

**COMPORTAMIENTO DEL MODULO DINAMICO DE LA MEZCLA ASFALTICA
PARA DIFERENTES FUENTES DE AGREGADO**

AUTORES:

YEISON YAZETH BARAJAS GONZALEZ

Cód. 2043551

LEIDY JOHANNA PINEDA DURAN

Cód. 2043590



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO - MECANICAS

ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL

BUCARAMANGA

2010

**COMPORTAMIENTO DEL MODULO DINAMICO DE LA MEZCLA ASFALTICA
PARA DIFERENTES FUENTES DE AGREGADO**

AUTORES:

YEISON YAZETH BARAJAS GONZALEZ

LEIDY JOHANNA PINEDA DURAN

Proyecto de grado para optar el título de Ingeniero Civil

DIRECTOR:

EDUARDO CASTAÑEDA PINZÓN

Doctor en Ingeniería

CO- DIRECTORA:

Ma. CRISTINA RIVERO OLARTE

Ingeniera Civil



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO - MECANICAS

ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL

BUCARAMANGA

2010

AGRADECIMIENTOS

A nuestro Director de proyecto, Ingeniero Eduardo Alberto Castañeda Pinzón, por la orientación profesional y comprometida.

A María Cristina Rivero, estudiante de Maestría de Ingeniería Civil, por su colaboración constante en el desarrollo y progreso del trabajo de grado.

A todo el cuerpo de docentes de la Escuela de Ingeniería Civil, por sus enseñanzas profesionales y humanas.

A la Universidad Industrial de Santander por brindarnos la posibilidad de desarrollarnos como persona.

DEDICATORIA

A mi Díosito y a la vírgencita santa por haberme dado la oportunidad de llegar a estas instancias de la vida y de tal forma convertirme en un orgullo de mi familia y mis amigos, a mis padres Luis Barajas Y Flor Gonzalez que con su inmenso apoyo han hecho de mí una persona llena de fortaleza y valentía para seguir cosechando muchos éxitos, a mi querida abuelita Ana Elvia viuda de Gonzalez por su apoyo moral y espiritual a mis tías (os) Rubí, Blanca, Isidro, Jaime Gonzalez sus esposos(as) e hijos por su esfuerzo y colaboración en todo momento, a mi hermano por su incondicionalidad, a mi querida compañera de proyecto Leidy Pineda y a mis amigos que estuvieron en las buenas y malas etapas de mi carrera como universitario.

Yeisson Yazeth Barajas Gonzalez.

A Dios y la Virgen por las bendiciones brindadas y ser mi guía en todo momento, a mis padres Ana Lucía Durán Villamil y Uriel Enrique Pineda Forero por sus esfuerzos, comprensión, amor y apoyo incondicional, a mis hermanas Sandra Milena y Yenny Liseth Pineda por contar con sus consejos siempre, a mi hermosa sobrina Paula Tatiana Ortiz Pineda quien colma de alegría todos los momentos, a mi abuelita María Trinidad Forero y a mis abuelitos que desde el cielo me acompañan , a mis familiares quienes sin duda siempre estarán a mi lado y por último a mis compañeros de carrera y a mi compañero de proyecto Yeisson Barajas por todos los momentos compartidos desde el inicio de esta etapa que ha culminado.

Leidy Johanna Pineda Durán.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCION	1
1 ESPECIFICACIONES DEL PROYECTO.....	3
1.1 OBJETIVOS GENERAL.....	3
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	3
1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
2 MARCO TEORICO	5
2.1 MEZCLAS ASFALTICAS EN GENERAL	5
2.1.1 MEZCLAS ASFALTICAS EN CALIENTE:	5
2.2 AGREGADOS PETREOS.....	6
2.3 ASFALTITA	6
2.4 MODULO DINAMICO.....	7
3 METODOLOGIA.....	9
3.1 ESPECIFICACIONES DEL DISEÑO DE LAS MEZCLAS.....	9
3.2 FABRICACION DE LAS PROBETAS.....	10
3.2.1 Agregados:	11
3.2.2 Asfalto:.....	12
3.3 PREPARACION DE LAS MUESTRAS:.....	12
3.4 ENSAYO DE MODULO DINAMICO.....	14
3.5 DETERMINACION DEL MODULO DINAMICO.....	15
3.5.1 CALCULO TIPO	15
4 RESULTADOS	20

4.1 DETERMINACION DE LA DENSIDAD BULK Y DENSIDAD MAXIMA TEORICA (GMM).....	20
4.1.1 Densidad Bulk.....	20
4.1.2 Densidad Máxima Teórica.....	20
4.1.3 PARAMETROS VOLUMETRICOS.....	21
4.2 MODULO DINAMICO.....	21
4.2.1 MEZCLAS DENSAS EN CALIENTE (MDC-2).....	22
4.2.2 MEZCLAS ABIERTAS (M-1)	27
CONCLUSIONES.....	33
RECOMENDACIONES	35
BIBLIOGRAFIA	36
ANEXOS	37

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Factores de la mezcla	10
Tabla 2. Granulometría mezclas asfálticas.	11
Tabla 3. Datos de entrada.....	15
Tabla 4. Ajuste Carga.....	17
Tabla 5. Ajuste Desplazamiento.....	18
Tabla 6. Módulo dinámico y ángulo de desfase	18
Tabla 7. Densidad Bulk	20
Tabla 8 Gravedad Específica Máxima Teórica (Gmm).....	21
Tabla 9. Parámetros volumétricos.....	21
Tabla 10. Relación de módulos dinámicos Chicamocha-Bocas, Asfalto 20/30	24
Tabla 11. Relación de módulos dinámicos Chicamocha-Bocas, Asfalto 60/70	26
Tabla 12. Relación de módulos dinámicos Chicamocha-Bocas, Asfalto 20/30	29
Tabla 13. Relación de módulos dinámicos Chicamocha-Bocas, Asfalto 60/70	31
Tabla 14. Intervalo de los valores del módulo dinámico Asfalto 20/30	33
Tabla 15. Intervalo de los valores del módulo dinámico Asfalto 60/70	33
Tabla 16. Intervalo de los valores del módulo dinámico Asfalto 20/30	34
Tabla 17. Intervalo de los valores del módulo dinámico Asfalto 60/70	34

LISTA DE GRAFICAS

Gráfica 1. Carga Vs Tiempo.....	16
Gráfica 2. Desplazamiento Vs Tiempo.....	16
Gráfica 3. Superposición Carga – Desplazamiento vs Tiempo.....	17
Gráfica 4. Carga – Desplazamiento vs Tiempo (Ajuste).....	19
Gráfica 5. Frecuencia Vs Módulo dinámico a 3°C.....	22
Gráfica 6. Frecuencia Vs Módulo dinámico a 19°C.....	23
Gráfica 7. Frecuencia Vs Módulo dinámico a 35°C.....	23
Gráfica 8. Frecuencia Vs Módulo dinámico a 3°C.....	25
Gráfica 9. Frecuencia Vs Módulo dinámico a 19°C.....	25
Gráfica 10. Frecuencia Vs Módulo dinámico a 35°C.....	26
Gráfica 11. Frecuencia Vs Módulo dinámico a 3°C.....	27
Gráfica 12. Frecuencia Vs Módulo dinámico a 19°C.....	28
Gráfica 13. Frecuencia Vs Módulo dinámico a 35°C.....	28
Gráfica 14. Frecuencia Vs Módulo dinámico a 3°C.....	30
Gráfica 15. Frecuencia Vs Módulo dinámico a 19°C.....	30
Gráfica 16. Frecuencia Vs Módulo dinámico a 35°C.....	31

LISTA DE FOTOGRAFIAS

Fotografía 1. Asfalto	12
Fotografía 2. Control de temperatura	13
Fotografía 3. Máquina Universal (Trebel).....	13
Fotografía 4. Equipo MTS	14

ANEXOS

Anexo 1 Cálculo Densidad Bulk	38
Anexo 2 Gravedad Máxima Específica	40
Anexo 3. Magnitud Módulo Dinámico.....	42
Anexo 4. Altura de las abrazaderas	51
Anexo 5. Altura Promedio De Las Probetas.....	53
Anexo 6. Módulo Dinámico por réplica.....	55

RESUMEN

TITULO: COMPORTAMIENTO DEL MODULO DINÁMICO DE LA MEZCLA ASFÁLTICA PARA DIFERENTES FUENTES DE AGREGADO. *

AUTORES:

BARAJAS GONZALEZ, Yeisson Yazeth; PINEDA DURAN, Leidy Johanna. **

PALABRAS CLAVES:

Mezcla asfáltica, asfaltita, asfalto, granulometría, módulo dinámico

DESCRIPCION:

Este proyecto busca determinar la variación del módulo dinámico de mezclas asfálticas cuando se utilizan diferentes fuentes de agregado, en este caso se uso material proveniente de Chicamocha y Bocas (unión entre los Ríos Surata y Oro), debido a que el módulo dinámico de las mezclas asfálticas constituyen un parámetro importante dentro del diseño por métodos mecánico - empíricos, y además forma parte del algoritmo que permite definir las dimensiones de la estructura. El comportamiento dinámico de las mezclas asfálticas está también definido por la variación de la temperatura y frecuencia de aplicación de las cargas, además de las propiedades del asfalto y el agregado que se utiliza en la fabricación de las mismas.

Para observar el comportamiento dinámico de las Mezclas Asfálticas se tomaron en cuenta cuatro parámetros: Contenido de asfalto (4.5 y 5.5), Tipo de asfalto (20/30 y 60/70), Gradación (MDC-2 y M1) y por último Fuente de agregado (Chicamocha y Bocas); para realizar el ensayo dinámico se utilizó la máquina dinámica MTS aplicando una fuerza de compresión axial sinusoidal sobre probetas cilíndricas, (compactadas estáticamente en la Máquina Universal Trebel), en condiciones de temperatura controladas de 3, 19 y 35°C y frecuencias de 10, 5 y 1Hz, para de esta manera obtener el valor del Módulo dinámico.

Finalmente se logró determinar que el comportamiento del módulo dinámico es directamente proporcional a la frecuencia aplicada e inversamente proporcional a la temperatura, así mismo al usar el asfalto 20/30, se obtuvo como resultado mayor rigidez comparado con el asfalto 60/70, igualmente al utilizar la fuente del Rio Chicamocha el resultado del módulo dinámico fue mayor que el obtenido de Bocas y la mezcla cerrada arrojó valores mayores que la mezcla abierta.

*Proyecto de grado

**Facultad de ciencias Físico- Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director Eduardo Castañeda. Codirectora María Cristina Rivero Olarte

ABSTRACT

TITLE: DYNAMIC BEHAVIOR OF THE MODULE asphalt ADDED TO DIFFERENT SOURCES.*

AUTHORS:

BARAJAS GONZALEZ, Yeisson Yazeth; PINEDA DURAN, Leidy Johanna.**

KEYWORDS:

Asphalt, asphaltite, asphalt, grain size, dynamic module.

DESCRIPTION:

This project seeks to determine the variation of dynamic modulus of asphalt mixtures when using different aggregate sources, in this case use material from Chicamocha and Bocas (union between Surat and Oro Rivers), because the dynamic modulus of mixtures asphalt is an important parameter in the design of - mechanical methods - empirical, and is also part of the algorithm to define the dimensions of the structure. The dynamic behavior of asphalt mixtures is also defined by the variation of temperature and frequency of application of loads, in addition to the properties of asphalt and aggregate used to manufacture them.

To observe the dynamic behavior of asphalt mixtures were taken into account four parameters: asphalt content (4.5 and 5.5), Type of bitumen (20/30 and 60/70), Grading (MDC-2 and M1) and finally Source aggregate (Chicamocha and Bocas) for the dynamic test was used dynamic MTS machine with a force of sinusoidal axial compression on cylindrical specimens (compacted statically Trebel Universal Machine) in controlled temperature conditions of 3, 19 and 35 ° C and frequencies of 10, 5 and 1 Hz, to thus obtain the value of the dynamic module.

Finally it was determined that the behavior of the dynamic modulus is directly proportional to the applied frequency and inversely proportional to the temperature and using the same asphalt 20/30, was obtained as a result of increased stiffness compared to the asphalt 60/70, also the use the power of the Rio Chicamocha dynamic module result was higher than that obtained from Bocas closed and the mixture had values greater than the mixed open.

* Draft Grade

** School of Mechanical and Physical Sciences. School of Civil Engineering. Director Eduardo Castañeda. Co-director Maria Cristina Rivero Olarte.

INTRODUCCION

En el mundo se han emprendido grandes campañas para mejorar el comportamiento de las mezclas asfálticas, y no obstante nuestro país es uno de ellos, según el INVIAS Colombia cuenta con una red vial de aproximadamente 16.641Km de los cuales se encuentran pavimentados 12.232 Km. Es por ello que el estudio se enfocó en analizar el comportamiento del módulo dinámico para diferentes mezclas asfálticas, las cuales se diseñaron con distintos parámetros como lo son el porcentaje de asfalto, tipo de asfalto, granulometría y origen del agregado con el propósito de establecer su influencia en aspectos relativos a su diseño y control de calidad.

Por otra parte en nuestro país existen diversos métodos para el diseño de mezclas asfálticas basados en principios empíricos, que han tenido gran discusión y aceptación por parte de los institutos que rigen actualmente en nuestro país. Por ello, este proyecto de investigación se convierte en una iniciativa al uso de ensayos y metodologías de diseño que actualmente son usadas en los países desarrollados, las cuales se basan en análisis mecánico-empíricos, en el cual se tiene en cuenta el efecto de de las cargas cíclicas y temperatura en la durabilidad del pavimento, por ello es prioritario la caracterización de la rigidez dinámica para definir las propiedades visco-elásticas de un material en el rango lineal y conocer de forma más aproximada el comportamiento de la estructura.

Otro problema típico es que los pavimentos no alcanzan a cumplir en su totalidad la vida útil prevista en los diseños, esto se debe a varios factores relevantes, entre ellos tenemos un vago desconocimiento del comportamiento de la mezcla, a su vez el de las propiedades de los materiales, bajo condiciones de tráfico y de ambiente.

De lo anteriormente expuesto depende que la carpeta asfáltica posea un buen desempeño, sea resistente a deformaciones plásticas a la fatiga, al agrietamiento, al daño por humedad, y tenga una mayor durabilidad, y con ello analizar las características mecánicas obteniendo así ventajas y desventajas que este nos proporciona y de esta manera tener mayores herramientas para tomar decisiones en pro de mejorar y obtener un diseño eficiente del pavimento flexible.

Básicamente queda un camino largo por recorrer, pues en el país se carece de datos que permitan determinar la influencia de tales factores en el desempeño de las mezclas asfálticas. Con este trabajo se plantea la necesidad de caracterizar dinámicamente las mezclas asfálticas utilizadas en la construcción de carreteras, debido a que para el subsistir y el bienestar del país se depende de esta infraestructura.

1 ESPECIFICACIONES DEL PROYECTO

1.1 OBJETIVOS GENERAL

- Determinar la variación del módulo dinámico de mezclas asfálticas para diferentes fuentes de agregado pétreo.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analizar la sensibilidad del módulo dinámico de mezclas asfálticas al utilizar diferentes gradaciones en la mezcla.
- Determinar las características mecánicas del agregado pétreo dependiendo de su fuente de explotación.
- Aportar recomendaciones para minimizar los errores en la obtención del modulo dinámico.

