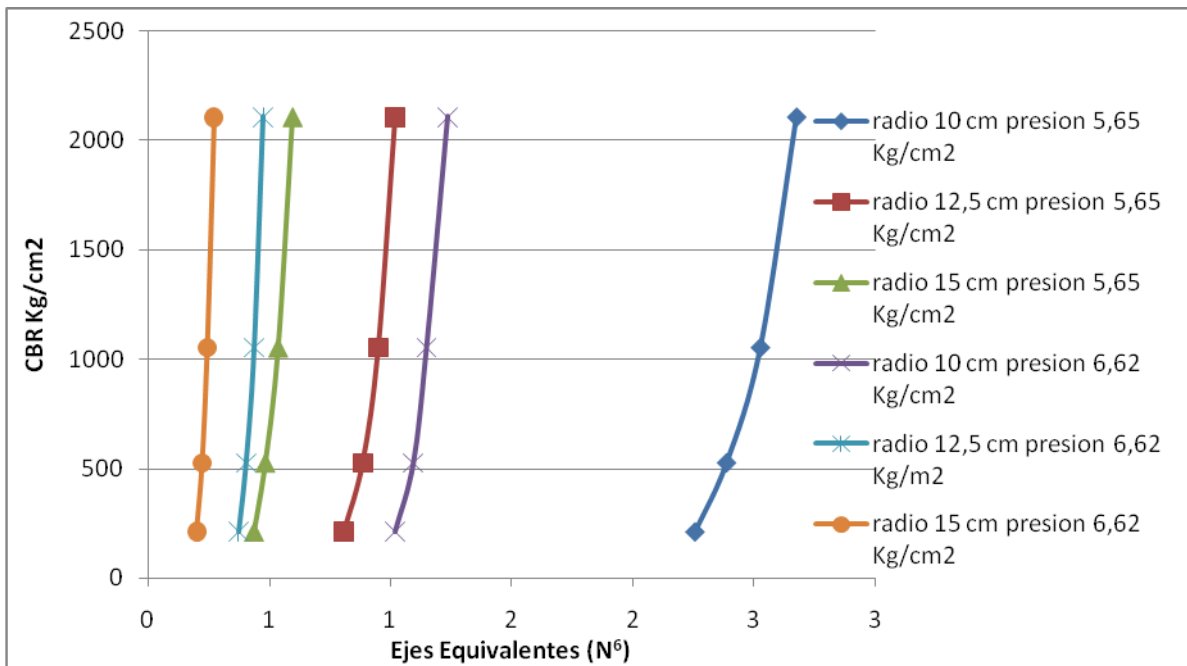


Figura No. 48

**MÓDULO 5000 PSI**

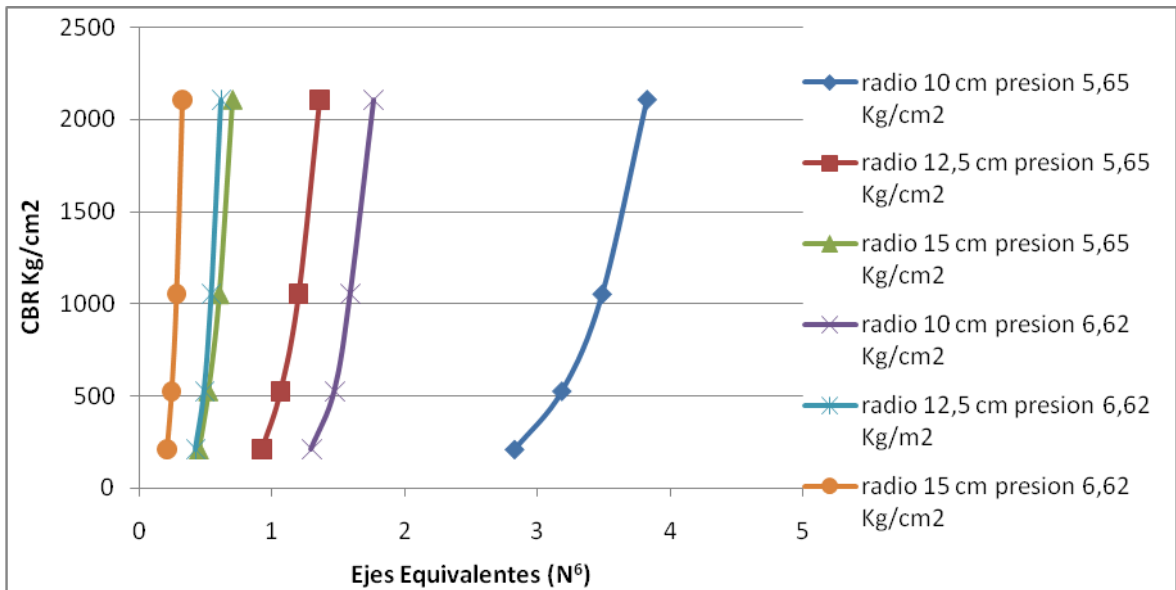


Figura No. 49

**MÓDULO 6000 PSI**

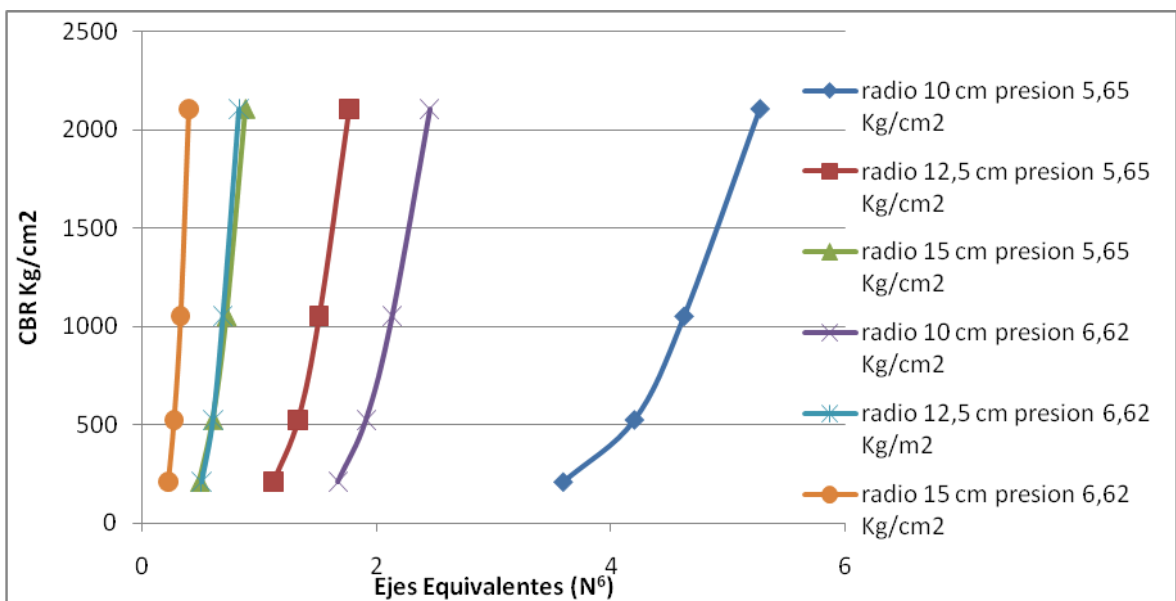


Figura No. 50

Manteniendo el mismo comportamiento que el grupo anterior estas cuatro gráficas solo indican un leve incremento en el valor de los ejes equivalentes, vale la pena resaltar que en el módulo de 3000 PSI todas sus componentes son verticales por lo que valor del CBR no afecta su contentiva de ejes para cada condición.

