



**UNIVERSIDAD CATÓLICA**  
**de Colombia**  
Vigilada Mineducación

**APROXIMACION AL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE MEZCLAS  
ASFÁLTICAS MDC CON RCA A TRAVES DEL MODELO DE WITZACK**

**ALIRIO ALEXANDER FELIX RODRIGUEZ**  
**CODIGO 150927**

**ERICK ALFONSO TORRES**  
**CODIGO 150925**

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**PROGRAMA DE ESPECIALIZACIÓN EN INGENIERÍA DE**  
**PAVIMENTOS**  
**BOGOTÁ D.C. / MAYO 2021**

**APROXIMACION AL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE MEZCLAS  
ASFÁLTICAS MDC CON RCA A TRAVES DEL MODELO DE WITZACK**

**ALIRIO ALEXANDER FELIX RODRIGUEZ**

**ERICK ALFONSO TORRES**

Trabajo de grado presentado para optar al título de  
Especialista en Ingeniería de Pavimentos

**Asesor**

**PhD. EDUARDO J. RUEDA C.**

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE ESPECIALIZACIÓN EN INGENIERÍA DE  
PAVIMENTOS  
BOGOTÁ D.C. / MAYO 2021**



## Atribución-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-SA 4.0)

This is a human-readable summary of (and not a substitute for) the license. Advertencia.

### Usted es libre de:

**Compartir** — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato.

**Adaptar** — remezclar, transformar y construir a partir del material para cualquier propósito, incluso comercialmente.

La licenciante no puede revocar estas libertades en tanto usted siga los términos de la licencia.



### Bajo los siguientes términos:



**Atribución** — Usted debe dar crédito de manera adecuada, brindar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciante.



**CompartirIgual** — Si remezcla, transforma o crea a partir del material, debe distribuir su contribución bajo la misma licencia del original.

**No hay restricciones adicionales** — No puede aplicar términos legales ni medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier uso permitido por la licencia.

Nota de aceptación

---

---

---

---

---

Director de Investigación

---

Asesor Metodológico

---

Jurado

Bogotá D.C., Mayo de 2021

## **AGRADECIMIENTOS**

Sea esta la oportunidad de agradecer a la vida por las oportunidades brindadas, a nuestro país que tantas lecciones nos da diariamente en especial por estos días tan difíciles y a nuestras familias por siempre estar presentes para ayudarnos e impulsarnos a seguir adelante.

## TABLA DE CONTENIDO

1.	Introducción	9
2.	Generalidades	10
2.1.	Línea de Investigación	10
2.2.	Planteamiento del Problema	10
2.2.1.	Pregunta de investigación	11
2.3.	Justificación	11
3.	Objetivos	12
	<i>Objetivo general</i>	12
	<i>Objetivos específicos</i>	12
4.	Marco de referencia	13
4.1.	Marco teórico (Estado del Arte)	13
	<i>Recycled Concrete Aggregate, RCA</i>	13
4.2.	Marco Conceptual	14
	<i>Mezclas Asfálticas en Caliente</i>	15
	<i>Clasificación de las Mezclas Asfálticas en Caliente</i>	15
	<i>Módulo Dinámico</i>	16
	<i>Ecuación de Witczak</i>	17
4.3.	Estado del Arte	18
5.	Metodología	25

5.1.	Fase 1: Recopilación de Información.	25
5.2.	Fase 2: Ajuste de los datos al modelo de witzack	28
6.	Resultados	36
6.1.	Fase 3: análisis comparativo entre los resultados	39
6.2.	Alcances y limitaciones	41
7.	Conclusiones	43

## LISTA DE TABLAS

TABLA 1:	RESUMEN DE INVESTIGACIONES REALIZADAS CON RCA EN MEZCLAS ASFÁLTICAS. ....	24
TABLA 2:	INFORMACIÓN GRANULOMÉTRICA MEZCLAS ASFÁLTICAS A ANALIZAR (MILLS-BEALE, 2010).....	26
TABLA 3:	COMPOSICIÓN RCA MEZCLAS ASFÁLTICAS (MILLS-BEALE, 2010).....	26
TABLA 4:	INFORMACIÓN GRANULOMÉTRICA MEZCLAS ASFÁLTICAS A ANALIZAR.....	29
TABLA 5:	CALCULO DE VISCOSIDAD.....	32
TABLA 6:	INFORMACIÓN GRANULOMÉTRICA MEZCLAS ASFÁLTICAS A ANALIZAR.....	33
TABLA 7:	COMPOSICIÓN RCA MEZCLAS ASFÁLTICAS.....	34
TABLA 8:	INFORMACIÓN VOLUMÉTRICA DE LAS MEZCLAS - (MILLS-BEALE, 2010).....	35
TABLA 9:	CALCULO DE MODULO DINÁMICO E* A PARTIR DE LA ECUACIÓN DE WITZACK.....	37

## LISTA DE GRAFICAS

GRAFICA 1: ESTRUCTURA DE PAVIMENTO FLEXIBLE	14
GRAFICA 2: ESTRUCTURA DE PAVIMENTO FLEXIBLE	15
GRAFICA 3: APLICACIÓN DE CARGA EN LA DETERMINACIÓN DEL MÓDULO DINÁMICO DE LA MEZCLA ASFÁLTICA	16
GRAFICA 4: RCA USADO EN LA INVESTIGACIÓN: (A) MORTERO ANEXO Y (B) IMPUREZAS DE YESO	19
GRAFICA 5: RESULTADOS DE MODULO RESILIENTE	20
GRAFICA 6: CANTIDAD OPTIMA DE ASFALTO EN MEZCLAS ACORDE AL PORCENTAJE DE RCA	21
GRAFICA 7: CLASIFICACIÓN DE MEZCLAS CON DIFERENTES PORCENTAJES DE RCA (AGREGADO GRUESO Y FINO)	22
GRAFICA 8: RESULTADOS EXPERIMENTALES DE MODULO DINÁMICO - (MILLS-BEALE, 2010)	27
GRAFICA 9: INFORMACIÓN VOLUMÉTRICA DE LAS MEZCLAS - (MILLS-BEALE, 2010)	28
GRAFICA 10: INFORMACIÓN VOLUMÉTRICA DE LAS MEZCLAS - (HIGUERA ET ALL, 2011)	29
GRAFICA 10: CURVAS ISOCRONAS PAVIMENTO 60-70	31
GRAFICA 12: CURVAS MAESTRA ASFALTO 60-70	32
GRAFICA 13: GRAFICA VISCOSIDAD VS FRECUENCIA - TEMP (13,2 – 21,3 Y 39,2 °C)	33
GRAFICA 14: INFORMACIÓN VOLUMÉTRICA DE LAS MEZCLAS - (MILLS-BEALE, 2010)	35
GRAFICA 15: CURVA MAESTRA MDC - 0% RCA	38
GRAFICA 16: CURVA MAESTRA MDC - 25% RCA	38
GRAFICA 17: CURVA MAESTRA MDC - 35% RCA	38
GRAFICA 18: CURVA MAESTRA MDC - 50% RCA	38
GRAFICA 19: CURVA MAESTRA MDC - 75% RCA	39
GRAFICA 20: CURVAS MAESTRAS E* PARA TODAS LAS MEZCLAS RCA - OBTENIDAS A PARTIR DE LA FÓRMULA DE WITZACK	40
GRAFICA 20: CURVAS MAESTRAS E* PARA TODAS LAS MEZCLAS RCA – (MILLS-BEALE, 2010)	40



## 1. INTRODUCCIÓN

La Ingeniería de pavimentos cobra relevancia en un país como Colombia, debido a la correlación existente entre la competitividad de un mercado como el nuestro y la capacidad de conexión de un territorio, toda vez que dicha capacidad está asociada a las facilidades con las que se disponen para la movilización de carga.

Por esta razón, el desarrollo de la Ingeniería de Pavimentos en nuestro país se convierte en una herramienta vital para garantizar la construcción, operación y mantenimiento de carreteras, cumpliendo con estándares técnicos, de seguridad, de costos y medioambientales que aumenten la competitividad en un mercado globalizado.

Ahora bien, teniendo en cuenta los fuertes impactos que tienen sobre el medio ambiente tanto los procesos constructivos como la explotación de los materiales utilizados para la fabricación de mezclas asfálticas, resulta relevante llevar a cabo trabajos de investigación para desarrollar propuestas que mitiguen los impactos al ambiente; en los últimos años se ha evidenciado un importante auge en el desarrollo de materiales alternativos amigables con el medio ambiente y que cumplan con las especificaciones técnicas.