1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Las estructuras de pavimentos en las vías de Colombia no alcanzan a cumplir en su totalidad la vida útil prevista en los diseños, esto se debe a varios factores relevantes, entre ellos tenemos el desconocimiento de las propiedades de los materiales usados sumado al desconocimiento del comportamiento de la mezcla bajo sollicitación del tráfico; de esto depende que la carpeta asfáltica posea un buen desempeño, sea resistente a deformaciones plásticas a la fatiga, al agrietamiento, al daño por humedad, y tenga una mayor durabilidad.

Otro factor que contribuye a estructuras deficientes es que en Colombia no hay suficientes métodos que proporcionen resultados óptimos los cuales puedan demostrar que las características y resultados de una probeta asfáltica ensayada en el laboratorio sean similares a la de una estructura de pavimento ya en funcionamiento, debido a que los diseños se basan en ensayos empíricos los cuales en las nuevas metodologías de la AASHTO 2002 ya no se utilizan, siendo reemplazados por ensayos mecánicos que caracterizan de forma más adecuada la respuesta de la mezcla sometida a cargas cíclicas. Cabe añadir que en Colombia son pocos los laboratorios que realizan ensayos mecánicos y es por eso que no se tiene suficiente información sobre el comportamiento de la rigidez de la mezcla asfáltica y como se comporta la curva esfuerzo vs deformación para este tipo de materiales compuestos.

2 MARCO TEORICO

2.1 MEZCLAS ASFALTICAS EN GENERAL

La mezcla asfáltica es el producto obtenido de la incorporación y distribución uniforme de un material asfáltico en uno pétreo, según el procedimiento de mezclado se clasifica:

2.1.1 MEZCLAS ASFALTICAS EN CALIENTE:

Elaborados como su nombre lo indica en caliente, usando cemento asfáltico y materiales pétreos, en una planta estacionaria o móvil, dotada del equipo necesario para calentar los componentes de la mezcla. Estas a su vez se clasifican en:

- **Mezcla asfáltica de granulometría densa:**

Esta mezcla es uniforme y homogénea, elaborada con cemento asfáltico y materiales pétreos bien gradados, con tamaño nominal entre 1 ½ "y 3/8 ", que satisfagan los requisitos dados, normalmente se utiliza en la construcción de carpetas asfálticas de pavimentos nuevos en los que se requiere una alta resistencia estructural o en re nivelaciones y refuerzo de pavimentos existentes.

- **Mezcla asfáltica de granulometría abierta:**

Igualmente uniforme y homogénea pero con un alto porcentaje de vacios, elaborada con cemento asfáltico y materiales pétreos de granulometría uniforme, con tamaño nominal entre ½ " y ¼ ", que satisfagan los requisitos, habitualmente se usan para formar capas de rodadura, no tienen función estructural y generalmente se construyen sobre una carpeta de granulometría densa, con la

finalidad principal de satisfacer los requerimientos de calidad de rodamiento del tránsito, al permitir que el agua de lluvia sea desplazada por las llantas de los vehículos, ocupando los vacíos de la carpeta, con lo que se incrementa la fricción de las llantas con la superficie de rodadura, se minimiza el acuaplaneo, se reduce la cantidad de agua que se impulsa sobre los vehículos adyacentes y se mejora la visibilidad del señalamiento horizontal. Las mezclas asfálticas de granulometría abierta no deben colocarse en zonas susceptibles al congelamiento ni donde la precipitación sea menor de seiscientos milímetros por año.¹

2.2 AGREGADOS PETREOS

Son materiales que están conformados por partículas duras, de forma cubica, y de caras angulares y rugosas, que ofrezcan propiedades mecánicas aptas para soportar las cargas del tránsito y tener una buena adherencia con el ligante contenido en el asfalto natural. El tipo de agregado pétreo se puede determinar de acuerdo a la procedencia y a la técnica empleada para su aprovechamiento, pueden ser: trituración, artificiales, marginales y naturales, que fue el que se utilizó, este tiene la característica de que se emplean solamente después de una modificación de su distribución de tamaño para adaptarse a las exigencias según su disposición final.²

2.3 ASFALTITA

Es una especie de betún, de color negro, sólido y comparativamente duro y no volátil, compuesta principalmente de hidrocarburos, algunas veces está asociada con material mineral, produce sustancias de sulfonación insolubles en agua.

¹ www.bitumixcvv.co

² Diseño Racional de Pavimentos

La incorporación de la asfaltita al ligante asfáltico convencional, del tipo comúnmente empleado en mezclas asfálticas en caliente para pavimentación de calles y rutas, produce importantes mejoras de sus propiedades como las mencionadas a continuación: ocasiona un considerable aumento de la viscosidad del ligante modificado a altas temperaturas, sin que se vean afectadas sus propiedades a bajas temperaturas, es decir produce menor susceptibilidad térmica, mejorando así el desempeño en un rango amplio de condiciones climáticas; disminuye ahuellamientos y desprendimientos; aumenta la estabilidad Marshall: del orden del 40% en las mezclas asfálticas; Mejor adherencia asfalto-agregado y mayor resistencia a la acción de deterioro producida por el agua y por último aumento del módulo dinámico de la mezcla, siendo más resistentes a las deformaciones permanentes bajo el accionar de cargas lentas.³

2.4 MODULO DINAMICO

Es el valor absoluto del Módulo complejo que define las propiedades elásticas de un material de viscosidad lineal sometido a una carga sinusoidal. Se aplican una gama de cargas a frecuencias diferentes por medio de una carga de forma sinusoidal a compresión axial. A partir de lo anterior se miden las deformaciones recuperables dinámicas usando un deformímetro y se determinan los valores máximos de esfuerzo y deformación con lo cual se calcula el módulo dinámico y el ángulo de desfase.⁴

³. <http://www.e-asfalto.com.ar/asfaltitas/asfaltitas.htm>

⁴. Revista Universidad EAFIT Vol. 42 No. 143. 2006. Pp. 72-88

Inicialmente se calcula el esfuerzo:

$$\sigma = \frac{C}{A}$$

Donde:

C: Amplitud de la Carga

A: Área

Luego se calcula la deformación unitaria:

$$\varepsilon\mu = \frac{\Delta L}{L}$$

Donde:

ΔL : Amplitud de la deformación

L: Longitud unitaria

Y Por último con la relación entre la amplitud del esfuerzo y la deformación se halla el Módulo Dinámico:

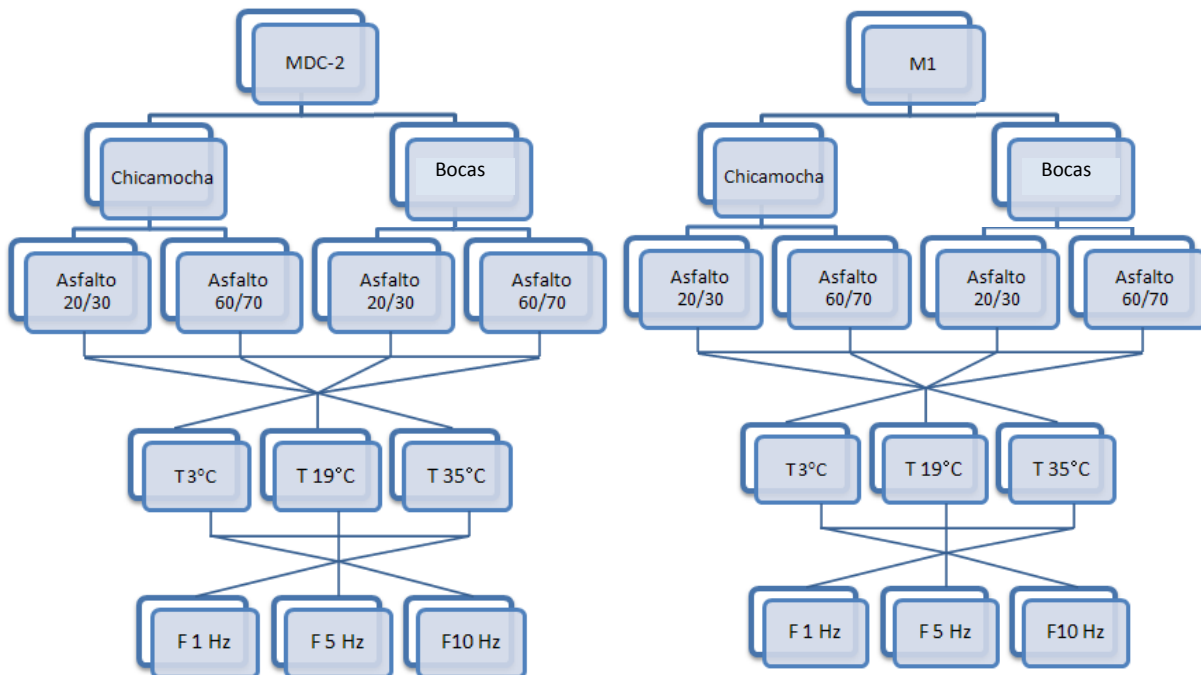
$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

3 METODOLOGIA.

Con el fin de lograr los objetivos propuestos con el proyecto se definió la siguiente metodología de investigación:

3.1 ESPECIFICACIONES DEL DISEÑO DE LAS MEZCLAS

Se elaboraron dos tipos de mezcla asfáltica: mezcla densa en caliente (MDC-2) y mezcla abierta (M1) utilizando en cada una de ellas diferentes fuentes de agregado y tipos de asfaltos entre los cuales se tienen los convencionales y modificados. Cada diseño se ensayó variando combinaciones de temperatura y frecuencia de aplicación de carga.



Se elaboraron ocho mezclas asfálticas cada una con tres réplicas para un total de 24 probetas, los diseños se codificaron según los niveles de los factores que lo componían. La Tabla 1 especifica la nomenclatura utilizada.

Tabla 1. Factores de la mezcla

FACTORES DE LA MEZCLA			
Factor 1	Contenido de asfalto	C1	4,5%
		C3	5,5%
Factor 2	Tipo de asfalto	T1	20/30
		T2	60/70
Factor 3	Gradación	G1	MDC-2
		G2	M1
Factor 4	Fuente	F1	Chicamocha
		F2	Bocas



Combinación
factores de mezcla

respondiente

Fuente: Autores

3.2 FABRICACION DE LAS PROBETAS

Las probetas fueron fabricadas siguiendo las indicaciones de las normas INVIAS las cuales regulan los procedimientos que se deben tener en cuenta en los diseños de mezclas asfálticas.

3.2.1 Agregados:

Obtenidos a través de procesos de trituración en cada una de las zonas de origen.

Para obtener la granulometría especificada en la norma INVIAS E-213-07 para mezclas densas en caliente tipo 2 y mezclas abiertas en caliente tipo 1, se ejecutó un tamizado mecánico, con el que se estableció la cantidad en masa de las fracciones con que se elaboraron las probetas, como se observa en la Tabla 2.

Tabla 2. Granulometría mezclas asfálticas.

GRANULOMETRIA				
MEZCLA DENSA EN CALIENTE MDC-2				
Contenido asf (%)	5.5			
Contenido asf (g)	110			
Peso Agregado (g)	1890			
MEZCLA ABIERTA M1				
Contenido asf (%)	4.5			
Contenido asf (g)	67.5			
Peso Agregado (g)	1432.5			
Peso Tamiz	MDC-2	M1	MDC-2	M1
3/4				
1/2	238.8		236.3	
3/8	162.4	200.6	160.7	198.5
Nº4	420.2	924.0	415.8	914.3
Nº10	382.0	71.6	378.0	70.9
Nº40	334.3	64.5	330.8	63.8
Nº80	133.7	0.0	132.3	0.0
Nº200	124.2	78.8	122.9	78.0
Pasa 200	114.6	93.1	113.4	92.1
	1910.0	1432.5	1890.0	1417.5

Fuente: Autores

3.2.2 Asfalto:

En este caso se utilizó dos tipos de asfaltos: convencional (T2, 60/30) y modificado (T1, 20/30), con el 20% de asfaltita y así obtener un asfalto de mayor dureza.⁵ Para confirmar la consistencia del asfalto se realizaron ensayos de penetración, ductilidad y punto de ablandamiento, realizados bajo requerimientos de las Normas del INVIAS E-724-7.

Fuente: Autores



Fotografía 1. Asfalto

3.3 PREPARACION DE LAS MUESTRAS:

Una vez obtenida la gradación correspondiente se elaboraron las probetas de 4 in de diámetro y aproximadamente 5 in de altura teniendo en cuenta las Normas del INVIAS E-747-07. Los agregados debían permanecer a una temperatura entre 150 y 160°C y el asfalto no debía sobre pasar 150°C, durante el proceso de mezcla mantenerla en este rango. Del mismo modo todas las herramientas usadas en el proceso debían estar a dicha temperatura para evitar cambios que alteraran el procedimiento de compactación.

⁵. MENDEZ, Adriana; NUÑEZ, Yudith. Trabajo de grado. Mezclas de asfaltos naturales con asfaltos de refinería para producir asfaltos duros en la elaboración de mezclas con un modulo alto.

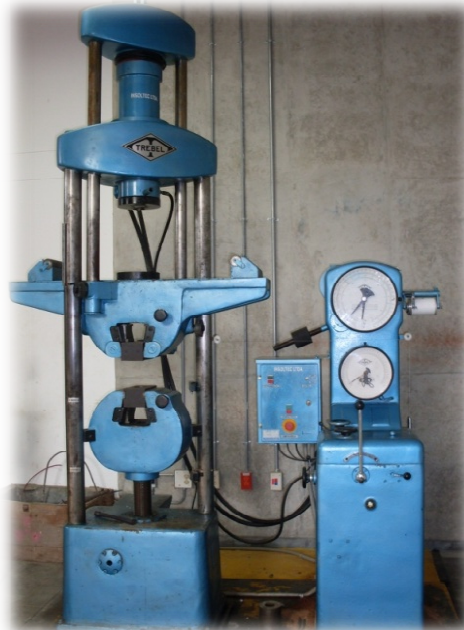
Fuente: Autores



Fotografía 2. Control de temperatura

La compactación se realizó en la Máquina Universal (marca Trebel), siguiendo lo estipulado en la norma del INVIAS E-747-07.

Fuente: Autores



Fotografía 3. Máquina Universal (Trebel).

3.4 ENSAYO DE MODULO DINAMICO.

Luego de tener las probetas elaboradas fueron ensayadas a tres temperaturas, 3, 19 y 35°C y cada una de ellas a tres frecuencias, 10 ,5 y 1Hz, con diferentes condiciones de carga; en el caso de la temperatura de 3°C y 35°C se introducían en la nevera doce horas y el horno dos horas respectivamente antes de ensayarlas para mantener dicha temperatura. Durante la ejecución el ensayo las probetas no podían tener contacto con el medio ambiente por más de dos minutos ya que perdían la temperatura indicada, en este lapso de tiempo se ensaya cada probeta siguiendo la recomendación de la norma INVIAS E-753-07 y E-754-07.

Fuente: Autores



Fotografía 4. Equipo MTS

Para el ensayo se siguió la norma del INVIAS E-754-07, la carga en el ensayo se colocó mediante un servo control el cual se programó en una onda sinusoidal media (seno inverso), que no produjera impacto sobre la muestra, programando

una carga lineal con el 10% de la carga máxima, siguiendo con el proceso se colocó una precarga a una frecuencia de 16 Hz y por último la carga a la frecuencia correspondiente a cada ensayo.

3.5 DETERMINACION DEL MODULO DINAMICO

3.5.1 CALCULO TIPO

Luego de ensayar cada una de las probetas en la MTS como se indicó anteriormente se continuó con el proceso para calcular los resultados.