**DISTANCIA EJES 12,5 cm; MÓDULO 3000 PSI;**

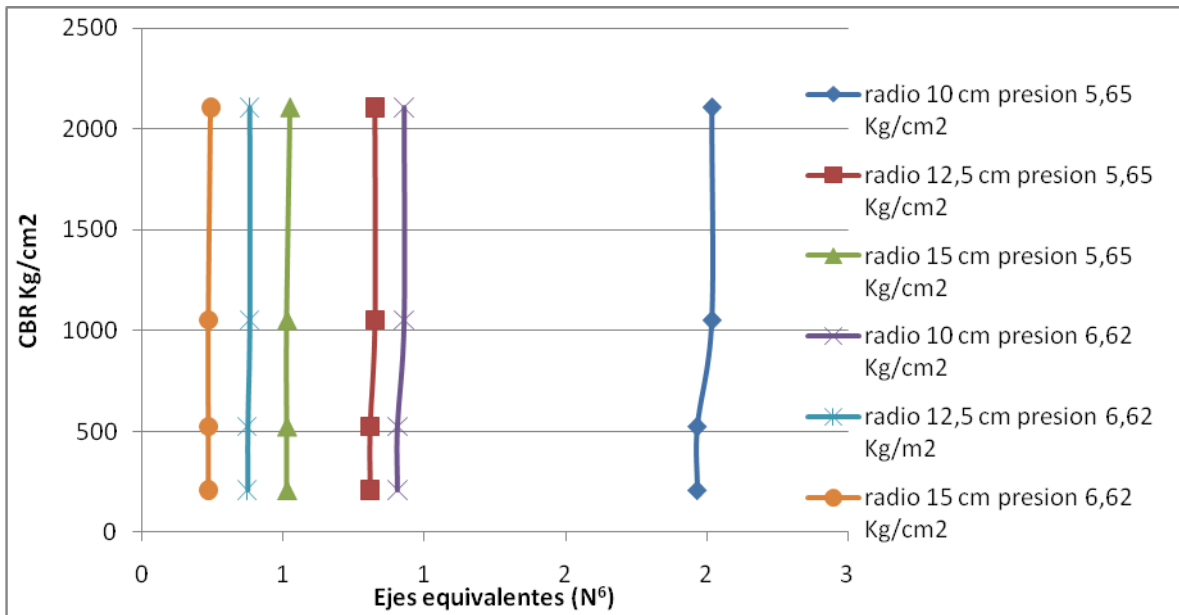


Figura No. 51

**MÓDULO 4000 PSI**

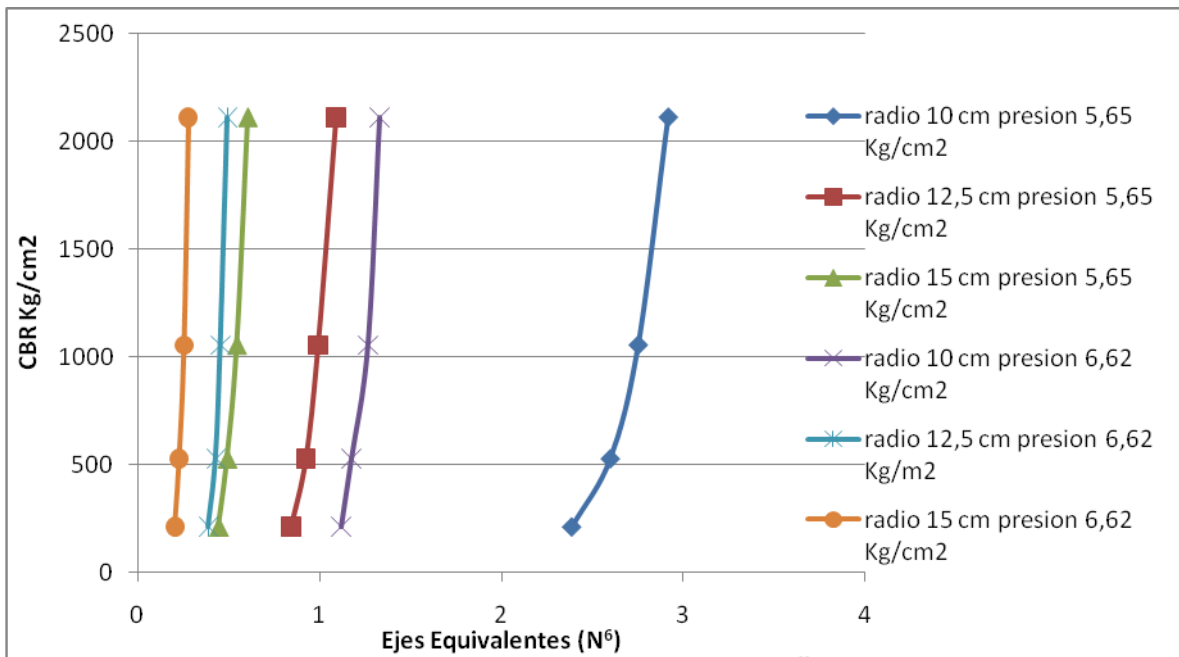


Figura No. 52

**MÓDULO 5000 PSI**

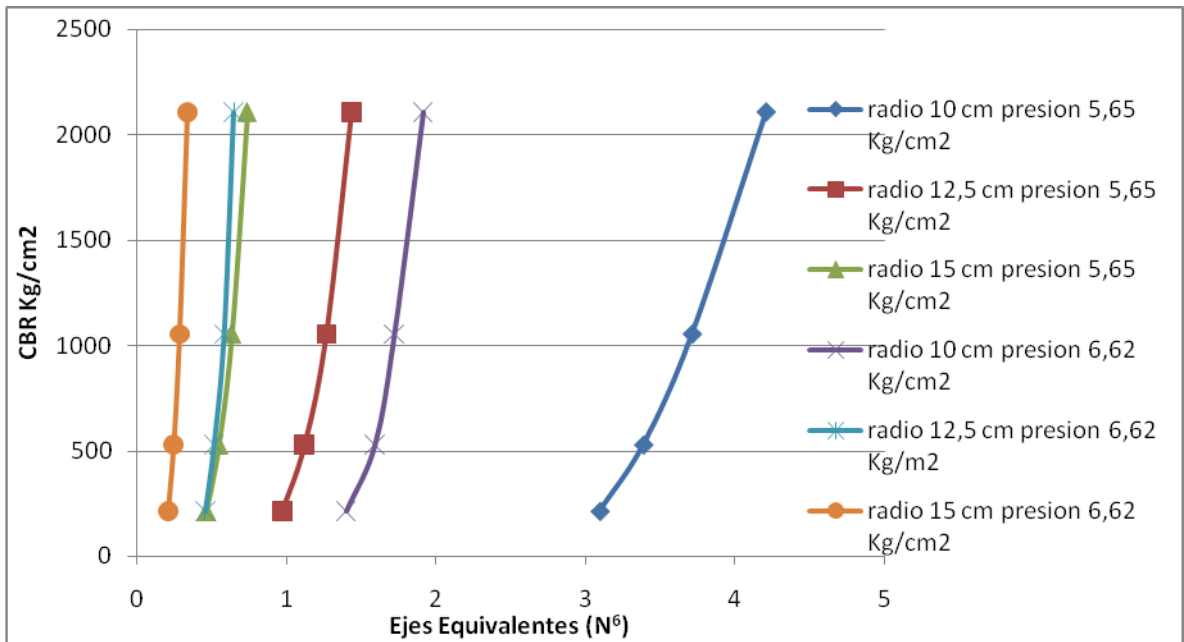


Figura No. 53

MÓDULO 6000 PSI

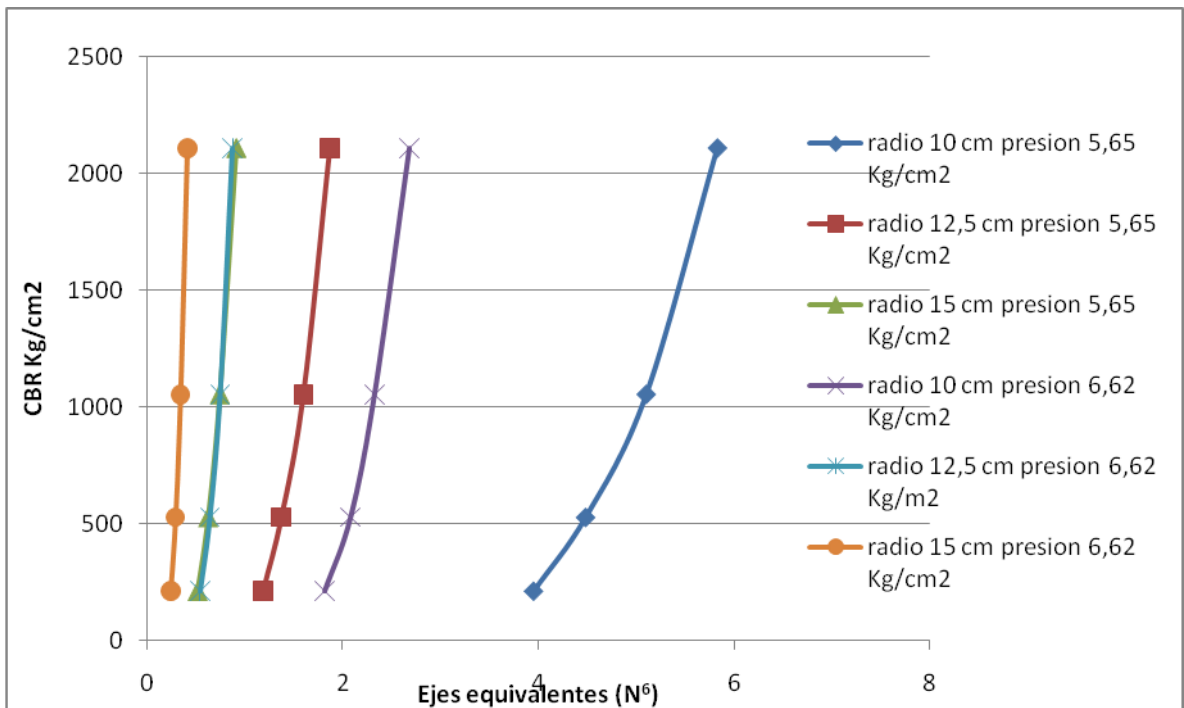


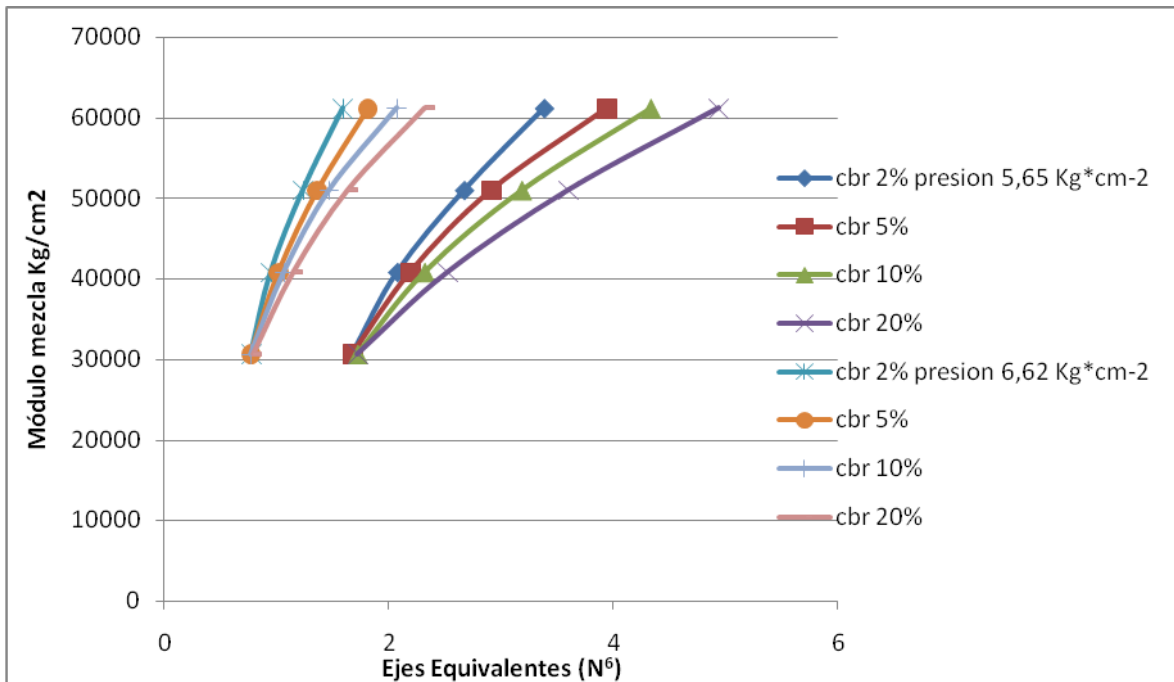
Figura No. 54

Se continua con el mismo comportamiento de las componentes donde sólo se incrementa el valor de los ejes equivalentes en el módulo más alto (6000 PSI), cuyo incremento en valor está casi por millón y medio de ejes más que en la distancia menor.

Ahora manteniendo constante el módulo y variando la distancia entre ejes (gráficas 43, 47 y 53) se evidencia un comportamiento similar en cada una de sus componentes al igual de la condición anterior, los valores de menor presión son los que mantienen la tendencia al alza en cuanto a cantidad de ejes equivalentes se refiere.