Por lo anterior; con el desarrollo de este trabajo, se pretende realizar un análisis sobre el comportamiento de las mezclas densas en caliente utilizando RCA “Recycle Concrete Aggregate” como sustituto del agregado grueso y, de manera paralela, realizar un análisis comparativo entre el módulo de la mezcla asfáltica empleando agregados de tipo convencional. De esta manera, se espera determinar la diferencia que existe entre mezclas convencionales y mezclas que emplean este tipo de materiales reciclados, obteniendo como resultado un modelo matemático que permita predecir el módulo de este tipo de mezclas en función de su volumetría.

## 2. GENERALIDADES

Esta investigación se llevará a cabo siguiendo los parámetros señalados en el Acuerdo N° 242 del 23 de septiembre del año 2016 aprobado por el Consejo Superior de la Universidad Católica de Colombia, de tal manera que esta sea una muestra de la investigación que se desarrolla en esta Universidad.

### 2.1. LÍNEA DE INVESTIGACIÓN

La línea institucional que engloba de mejor manera el objetivo de esta investigación se denomina **Materiales**. Claramente, el análisis actual de este trabajo de grado se encuentra enmarcado en este campo de investigación, debido a que se pretende estudiar el comportamiento mecánico de un material como es el caso del RCA “Recycle Concrete Aggregate” y su influencia en las mezclas densas en caliente o MDC.

### 2.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Uno de los materiales más comúnmente empleados para la construcción de carreteras en nuestro país es Mezcla Densa en Caliente, debido principalmente a la facilidad de la consecución de los materiales necesarios para su producción. Por otra parte, el acelerado desarrollo automotriz y el intercambio de bienes y servicios han conducido a construir vías que soportan mayor número de ejes equivalentes y cargas con el empleo de materiales modificados y estricto control de obra. (Camacho et al, 2006). Por tal razón, para su fabricación convencional es necesario recurrir a fuentes de materiales que cumplan con una serie de especificaciones, esta explotación de los materiales requeridos genera a su vez efectos adversos al medio ambiente debido a la huella de carbono que resulta de su extracción, tratamiento y transporte.

De otra parte, el concreto es el material más utilizado en la mayoría de estructuras debido a su considerable duración y conservación a través del tiempo. Sin embargo, las necesidades cambian y se generan una cantidad elevada de desechos, de hecho, se han registrado de más de 900 millones de toneladas por año tan solo en Europa, los estados Unidos y Japón (Oikonomou, 2005), lo cual genera afectaciones al medio ambiente debido al fuerte aporte a la emisión de gases de efecto invernadero y al significativo consumo de agua en su producción, el cual representa el 1,7% de todas las extracciones de agua en el mundo (Valdes, 2017); por esta razón, el concreto puede ser recuperado y posteriormente ser triturado y reutilizado como agregado en nuevos materiales y por lo general es más económico de producir que el agregado virgen.

Teniendo en cuenta los argumentos planteados, se hace necesario abordar desde la ingeniería de pavimentos, investigaciones encaminadas por un lado, a prolongar la vida útil de materiales como

el RCA, y por otro lado a reutilizar este tipo de materiales como componentes en otro tipo de materiales, que para el caso de este estudio serán las Mezclas Densas en Caliente o MDC, que por su amplia utilización en nuestro medio generarían un impacto ambiental positivo.

Para lograr incorporar la utilización de RCA como agregado para la fabricación de MDC es necesario comprender las características físicas y su comportamiento mecánico, pero teniendo en cuenta las dificultades que se han presentado para ingresar a los laboratorios para realizar trabajo experimental debido a momento por el cual el mundo entero está cruzando, para el desarrollo de esta investigación se llevara a cabo una búsqueda de información sobre propiedades volumétricas y de resistencia de mezclas asfálticas que hubiesen empleado este tipo de materiales para su fabricación y a partir de estos datos, buscar un modelo que nos permita encontrar aproximación a la resistencia del material en función de sus propiedades volumétricas.

### **2.2.1. Pregunta de investigación**

¿Qué efectos, en términos del comportamiento mecánico, genera el uso del RCA en reemplazo de agregados gruesos en mezclas asfálticas densas en caliente, a través del análisis comparativo del módulo dinámico?

### **2.3.JUSTIFICACIÓN**

Tal y como se ha explicado a lo largo de los capítulos introductorios del presente documento, la justificación del presente trabajo tiene un fuerte componente ambiental, debido a la necesidad imperiosa de estudiar, analizar y validar alternativas de reemplazo de materiales que mitiguen los impactos que tienen en el medio ambiente la explotación de materiales necesarios para la construcción de carreteras, enfocados en los materiales más comúnmente utilizados en nuestro medio como lo son las mezclas densas en caliente y el concreto proveniente del reciclaje o RCA para ser incorporado como agregado en las nuevas mezclas.

### 3. OBJETIVOS

#### *Objetivo general*

Estudiar el comportamiento mecánico de una mezcla densa en caliente en función del porcentaje del agregado grueso reemplazado con RCA, a partir de datos encontrados en la bibliografía sobre el ensayo de módulo dinámico y propiedades volumétricas en mezclas que empleen este tipo de material.

#### *Objetivos específicos*

- Buscar información sobre el comportamiento mecánico y de la composición volumétrica de mezclas asfálticas con incorporación del agregado RCA.
- Proponer un modelo matemático basado en las propiedades volumétricas de las mezclas con RCA que permita estimar el valor del módulo dinámico.
- Realizar un análisis comparativo entre las propiedades mecánicas de las mezclas modificadas con RCA y una mezcla asfáltica convencional.

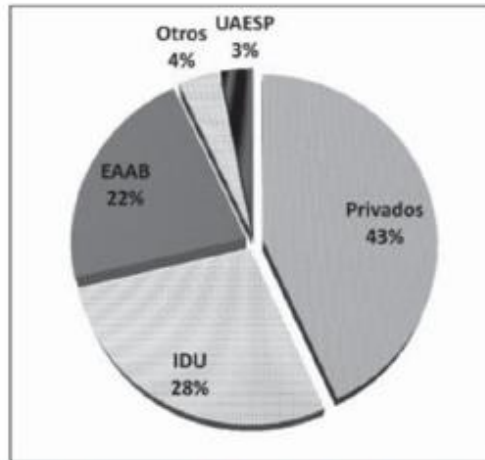
## 4. MARCO DE REFERENCIA

### 4.1. MARCO TEÓRICO (ESTADO DEL ARTE)

#### *Recycled Concrete Aggregate, RCA*

El “Recycle concrete aggregate” o RCA, se refiere al material reciclado de estructuras de concreto demolidas. El RCA se obtiene principalmente del proceso de trituración de los agregados de estructuras demolidas que se pueden clasificar como pavimentos rígidos y estructuras de concreto como (puentes, edificaciones, obras de urbanismo, obras hidráulicas etc. Los agregados naturales son sustancialmente valiosos para el desarrollo urbano de la humanidad, sin embargo no son renovables y deben ser utilizados teniendo en cuenta los principios de desarrollo sostenible (Blengini y Garbarino, 2010). Esta afirmación es un problema en la actualidad debido al incremento de procesos constructivos presentes en todo el mundo. Es aquí donde el RCA aparece como una buena solución a estos problemas. El RCA puede eventualmente reducir los costos de los agregados, reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> producidas en el transporte de los agregados y mejorar las condiciones ambientales. Además, en el caso de otros países se convierte en una solución para reusar estos materiales que de otra forma serían considerados desechos. Por ejemplo, esta técnica podría proveer una solución a los 200 millones de toneladas por año de desperdicio de construcción (Bifmet al, 1998).