Para el cálculo tipo la probeta que se escogió es la 3_1221_R2 (mezcla abierta con un contenido de asfalto de 4.5%, asfalto convencional y agregado Chicamocha).

Tabla 3. Datos de entrada.

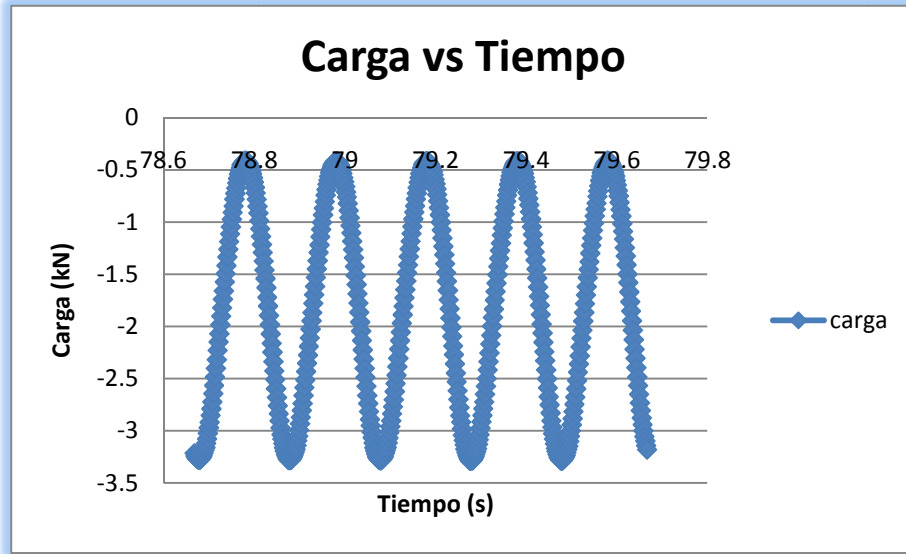
DATOS DE ENTRADA	
Código probeta	3_1221_R2
Temperatura (°C)	19
Frecuencia (Hz)	5
w	31.416
Longitud útil (mm)	99.545
Área (mm ²)	8107.320
Abertura extensómetro (mm)	7.245
Nº abrazadera	7

Fuente: Autores

La MTS crea un archivo de Excel con los siguientes datos: Tiempo (s), Carga (KN), y desplazamiento del extensómetro (mm). En total se tomaron 100 datos por cada ciclo y el módulo se calculó con los últimos cinco ciclos de cada aplicación.

A partir de estos datos adquiridos de la MTS se obtienen las siguientes gráficas, donde se observa como varia la carga con respecto al tiempo

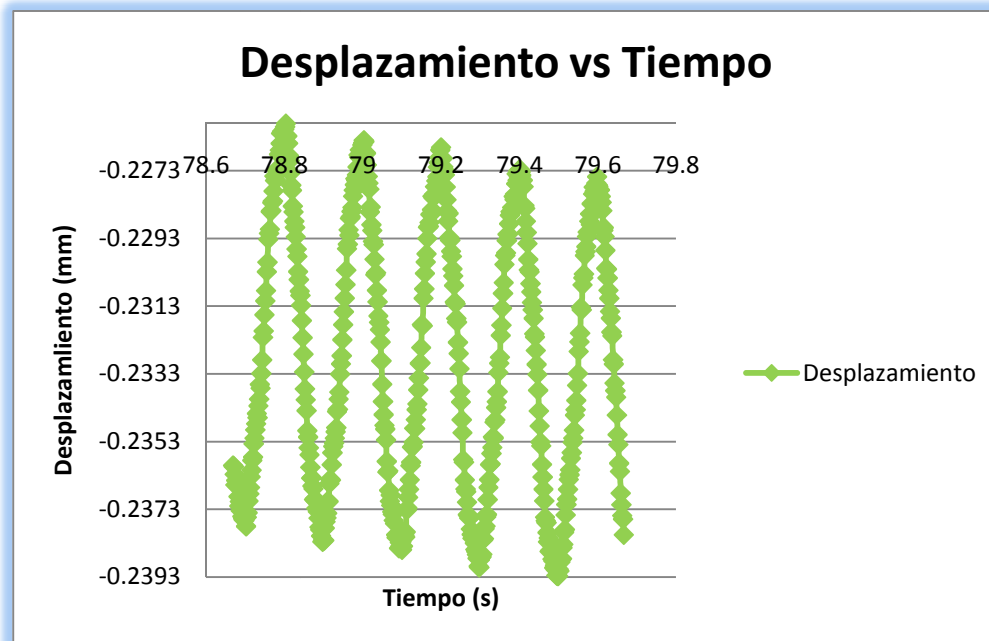
Gráfica 1. Carga Vs Tiempo



Fuente: Autores

En la siguiente gráfica se observa la variación del desplazamiento con respecto al tiempo;

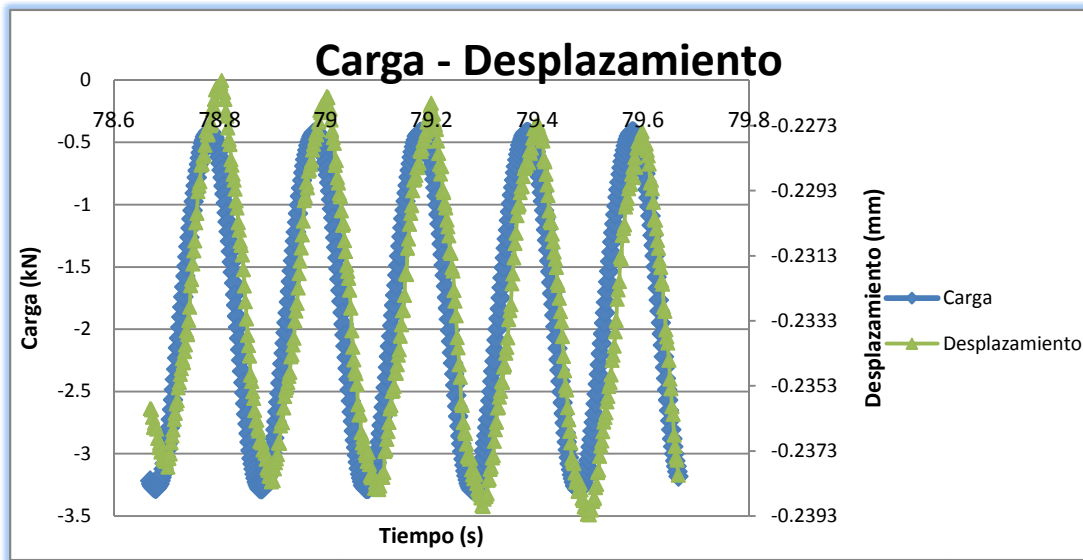
Gráfica 2. Desplazamiento Vs Tiempo



Fuente: Autores

Realizando una superposición de la carga y el desplazamiento en función del tiempo se obtiene lo siguiente, donde se ve claramente el desfase que existe entre las dos señales.

Gráfica 3. Superposición Carga – Desplazamiento vs Tiempo



Fuente: Autores

Posteriormente se realiza el respectivo ajuste de la curva mediante el método de mínimos cuadrados, para obtener las funciones sinusoidales de la carga (KN) y el desplazamiento (mm):

- **CARGA:**

Tabla 4. Ajuste Carga

CICLOS	CONSTANTES DE LA ECUACION DE AJUSTE			w (rad/s)	Σ ERROR ²	σ (kN/mm ²)
	A	B	δ			
1	-1.825	1.435	5.668	31.416	0.095	1.77 E ⁻⁴
2	-1.818	1.434	5.667	31.416	0.090	1.768 E ⁻⁴
3	-1.820	1.434	5.668	31.416	0.103	1.769 E ⁻⁴
4	-1.819	1.435	5.665	31.416	0.108	1.770 E ⁻⁴
5	-1.822	1.443	5.659	31.416	0.123	1.780 E ⁻⁴
Amplitud Carga (kN)		1.436				

Fuente: Autores

- **DESPLAZAMIENTO:**

Tabla 5. Ajuste Desplazamiento

CICLOS	CONSTANTES DE LA ECUACION DE AJUSTE			w (rad/s)	Σ ERROR ²	ε (mm/mm)	με
	A	B	δ				
1	-0.23199	5.625 E ⁻³	-0.147	31.416	8.82 E ⁻⁶	5.65 E ⁻⁵	56.507
2	-0.23242	5.598 E ⁻³	-0.140	31.416	7.76 E ⁻⁶	5.62 E ⁻⁵	56.236
3	-0.23279	5.588 E ⁻³	-0.147	31.416	7.08 E ⁻⁶	5.61 E ⁻⁵	56.131
4	-0.23322	5.604 E ⁻³	-0.154	31.416	7.71 E ⁻⁶	5.63 E ⁻⁵	56.297
5	-0.23366	5.680 E ⁻³	-0.162	31.416	9.81 E ⁻⁶	5.71 E ⁻⁵	57.062
Amplitud Desplazamiento (mm)		5.619 E ⁻³					56.447

Fuente: Autores

Con el ajuste de la curva finalmente se obtiene la amplitud de la carga y el desplazamiento, dividiendo el área de la probeta y la longitud útil (hallada teniendo en cuenta la altura de la abrazadera utilizada. Ver anexo 4) en la cual se midieron las deformaciones se calcula el esfuerzo y la deformación unitaria respectivamente.

Con ello se calculó el módulo dinámico y el ángulo de desfase mostrado en la siguiente tabla:

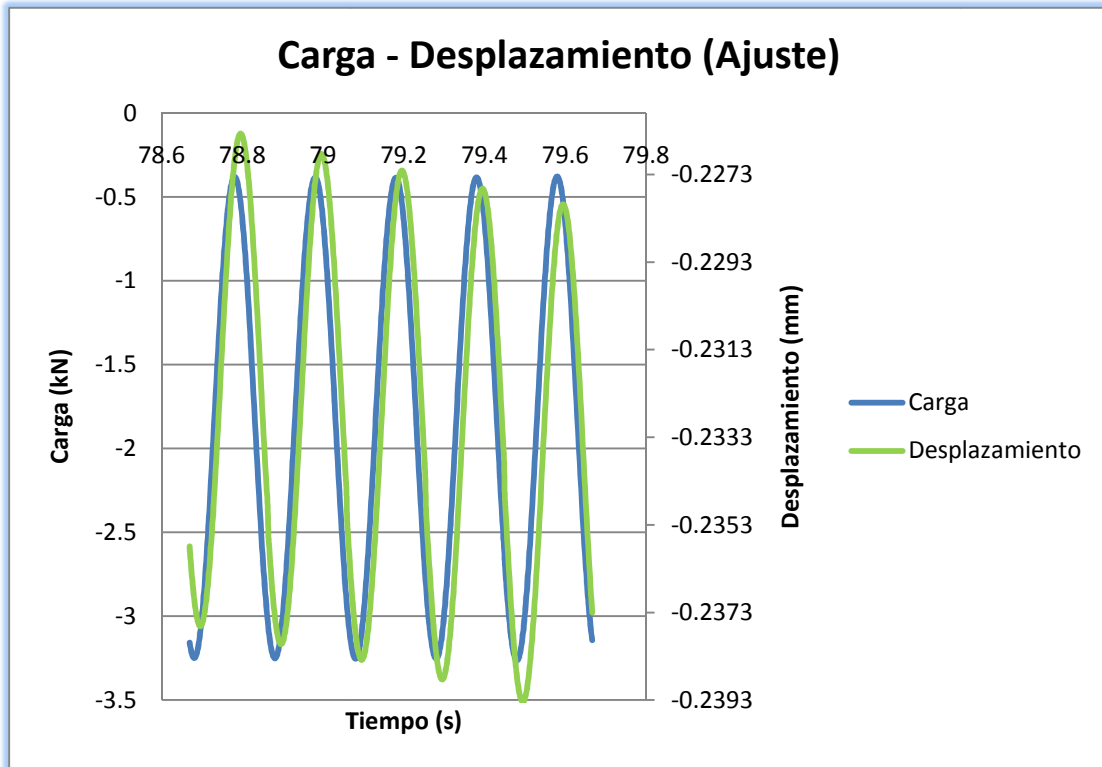
Tabla 6. Módulo dinámico y ángulo de desfase

MODULO DINAMICO Y ANGULO DE DESFASE		
	E (GPa)	φ (°)
ciclo1	3.132	26.831
ciclo2	3.145	27.311
ciclo3	3.152	26.839
ciclo4	3.144	26.625
ciclo5	3.120	26.475
Promedio	3.138	26.816

Fuente: Autores

Por último se obtuvo la gráfica de superposición carga desplazamiento del anterior ajuste como se muestra a continuación:

Gráfica 4. Carga – Desplazamiento vs Tiempo (Ajuste)



Fuente: Autores

Con el anterior procedimiento se calculó el módulo dinámico de cada probeta, y en el Anexo 2 se muestra la tabla resumen con los datos, los cuales se utilizaron para el respectivo análisis, y concluir la forma en que se comporta la rigidez del material para cada una de las condiciones evaluadas.

4 RESULTADOS

4.1 DETERMINACION DE LA DENSIDAD BULK Y DENSIDAD MAXIMA TEORICA (GMM)

4.1.1 Densidad Bulk

Siguiendo la norma del INVIAS E-225-07 se calculó el promedio de las tres replicas en la Tabla 3 se resume el resultado de la Densidad Bulk de cada diseño ver el anexo (Ver Anexo 1)

Tabla 7. Densidad Bulk

PROBETA N.	DENSIDAD BULK (g/cm ³)
1_1122	2.23
2_1121	2.23
3_1221	2.24
4_1222	2.22
5_3112	2.32
6_3111	2.31
7_3211	2.33
8_3212	2.30

Fuente: Autores

4.1.2 Densidad Máxima Teórica

Siguiendo los requerimientos establecidos en la Norma INVIAS E-735-07, se calculó la Gravedad máxima teórica (Gmm), como se observa en la Tabla 8.

Tabla 8 Gravedad Específica Máxima Teórica (Gmm)

MUESTRA ASFALTICA	GMM
1_1122	2.44
2_1121	2.53
3_1221	2.48
4_1222	2.53
5_3112	2.39
6_3111	2.31
7_3211	2.41
8_3212	2.44

Fuente: Autores

4.1.3 PARAMETROS VOLUMETRICOS

Para hallar estos parámetros se siguió la norma INVIAS E-799-07, En la siguiente tabla se observa los valores obtenidos para cada mezcla asfáltica.

Tabla 9. Parámetros volumétricos

MUESTRA ASFALTICA	VAM	Va (%)	VFA
1_1122	19.80	8.56	56.7
2_1121	19.84	11.71	41.0
3_1221	19.54	9.16	53.1
4_1222	17.76	8.48	52.3
5_3112	17.67	3.2	81.8
6_3111	20.22	3.9	80.5
7_3211	17.38	3.57	79.4
8_3212	18.38	5.71	68.9

Fuente: Autores

4.2 MODULO DINAMICO

Inicialmente se analizó la mezcla densa en caliente, determinando el comportamiento del módulo dinámico comparando las fuentes de agregado de Chicamocha y Bocas, de la misma manera para la mezcla abierta.

Para visualizar la influencia de la fuente del agregado se graficó el comportamiento del módulo dinámico vs la frecuencia de aplicación de las cargas y se determinó la relación entre las magnitudes del módulo para la fuente de Chicamocha y Bocas.