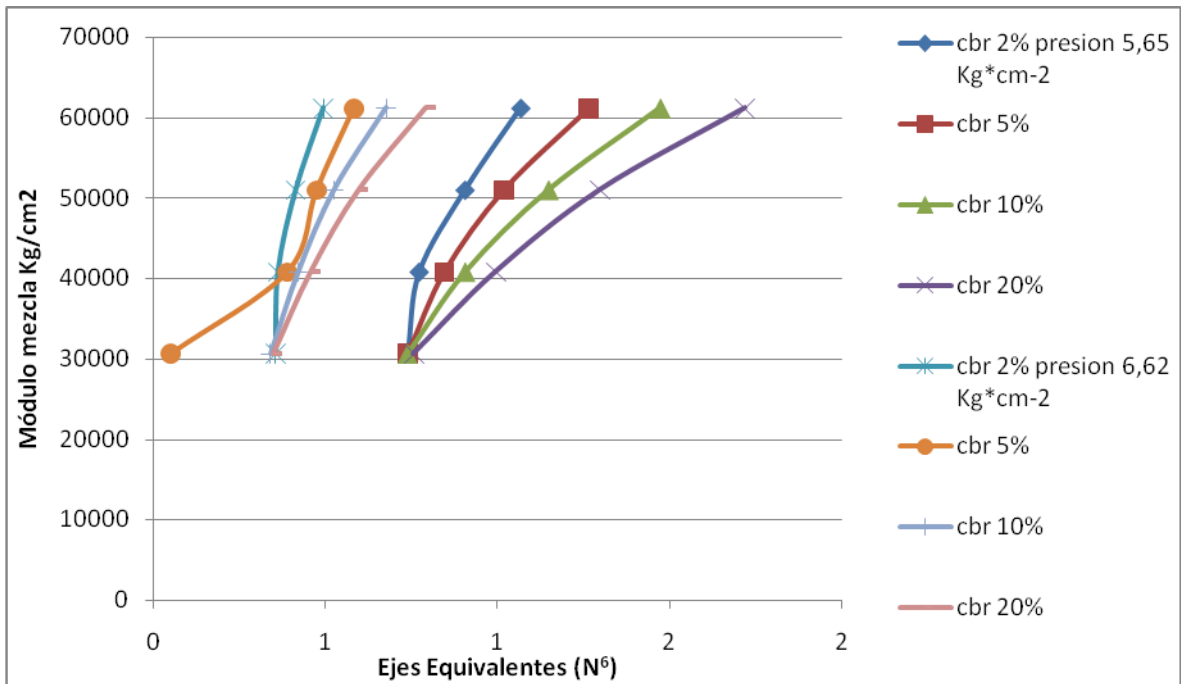
### GRÁFICAS DEL VALOR DE N vs MÓDULO MEZCLA ASFÁLTICA

**DISTANCIA EJES 10,5 cm; RADIO 10 cm.**



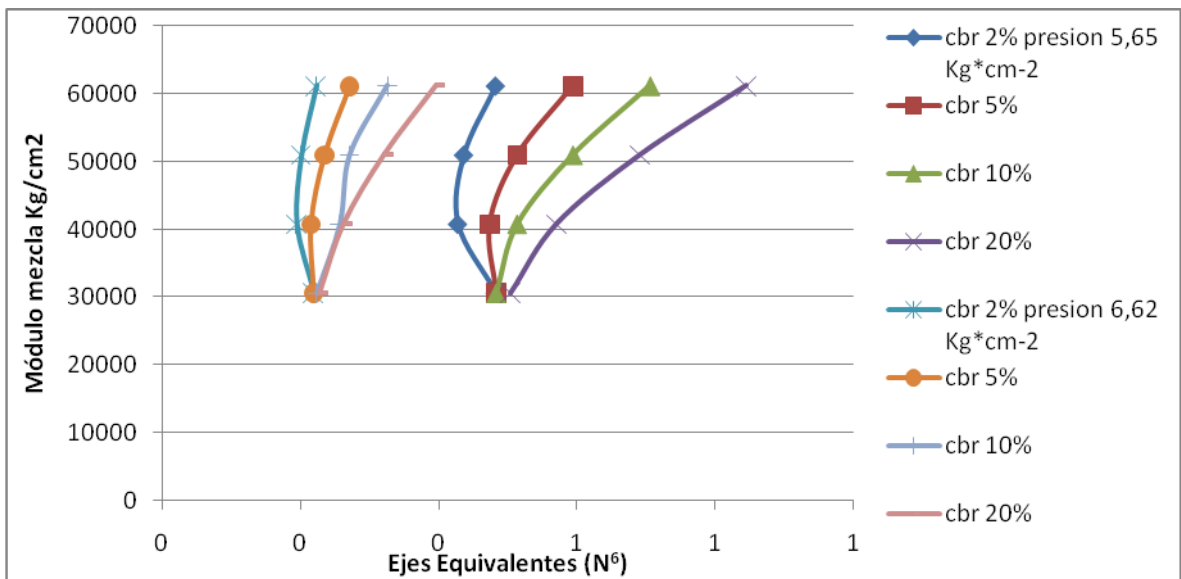
**Figura No. 55**

**RADIO 12,5 cm.**



**Figura No. 56**

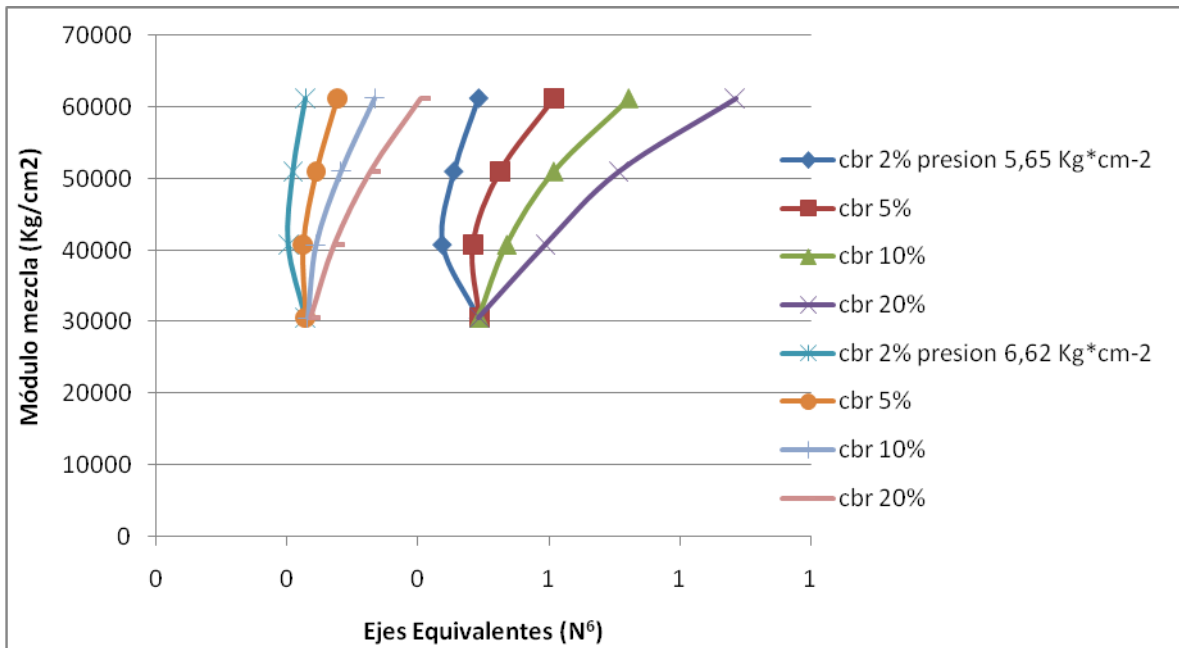
**RADIO 15 cm.**



**Figura No. 57**

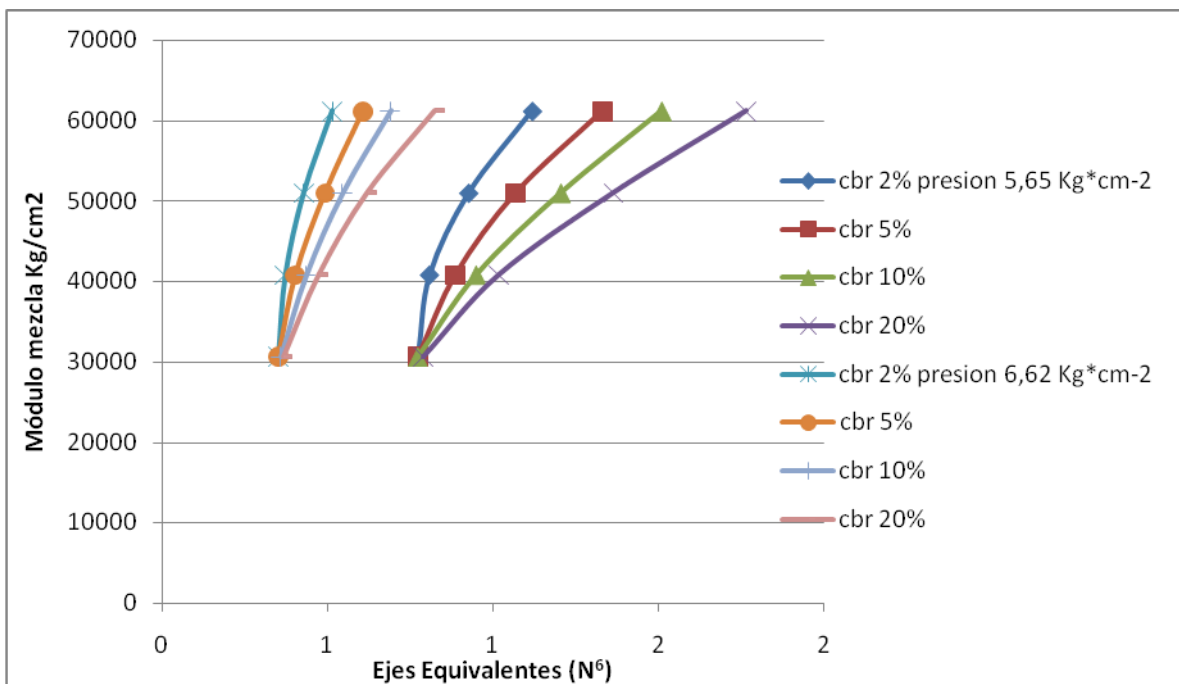
- Para estas graficas se encuentra la particularidad de estar agrupadas por presiones de contacto y de iniciar cada componente en el mismo o muy similar valor cuando el módulo de la mezcla es menor (3000 PSI), incrementándose estos ejes a medida que aumenta de la mezcla, pero disminuyendo su valor a medida que aumenta el radio.

**DISTANCIA EJES 11,5 cm; RADIO 10 cm.**



**Figura No. 58**

**RADIO 12,5 cm.**



**Figura No. 59**

**RADIO 15 cm.**

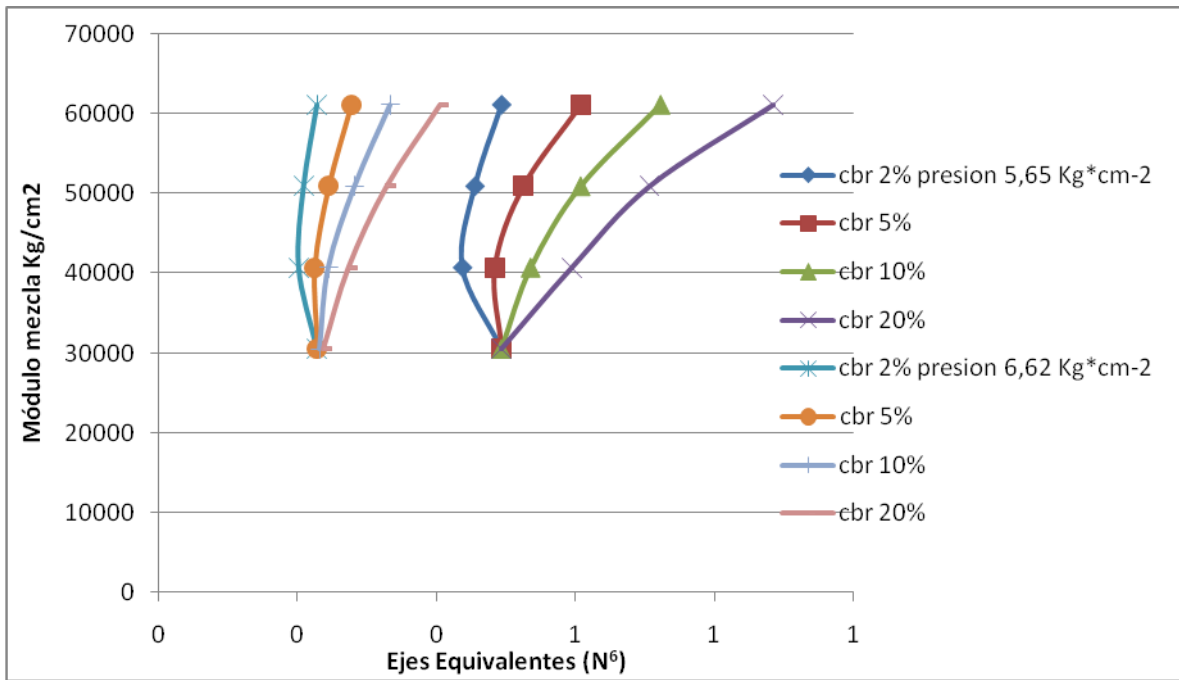


Figura No. 60

- Manteniendo el mismo comportamiento de las cuatro gráficas anteriores solo se puede indicar que se incrementa el valor de los ejes a medida que el radio es menor.

**DISTANCIA EJES 12,5 cm; RADIO 10 cm.**

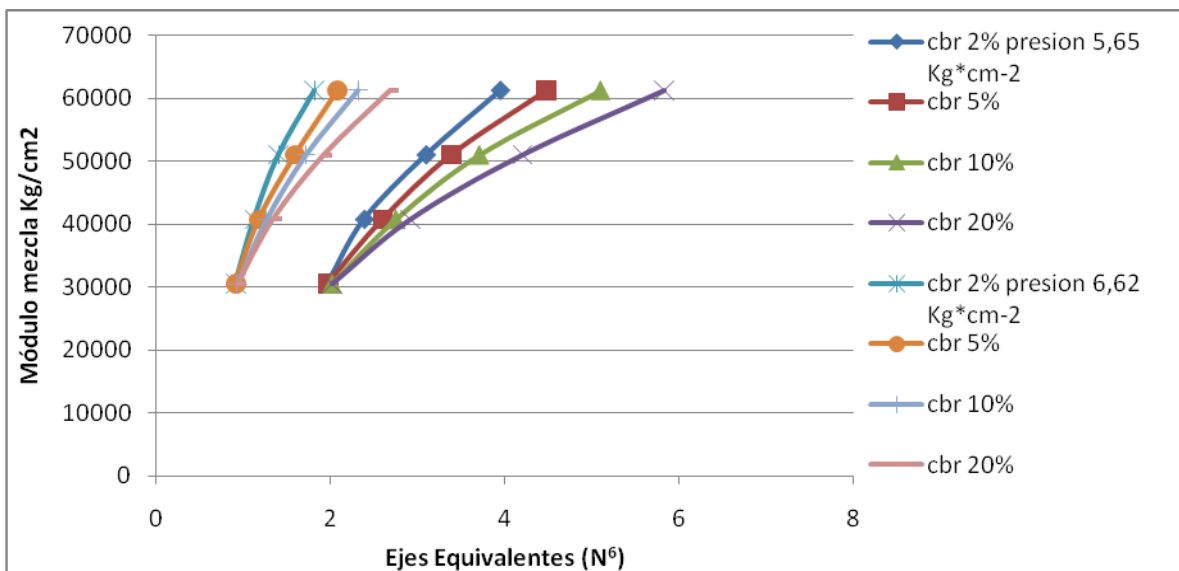
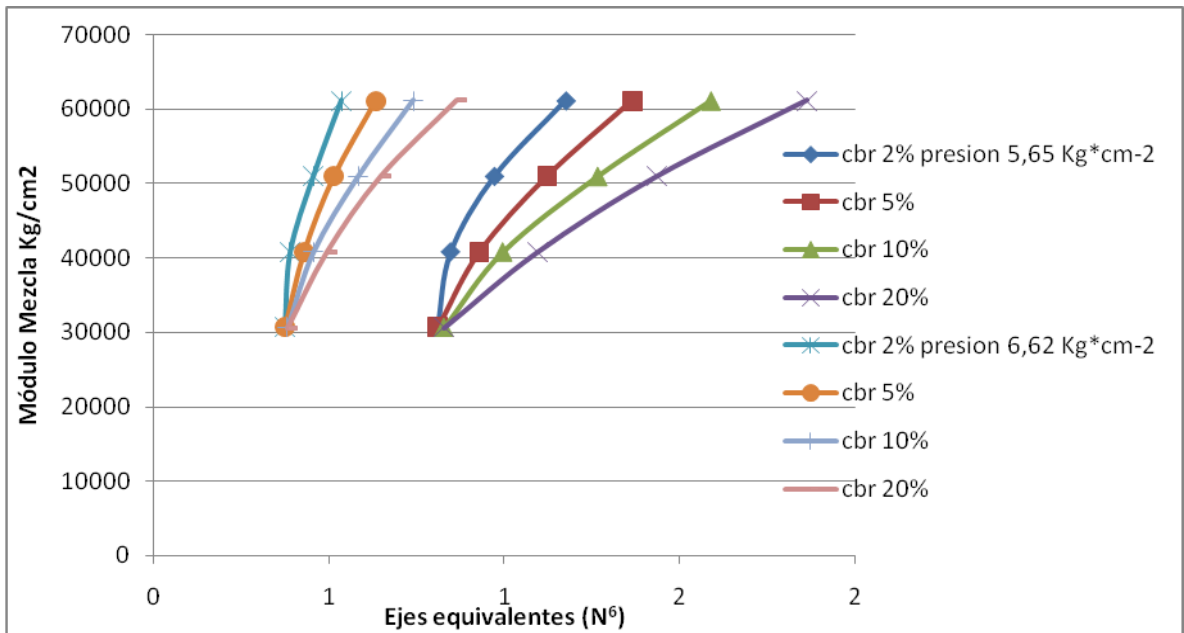