A pesar de que el RCA ofrece muy buenas alternativas de reciclaje, es necesario estudiar las restricciones que pueden encontrarse al utilizar agregados reciclados. Es ampliamente aceptado que el uso de RCA cambia las propiedades conocidas del concreto. Las propiedades mecánicas como la resistencia a la tensión y compresión en concreto hecho con materiales reciclables, pierden hasta en un 40% su resistencia en comparación al concreto con agregados sin reciclar. Además, debido a que los agregados en el concreto corresponden al 80% del volumen total del concreto, deben ser seleccionados con precaución (Iqbal y Quiasrawi, 2012). Por este motivo, se están desarrollando nuevos estudios como agregar mezclas de Polivinilo de Alcohol, PVA (Kou y Poon, 2009), para disminuir un cambio drástico en las propiedades originales de los agregados; en este caso específico, reducir la absorción de agua por medio de bloqueo de poros (Kou y Poon, 2009). Este tipo de residuos agudizan la contaminación ambiental a medida que el sector de la construcción crece, dado a las malas prácticas por parte de las entidades generadoras de estos residuos terminan agudizando un problema ambiental que va creciendo a medida que el sector de la construcción también lo hace. Un estudio realizado en Bogotá (Castaño et al., 2013) determinó que el IDU y las entidades privadas son los mayores productores de este tipo de residuos en esta ciudad, a continuación, se puede observar la gráfica completa con la información de esta investigación:



*Grafica 1: Estructura de Pavimento Flexible.*

*Fuente: Gestión de residuos de construcción y demolición en Bogotá Perspectivas y limitantes.*

Actualmente hay varios usos que se le puede dar a los RCA con el fin de mitigar el impacto ambiental ocasionado por el mal vertimiento de dichos residuos, en Bogotá existen plantas de procesamiento de RCA que se encargan de tratar este material proveniente de las construcciones y transformarlo para reutilizarlo en otras actividades relacionadas con el campo de la construcción.

## **4.2.Marco Conceptual**

### ***Mezcla asfáltica***

Se define como la combinación de agregados pétreos y cemento asfáltico, cada uno de ellos, en proporciones exactas y determinadas, la mezcla de más amplia utilización en Colombia es la mezcla densa en caliente, estas mezclas asfálticas son desarrolladas con el fin de soportar los factores climáticos a los que estará expuesto, y las cargas repetitivas del tráfico (Bacca et al, 2015).

Las características o propiedades más importantes a tener en cuenta en una mezcla asfáltica, con su correspondiente definición, son las siguientes:

- Estabilidad: Es la capacidad para soportar la deformación ante las cargas generadas por tráfico vehicular. Una estructura del pavimento presenta varios tipos de fallas o deformaciones como ahuellamientos, fisuraciones y fatiga.
- Durabilidad: Es la capacidad con la que cuenta la estructura de pavimento para soportar los agentes climáticos y de tránsito vehicular, y es posible percibirlo en los cambios de las características del asfalto y el desprendimiento de las capas de asfalto.
- Impermeabilidad: Es la resistencia con la que cuenta la estructura de pavimento a la acción del agua y aire hacia el interior de dicha estructura.

- Resistencia a la fatiga: Es la resistencia a la flexión continua ante las cargas ejercidas por el tráfico vehicular. Representa la capacidad de la mezcla asfáltica a deformarse reiteradamente sin presentar falla.
- Resistencia al deslizamiento: Esta se define como la “capacidad de suministrar suficiente fricción para disminuir el deslizamiento de los neumáticos de los vehículos, especialmente cuando la superficie presenta una película de agua” (ASOPAC, 2004).

### *Mezclas Asfálticas en Caliente*

Es posible definirla como mezcla asfáltica en caliente a la composición de agregado (incluido el polvo mineral) con un ligante. Dichas cantidades de ligante y agregado establecen las características físicas de las mezclas. Su proceso de producción implica calentar el agregado mineral y el asfalto a una alta temperatura. Para posteriormente instalar esta mezcla en las obras (Zúñiga, 2015).

### *Clasificación de las Mezclas Asfálticas en Caliente*

- **Carpeta de Rodadura:** Es una capa aglomerada de agregados pétreos y asfalto, generalmente semi-cerrada o cerrada diseñada para resistir la abrasión y desintegración por efectos ambientales.
- **Capa Intermedia:** Mezcla generalmente abierta y graduada densa o gruesa, colocada sobre la base.
- **Base Asfáltica:** Mezcla generalmente abierta colocada sobre la base granular o subrasante, a la cual se le superpone la capa intermedia o rodadura.



*Grafica 2: Estructura de Pavimento Flexible*

Fuente: (Rondón y Reyes, 2015)

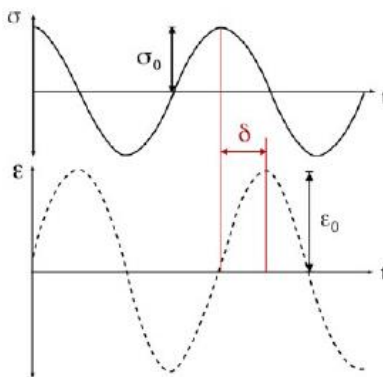
## ***Módulo Dinámico***

El módulo dinámico es un parámetro utilizado para evaluar la rigidez bajo carga cíclica de mezclas asfálticas a diferentes temperaturas y frecuencias de carga. La principal diferencia entre el módulo dinámico y el módulo resiliente es la forma de aplicación de carga. En el módulo resiliente se aplica un periodo de receso entre carga y carga, mientras que en el dinámico se aplica carga repetitiva, es decir que no existe receso entre ciclos de carga. El ensayo de laboratorio se realiza según las normas AASTHO T 378 (2017) o ASTM D3496-99 (2005), las cuales presentan los lineamientos para preparar y ensayar mezclas asfálticas y determinar los valores del módulo dinámico.

El ensayo consiste en someter una muestra de concreto asfáltico a la aplicación de una carga uniaxial o triaxial de tensión o compresión y obtener la respuesta del material en términos de la deformación axial. A partir de la realización del ensayo se determinan parámetros del comportamiento del material, tales como el módulo dinámico [ $E^*$ ] y el ángulo de fase [ $\delta$ ] de la mezcla asfáltica.

- **El módulo dinámico:** Se define como la relación entre la máxima tensión uniaxial aplicada y la máxima deformación que se presenta en un ciclo de carga.
- **El ángulo de fase:** se define como el desfase o “retraso” entre la aplicación de carga y respuesta del material en un ciclo de carga.

El procedimiento de ensayo recomienda determinar el módulo dinámico y el ángulo de fase en el intervalo de temperaturas de 5, 25 y 40°C a frecuencias de cargas de 1, 4 y 16 Hz respectivamente. Sin embargo, dichas temperaturas y frecuencias pueden variar. Como resultados se reporta la variación del módulo dinámico y el ángulo de fase a diferentes temperaturas y frecuencias de carga. (Bastidas y Rondón, 2020)



*Grafica 3: Aplicación de carga en la determinación del módulo dinámico de la mezcla asfáltica (Bastidas y Rondón,*



2020.)

El módulo dinámico se define como la relación de las amplitudes del esfuerzo sinusoidal en cualquier tiempo dado (t) y la frecuencia de carga angular (w) (Nega et al, 2015):

$$|E^*| \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{\sigma_0 \cdot \sin(\omega t)}{\varepsilon_0 \cdot \sin(\omega t - \phi)} \quad (1)$$

Donde:

$E^*$ : Tensión inicial, [MPa].

$\sigma_0$ : Módulo dinámico, [MPa].

$\varepsilon_0$ : Deformación inicial, [ $\mu\text{m}$ ]

$\omega$ : Frecuencia de carga aplicada en el tiempo (t).

### ***Ecuación de Witczak***

La ecuación (2) de Witczak es empleada para obtener el módulo dinámico de una mezcla asfáltica para un rango de temperatura que varía entre (-17,7 y 54,4 °C), y frecuencias de carga que oscilan entre (0,1 - 25 Hz) teniendo en cuenta escenarios de envejecimiento con información disponible de las especificaciones de materiales o características volumétricas de la mezcla.

$$\log E^* = 3.750063 + 0.02932(\rho_{200})^2 - 0.002841\rho_4 - 0.058097V_a - 0.802208 \left( \frac{V_{beff}}{V_{beff} + V_a} \right) + \frac{3.871977 - 0.0021\rho_4 + 0.003958\rho_{38} - 0.000017(\rho_{38})^2 + 0.005470\rho_{34}}{1 + e^{(-0.603313 - 0.31335 \log(f) - 0.393532 \log(n))}} \quad (2)$$

Donde:

$E^*$ = modulo dinámico, psi,

$n$ = viscosidad de asfalto al envejecimiento y temperatura de interés,  $10^6$  Poise.

$$n = \frac{G}{10} \left( \frac{1}{\sin \delta} \right)^{4.8628}$$

$F$ = frecuencia de carga, Hz

$V_a$ = Contenido de vacíos de aire, %

$V_{beff}$ = Volumen de asfalto efectivo, % - volumen

$\rho_{34}$ = % retenido acumulado en tamiz de 19 mm (3/4 pulg).