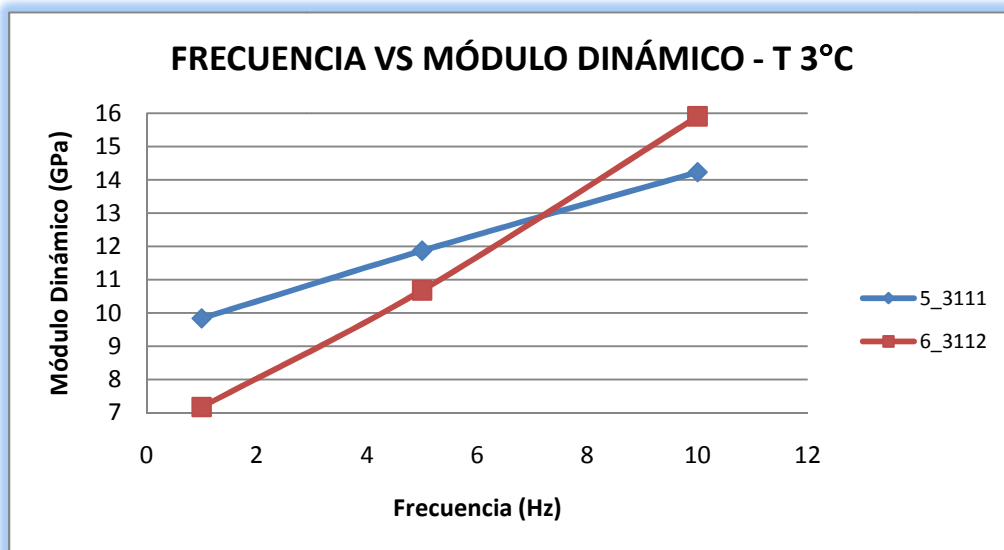
4.2.1 MEZCLAS DENSAS EN CALIENTE (MDC-2)

Asfalto Modificado 20/30

En las siguientes gráficas se muestra el promedio de los módulos dinámicos a las diferentes frecuencias y temperaturas. Estas mezclas tienen un contenido de asfalto del 5,5% (C3) y se analizará la Fuente del agregado de Chicamocha Vs Bocas. Las mezcla asfálticas 5_3111 y 6_3112 tienen un porcentaje de vacios de 3.21 y 3.94% respectivamente

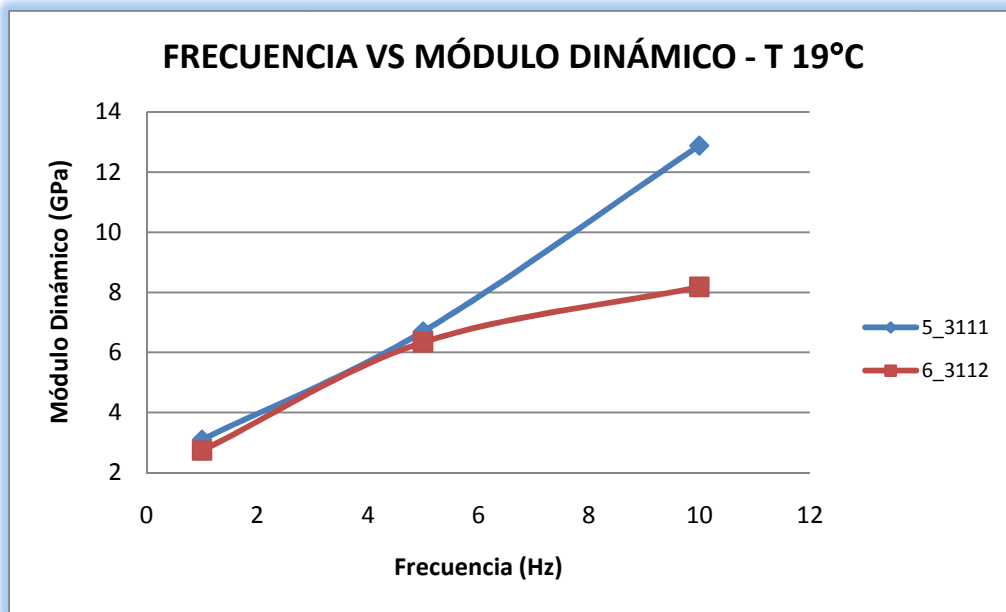
DISEÑO 5_3111 (Chicamocha) Vs 6_3112 (Bocas)

Gráfica 5. Frecuencia Vs Módulo dinámico a 3°C



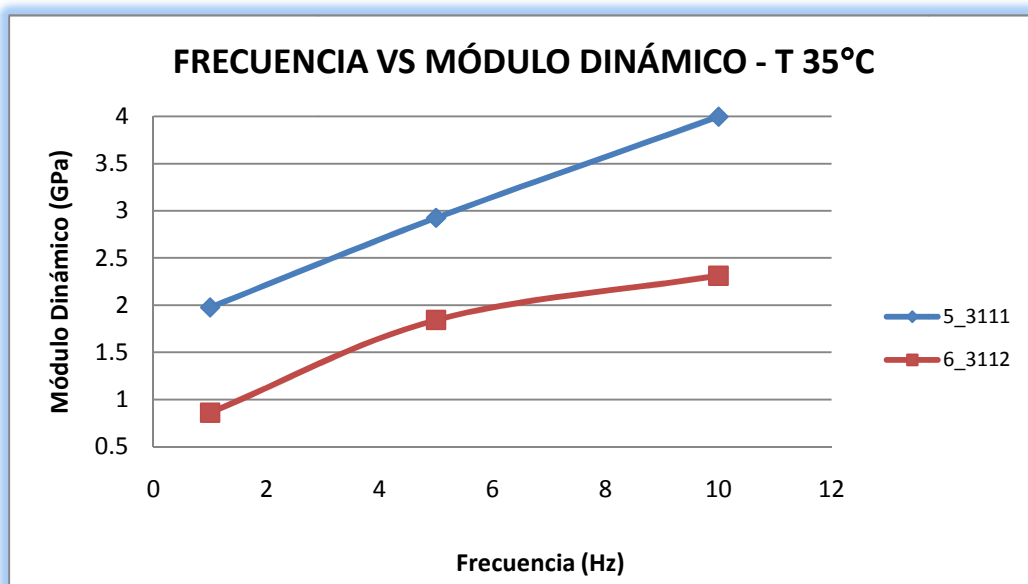
Fuente: Autores

Gráfica 6. Frecuencia Vs Módulo dinámico a 19°C



Fuente: Autores

Gráfica 7. Frecuencia Vs Módulo dinámico a 35°C



Fuente: Autores

Se relacionó los módulos dinámicos promedios entre la fuente de Chicamocha (F1) y Bocas (F2), en general los valores del módulo dinámico para las mezclas elaboradas con material de la fuente Chicamocha son mayores que los de Bocas. Como se observa en la Tabla 10.

Tabla 10. Relación de módulos dinámicos Chicamocha-Bocas, Asfalto 20/30

		Temperatura (°C)		
		3	19	35
Frecuencia (Hz)	1	1.37	1.13	2.30
	5	1.11	1.06	1.60
	10	0.90	1.57	1.73
		Diseño	Chicamocha	Bocas
		%Vacíos	3.21	3.94

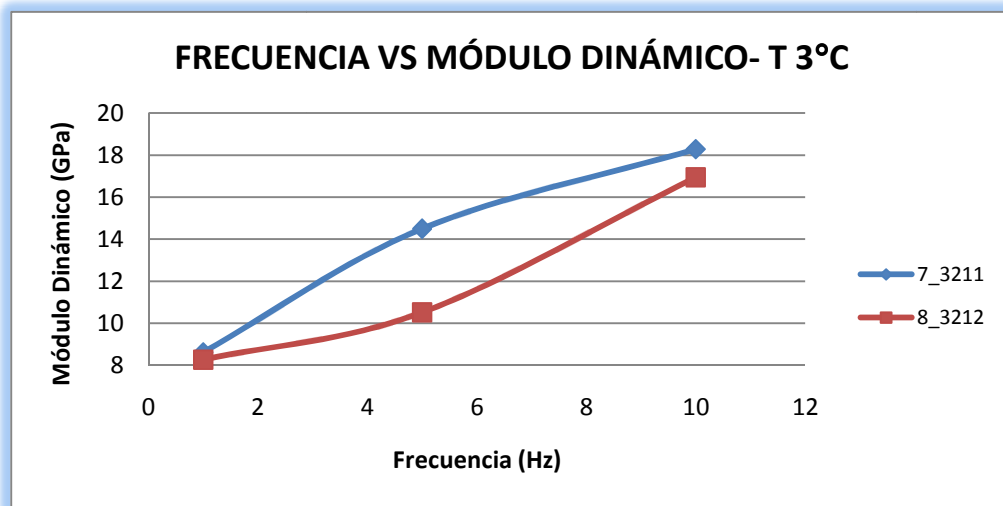
Fuente: Autores

Asfalto convencional 60/70

En las siguientes gráficas se muestra el promedio de los módulos dinámicos a las diferentes frecuencias y temperaturas. Estas mezclas tienen un contenido de asfalto del 5,5% (C3). Las mezcla asfálticas 7_3211 y 8_3212 tienen un porcentaje de vacíos de 3.57 y 5.71% respectivamente.

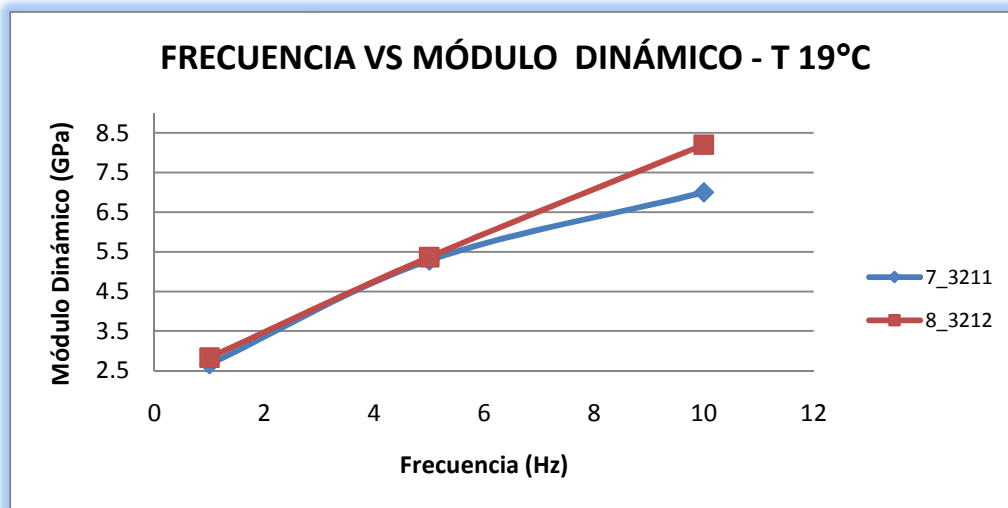
DISEÑO 7_3211 (Chicamocha) Vs 8_3212 (Bocas)

Gráfica 8. Frecuencia Vs Módulo dinámico a 3°C



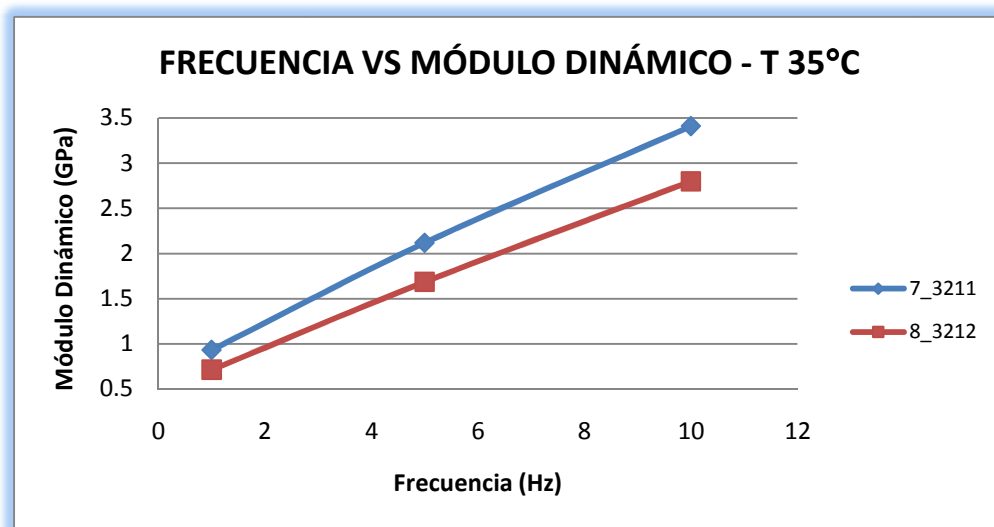
Fuente: Autores

Gráfica 9. Frecuencia Vs Módulo dinámico a 19°C



Fuente: Autores

Gráfica 10. Frecuencia Vs Módulo dinámico a 35°C



Fuente: Autores

En la Tabla 11 se observa que la fuente de agregado de Chicamocha a temperatura ambiente obtuvo módulos de menor magnitud que en Bocas, caso contrario se presenta a temperaturas bajas y altas.

Tabla 11. Relación de módulos dinámicos Chicamocha-Bocas, Asfalto 60/70

		Temperatura (°C)		
		3	19	35
Frecuencia (Hz)	1	1.04	0.94	1.31
	5	1.38	0.98	1.26
	10	1.08	0.85	1.22
Diseño		Chicamocha	Bocas	
% VACIOS		3.57	5.71	

Fuente: Autores

En general para una mezcla densa se cumple que la fuente de Chicamocha (F1) es un material que suministra a la mezcla asfáltica una mayor rigidez, y las mezclas que incluyen el agregado Chicamocha en su diseño presenta un porcentaje de vacios menores que la fuente de Bocas (F2).

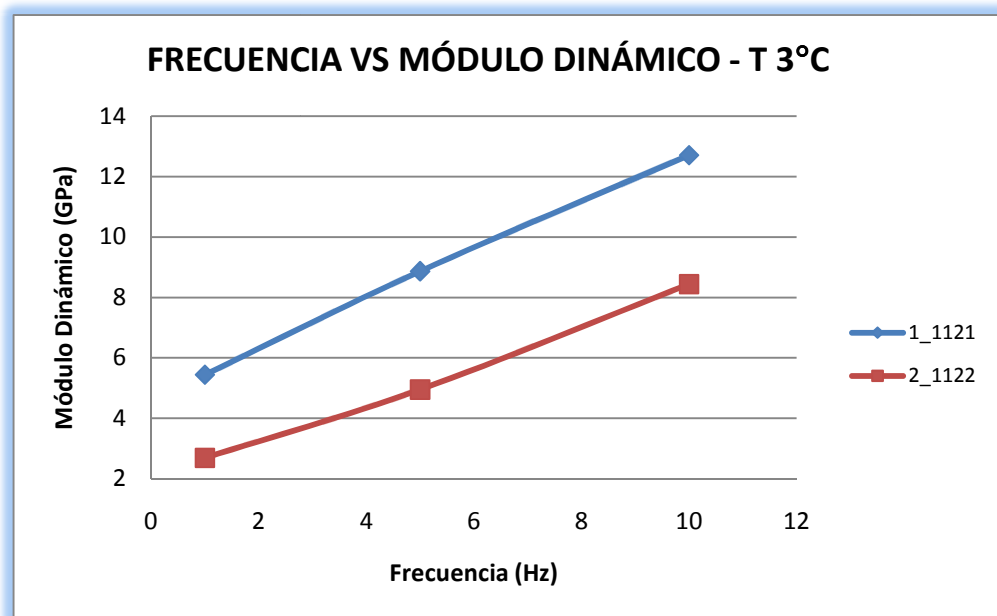
4.2.2 MEZCLAS ABIERTAS (M-1)

- **Asfalto modificado 20/30**

En las siguientes gráficas se muestra el promedio de los módulos dinámicos a las diferentes frecuencias y temperaturas. Estas mezclas tienen un contenido de asfalto del 4,5% (C1) y se analizó la Fuente del agregado de Chicamocha Vs Bocas Las mezcla asfálticas 1_1121 y 2_1122 tienen un porcentaje de vacios de 8.55 y 11.71% respectivamente.