Figura No. 61

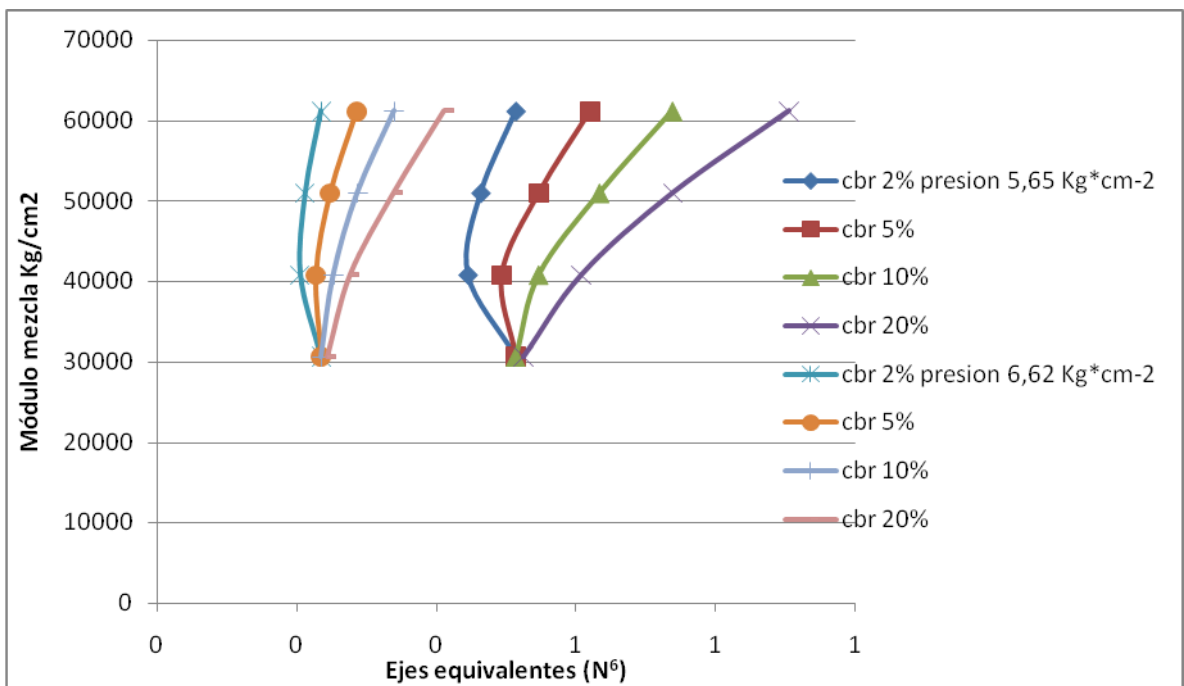
**RADIO 12,5 cm.**





**Figura No. 62**

**RADIO 15 cm.**



**Figura No. 63**

- Este último grupo sólo indica el incremento de los ejes a medida que disminuye el valor del radio, las cuales comparadas con las cuatro primeras gráficas de esta serie (55 a 57) disminuyen en hasta siete millones de ejes cuando se trata de la componente de mayor cantidad de ejes equivalentes.

Ahora manteniendo constante el radio y variando la distancia entre ejes (gráficas 61, 58 y 55) se encuentra un comportamiento casi igual a la otra condición en relación a sus componentes con la diferencia del aumento de ejes

a medida que aumenta el valor del radio, lo mismo sucede para las demás gráficas con condiciones iguales.

### 3.3.4 ESPESOR DE CAPA ASFALTICA 12,5 cm

#### GRÁFICAS DEL VALOR DE N vs CBR

#### DISTANCIA EJES 10,5 cm; MÓDULO 3000 PSI

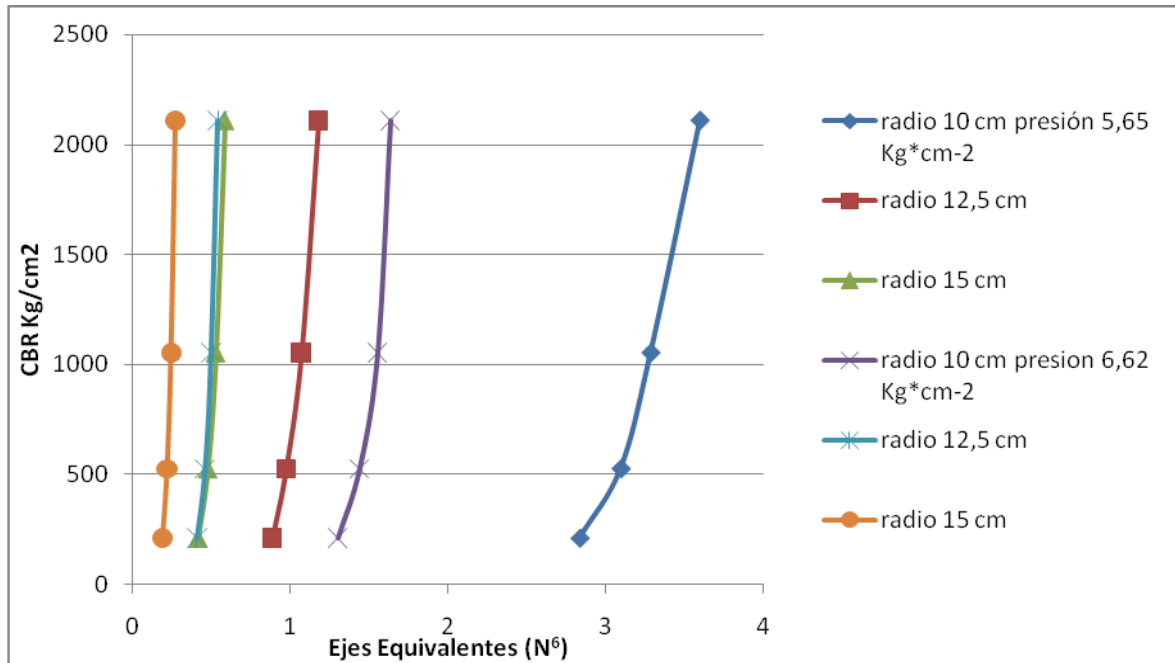


Figura No. 64

#### MÓDULO 4000 PSI

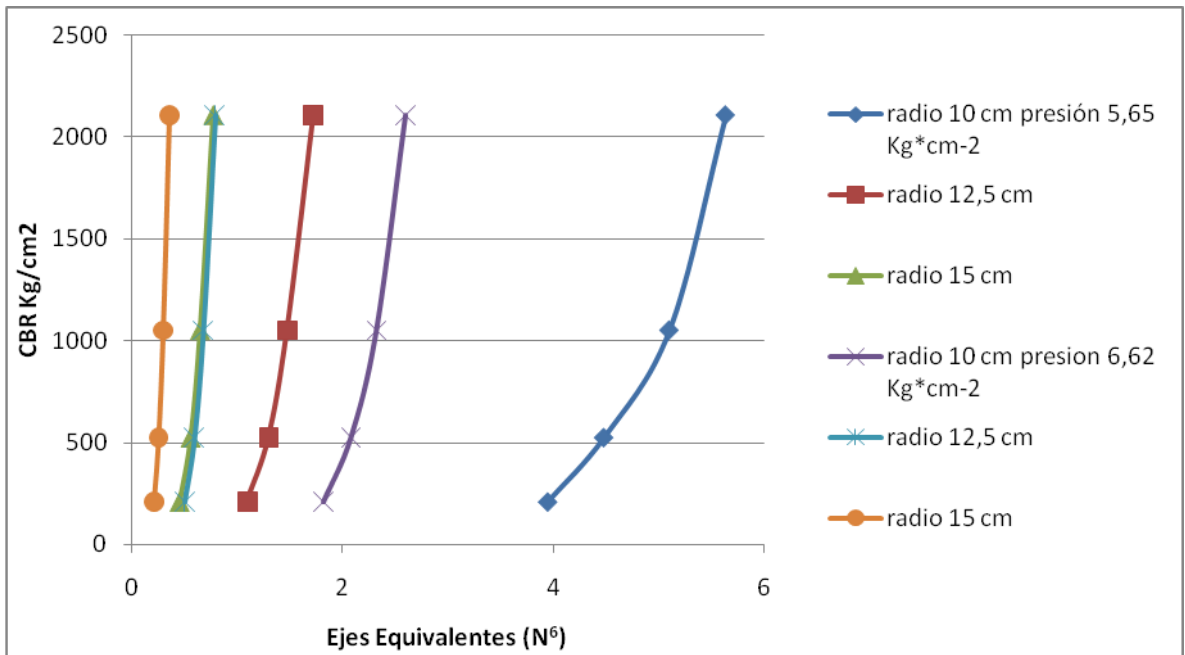


Figura No. 65

MÓDULO 5000 PSI

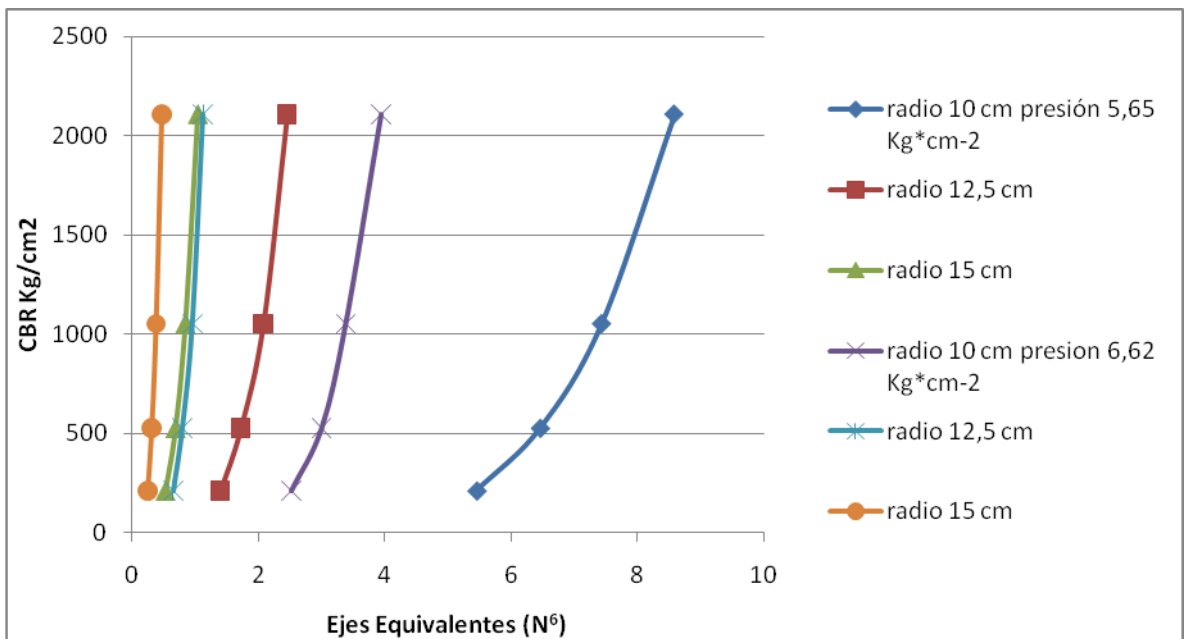
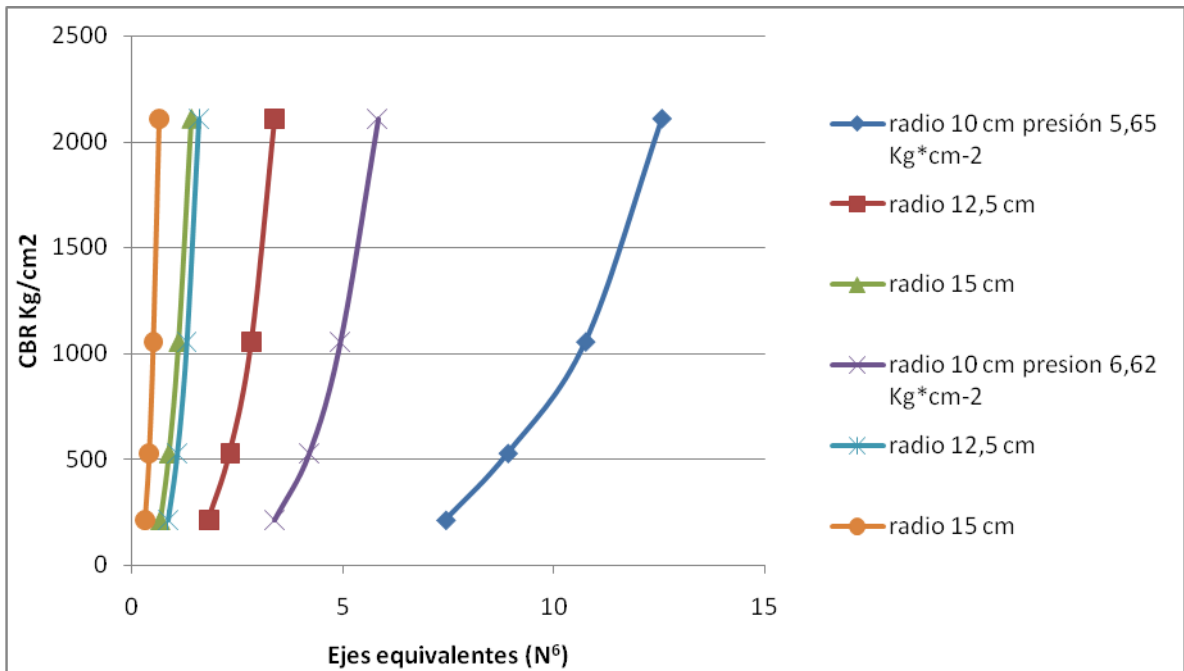