$\rho_{38}$ = % retenido acumulado en tamiz de 9.53 mm (3/8 pulg).

$\rho_4$ = % retenido acumulado en tamiz de No.4

$\rho_{200}$ = % retenido acumulado en tamiz No.200

### ***Viscosidad del ligante asfáltico***

La viscosidad del asfalto a la temperatura de interés es un parámetro de entrada crítico para la ecuación de Witczak y de igual manera es necesario para encontrar los factores de ajuste

presentados. En la condición sin envejecimiento, la viscosidad se calcula según la norma ASTM D2493. Dicho método define la susceptibilidad a la temperatura como la pendiente de la relación del logaritmo de la viscosidad y el logaritmo de la temperatura, aplicando la ecuación (3):

$$\log \log n = A + VTS \log T_R \quad (3)$$

n= viscosidad, cP.

$T_R$ = temperatura, Ranking.  $T_R=9/5*(^{\circ}\text{C})+497.67$

A= intercepto de la regresión

VTS= pendiente de la correlación de la susceptibilidad a la temp. de la viscosidad.

### 4.3.Estado del Arte

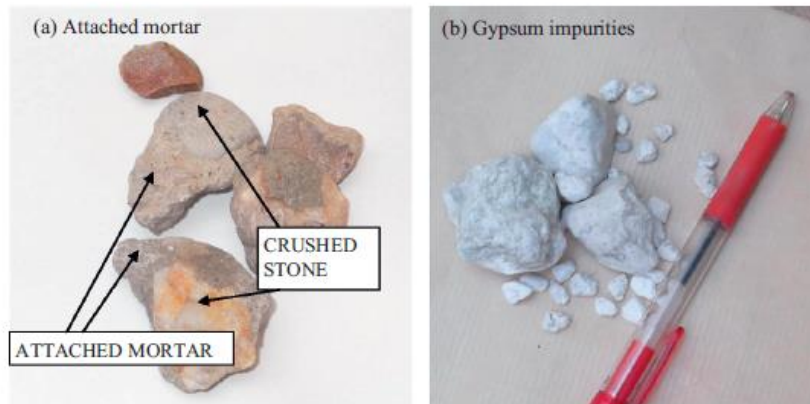
A continuación, se presenta un resumen de una serie de estudios realizados en la utilización de RCA en mezclas asfálticas:

***A.R. Pasandín & I. Pérez “Laboratory evaluation of hot-mix asphalt containing construction and demolition waste” Universidad da Coruña, E.T.S.I. Caminos, Canales y Puertos, A Coruña, España; 2017***

En las últimas décadas se han incrementado los esfuerzos por lograr un crecimiento sostenible y esto ha dado lugar a estudios para reciclar o reutilizar una gran parte de materiales de desecho de la construcción. Este es el caso del hormigón reciclado agregado (RCA) de residuos de construcción y demolición (RCD). Su uso se ha incrementado en los últimos años, particularmente como agregados para hormigón y capas de pavimento. Sin embargo, Se necesita más investigación para diversificar las aplicaciones de RCA y hacer de su uso una práctica habitual.

Aunque lo más probable es que el RCA sea adecuado para su uso como agregado en mezcla de asfalto (HMA) por sus siglas en ingles “Hot Mix Asphalt” o MDC “Mezclas Densas en Caliente” para pavimentos en la construcción de carreteras, hasta la fecha solo un se han realizado pocos estudios sobre el uso de este tipo de material de desecho en HMA.

Investigaciones han demostrado que el mortero adjunto, es más poroso y menos denso que la piedra triturada, por lo que ha sido la razón principal por la que el RCA ha sido considerado de calidad insatisfactoria (Motter et al, 2015). De hecho, algunos de los estudios han recomendado eliminar impurezas como la madera, caucho y yeso con el objetivo de hacer del RCA más homogéneo.



Grafica 4: RCA usado en la investigación: (a) mortero anexo y (b) impurezas de yeso  
Fuente: *construccion and bulding materials* 43 (2013) 497-505

Las diminutas fisuras que aparecen durante el proceso de trituración y el contacto débil entre el mortero y el agregado son otros factores a tener en cuenta y hacen del RCA un agregado de calidad inferior que el agregado natural. Obviamente, las diferencias entre las propiedades del RCA y las de los agregados naturales influyen en el rendimiento del MDC realizado con RCA. También se estima que el contenido de RCA (entre 0% y 100%) afecta el rendimiento de las MDC.

**Julian Mills-Beale. “The mechanical properties of asphalt mixtures with Recycled Concrete Aggregates”, Department of Civil and Environmental Engineering, Michigan Technological University, Houghton, Michigan 49931-1295, United States; 2010**

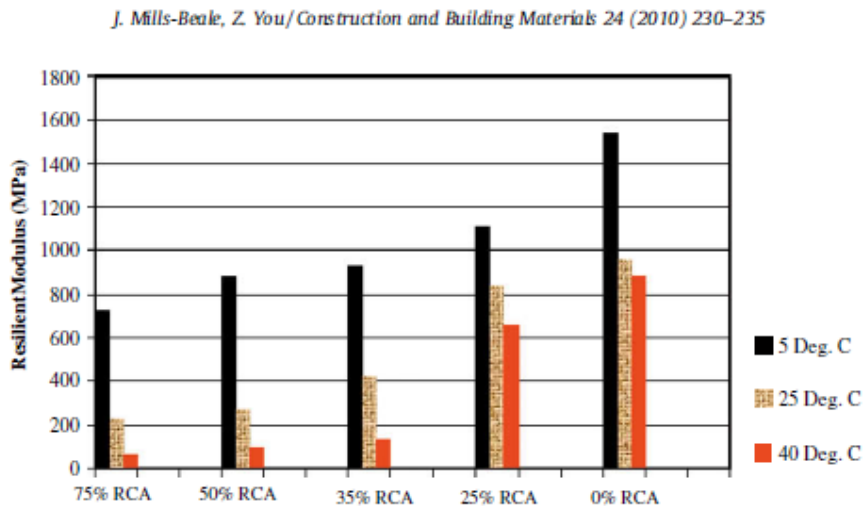
El Programa de Investigación Estratégica de Carreteras (SHRP) en 1990 buscó establecer el efecto del asfalto y agregados propiedades de absorción en MDC. Una conclusión clave fue la propuesta de recubrimientos y selladores para minimizar la absorción de asfalto por agregados porosos como RCA.

Una combinación de materiales de construcción de hormigón recuperado: residuos de concreto RCA, ladrillo y baldosas: se ha evaluado para determinar su potencial para uso como agregados en MDC. En investigaciones realizadas por (Shen et al, 2012) fueron usados cuatro tipos de agregados para el proyecto de investigación a saber:

- 100% roca ígnea triturada (mezcla de control),
- materiales de construcción 100% reciclados (RBM),
- 50% RBM grueso y fino más 50% grueso y
- 50% fino roca ígnea triturada (ICS) (50% RBM más 50% ICS) y RBM grueso más ICS fino (C-RBM más F-ICS).

La mezcla C-RBM más F-ICS fue identificada como la mezcla de mejor desempeño. El proyecto demostró que el potencial de falla de la formación de surcos (Ahuellamientos) se vio afectado en gran medida por el tipo de agregado independientemente del grado de aglutinante PG y la temperatura de prueba.

Además, la investigación estableció que el asfalto PG (El grado de desempeño o Grado **PG** es el rango de temperaturas, máxima a mínima, entre las que un cemento asfáltico se desempeña satisfactoriamente) y los tipos agregado no influyen en el módulo resiliente resultados a 25° C, pero afectan los resultados del módulo resiliente a 40 C. La aplicabilidad de sustituir agregados vírgenes comunes ha demostrado que los agregados de hormigón de desecho (RCA) son prometedores. El hallazgo notable en esta investigación, que utilizó el método de diseño Marshall, fue el hecho de que es posible utilizar materiales de hormigón reciclado en MDC.