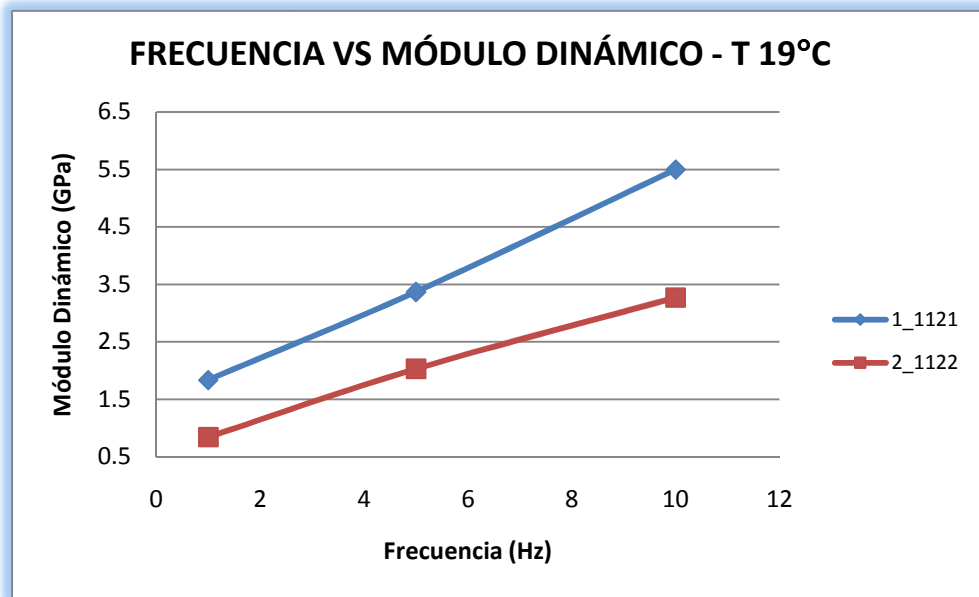
DISEÑO 1_1121 (Chicamocha) Vs 2_1122 (Bocas)

Gráfica 11. Frecuencia Vs Módulo dinámico a 3°C



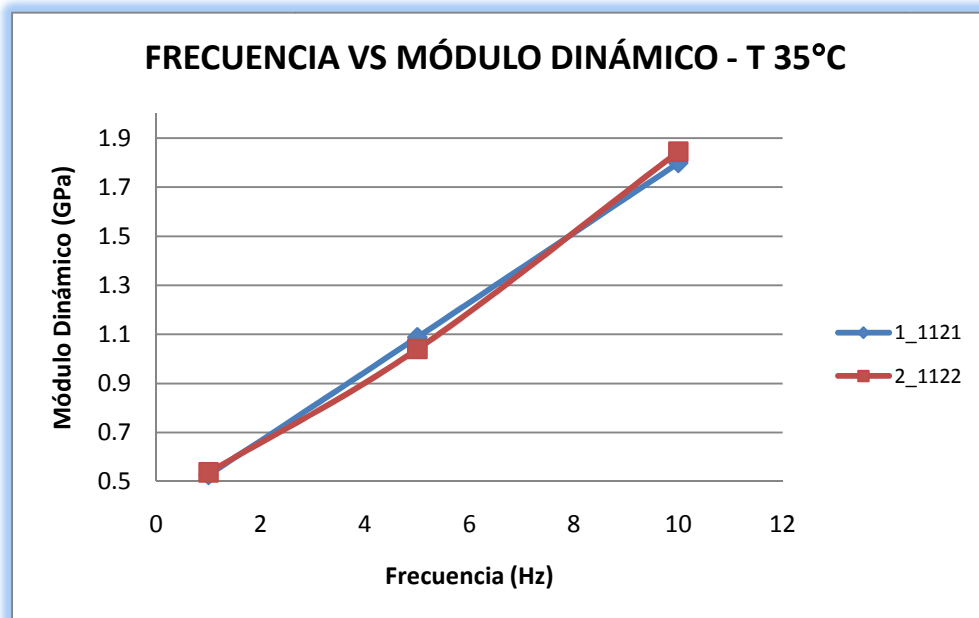
Fuente: Autores

Gráfica 12. Frecuencia Vs Módulo dinámico a 19°C



Fuente: Autores

Gráfica 13. Frecuencia Vs Módulo dinámico a 35°C



Fuente: Autores

En la Tabla 12 se puede observar que a temperatura alta el módulo dinámico fue mayor en Bocas, aunque teniendo en cuenta que la variación no es muy significativa entre estos, para los demás casos la relación arrojó como resultado valores mayores para la fuente de Chicamocha.

Tabla 12. Relación de módulos dinámicos Chicamocha-Bocas, Asfalto 20/30

		Temperatura (°C)		
		3	19	35
Frecuencia (Hz)	1	2.03	2.18	0.98
	5	1.80	1.66	1.04
	10	1.50	1.68	0.97
		Diseño	Chicamocha	Bocas
		% VACIOS	8.55	11.71

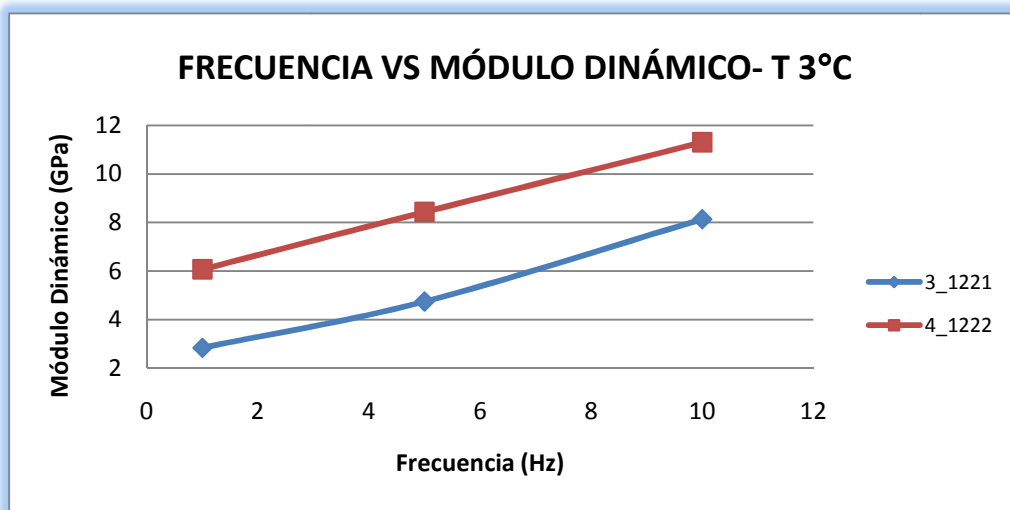
Fuente: Autores

Asfalto convencional 60/70

En las siguientes gráficas se muestra el promedio de los módulos dinámicos a las diferentes frecuencias y temperaturas. Estas mezclas tienen un contenido de asfalto del 4,5% (C1). Las mezcla asfálticas 3_1221 y 4_1222 tienen un porcentaje de vacíos de 9.16 y 8.47% respectivamente.

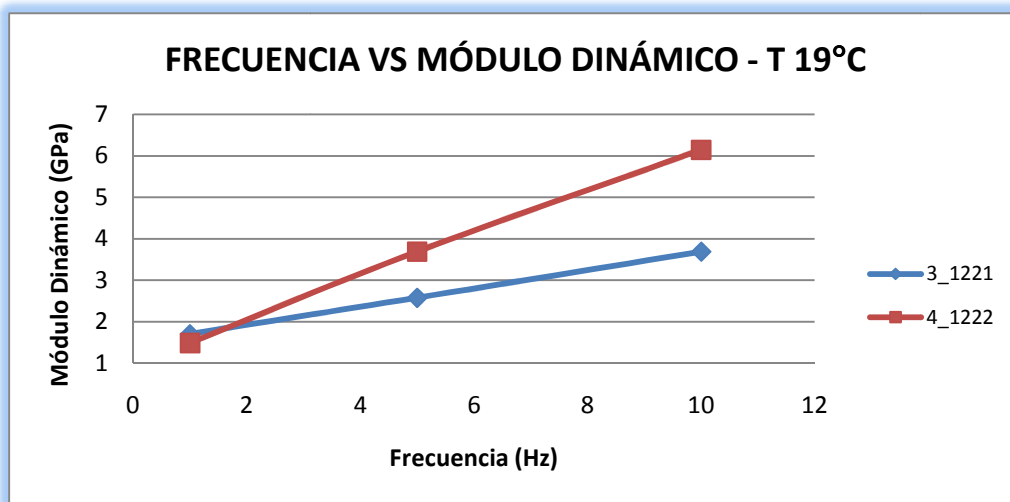
DISEÑO 3_1221 (Chicamocha) Vs 4_1222 (Bocas)

Gráfica 14. Frecuencia Vs Módulo dinámico a 3°C



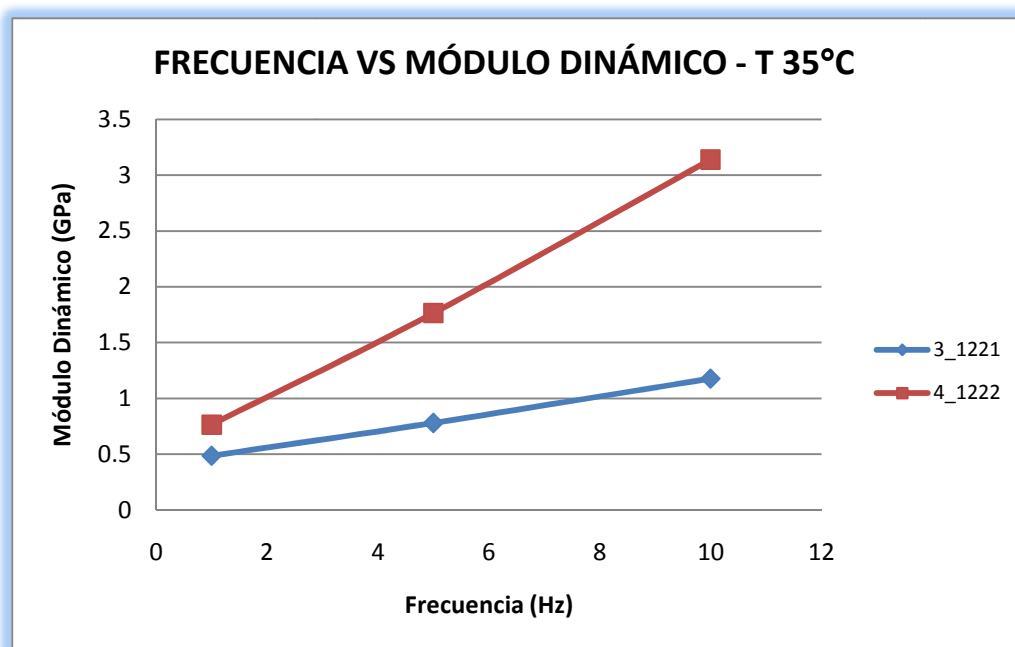
Fuente: Autores

Gráfica 15. Frecuencia Vs Módulo dinámico a 19°C



Fuente: Autores

Gráfica 16. Frecuencia Vs Módulo dinámico a 35°C



Fuente: Autores

Esta relación arrojó en general como resultado valores del módulo dinámico mayores en la fuente de agregado de Bocas que Chicamocho.

Tabla 13. Relación de módulos dinámicos Chicamocho-Bocas, Asfalto 60/70

		Temperatura (°C)		
		3	19	35
Frecuencia (Hz)	1	0.47	1.14	0.64
	5	0.56	0.70	0.44
	10	0.72	0.60	0.37
Diseño		Chicamocho	Bocas	
% VACIOS		9.15	8.47	

Fuente: Autores

En la mayor parte de los materiales estudiados, el agregado de la fuente Chicamocha produce mezclas asfálticas con mayor rigidez, tanto en el caso de granulometría densa como abierta. En mezclas abiertas con asfalto 60/70 y contenido de ligante 4.5 % no se obtuvo el mismo comportamiento, los estudios realizados no permiten explicar esta variación.

Finalmente los datos obtenidos se comportaron consecuentemente ya que se comprobó que el Módulo dinámico es inversamente proporcional a la temperatura y directamente proporcional a la frecuencia aplicada, ya que a menor frecuencia y mayor temperatura se genera más daño produciendo mayor deformación.

CONCLUSIONES

De las fuentes de materiales que se analizaron, las mezclas fabricadas con agregado proveniente del Rio Chicamocha muestran rigidez superior a las fabricadas con agregado de la fuente de Bocas (unión entre los ríos Surata y Oro).

Los valores de los módulos dinámicos del ensayo, según las combinaciones de temperatura y frecuencia, variaron en intervalos, como se muestra en las siguientes tablas 14, 15, 16 y 17:

En las Tabla 14 y 15 se observan los resultados obtenidos para mezclas densas en caliente elaboradas con asfalto 20/30 y 60/70 respectivamente.

Tabla 14. Intervalo de los valores del módulo dinámico Asfalto 20/30

MODULOS DINAMICOS (GPa)				
Temperatura (°C)				
		3	19	35
F(Hz)	1	[9.8-7.2]	[5.1-2.7]	[2.0-0.9]
	5	[11.8-10.7]	[6.7-6.3]	[2.9-1.8]
	10	[14.2-15.9]	[12.9-8.2]	[4.0-2.3]

Fuente: Autores

Tabla 15. Intervalo de los valores del módulo dinámico Asfalto 60/70

MODULOS DINAMICOS (GPa)				
Temperatura (°C)				
		3	19	35
F(Hz)	1	[8.6-8.3]	[2.8-2.7]	[0.9-0.7]
	5	[14.5-10.5]	[5.4-5.3]	[2.1-1.7]
	10	[18.3-17.0]	[8.2-7.0]	[3.4-2.8]

En las Tabla 16 y 17 se observan los resultados obtenidos para mezclas abiertas elaboradas con asfalto 20/30 y 60/70 respectivamente.

Fuente: Autores

Tabla 16. Intervalo de los valores del módulo dinámico Asfalto 20/30

MODULOS DINAMICOS (GPa)				
Temperatura (°C)				
		3	19	35
F (Hz)	1	[5.4-2.7]	[1.8-0.8]	[0.5-0.5]
	5	[8.9-3.4]	[3.4-2.0]	[1.1-1.0]
	10	[12.7-8.4]	[5.5-3.3]	[1.8-1.8]

Fuente: Autores

Tabla 17. Intervalo de los valores del módulo dinámico Asfalto 60/70

MODULOS DINAMICOS (GPa)				
Temperatura (°C)				
		3	19	35
F (Hz)	1	[6.1-2.8]	[1.7-1.5]	[0.8-0.5]
	5	[8.4-4.8]	[3.7-2.6]	[1.8-0.8]
	10	[11.3-8.1]	[6.1-3.7]	[3.1-1.2]

Fuente: Autores

RECOMENDACIONES

Aplicar este ensayo para nuevas fuentes de agregado de la región, variando los métodos de obtención del módulo dinámico realizando así una comparación entre estos.