Figura No. 66

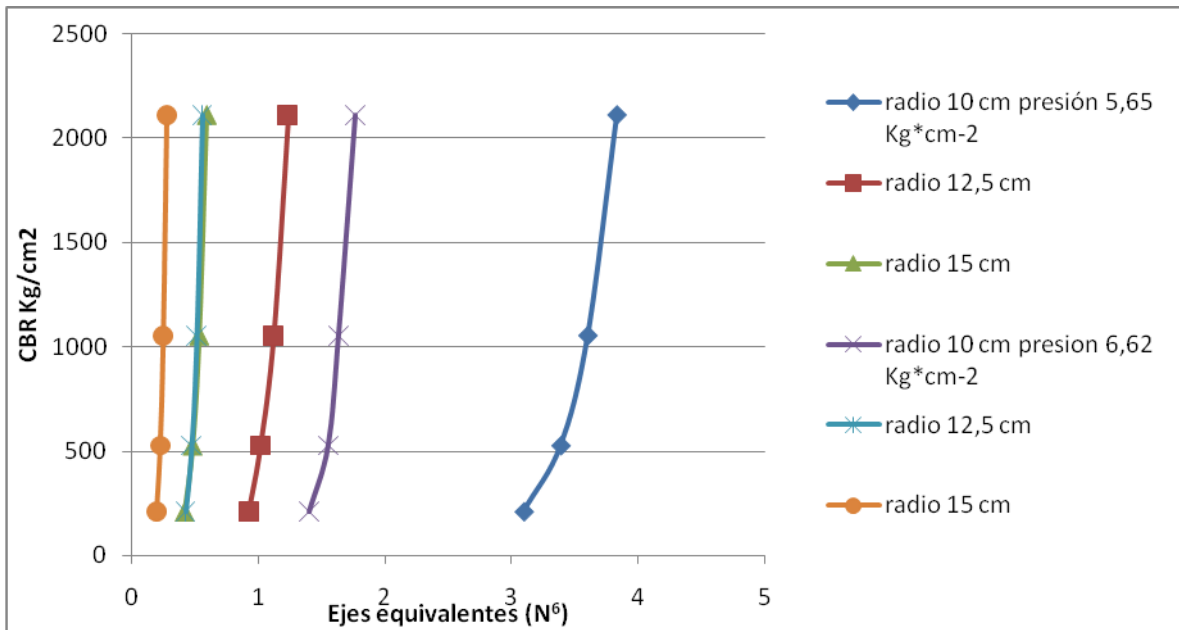
MÓDULO 6000 PSI



**Figura No. 67**

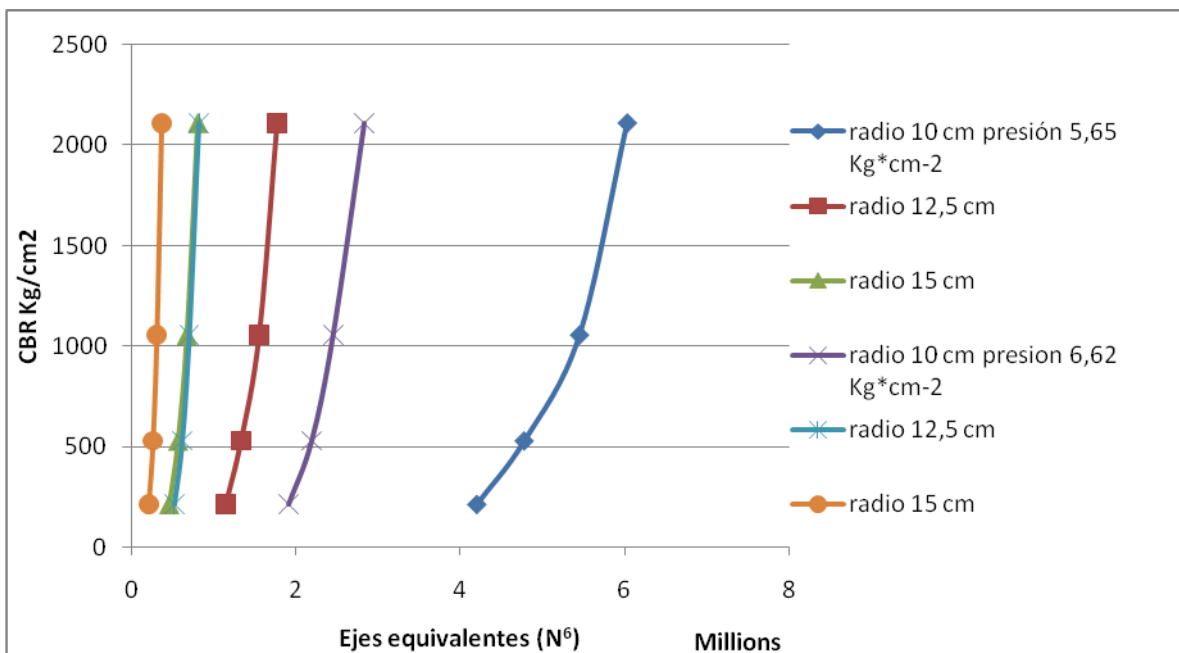
- En este grupo de figuras (64 a 67), se encuentra un comportamiento casi lineal de sus componentes, con un leve incremento de la cantidad de ejes a medida que aumenta el valor del CBR y el valor del módulo, hallando así valores en la mayor componente de hasta 7 millones de ejes en el módulo de 6000 PSI.
- Adicionalmente se marca la tendencia a incrementar el valor de los ejes cuando el radio y la presión son mayores, se encontró además que los valores de radio 15 cm y presión 5,65 Kg/cm<sup>2</sup> son iguales o coincidentes en todas las gráficas con los de radio 12,5 y presión 6,65 Kg/cm<sup>2</sup>.

**DISTANCIA EJES 11,5 cm; MÓDULO 3000 PSI**



**Figura No. 68**

**MÓDULO 4000 PSI**



**Figura No. 69**

**MÓDULO 5000 PSI**

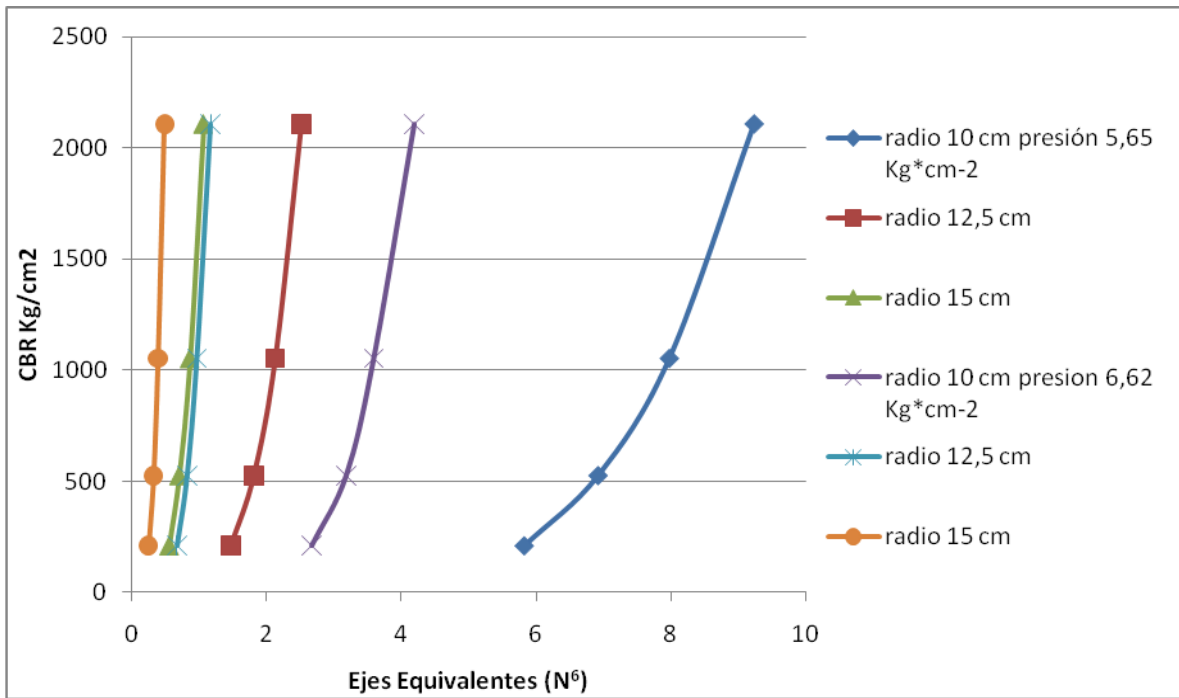


Figura No. 70

MÓDULO 6000 PSI

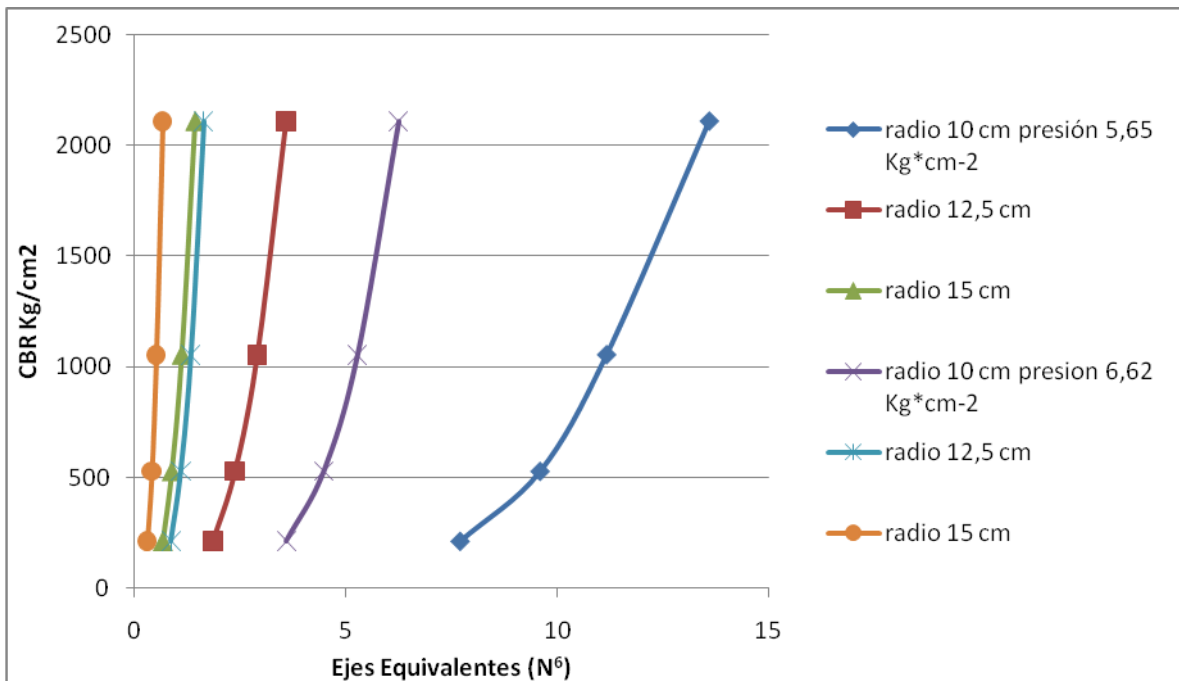
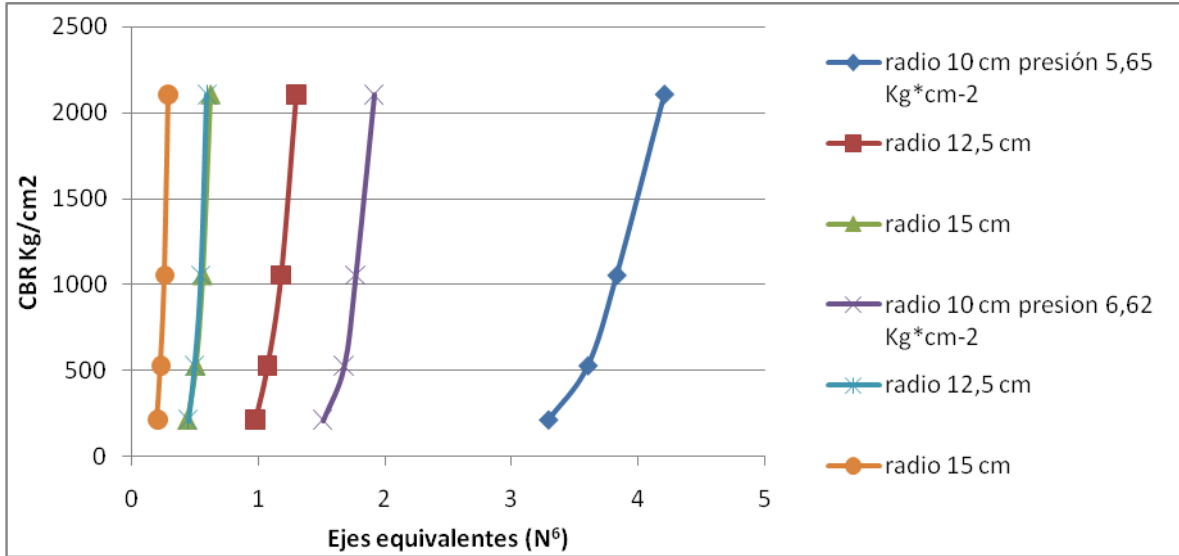


Figura No. 71

- Este grupo de figuras (68 a 71) sigue el mismo patrón de comportamiento que las cuatro gráficas anteriores incrementando sólo el valor de la cantidad de ejes equivalentes en la misma componente de la distancia entre ejes menor contenida en las gráficas anteriores.