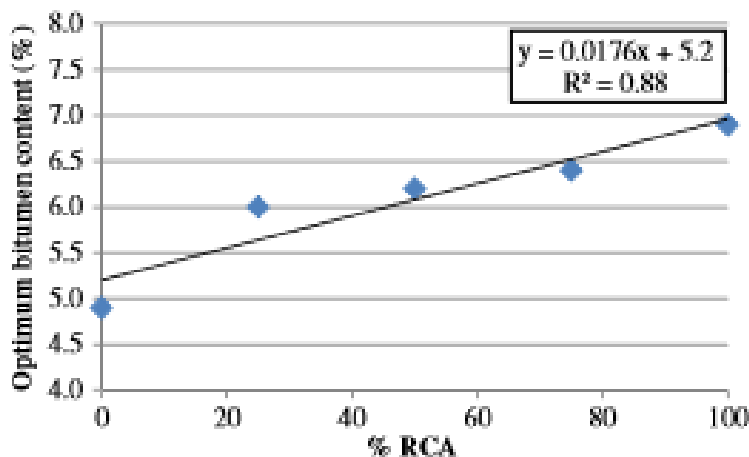
Grafica 5: Resultados de Modulo Resiliente – Fuente: (Mills-Beale, 2010)

**Motter J., Roseback L & Bariani L.. “Performance of Hot Mix Asphalt Concrete Produced with Coarse Recycled Concrete Aggregate”, Ph.D.2; American Society of Civil Engineers, New York, NY, USA, 2015.**

Este artículo evalúa la sustitución de la fracción gruesa del agregado natural por agregado de concreto reciclado (RCA) en mezclas asfálticas en caliente (MDC), área en la que los estudios son recientes y escasos. Los agregados gruesos de piedra triturada (CSCA) fueron reemplazados por RCA con una resistencia a la compresión de 30 MPa en los siguientes porcentajes: 0, 25, 50, 75 y 100%, y mezclado con cemento asfáltico (AC) 50-70. Propiedades volumétricas y mecánicas resultantes del método de diseño de mezcla Marshall, junto con deformación permanente y durabilidad mediante la prueba de daños inducidos por la humedad (Lottman). Los resultados indican que, aunque el RCA muestra mayor absorción y menor densidad que los agregados de

piedra triturada, las mezclas mostraron resultados satisfactorios para su uso en mezclas asfálticas.

Las pruebas de seguimiento presentaron deformaciones permanentes que oscilaron entre 4,4 y 9,3% en la capa superficial en carreteras de bajo volumen de tráfico, también se percibe una mejora de la adhesividad en la mezcla de RCA. Los resultados refuerzan la necesidad de buscar alternativas para reducir el consumo de ligante cuando se utiliza RCA grueso en la producción de MDC.



Grafica 6: Cantidad optima de asfalto en mezclas acorde al porcentaje de RCA – Fuente: (Motte et al, 2015)

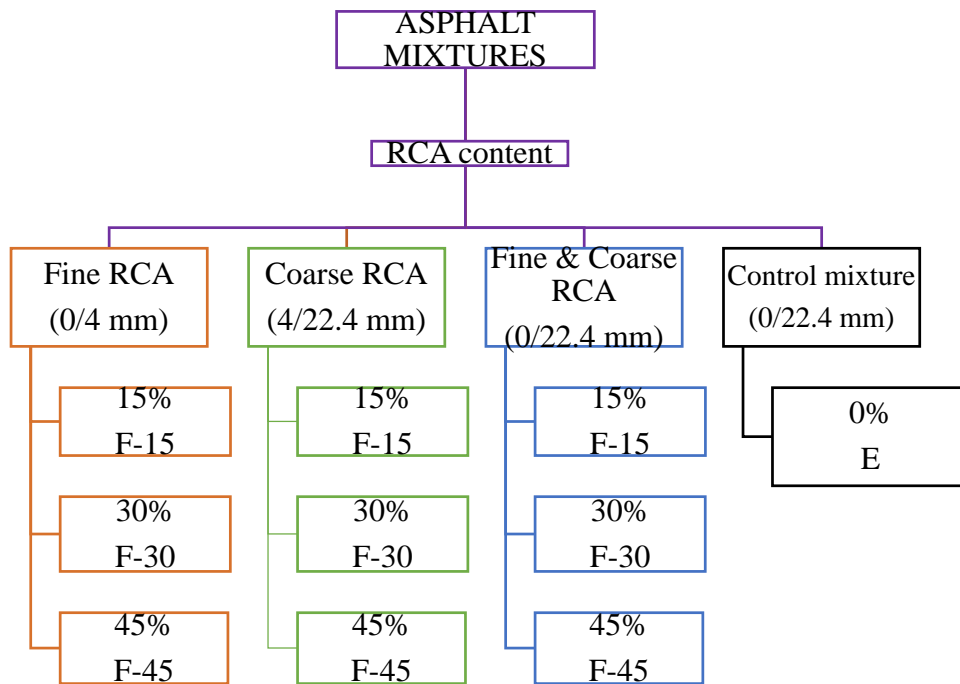
**Radevic A., Isailovic I., Wistuba M., Zakic D., Oreškovic M. & Mladenovic' G. "The Impact of Recycled Concrete Aggregate on the Stiffness, Fatigue, and Low-Temperature Performance of Asphalt Mixtures for Road Construction"; Faculty of Civil Engineering, University of Belgrade; 2020.**

La necesidad de materiales de construcción de carreteras aumenta constantemente. Al mismo tiempo, hay una cantidad limitada de materiales nuevos y de alta calidad disponibles y una acumulación de materiales de construcción secundarios / reciclados.

Una posible solución puede ser el uso de agregado de concreto reciclado (RCA) en mezclas asfálticas en lugar de agregado natural (NA), que también promueve la sustentabilidad económica y ambiental. En este trabajo se analizó el uso potencial de RCA fino y grueso en mezclas de asfalto para carreteras. Se probaron nueve mezclas de asfalto para capas de capa base, donde se utilizó RCA como sustituto de NA. Se investigó el impacto de la cantidad de RCA (hasta un 45% en masa) sobre las propiedades físicas y mecánicas resultantes de las mezclas asfálticas y, en consecuencia, se comparó con las propiedades de una mezcla de control de referencia producida solo con NA.

Los resultados revelan que la adición de RCA requiere un bitumen más alto en comparación con la mezcla de control (hasta 1%). En consecuencia, las mezclas con RCA tenían entre un 15% y un

20% menos rigidez y hasta un 26% más de esfuerzo crítico de fatiga( $\epsilon_6$ ). Aunque las mezclas de RCA contenían más betún, su resistencia a bajas temperaturas fue ligeramente inferior en comparación con la mezcla de control (las temperaturas de falla fueron hasta 4,3 ° C más altas). En conclusión, se pueden utilizar mezclas de asfalto con hasta un 45% de RCA sin reducir sustancialmente el rendimiento.



Grafica 7: Clasificación de mezclas con diferentes porcentajes de RCA (agregado grueso y fino) – Fuente: (Radevic et al, 2020)

**Nwakaire C., Poh S., Yuen C., Onn C., Koting S. & Babalghaith M. “Laboratory study on recycled concrete aggregate based asphalt mixtures for sustainable flexible pavement surfacing”, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Malaya, Malasia; 2020**

La utilización de agregados de hormigón reciclado (RCA) para la construcción de pavimentos de carreteras ha sido un intento de conservación de la base de recursos naturales, así como de mitigación contra los problemas ambientales asociados con la eliminación de desechos sólidos nocivos.

El comportamiento de mezclas asfálticas con 20%, 40%, 60%, 80% y 100% de granito grueso, así como 100% de granito fino y grueso reemplazados por RCA, para pavimentos flexibles, han sido evaluados en este documento. La mezcla que usó granito 100% como control. Para luego realizar ensayos de estabilidad, flujo, propiedades volumétricas, resiliente módulo, resistencia a la tracción indirecta, susceptibilidad a la humedad, resistencia a la fatiga, resistencia a la formación de surcos

y se probaron resistencia a la compresión simple, resistencia al deslizamiento y resistencia a la abrasión para las mezclas.

Respecto a los ensayos de módulo resiliente y resistencia a la tracción indirecta, la mezcla de control se comportó mejor que las mezclas RCA pero las mezclas de RCA generalmente se comportaron mejor en las otras pruebas. Se registraron 9496MPa y 1058 kPa para Módulo Elástico y Resistencia a la tracción indirecta, respectivamente. Éstas eran comparables a la mezcla con 40% RCA con Módulo Resiliente de 9339 MPa y 1051,7 kPa e Resistencia a la Tracción Indirecta, respectivamente. Se concluyó que el RCA se puede utilizar eficazmente en mezclas asfálticas, pero se recomienda un reemplazo del 40% del RCA para un rendimiento óptimo del pavimento.