En cuanto a la realización del ensayo dinámico no es recomendable que las probetas tengan contacto por más de dos minutos con el ambiente, ya que se puede alterar la temperatura estipulada variando con esto los resultados.

Sería conveniente hacer una revisión y análisis a futuro con más profundidad ya que se careció del equipo necesario para una mayor precisión en los datos obtenidos de los ensayos, como una cámara de temperatura y al menos dos deformímetros.

BIBLIOGRAFIA

- www.invias.gov.co/info/red_vial/red_vial.asp
- MENDEZ, Adriana; NUÑEZ, Yudith. Mezclas de asfaltos naturales con asfaltos de refinería para producir asfaltos duros en la elaboración de mezclas con un modulo alto. Trabajo de grado (Ingeniería Civil) UIS. Facultad de físico - mecánicas.
- BOWLES, Joseph E. Manual de laboratorio de suelos en Ingeniería Civil. McGraw-Hill
- Elizondo Fabián, Badilla Gustavo, Ulloa Álvaro. Predicción de módulos resilientes en mezclas asfálticas mediante el modelo de Witczak. Infraestructura Vial No 19 Febrero 2008; p 38-48.
- Cepeda Aldape Jorge B, Empleo del ensayo de tensión indirecta para mejorar el diseño de mezclas asfálticas densas. (2004)
- Anual book of ASTM standard, 4.03 Roofing and Paving Material; Behicle-Pavement System (2001)
- Centros de Estudios Experimentales de Obras Públicas – Centro de estudios de carreteras, Normas NLT1-Ensayos de carreteras.

ANEXOS

Anexo 1 Cálculo Densidad Bulk

PROBETA N.	P SECA (g)	P SUMER (g)	PSS (g)	DENSIDAD BULK (g/cm³)
1-1	2487	1395.6	2523	2.21
1-2	2453.5	1389.2	2487.2	2.23
1-3	2488	1410.9	2513	2.26
2-1	2457.3	1399	2498.5	2.23
2-2	2446.8	1400.6	2498.8	2.23
2-3	2466.3	1406.2	2508	2.24
3-1	2505	1412.3	2545.5	2.21
3-2	2530.5	1426.5	2559.7	2.23
3-3	2469.1	1398.4	2481.8	2.28
4-1	2484.3	1409.2	2522.4	2.23
4-2	2475.2	1425.6	2544.5	2.21
4-3	2469.3	1405.8	2516.8	2.22
5-1	2444.3	1398.5	2454.6	2.31
5-2	2523	1442.7	2531.8	2.32
5-3	2494.3	1429.5	2507.7	2.31
6-1	2454.9	1392	2461.6	2.29
6-2	2519	1442.2	2520	2.34
6-3	2482.4	1417	2487.1	2.32
7-1	2432.7	1418	2467.7	2.32
7-2	2448.2	1410.3	2459.5	2.33
7-3	2460.1	1412	2469.6	2.33
8-1	2478.1	1411.2	2493.1	2.29
8-2	2470.9	1405.3	2478.4	2.30
8-3	2499.4	1424.4	2511.6	2.30

Anexo 2 Gravedad Máxima Específica

MUESTRA ASFALTICA	W (g)	W (RECIPIENTE+AGUA g)	W (RECIPIENTE+AGUA + MTRA g)	GMM
1_1122	1412	6009.8	6863.4	2.44
2_1121	1440.8	6009.8	6860.8	2.53
3_1221	1488.7	6009.8	6895	2.47
4_1222	1460.6	6009.8	6892.9	2.53
5_3112	1466.9	6009.8	6842.6	2.39
6_3111	1446.9	6009.8	6852.4	2.31
7_3211	1378.4	6009.8	6816.7	2.41
8_3212	1407.5	6009.8	6839.6	2.44

Anexo 3. Magnitud Módulo Dinámico

MEZCLA DENSA EN CALIENTE (MDC-2)

	Nº probeta	Código	T (°C)	F (Hz)	Módulo (Gpa)	ϕ (°)	Amplitud	
							Carga (KN)	Microstrain
4.5% de asfalto _PEN 20/30_densa_Bocas	4	5_3111_R1	3	10	14.027	11.766	6.906	60.73
	4	5_3111_R1	3	5	11.588	12.961	5.051	53.767
	4	5_3111_R1	3	1	10.175	16.366	3.218	39.014
	4	5_3111_R1	19	10	11.301	19.011	4.065	44.362
	4	5_3111_R1	19	5	6.329	21.535	2.286	44.555
	4	5_3111_R1	19	1	2.569	33.479	0.608	29.212
	4	5_3111_R1	35	10	5.094	35.272	1.625	39.344
	4	5_3111_R1	35	5	3.408	37.812	1.28	46.344
	4	5_3111_R1	35	1	2.172	43.649	1.075	61.038
	5	5_3111_R2	3	10	12.696	5.711	8.954	86.985
	5	5_3111_R2	3	5	10.697	11.349	6.416	73.98
	5	5_3111_R2	3	1	8.344	14.449	4.538	67.08
	5	5_3111_R2	19	10	15.545	19.305	5.693	45.177
	5	5_3111_R2	19	5	6.054	16.603	3.438	70.05
	5	5_3111_R2	19	1	3.183	24.286	1.649	63.916
	5	5_3111_R2	35	10	3.164	26.888	1.606	62.613
	5	5_3111_R2	35	5	2.314	59.229	1.314	70.038
	5	5_3111_R2	35	1	1.838	24.126	1.084	72.733
	6	5_3111_R3	3	10	15.978	9.887	8.25	63.692
	6	5_3111_R3	3	5	13.328	11.470	6.403	59.262
	6	5_3111_R3	3	1	10.982	14.843	4.112	46.184
	6	5_3111_R3	19	10	11.788	16.754	3.37	58.93
	6	5_3111_R3	19	5	7.706	15.626	3.422	54.777
	6	5_3111_R3	19	1	3.545	22.900	1.79	62.277
6	5_3111_R3	35	10	3.73	24.451	1.642	54.29	
6	5_3111_R3	35	5	3.054	25.511	1.323	53.432	
6	5_3111_R3	35	1	1.92	30.076	1.086	69.747	

4.5% de asfalto_ PEN 20/30_densa_Chicamocho	7	6_3112_R1	3	10	16.594	10.457	6.919	51.435
	7	6_3112_R1	3	5	11.308	12.024	2.768	50.298
	7	6_3112_R1	3	1	7.103	17.597	1.885	32.738
	7	6_3112_R1	19	10	8.901	18.497	4.025	55.79
	7	6_3112_R1	19	5	5.787	19.939	2.491	53.106
	7	6_3112_R1	19	1	1.714	28.008	0.172	62.087
	7	6_3112_R1	35	10	2.273	24.941	1.609	87.297
	7	6_3112_R1	35	5	1.799	27.479	1.095	75.066
	7	6_3112_R1	35	1	0.888	30.285	0.572	79.546
	8	6_3112_R2	3	10	14.94	9.227	6.939	57.294
	8	6_3112_R2	3	5	9.683	12.156	4.63	58.983
	8	6_3112_R2	3	1	6.409	15.799	1.891	36.408
	8	6_3112_R2	19	10	7.293	21.173	4.043	68.382
	8	6_3112_R2	19	5	5.696	19.753	1.497	54.218
	8	6_3112_R2	19	1	3.111	28.718	0.866	34.349
	8	6_3112_R2	35	10	2.102	25.979	1.404	82.403
	8	6_3112_R2	35	5	1.831	27.088	1.115	75.084
	8	6_3112_R2	35	1	0.894	32.241	0.564	77.824
	9	6_3112_R3	3	10	16.195	10.081	6.921	52.712
	9	6_3112_R3	3	5	11.043	12.143	4.612	51.518
	9	6_3112_R3	3	1	7.991	18.070	1.892	29.199
	9	6_3112_R3	19	10	8.347	18.925	2.442	60.253
	9	6_3112_R3	19	5	7.534	23.515	1.496	40.924
	9	6_3112_R3	19	1	3.381	29.568	0.868	31.664
	9	6_3112_R3	35	10	2.558	25.896	1.428	68.868
	9	6_3112_R3	35	5	1.898	27.650	1.105	71.807
	9	6_3112_R3	35	1	0.8	30.344	0.567	87.546

5% de asfalto_ PEN 20/30_abierta_Bocas	10	7_3211_R1	3	10	16.936	86.409	4.172	50.747
	10	7_3211_R1	3	5	13.909	16.247	4.602	40.816
	10	7_3211_R1	3	1	7.715	23.394	2.102	33.607
	10	7_3211_R1	19	10	5.385	21.981	3.395	77.766
	10	7_3211_R1	19	5	4.173	24.423	1.833	54.172
	10	7_3211_R1	19	1	2.093	30.350	0.721	42.464
	10	7_3211_R1	35	10	2.364	27.561	1.429	74.562
	10	7_3211_R1	35	5	1.808	27.785	1.062	72.417
	10	7_3211_R1	35	1	0.934	29.785	0.576	76.094
	11	7_3211_R2	3	10	18.414	8.564	4.147	46.382
	11	7_3211_R2	3	5	16.55	13.178	5.504	41.024
	11	7_3211_R2	3	1	10.211	19.628	2.541	30.693
	11	7_3211_R2	19	10	7.091	19.643	3.404	59.202
	11	7_3211_R2	19	5	5.651	22.685	1.834	40.031
	11	7_3211_R2	19	1	2.858	33.510	0.725	31.29
	11	7_3211_R2	35	10	3.205	29.134	1.437	55.301
	11	7_3211_R2	35	5	2.237	29.109	1.071	59.075
	11	7_3211_R2	35	1	0.989	30.844	0.589	73.498
	12	7_3211_R3	3	10	19.487	9.311	4.149	43.85
	12	7_3211_R3	3	5	13.028	12.940	4.577	43.331
	12	7_3211_R3	3	1	7.927	18.377	2.552	39.71
	12	7_3211_R3	19	10	8.522	19.213	2.034	49.164
	12	7_3211_R3	19	5	6.016	23.649	1.838	37.681
	12	7_3211_R3	19	1	3.035	29.153	0.439	29.874
	12	7_3211_R3	35	10	4.66	34.239	1.568	41.505
	12	7_3211_R3	35	5	2.313	31.380	1.066	56.848
	12	7_3211_R3	35	1	0.879	36.706	0.572	80.208

5% de asfalto_ PEN 20/30_abierta_ Chicamocho	1	8_3212_R1	3	10	18.028	11.526	4.665	53.267
	1	8_3212_R1	3	5	12.5	13.581	6.425	63.399
	1	8_3212_R1	3	1	8.752	18.211	3.898	54.935
	1	8_3212_R1	19	10	9.698	20.879	4.494	57.16
	1	8_3212_R1	19	5	6.431	19.273	3.157	60.545
	1	8_3212_R1	19	1	3.414	28.365	1.848	66.766
	1	8_3212_R1	35	10	2.903	27.819	1.797	76.378
	1	8_3212_R1	35	5	2.091	27.677	1.146	67.577
	1	8_3212_R1	35	1	0.744	32.338	0.263	72.403
	2	8_3212_R2	3	10	21.258	8.976	4.286	41.517
	2	8_3212_R2	3	5	10.394	11.827	2.775	54.933
	2	8_3212_R2	3	1	8.41	16.506	1.538	37.567
	2	8_3212_R2	19	10	8.372	19.633	4.494	66.218
	2	8_3212_R2	19	5	6.023	20.649	3.154	64.596
	2	8_3212_R2	19	1	3.701	27.432	1.633	54.441
	2	8_3212_R2	35	10	2.841	28.185	1.593	69.173
	2	8_3212_R2	35	5	1.398	29.462	0.818	72.184
	2	8_3212_R2	35	1	0.652	34.303	0.424	80.286
	3	8_3212_R3	3	10	11.548	11.410	3.731	66.552
	3	8_3212_R3	3	5	8.67	14.061	3.939	56.039
	3	8_3212_R3	3	1	7.652	19.385	2.344	37.778
	3	8_3212_R3	19	10	6.528	22.221	3.125	59.052
	3	8_3212_R3	19	5	3.635	23.383	1.797	60.966
	3	8_3212_R3	19	1	1.375	31.523	0.5	44.906
	3	8_3212_R3	35	10	2.655	27.226	1.403	65.201
	3	8_3212_R3	35	5	1.572	30.469	0.658	51.648
	3	8_3212_R3	35	1	0.747	30.700	0.425	70.136

MEZCLA ABIERTA EN CALIENTE (M1)

	Cod/grupo		Amplitud					
	Nº probeta	Código	T (°C)	F (Hz)	Módulo (Gpa)	ϕ (°)	carga (kN)	Microstrain
5% de asfalto _ PEN 60/70 _ abierta _ Chicamocho	16	1_1121_R1	3	10	11.2	9.671	4.099	75.358
	16	1_1121_R1	3	5	6.707	13.719	3.674	67.567
	16	1_1121_R1	3	1	3.895	17.972	2.068	65.498
	16	1_1121_R1	19	10	6.218	20.640	3.499	69.418
	16	1_1121_R1	19	5	3.811	24.602	1.784	57.745
	16	1_1121_R1	19	1	1.538	30.684	0.728	58.409
	16	1_1121_R1	35	10	1.697	23.790	0.549	66.643
	16	1_1121_R1	35	5	1.036	25.543	0.117	70.16
	16	1_1121_R1	35	1	0.447	32.214	0.276	76.222
	17	1_1121_R2	3	10	8.325	13.401	5.558	82.354
	17	1_1121_R2	3	5	6.662	14.648	3.654	67.651
	17	1_1121_R2	3	1	5.679	20.304	1.244	44.954
	17	1_1121_R2	19	10	4.383	20.540	3.53	99.361
	17	1_1121_R2	19	5	2.74	23.549	1.783	80.252
	17	1_1121_R2	19	1	1.807	27.730	0.721	49.208
	17	1_1121_R2	35	10	1.427	23.751	0.918	79.348
	17	1_1121_R2	35	5	0.889	23.148	0.602	83.535
	17	1_1121_R2	35	1	0.521	27.031	0.165	65.3
	18	1_1121_R3	3	10	18.607	11.906	5.53	36.658
	18	1_1121_R3	3	5	13.242	13.507	2.187	33.944
	18	1_1121_R3	3	1	6.767	18.989	2.091	38.112
	18	1_1121_R3	19	10	5.898	21.342	3.584	74.953
	18	1_1121_R3	19	5	3.56	21.451	1.804	62.504
	18	1_1121_R3	19	1	2.163	27.774	0.734	41.887
18	1_1121_R3	35	10	2.27	25.177	0.977	53.105	
18	1_1121_R3	35	5	1.339	25.033	0.371	57.002	
18	1_1121_R3	35	1	0.612	28.589	0.287	57.803	