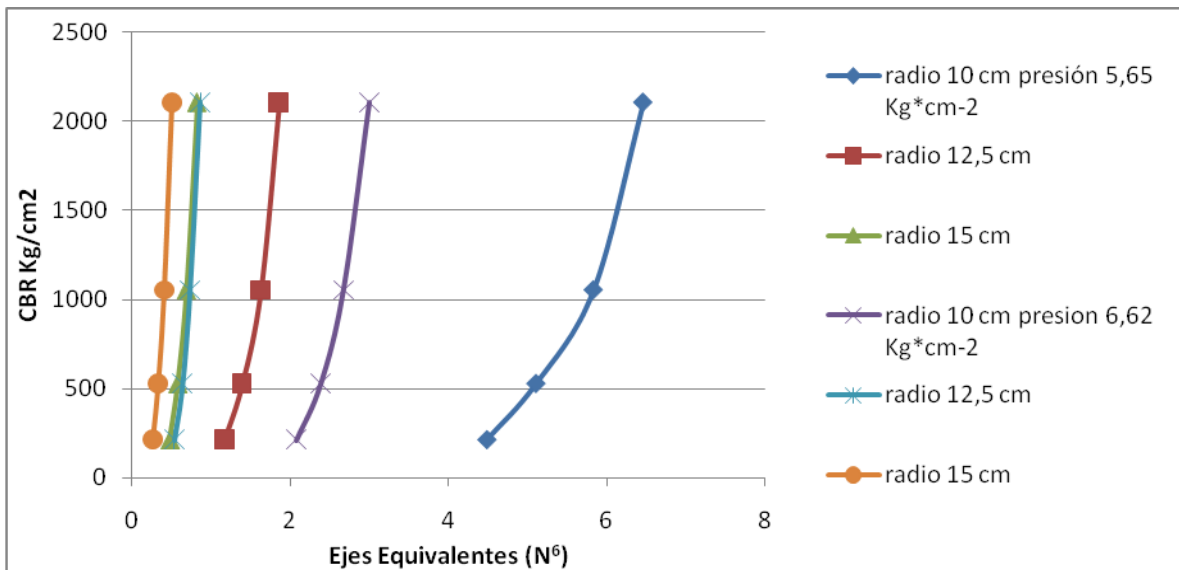
- Por lo tanto, sólo se incrementa el valor de los ejes en casi 200 mil ejes contado a partir del incremento en el módulo de la mezcla, situación que ya fue enunciada en el párrafo anterior.

**DISTANCIA EJES 12,5 cm; MÓDULO 3000 PSI;**



**Figura No. 72**

**MÓDULO 4000 PSI**



**Figura No. 73**

**MÓDULO 5000 PSI**

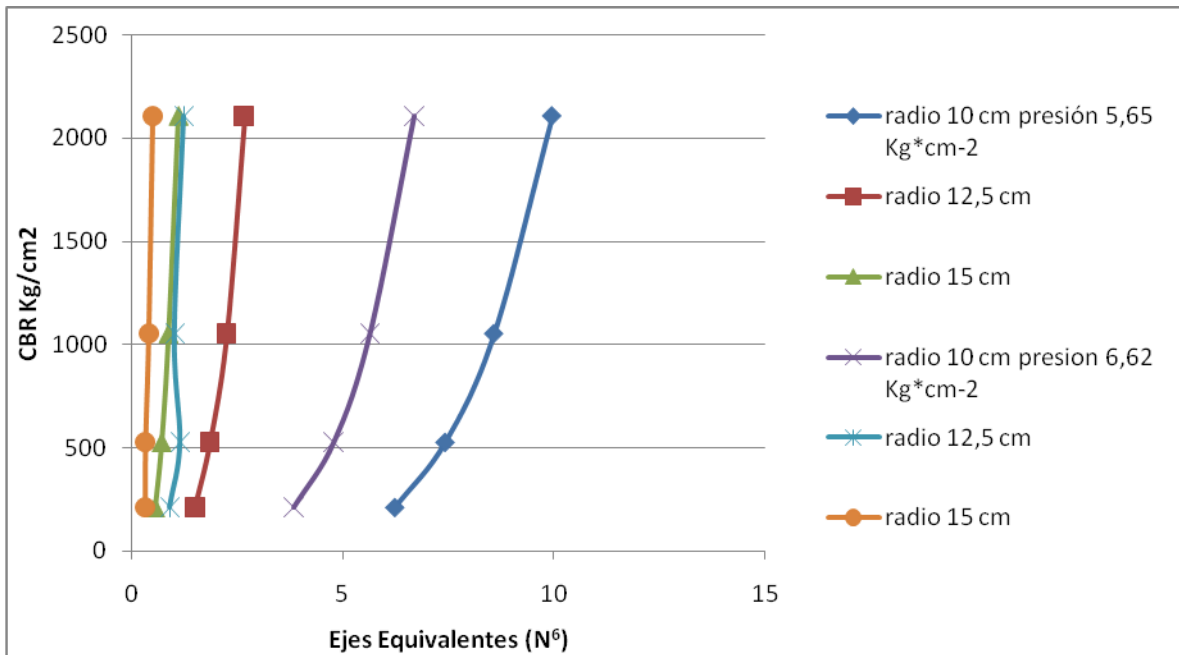


Figura No. 74

**MÓDULO 6000 PSI**

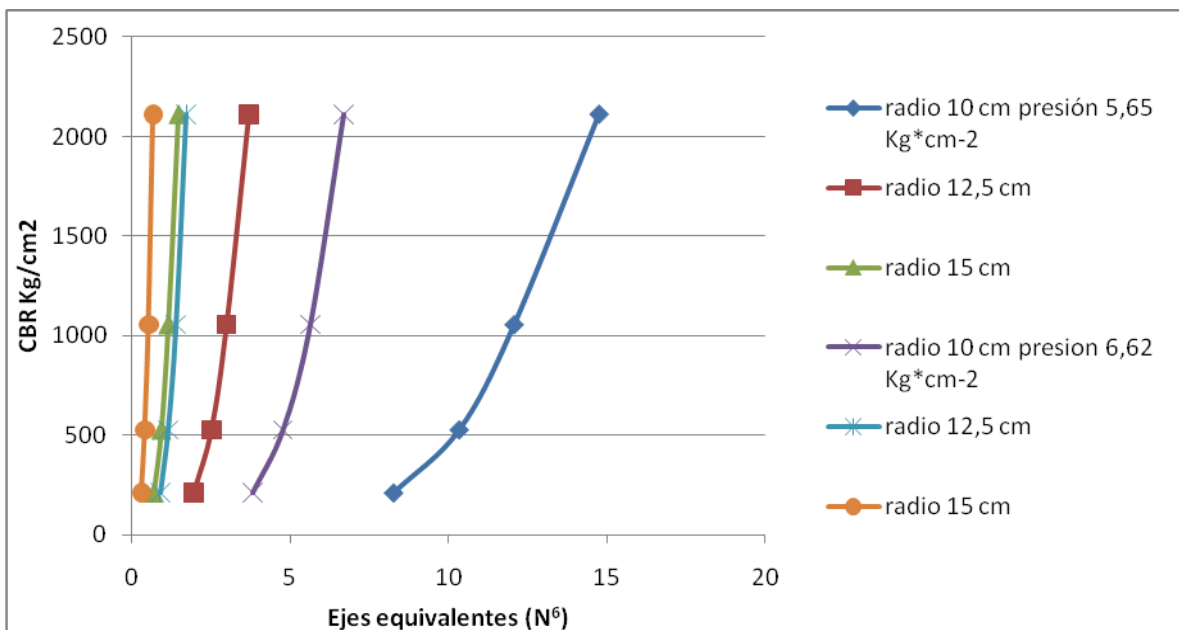


Figura No. 75

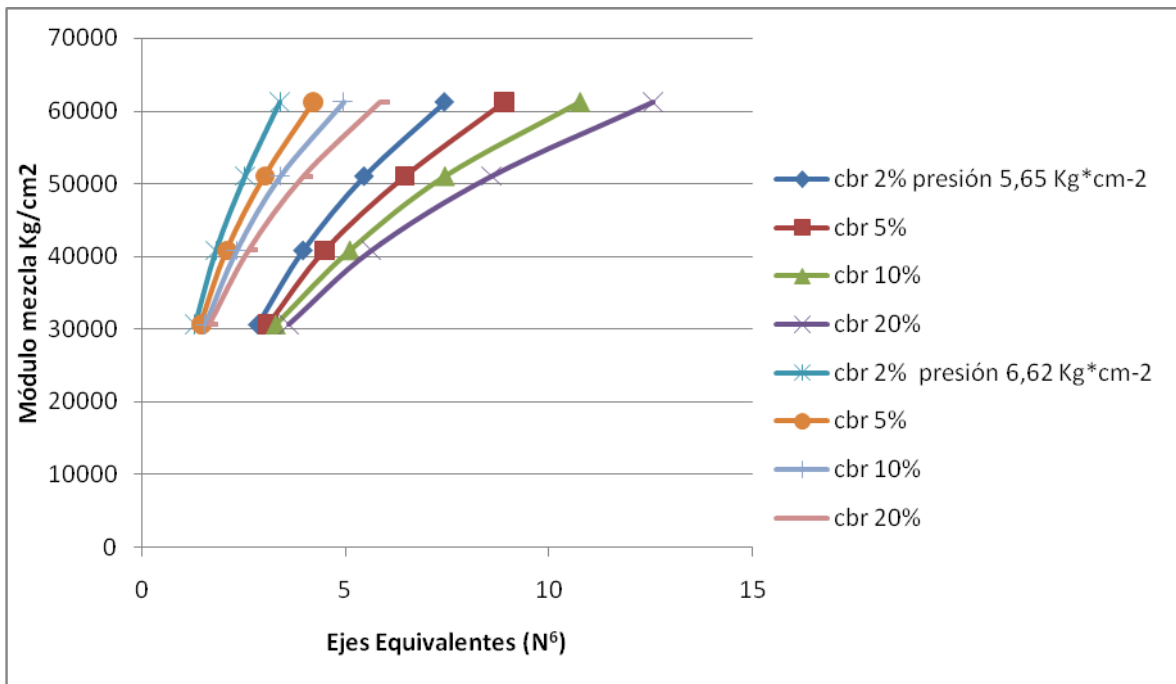
- Para este grupo de figuras (72 a 75) se mantiene el mismo comportamiento de sus componentes salvo un incremento en el valor de los ejes equivalentes de casi 500 mil ejes a medida que se incrementa el valor del módulo.



- El comportamiento de las figuras 64, 68 y 72, donde se mantiene constante el valor del módulo pero se incrementa el valor de la distancia entre ejes, muestra un comportamiento similar de componentes casi verticales, donde solo marca la diferencia el incremento de la cantidad de ejes a medida que se incrementa el valor de los ejes a una tasa no muy alta (casi 200 mil ejes por cm incrementado). Esta misma condición se repite para los demás módulos y distancias.