**Mikhailenko P. et al. “Incorporation of recycled concrete aggregate (RCA) fractions in semidense asphalt (SDA) pavements: Volumetrics, durability and mechanical properties” Swiss Federal Institute of Technology; 2020.**

Los agregados de concreto reciclado (RCA) forman una parte significativa de los desechos de construcción y demolición y su el reciclaje es fundamental para la sostenibilidad de la construcción a largo plazo. Este estudio examinó la incorporación de varias fracciones de RCA en mezclas de asfalto semidense (SDA). Los agregados de SDA de control fueron reemplazado por RCA en fracciones seleccionadas de 2/4 mm (grueso) y 0.125 / 2 mm (arena) al 100% y 50% cada una, y el llenante mineral al 100% de la fracción. Las mezclas fueron evaluadas por su volumétrica, tracción indirecta resistencia (ITS), sensibilidad al agua (EN 12697-12), energía de fractura y resistencia a la formación de surcos (EN 12697-22) para evaluar los efectos de cada fracción de RCA sobre las propiedades de la mezcla. Los resultados mostraron que el reemplazo RCA en los agregados gruesos absorben cantidades significativas de aglutinante y requieren más energía para la compactación, lo que no es el caso de la arena o el llenante mineral por RCA. Los resultados de ITS mostraron una mayor carga máxima para el reemplazo de RCA muestras, sino que también aumentó la fragilidad en términos de resistencia a la inicio y propagación de grietas.

La incorporación de arena RCA disminuyó la energía de fractura a una tasa mayor que el agregado grueso. El resultado de ITS fue similar al control para cantidades más bajas de reemplazo de RCA, pero significativamente menor con mayor reemplazo. La resistencia a la formación de surcos mejoró con arena RCA y especialmente cuando se realizó reemplazo con agregado grueso. El estudio muestra algunas limitaciones para el uso de RCA en mezclas asfálticas, pero también la posibilidad de usarlos cuando la tasa de reemplazo es limitada y se recomienda el reemplazo por volumen. El rendimiento del llenante mineral de RCA fue muy similar al del llenante mineral convencional virgen, que hace su uso en asfalto mezclas especialmente prometedoras.

A continuación, se presenta una tabla resumen de las investigaciones realizadas en el mundo que se encuentran relacionadas con la utilización de RCA en mezclas asfálticas:

Tabla 1: Resumen de Investigaciones realizadas con RCA en Mezclas asfálticas.

Estudio	Objetivo	Características	Resultados
<i>Performance of hot-mix asphalt involving recycled concrete aggregates, (Pasandín et al,2018)</i>	Diseño de una MDC para base con RCA	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Mezclas con 0, 5, 10, 20 y 30% de RCA</li> <li>✓ Evaluación daño por humedad</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Bajo resistencia al daño por humedad</li> <li>✓ Baja Resistencia a la fragmentación</li> <li>✓ Mejora en comportamiento aplicando procesos de curado a la mezcla asfáltica para todos los porcentajes de RCA.</li> </ul>
<i>The mechanical properties of asphalt mixtures with Recycled Concrete Aggregates, (Mills-Beale, 2010)</i>	RCA para mezclas asfálticas en vías de bajo trafico	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Caracterizar propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas con agregados de RCA a razón de 25, 35, 50 y 75%.</li> <li>✓ Especificaciones Superpave.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Bajo Rigidez Dinámica a mayor cantidad de RCA</li> <li>✓ Alta resistencia a la humedad en bajos % de RCA</li> <li>✓ Uso de RCA ahorra energía de compactación</li> <li>✓ Recomendable en vías de bajo trafico</li> </ul>
<i>Performance of Hot Mix Asphalt Concrete Produced with Coarse Recycled Concrete Aggregate, (Motter et al, 2015)</i>	Uso de RCA en MDC - Propiedades mecánicas	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Caracterizar propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas con agregados de RCA a razón de 25, 50 y 75%.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ &gt;%Asfalto debido a la porosidad del RCA, aumentando deformación permanente</li> <li>✓ Reemplazo de agregado grueso mejora adhesión de la mezcla</li> <li>✓ Viable la utilización de RCA en MDC, se debe mejorar el comportamiento a condiciones de humedad</li> </ul>
<i>Effects of recycled concrete aggregate on stiffness and rutting resistance of asphalt concrete, (Radevic´ et al, 2017)</i>	Uso de RCA en MDC - Propiedades mecánicas, reemplazo de fracción gruesa y fina.	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Sustitución por RCA, que osciló entre el 15% y el 45% de fino (64 mm), grueso (4 / 22,4 mm) y ambos finos y agregado grueso.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ &gt;%Asfalto debido a la porosidad del RCA, aumentando deformación permanente</li> <li>✓ Cumple criterio de diseño Marshall</li> <li>✓ RCA grueso mejora la resistencia a la deformación permanente.</li> <li>✓ Se recomienda uso en capas base debido a condiciones ambientales</li> </ul>
<i>Laboratory study on recycled concrete aggregate based</i>	Uso de RCA en MDC -	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Caracterizar propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas con agregados de</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ &gt;%Asfalto debido a la porosidad del RCA, aumentando deformación permanente - %Opt &gt; 7%</li> </ul>



<i>asphalt mixtures for sustainable flexible pavement surfacing, (Nwakaire et al, 2020)</i>	Propiedades mecánicas	RCA a razón de 20, 40, 60, 80 y 100%.	✓ ✓	Cumple criterio de diseño Marshall Desmejora en los módulos resilientes y tracción indirecta de las mezclas con inclusión de RCA. Mezcla 40% de RCA es el más cercano al control.
---	-----------------------	---------------------------------------	--------	--

## 5. METODOLOGÍA

### 5.1. FASE 1: RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN.

De acuerdo con la metodología planteada para el desarrollo de la presente investigación, se ha definido una primera fase de recopilación de la información que posteriormente será utilizada como insumo principal para el desarrollo de un modelo matemático a partir de la ecuación de Witzack.

Básicamente se ha definido recopilar y emplear toda la información de entrada para la ecuación de Witzack presentada anteriormente, la cual busca determinar el módulo dinámico de mezclas asfálticas en función de las características granulométricas, volumétricas ( $V_a$  y  $V_{beff}$ ), la viscosidad y la frecuencia de aplicación de las cargas.

Es importante no perder de vista que tal y como se ha definido como hipótesis de la presente investigación, se trata de predecir los resultados de modulo dinámico en mezclas asfálticas que implementan el reemplazo de agregados convencionales con RCA, por lo que la recopilación de información necesaria para la presente investigación tendrá que incluir información volumétrica y granulométrica de este tipo de mezclas falticas y características del asfalto a utilizar como ligante. A partir de la investigación realizada por (Mills-Beale, 2010) se obtuvieron datos relevantes de las características volumétricas y granulométricas de las mezclas desarrolladas con reemplazo de Agregado convencional por RCA, como se muestra a continuación:

Tabla 2: Información granulométrica mezclas asfálticas a analizar (Mills-Beale, 2010)

Sieve size	Sieve size (mm)	% Passing	
		Coarse aggregate	Fine aggregate
Aggregate gradation %			
1 1/2 in	37,5	100	
1 in	25	100	
3/4 in	19	100	
1/2 in	12,5	94	
3/8 in	9,5	86,3	
#4	4,75		68,2
#8	2,36		49,2
#16	1,18		38,4
#30	0,6		27,8
#50	0,3		15
#100	0,15		6,7
#200	0,075		4,5

Tabla 3: Composición RCA mezclas asfálticas (Mills-Beale, 2010)

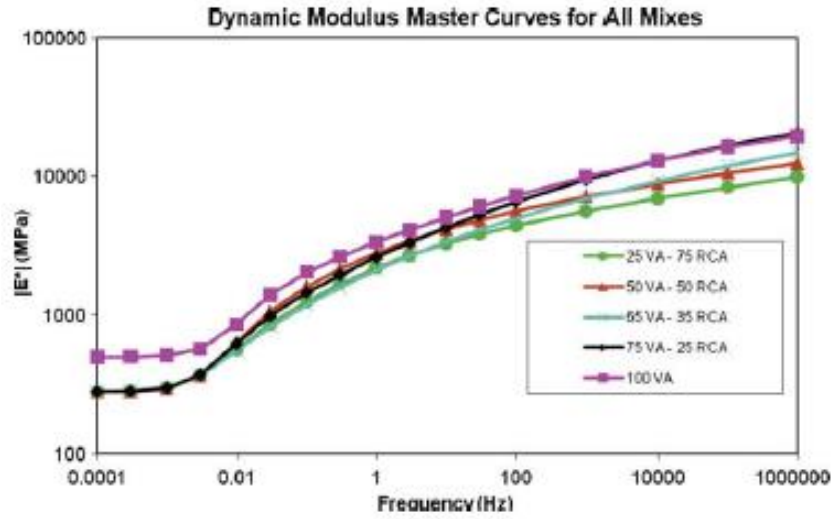
VA-RCA aggregate contributions	
Virgin aggregates (%)	RCA aggregates (%)
75	25
65	35
50	50
25	75

A partir de las características de las mezclas asfálticas producidas a partir de la granulometría definida, los porcentajes de reemplazo de agregado convencional por RCA, se llevaron a cabo una serie de ensayos para determinar, entre otros, el módulo dinámico de dichas mezclas bajo diferentes condiciones de temperatura y frecuencia de carga.