4.5% de asf _ PEN 60/70 _ densa _ Bocas	19	2_1122_R1	3	10	4.243	14.507	1.906	92.441
	19	2_1122_R1	3	5	3.071	18.876	1.738	69.795
	19	2_1122_R1	3	1	1.582	22.455	0.873	68.085
	19	2_1122_R1	19	10	2.755	20.249	2.15	96.268
	19	2_1122_R1	19	5	1.543	23.758	0.086	68.72
	19	2_1122_R1	19	1	0.747	28.092	0.397	65.534
	19	2_1122_R1	35	10	1.422	24.283	0.415	59.899
	19	2_1122_R1	35	5	0.956	25.473	0.437	56.352
	19	2_1122_R1	35	1	0.437	28.595	0.165	79.294
	20	2_1122_R2	3	10	13.689	15.731	3.14	28.299
	20	2_1122_R2	3	5	6.572	19.413	1.643	30.84
	20	2_1122_R2	3	1	3.496	23.038	1.192	42.048
	20	2_1122_R2	19	10	3.436	20.334	2.124	76.221
	20	2_1122_R2	19	5	2.477	24.329	0.88	43.845
	20	2_1122_R2	19	1	0.985	31.147	0.391	49.003
	20	2_1122_R2	35	10	2.476	27.412	0.749	37.295
	20	2_1122_R2	35	5	1.323	31.309	0.448	41.763
	20	2_1122_R2	35	1	0.57	33.979	0.278	60.291
	21	2_1122_R3	3	10	7.398	16.654	3.452	57.552
	21	2_1122_R3	3	5	5.214	19.030	1.924	45.508
	21	2_1122_R3	3	1	2.984	21.276	1.203	49.741
	21	2_1122_R3	19	10	3.622	23.155	2.112	71.93
	21	2_1122_R3	19	5	2.07	26.085	0.882	52.557
	21	2_1122_R3	19	1	0.796	31.098	0.393	61.013
	21	2_1122_R3	35	10	1.635	26.121	0.743	56.024
	21	2_1122_R3	35	5	0.842	24.856	0.45	65.909
	21	2_1122_R3	35	1	0.605	28.630	0.178	60.568

5% de asfalto_ PEN 60/70abierto_Bocas	13	3_1221_R1	3	10	8.4	15.060	3.633	53.355
	13	3_1221_R1	3	5	4.24	15.407	2.278	66.266
	13	3_1221_R1	3	1	2.945	19.240	1.427	59.778
	13	3_1221_R1	19	10	3.087	21.141	1.156	76.938
	13	3_1221_R1	19	5	1.983	21.518	1.243	77.322
	13	3_1221_R1	19	1	1.065	26.164	0.718	83.086
	13	3_1221_R1	35	10	1.398	21.550	0.716	63.152
	13	3_1221_R1	35	5	0.827	24.385	0.244	60.71
	13	3_1221_R1	35	1	0.48	31.252	0.108	45.232
	14	3_1221_R2	3	10	7.041	15.813	3.601	63.089
	14	3_1221_R2	3	5	5.602	17.596	2.266	49.901
	14	3_1221_R2	3	1	2.926	22.696	1.189	50.118
	14	3_1221_R2	19	10	4.569	26.771	1.751	42.279
	14	3_1221_R2	19	5	3.138	26.816	1.436	56.447
	14	3_1221_R2	19	1	2.82	40.256	0.721	31.536
	14	3_1221_R2	35	10	1.161	23.313	0.695	73.903
	14	3_1221_R2	35	5	0.763	26.579	0.394	63.77
	14	3_1221_R2	35	1	0.6	38.876	0.101	34.618
	15	3_1221_R3	3	10	8.985	14.821	3.635	49.905
	15	3_1221_R3	3	5	4.413	15.216	2.283	63.825
	15	3_1221_R3	3	1	2.667	22.199	1.201	55.576
	15	3_1221_R3	19	10	3.416	20.646	1.932	69.763
	15	3_1221_R3	19	5	2.612	22.721	1.238	58.458
	15	3_1221_R3	19	1	1.216	25.137	0.726	73.663
	15	3_1221_R3	35	10	0.972	22.022	0.734	93.154
	15	3_1221_R3	35	5	0.75	22.567	0.409	67.328
	15	3_1221_R3	35	1	0.378	29.375	0.173	56.471

4.5% de asfalto_ PEN 60/70_densa_Chicamocho	22	4_1222_R1	3	10	14.261	13.718	6.74	58.296
	22	4_1222_R1	3	5	10.36	14.021	5.037	59.972
	22	4_1222_R1	3	1	7.11	19.704	3.215	55.794
	22	4_1222_R1	19	10	7.226	20.533	3.085	52.662
	22	4_1222_R1	19	5	3.903	25.117	1.77	55.939
	22	4_1222_R1	19	1	1.812	33.240	0.728	49.551
	22	4_1222_R1	35	10	4.768	37.750	1.157	29.92
	22	4_1222_R1	35	5	2.22	35.678	0.791	43.967
	22	4_1222_R1	35	1	0.917	37.029	0.374	50.324
	23	4_1222_R2	3	10	8.343	11.080	6.762	99.965
	23	4_1222_R2	3	5	6.516	12.319	3.018	95.312
	23	4_1222_R2	3	1	5.042	16.636	3.215	78.661
	23	4_1222_R2	19	10	5.057	20.542	3.094	75.484
	23	4_1222_R2	19	5	3.471	23.189	1.79	63.589
	23	4_1222_R2	19	1	1.157	32.208	0.499	53.208
	23	4_1222_R2	35	10	1.512	23.790	1.173	95.699
	23	4_1222_R2	35	5	1.309	27.899	0.698	65.748
	23	4_1222_R2	35	1	0.61	29.966	0.382	77.253

Anexo 4. Altura de las abrazaderas

ALTURA ABRAZADERA	
Nº	Altura (mm)
1	72.395
2	70.560
3	70.905
4	68.755
5	70.450
6	71.280
7	67.300
8	68.530
9	68.840
10	71.315
11	70.750
12	71.960
Prueba	70.000

Anexo 5. Altura Promedio De Las Probetas

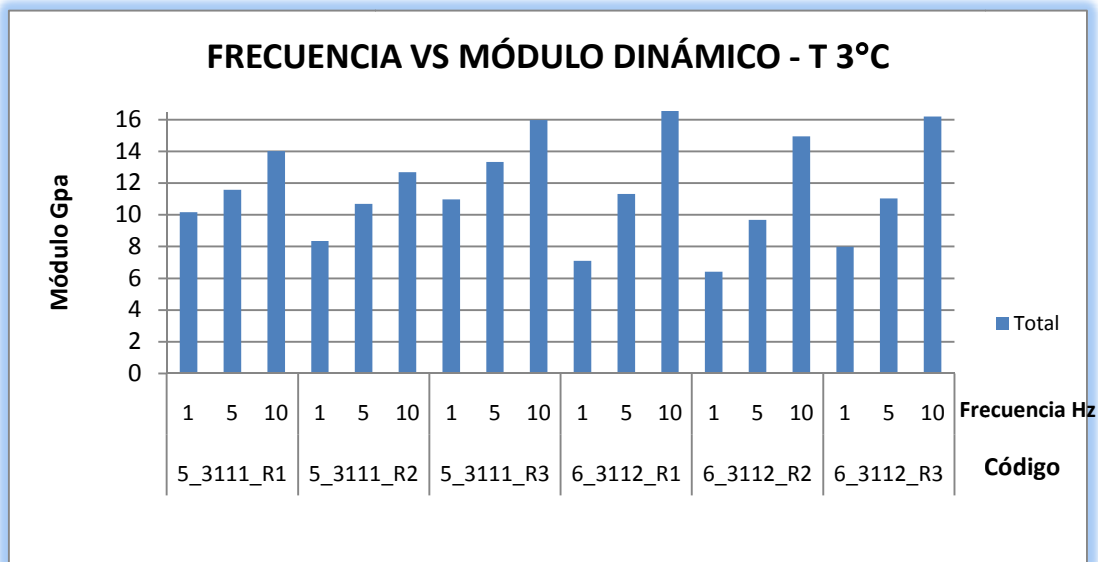
PROBETA	ALTURA PROM (mm)			
1_R1	135.7	135.3	135.8	135.60
1_R2	134	133.8	134	133.93
1_R3	133.8	134.2	134.1	134.03
2_R1	134.8	134.2	134.7	134.57
2_R2	133.5	133.9	133.6	133.67
2_R3	135.3	135.5	136	135.60
3_R1	138.6	138.1	138.6	138.43
3_R2	136.9	136.9	137	136.93
3_R3	135.4	134.6	134.5	134.83
4_R1	135.9	135.4	135.3	135.53
4_R2	136.5	136.8	136.8	136.70
5_R1	130.1	130.3	130.1	130.17
5_R2	131.6	131.5	131.8	131.63
5_R3	131.6	131.2	131.9	131.57
6_R1	130.3	130.1	129.8	130.07
6_R2	131.7	130.7	131.1	131.17
6_R3	130.2	130.9	130.7	130.60
7_R1	127.6	127.3	127	127.30
7_R2	128.7	128.3	128	128.33
7_R3	128.5	128.9	128.2	128.53
8_R1	130.4	130.5	130.5	130.47
8_R2	130.5	130.4	130.3	130.40
8_R3	131.3	131.6	131.4	131.43

Anexo 6. Módulo Dinámico por réplica.

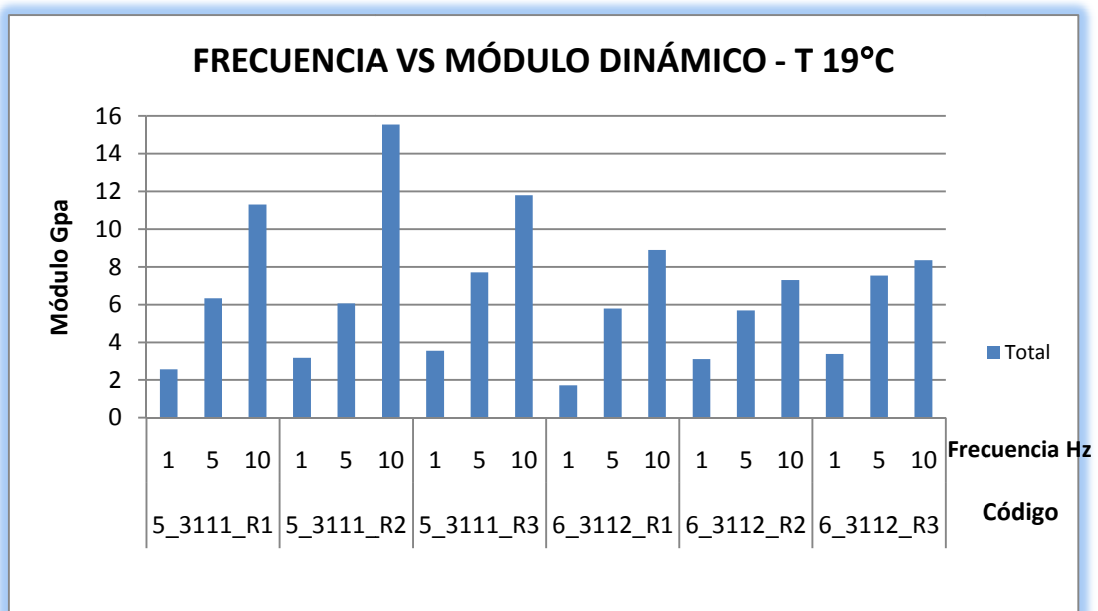
1. MEZCLAS DENSAS EN CALIENTE (MDC-2)