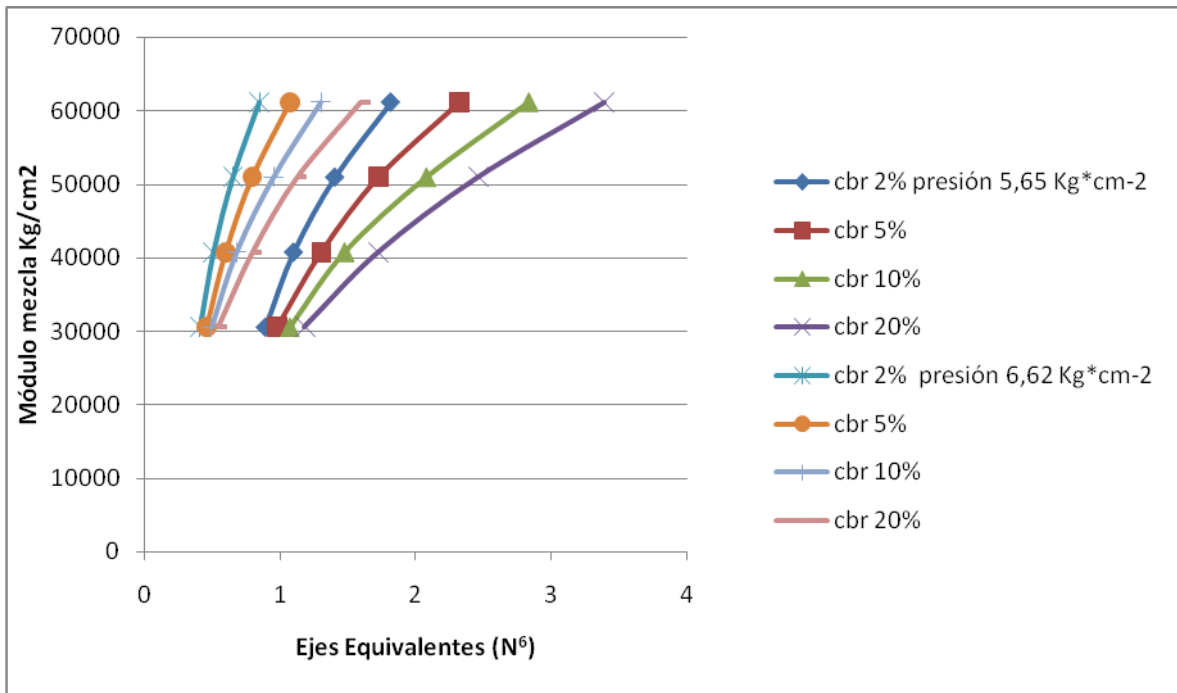
### GRÁFICAS DEL VALOR DE N vs MÓDULO MEZCLA ASFÁLTICA

**DISTANCIA EJES 10,5 cm; RADIO 10 cm.**



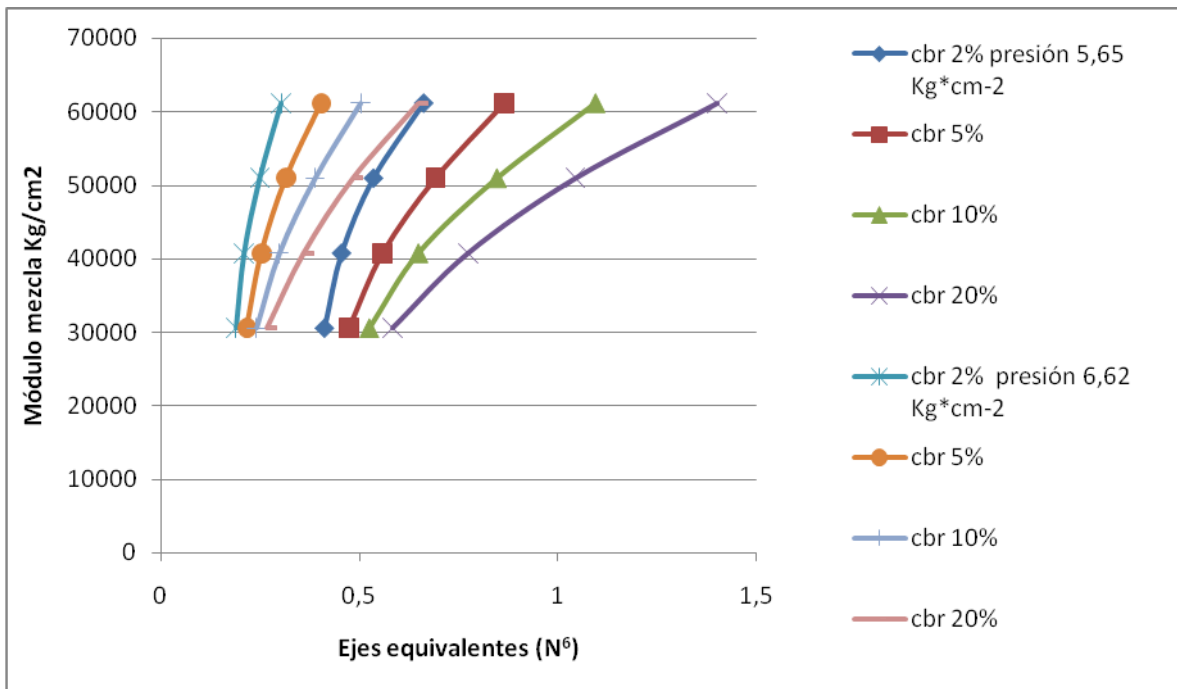
**Figura No. 76**

**RADIO 12,5 cm.**



**Figura No. 77**

**RADIO 15 cm.**

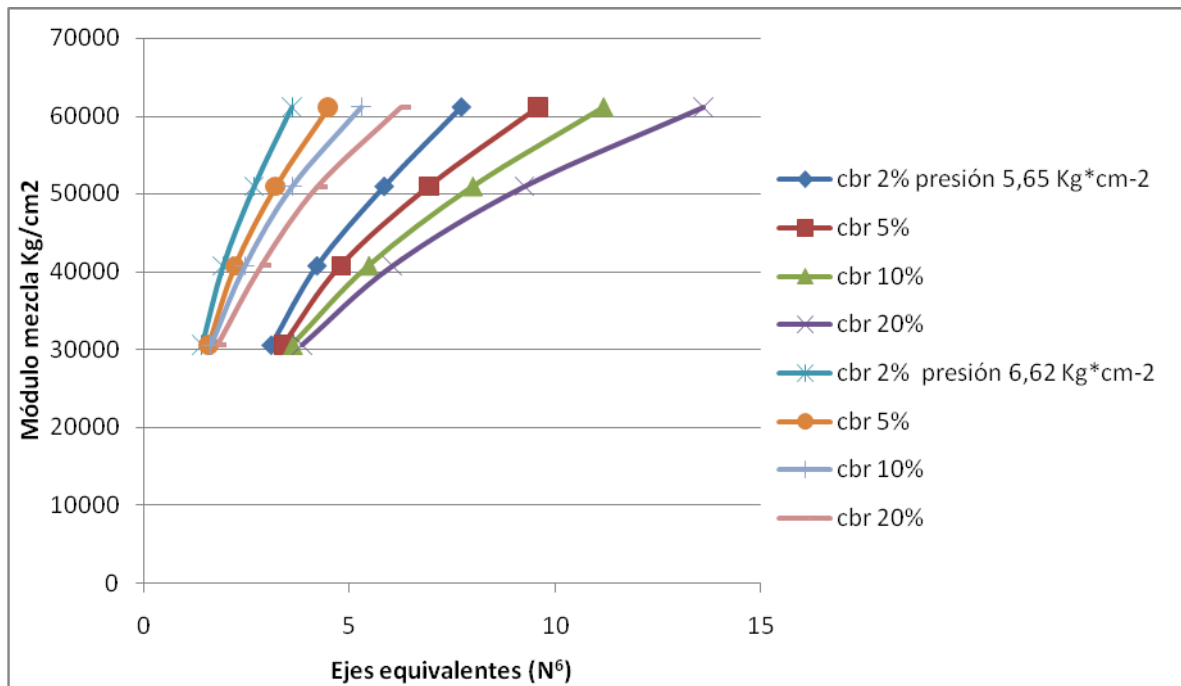


**Figura No. 78**

- Este grupo de figuras (76 a 78) muestra una agrupación de componentes distribuidos en presiones de contacto, hallándose las presiones menores y módulo de mezcla mayores con mayor cantidad de ejes equivalentes y adicionalmente partiendo cada grupo desde el mismo punto similar desde el menor valor del módulo de la mezcla.

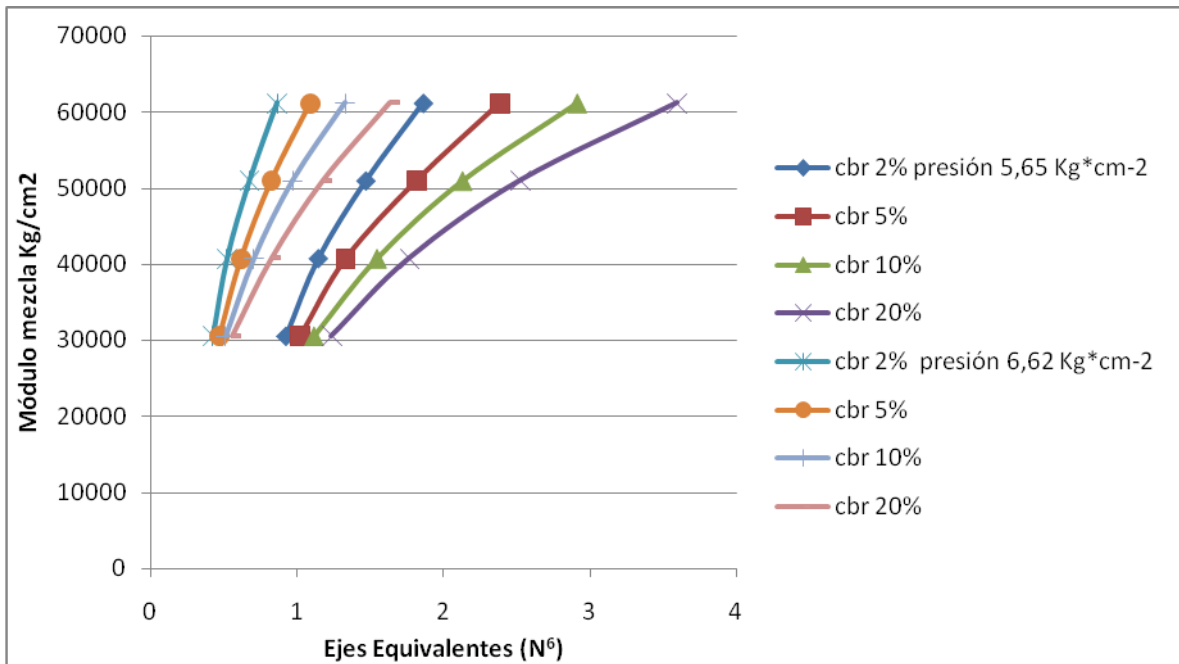
- Cabe anotar que esta unión va paulatinamente desapareciendo a medida que se incrementa el radio, de la misma manera se observa que las componentes con mayor módulo de CBR tienen la mayor cantidad de ejes cualesquiera que sea el valor de la presión de contacto.
- Es preciso resaltar que el valor de los ejes equivalentes obtenidos en estas gráficas no superan los 15 millones en la componente de mayor valor toda vez que el radio sea menor y disminuye hasta 1,5 millones en el escenario donde el radio es mayor.

**DISTANCIA EJES 11,5 cm; RADIO 10 cm.**



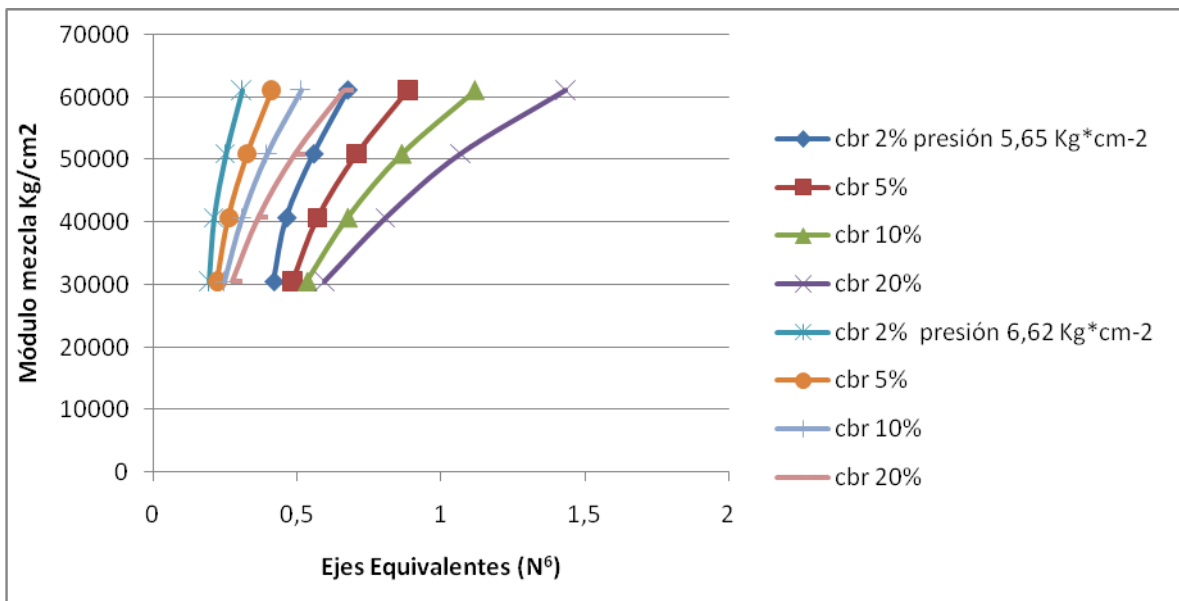
**Figura No. 79**

**RADIO 12,5 cm.**



**Figura No. 80**

**RADIO 15 cm.**



**Figura No. 81**

En este grupo de figuras (79 a 81) se observa el mismo comportamiento que el descrito en las figuras 76 a 78 con un pequeño incremento en el valor de los ejes equivalentes no mayor a un millón de en la componente de mayor cantidad de ejes.