***Módulo dinámico ( $E^*$ ) / ángulo de fase ( $d$ ), (AASHTO T 62-03):***

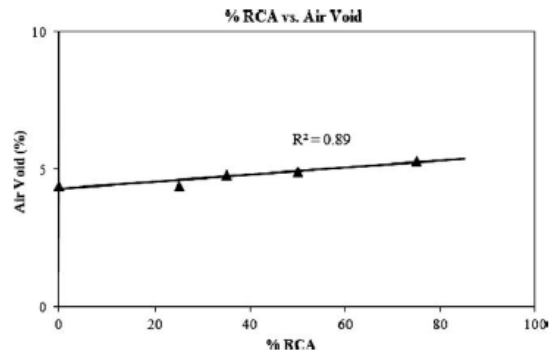
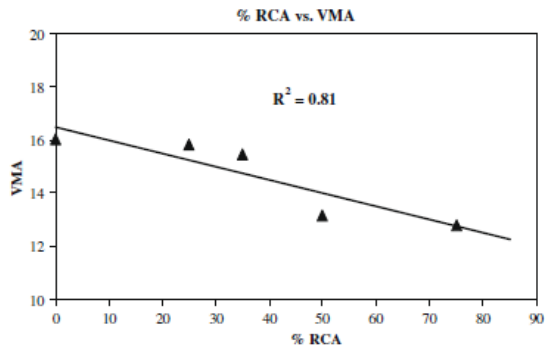
La prueba se realizó para determinar el módulo dinámico ( $E^*$ ) y ángulo de fase ( $d$ ) a temperaturas de 13,2 y 21,3 y 39,2 °C, y frecuencias de carga de 25, 10, 5, 1, 0,1 Hz, bajo carga sinusoidal. Esto proporcionó una idea del comportamiento de rigidez de las mezclas y simuló su

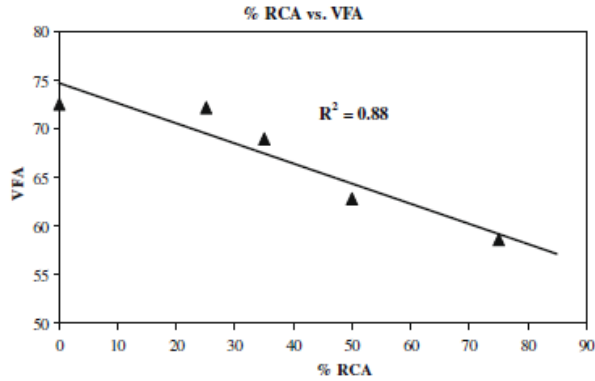
rendimiento bajo carga de tráfico dinámico.



Grafica 8: Resultados experimentales de Modulo dinámico - (Mills-Beale, 2010)

De otra parte, se llevó a cabo un análisis volumétrico a partir de la metodología Superpave con el cual se logró determinar características como los vacíos de aire, vacíos en el agregado y vacíos llenos de asfalto, tal y como se muestra a continuación:





Gráfica 9: Información volumétrica de las mezclas - (Mills-Beale, 2010)

## 5.2.FASE 2: AJUSTE DE LOS DATOS AL MODELO DE WITZACK

Este método fue desarrollado teniendo en cuenta la composición de la mezcla asfáltica, y se condensa en una única expresión matemática, mostrada a continuación:

$$\log E^* = 3.750063 + 0.02932(\rho_{200})^2 - 0.002841\rho_4 - 0.058097V_a - 0.802208 \left( \frac{V_{beff}}{V_{beff} + V_a} \right) + \frac{3.871977 - 0.0021\rho_4 + 0.003958\rho_{38} - 0.000017(\rho_{38})^2 + 0.005470\rho_{34}}{1 + e^{(-0.603313 - 0.31335 \log(f) - 0.393532 \log(n))}} \quad (2)$$

Donde:

$E^*$ = modulo dinámico, psi,

$n$ = viscosidad de asfalto al envejecimiento y temperatura de interés,  $10^6$  Poise.

$$n = \frac{G}{10} \left( \frac{1}{\sin \delta} \right)^{4.8628} \quad (3)$$

$F$ = frecuencia de carga, Hz

$V_a$ = Contenido de vacíos de aire, %

$V_{beff}$ = Contenido de asfalto efectivo, % por volumen

$\rho_{34}$ = Porcentaje retenido acumulado en la malla de 19 mm (3/4 pulg).

$\rho_{38}$ = Porcentaje retenido acumulado en la malla de 9.53 mm (3/8 pulg).

$\rho_4$ = Porcentaje retenido acumulado en la malla de No.4

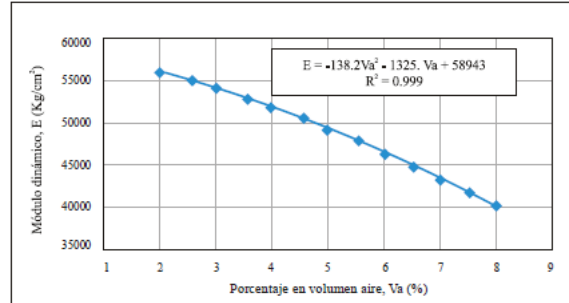
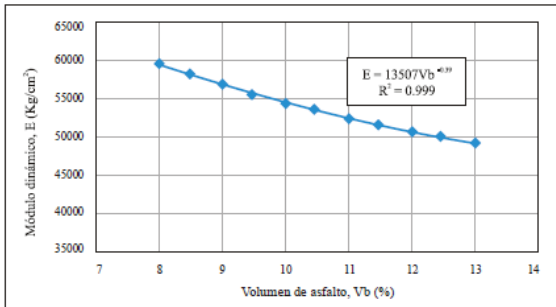
$\rho_{200}$ = Porcentaje retenido acumulado en la malla No.200

Como ya se definió anteriormente, la información granulométrica con la cual se desarrollaron las diferentes mezclas asfálticas, tanto las desarrolladas a partir de agregados convencionales como en las que se reemplazó dicho agregado con RCA en diferentes porcentajes de reemplazo es la misma:

Tabla 4: Información granulométrica mezclas asfálticas a analizar

Sieve size	Sieve size (mm)	% Passing	
		Coarse aggregate	Fine aggregate
Aggregate gradation %			
1 1/2 in	37,5	100	
1 in	25	100	
3/4 in	19	100	
1/2 in	12,5	94	
3/8 in	9,5	86,3	
#4	4,75		68,2
#8	2,36		49,2
#16	1,18		38,4
#30	0,6		27,8
#50	0,3		15
#100	0,15		6,7
#200	0,075		4,5

Sin embargo, se ha evidenciado que los datos de  $V_a$  (Contenido de vacíos de aire %) y  $V_{beff}$  (Volumen de asfáltico efectivo) se verán modificados con la fabricación de mezclas asfálticas con RCA en los diferentes porcentajes de reemplazo (0%, 25%, 35%, 50% y 75%), es importante tener en cuenta el estudio realizado por (Higuera et al, 2011), en el que se muestra que una vez realizado un análisis de sensibilidad, las variable  $V_a$  y  $V_{beff}$  afectan de manera inversamente proporcional el modulo dinámico, como se muestra a continuación:



Grafica 10: Información volumétrica de las mezclas - (Higuera et al, 2011)

Teniendo en cuenta lo anterior, realizaremos un cálculo del módulo dinámico a partir de la información obtenida de la fabricación de mezclas asfálticas con RCA ((0%, 25%, 35%, 50% y 75%) y finalmente con los resultados obtenidos de los correspondientes cálculos realizaremos un comparativo con los resultados obtenidos en laboratorio del trabajo desarrollado por (Mills-Beale, 2010) con el fin de validar la representatividad del modelo de Witzack para mezclas asfálticas con RCA.