FRECUENCIA Vs MODULO DINAMICO REPLICAS 5_3111 Y 6_3112

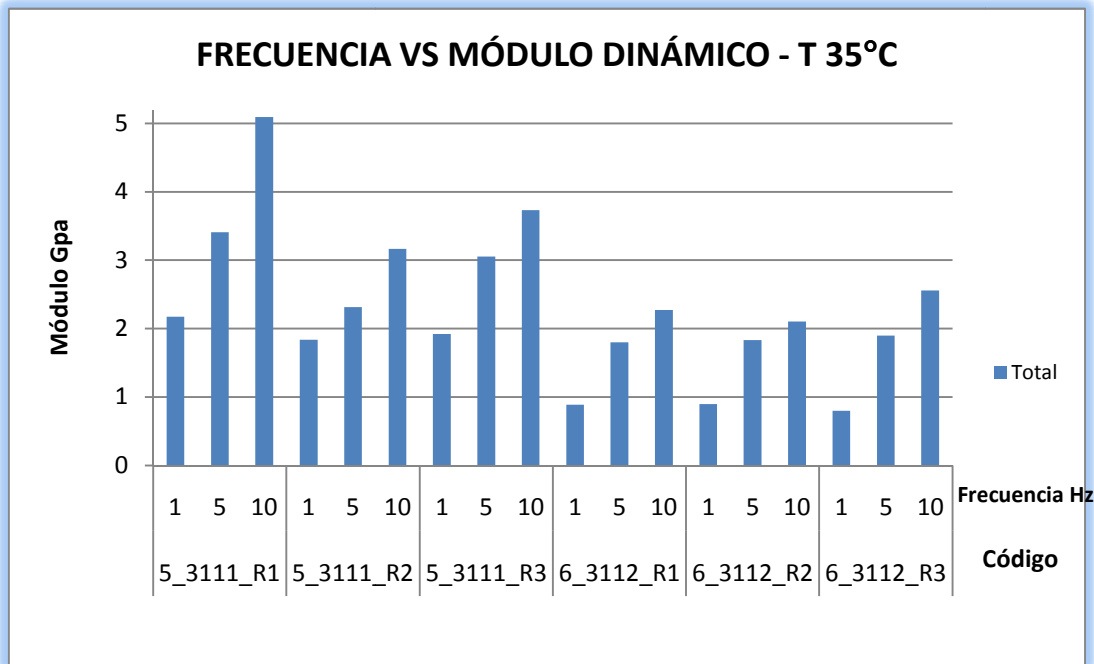
- 3°C



- 19°C

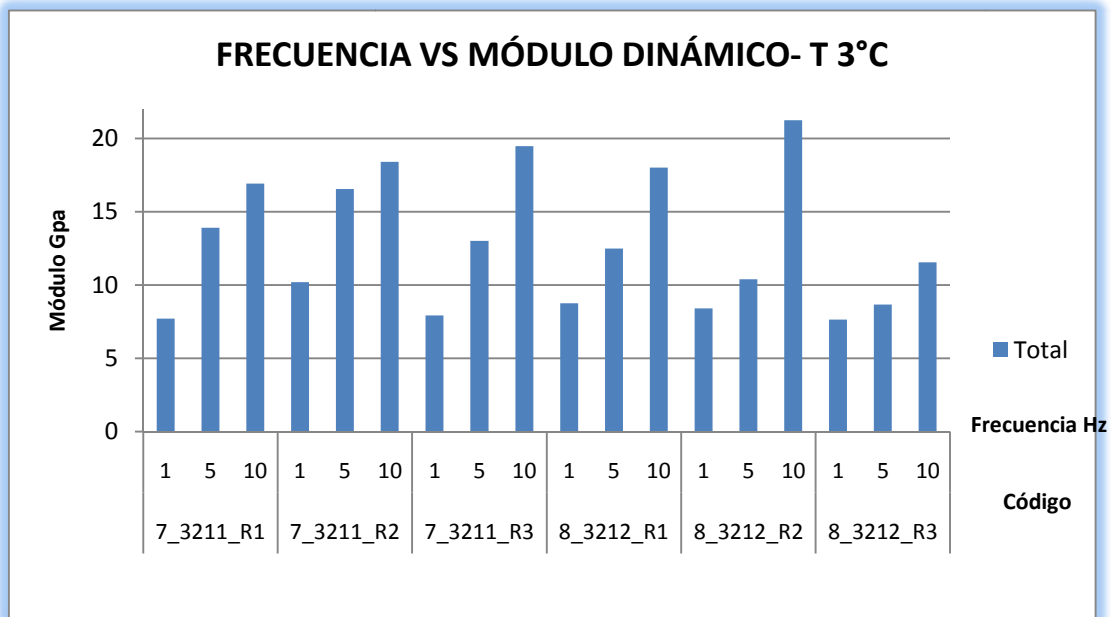


- 35°C

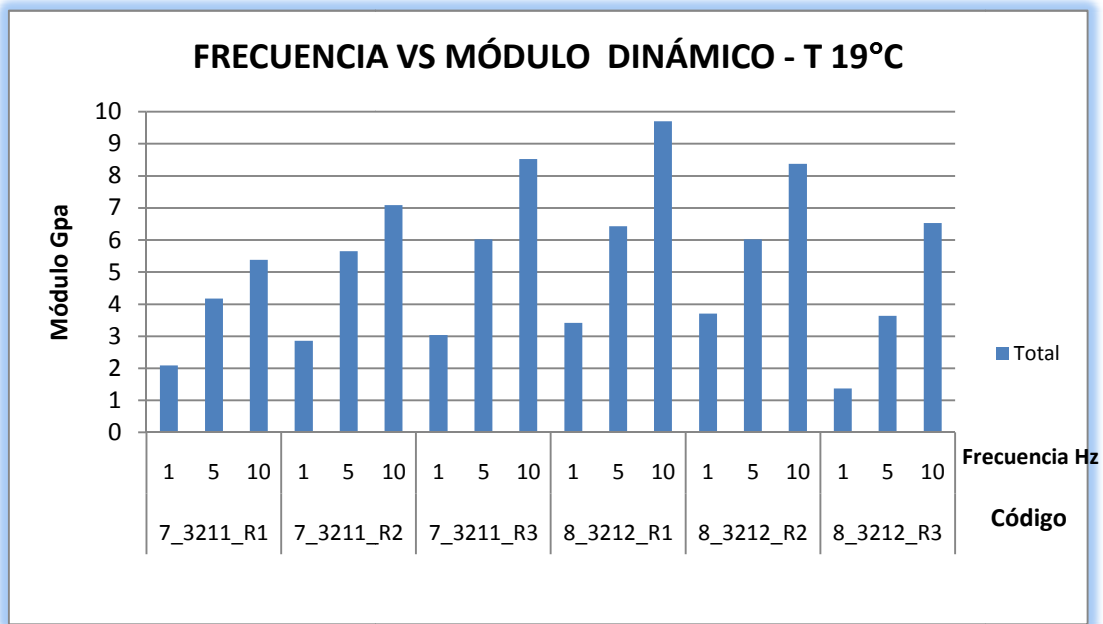


FRECUENCIA Vs MODULO DINAMICO REPLICAS 7_3211 y 8_3212

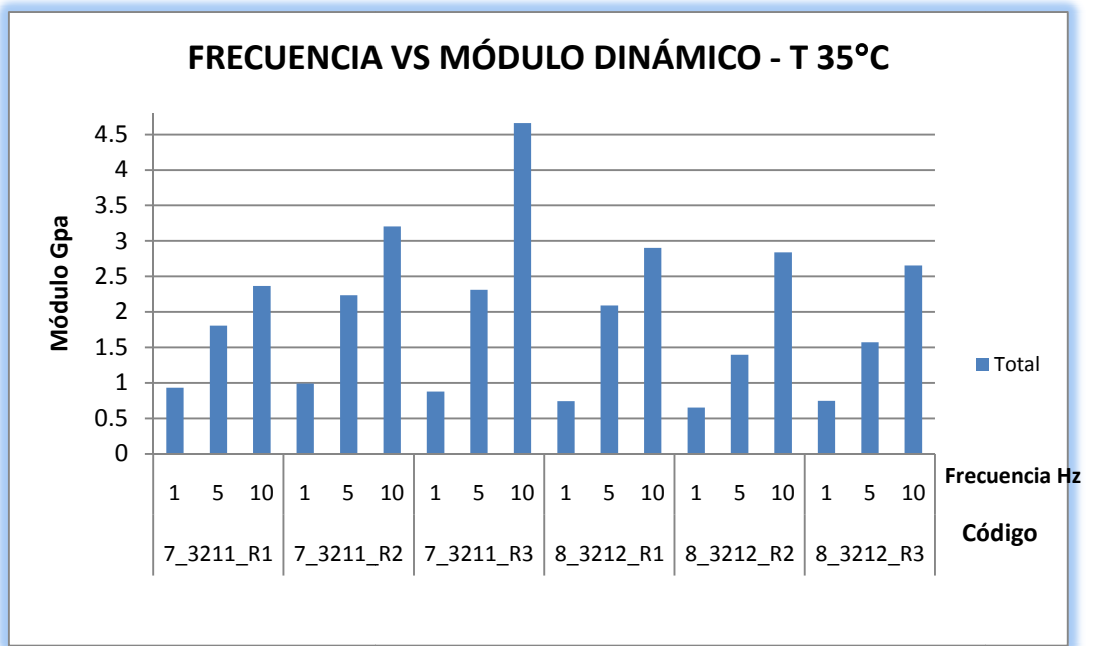
- 3°C



- 19°C



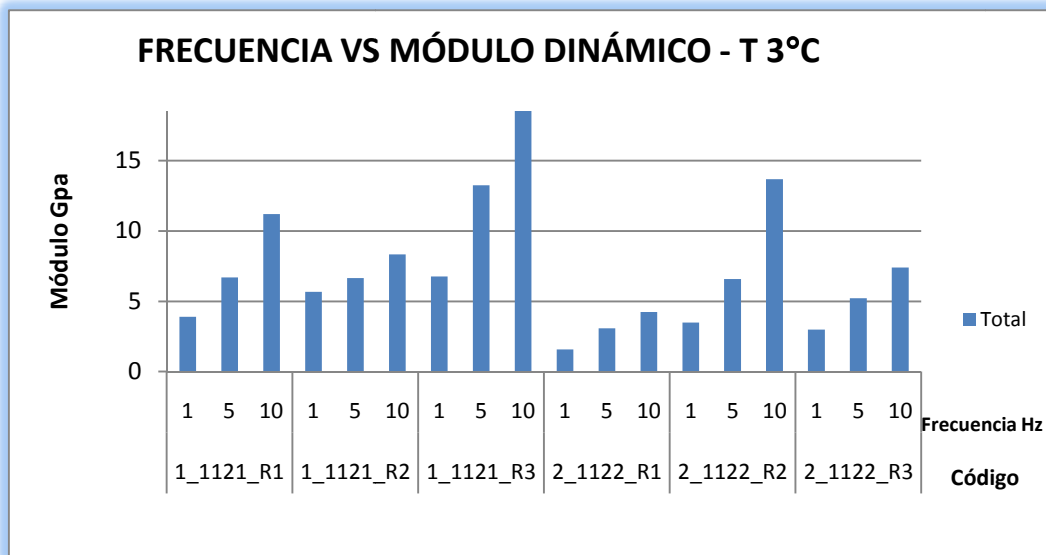
- 35°C



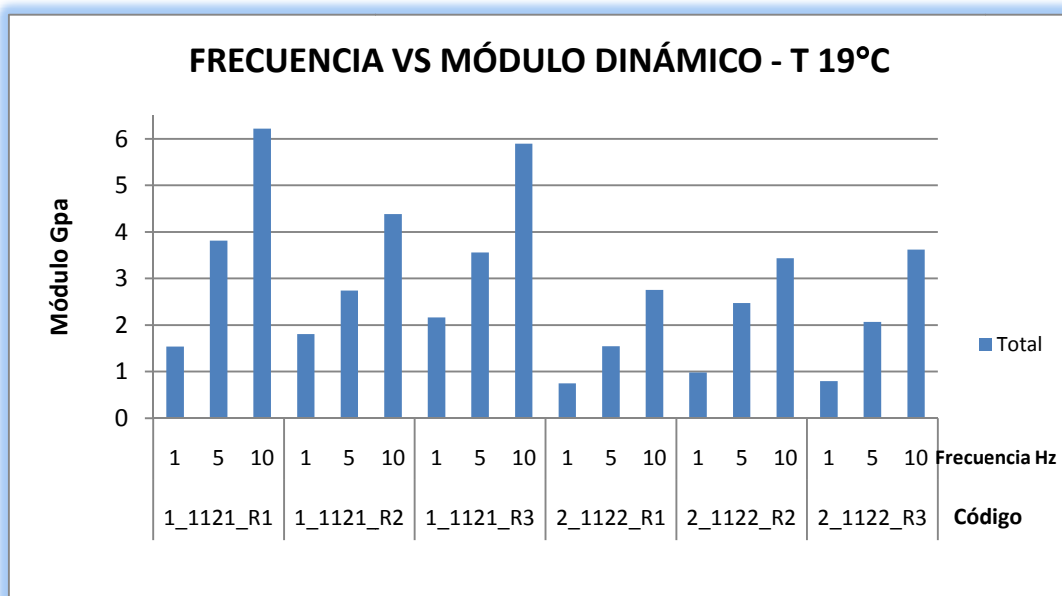
2. MEZCLAS ABIERTAS (M-1)

FRECUENCIA Vs MODULO DINAMICO REPLICAS 1_1121 y 2_1122

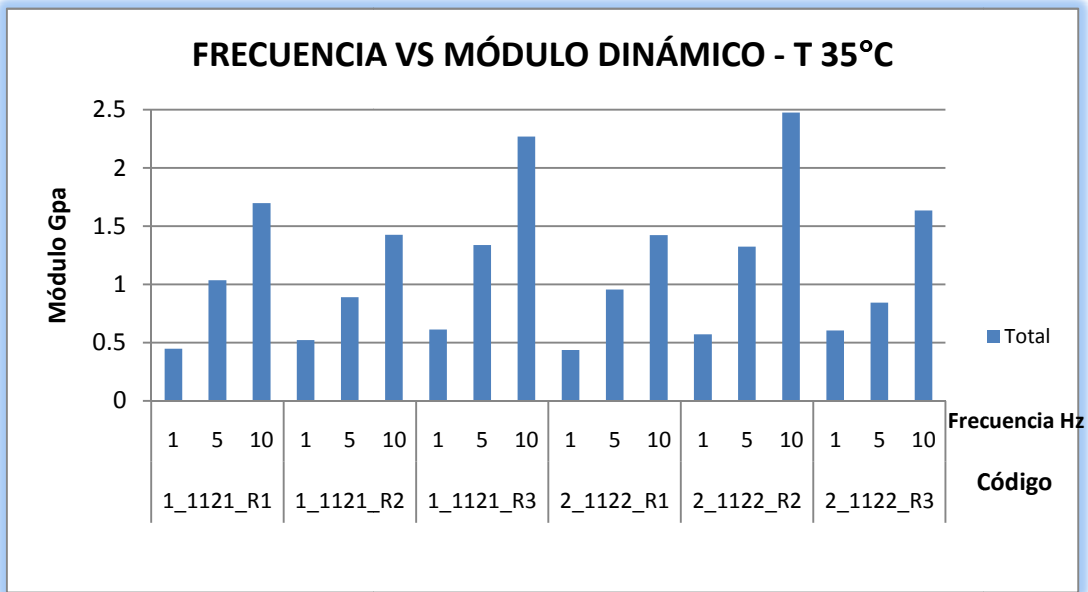
- 3°C



- 19°C

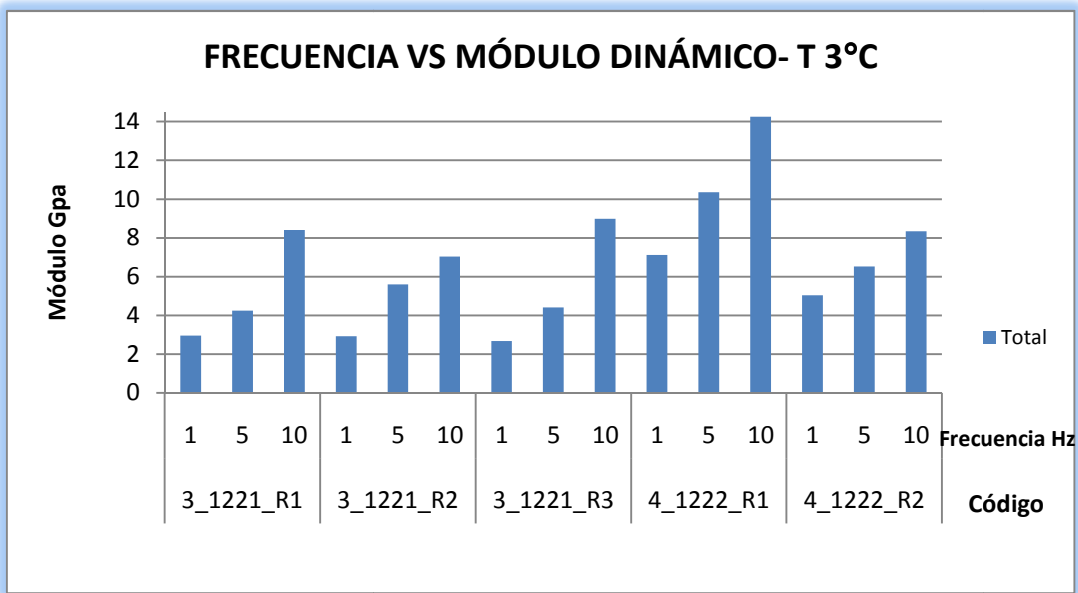


- 35°C

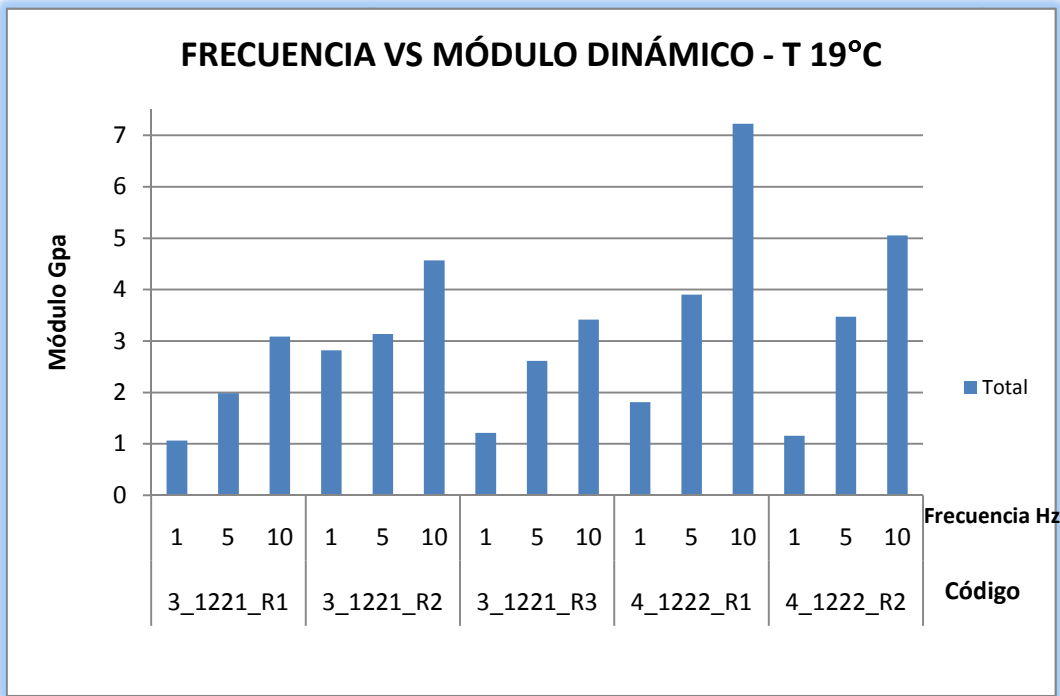


FRECUENCIA Vs MODULO DINAMICO REPLICAS 3_1221 y 4_1222

- 3°C



- 19°C



- 35°C