**DISTANCIA EJES 12,5 cm; RADIO 10 cm.**

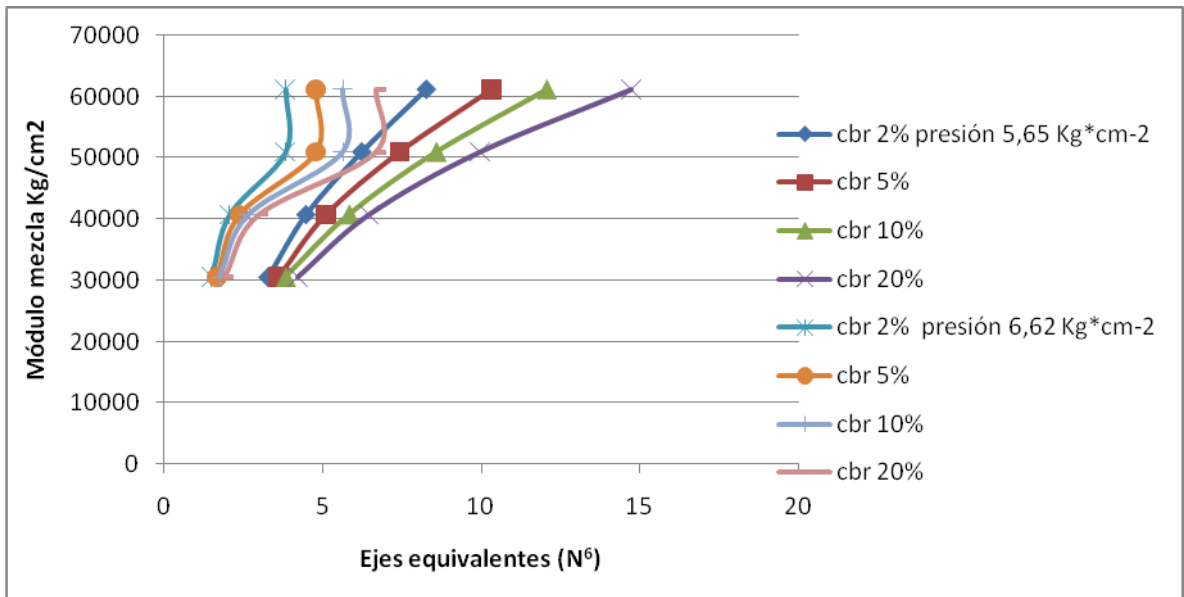


Figura No. 82

RADIO 12,5 cm.

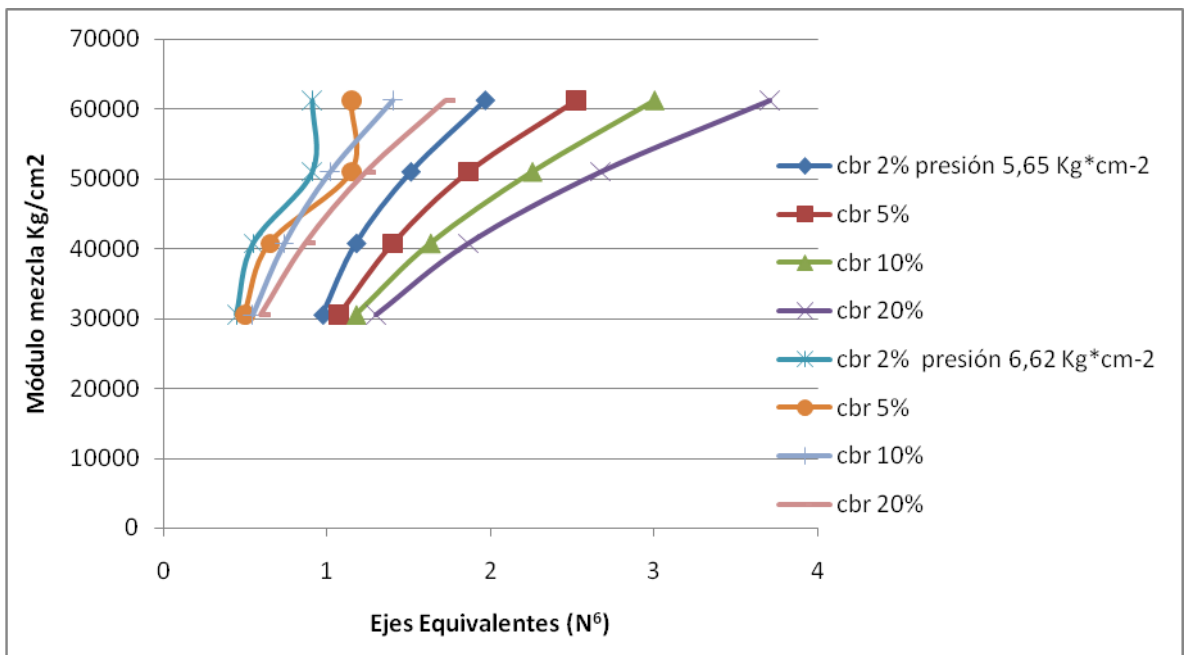
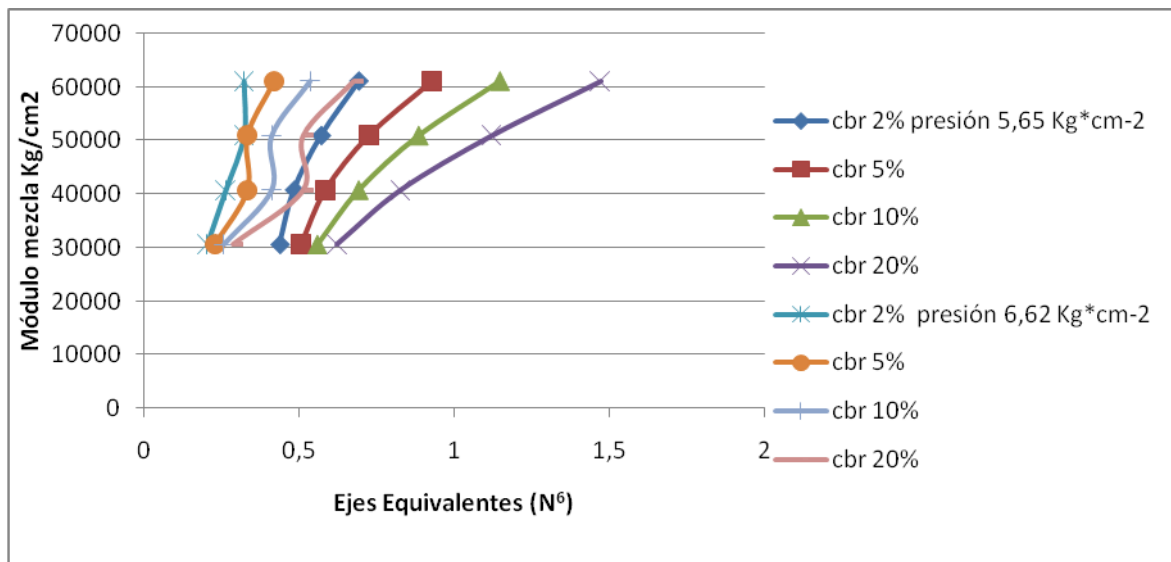


Figura No. 83

RADIO 15 cm.



**Figura No. 84.**

Este último grupo de figuras marca más la tendencia a juntar los valores de las componentes agrupadas hacia un mismo valor de ejes por lo que su incremento en términos de ejes no es significativo. No obstante se evidencia una pequeña verticalización de las componentes de mayor presión de contacto a medida que aumenta el valor del módulo de la mezcla.

Así mismo el incremento de los ejes no es significativo comparado con los grupos de figuras anteriores, aumentando sólo en 200 mil ejes en la mayor componente.

### 3.4 ANÁLISIS DE LAS GRÁFICAS CONJUNTAS DE LOS ESPESORES DE ASFALTO.

Este análisis se refiere a un tipo mucho más global en el que se observan los comportamientos generales de las gráficas acorde con sus espesores y se comparan con los demás espesores de mezcla asfáltica contenidos en este trabajo arrojando los siguientes resultados:

En cuanto a las gráficas de los módulos de subrasante vs ejes equivalentes se observa que las mismas iniciaron con un comportamiento no lineal en sus componentes a medida que el espesor del asfalto y el porcentaje del CBR de la subrasante, no obstante esta condición va cambiando de manera significativa a medida que aumenta el valor del espesor de mezcla llegando en algunos casos a observar componentes totalmente lineales, lo cual indica que el espesor de la mezcla influye de manera significativa en el comportamiento de la subrasante.

Otra característica observada es la poca o nimia reducción de ejes equivalentes en los módulos de subrasante superiores (10 y 20%) a lo largo de todas las gráficas y en todos sus espesores.

Existe una marcada tendencia a generarse una mayor cantidad de ejes equivalentes a medida que la presión y el radio de carga disminuyen, situación

que contrasta únicamente en el espesor de mezcla de 5 cm, donde se aprecia el incremento exorbitante de ejes equivalentes en las radios mayores (15 cm) independiente de la presión en la que se encuentren contenidos.

Para los análisis de los módulos de mezcla vs ejes equivalentes indican comportamientos bastante particulares en lo que se refiere a la agrupación de sus componentes, toda vez que las mismas se plasman acorde con su valor de presión, es decir todas sus componentes inician en un valor igual o bastante similar de ejes equivalentes en su módulo más bajo (3000PSI), excluyéndose de esta situación el espesor de mezcla de 5 cm cuyas gráficas arrojan resultados inversos a los mencionados anteriormente.

Adicionalmente se observa la tendencia a incrementar el valor de los ejes equivalentes a medida que aumenta el módulo de mezcla, situación que tampoco se presenta en el espesor de mezcla de 5 cm donde su comportamiento es inverso.

La cantidad de ejes equivalentes aumentan directamente proporcional con el espesor de la mezcla en cada uno de los escenarios gráficos en los que se desarrolla este estudio.

Se remarca el hecho que es constante encontrar la mayor cantidad de ejes equivalentes obtenidos en las graficas correspondientes a los valores de menor presión.

No es recurrente el factor de comportamiento lineal en las componentes graficas, especialmente cuando se revisa el comportamiento de los espesores de asfaltos menores en conjunto con CBR de subrasantes bajas y que van mejorando a medida que se aumentas los espesores y los módulos.

## 4. CONCLUSIONES

Los valores de los parámetros estudiados están reflejados en función de la cantidad de ejes equivalentes que éstos puedan generar o perder a medida que se incremente o disminuyan estos valores, pues es este valor el que define la conveniencia para el criterio de diseño de una vía, así las cosas se llegaron a las siguientes conclusiones:

- Uno de los parámetros más relevantes y recurrentes en el análisis de las gráficas es la presión de inflado de las llantas, toda vez que la misma demostró que a menor valor se obtiene una cantidad de ejes equivalentes mayor que en la otra condición, por lo que una presión de inflado mayor consume en mayor tiempo los ejes equivalentes de diseño de una vía, generando así el prematuro deterioro de la misma.
- Los radios de carga de menor valor son otro factor a tener en cuenta, ya que los valores menores afectan en menor cantidad la pérdida de ejes equivalentes. No obstante esta condición no se cumple para el espesor de mezcla de 5 cm, donde se aprecian valores similares de ejes equivalentes en los radios más grandes obteniendo menores ejes equivalentes con módulos de subrasante del 2%.
- Para los espesores de 5 cm y 7,5 cm, es preciso tener módulos de subrasante del 10% y 20% con el fin de obtener una cantidad de ejes equivalentes que solventen un diseño sostenible con los años a los que proyecte la vía.
- Las cantidades de ejes equivalentes en función del módulo de la subrasante, aumentan a medida que se incrementa el espesor de la mezcla asfáltica.
- Los módulos de subrasante contenidos entre el 10% y 20% de CBR no garantizan un correcto comportamiento de la estructura de pavimento ya que se demostró gráficamente que la mayor pérdida de ejes equivalentes en cualquier espesor de mezcla está en este rango, situación que sólo se nivela con un espesor de mezcla mayor, lo cual impacta fuertemente en la ecuación financiera de un proyecto vial.
- Los valores de ejes equivalentes en función del módulo de mezcla asfáltica siempre serán mayores a medida que se incrementa su módulo, pero esta situación afecta la economía del proyecto ya que el ítem más representativo en un presupuesto vial es la mezcla asfáltica, por lo que es conveniente observar el espesor de 5 cm con el módulo de mezcla de 3000 PSI el cual brinda cierta mejoría, pero no garantiza en cantidad de ejes equivalentes que un módulo mayor puede alcanzar, por tal motivo se encuentra un punto de equilibrio con un módulo de 4500 PSI a 5000 PSI.



- Se encontró una mejoría en la cantidad de ejes equivalentes en función de la mezcla para los valores de CBR del 20% de la subrasante, situación que a todas luces equilibra los costos, descartando para este escenario el espesor de mezcla de 5 cm donde se observa un comportamiento totalmente inverso.
- El parámetro que menos afecta el comportamiento de las componentes gráficas es la distancia entre ejes, ya que gráficamente siempre presentaron el mismo tipo de línea o curva, no obstante se debe tener en cuenta en un diseño el ancho de la vía, ya que un diseño geométrico angosto puede limitar la disipación correcta de las cargas teniendo en cuenta este parámetro.

## 5. BIBLIOGRAFÍA

CRESPO, del Río Ramón “LA INGENIERIA DE PAVIMENTOS EN EL SIGLO XXI”. AEPO S.A. España 2002.

INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS, “Guía metodológica para el diseño de obras de rehabilitación de pavimentos asfálticos de carreteras”, Bogotá D.C., marzo 2007.

MANUAL DE DISEÑOS DE PAVIMENTOS PARA BOGOTÁ D.C. IDU. Universidad de los Andes. Agosto 2002.

MONTEJO, Alfonso. “Ingeniería de pavimentos para carreteras” Universidad Católica de Colombia. Bogotá D.C. 2001.

REYES, Fredy L. “Diseño de pavimentos por métodos racionales” Tomo I. Universidad de los Andes. Bogotá 1999.

<http://www.Invias.gov.co>

<http://www.mintransporte.gov.co>

<http://www.idu.gov.co>