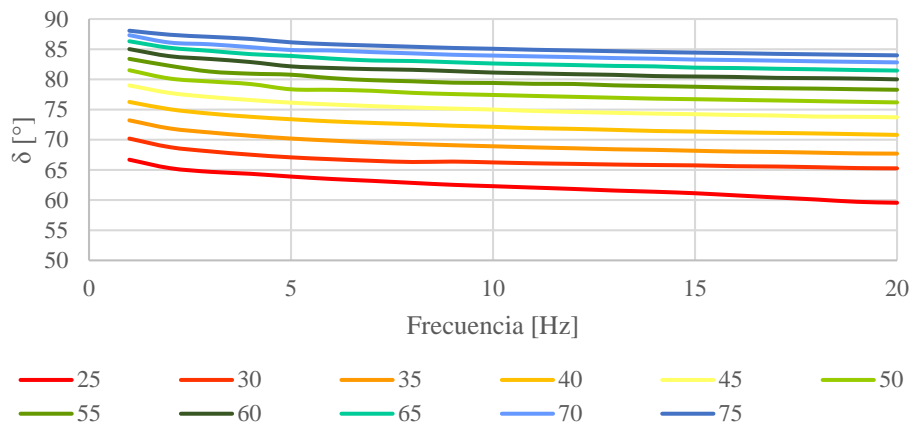
Como ya se explicó anteriormente, procederemos a presentar el modelo desarrollado para la obtención de las curvas maestras de módulos dinámicos obtenidos para cada una de las mezclas asfálticas con RCA ((0%, 25%, 35%, 50% y 75%).

### 5.2.1. Materiales

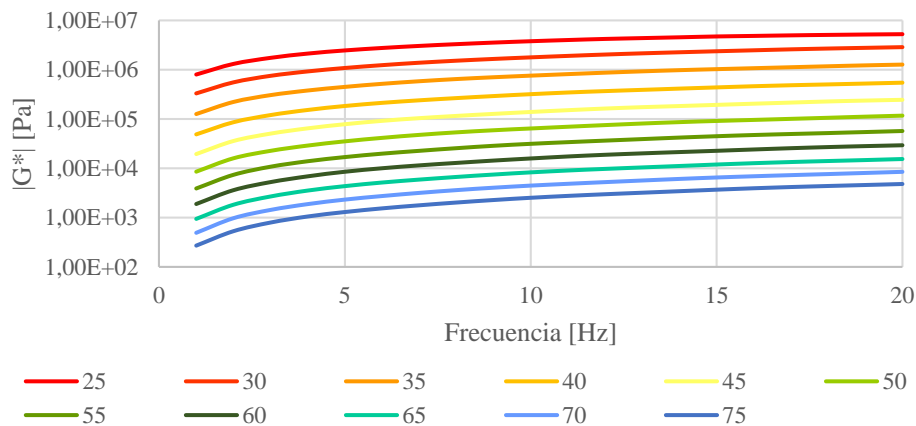
#### Asfalto

Dentro de la información de los materiales analizados para el desarrollo de los cálculos se tiene en primera medida la información geológica de un asfalto 60-70, información a partir de la cual se obtuvieron los datos de Modulo de Corte Dinámico  $G^*$  y el Angulo de desfase  $\delta$ , los cuales a su vez son requeridos para la obtención de la viscosidad dinámica o absoluta.

Respecto a las curvas isócronas, las mismas representan el comportamiento del asfalto 60-70 que para un rango de temperaturas entre 25°C – 75°C y frecuencias de carga que varían entre los 1-20 Hz presenta ángulos de desfase entre 60° promedio para temperaturas de 25°C y muy próximos a 90° para las temperaturas cercanas a 75°C, dicho ángulo de desfase es inversamente proporcional al módulo de corte dinámico por lo que es mayor en temperaturas bajas (cercanas a 25°C).



Gráfica 11: Curvas Isócronas pavimento 60-70



Grafica 11: Curvas Isócronas pavimento 60-70

A partir de la información antes presentada que corresponde a un asfalto 60-70, obtenemos a partir del siguiente procedimiento, el Módulo de Corte Dinámico  $G^*$  y el Angulo de desfase  $d'$  para cada una de las temperaturas y frecuencias a las cuales se llevaron a cabo los ensayo en el estudio (Mills-Beale, 2010), las cuales son T(13,2 – 21,3 y 39,2)°C y Frecuencias (0,1 – 1 – 5 – 10 y 25) Hz, los cuales a su vez son los rangos en los que es posible predecir los módulos dinámicos a partir de la ecuación de Witzack, de la cual se extrae la siguiente expresión:

$n$ = viscosidad de asfalto al envejecimiento y temperatura de interés,  $10^6$  Poise.

$$n = \frac{G}{10} \left( \frac{1}{\text{sen}\delta} \right)^{4.8628}$$

A partir de la curva maestra del asfalto 60-70 utilizado como referencia y de su curva a 70°C, realizamos para cada temperatura y frecuencia, el procedimiento para deducir el Modulo de Corte Dinámico  $G^*$  y su correspondiente Angulo de desfase  $d'$  a partir del Shift Factor, como se muestra a continuación:

$$\begin{aligned} G * (39.2^\circ\text{C y } 1\text{Hz}) &= \text{¿?} \\ G * (39.2^\circ\text{C y } 1\text{Hz}) &= G * (70^\circ\text{C y } ?\text{Hz}) \end{aligned}$$

Teniendo en cuenta como referencia la curva maestra vamos a buscar un modulo dinámico a 39,2 °C y 1 Hz lo primero que obtenemos es la frecuencia ( $F_{tref}$ ) interpolando:

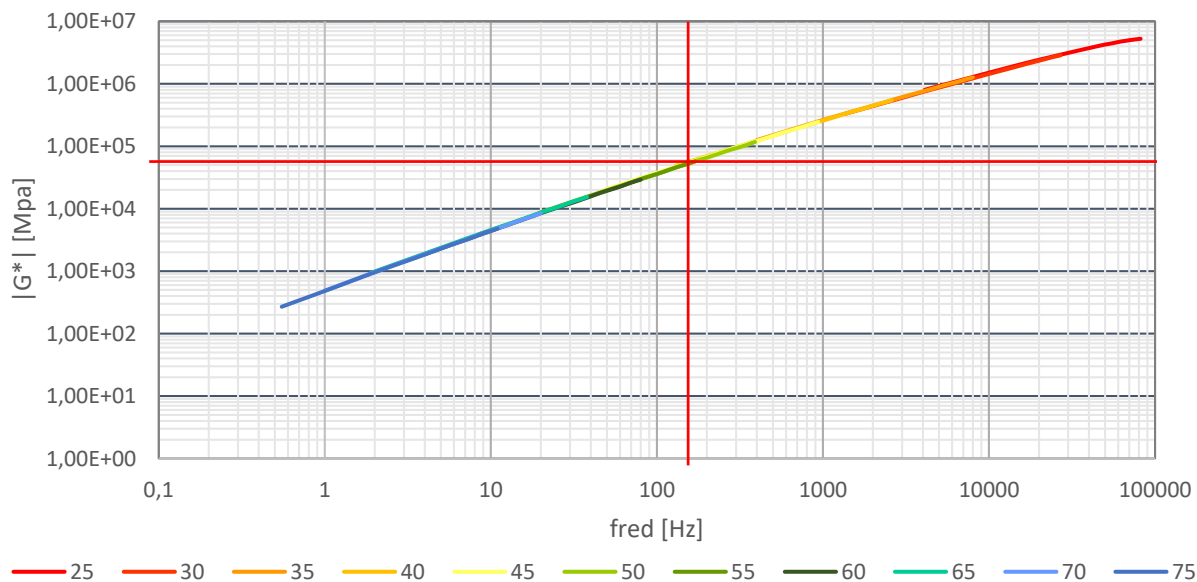
$$at = \frac{F_{tref}}{F_{tbuscada}}$$

Despejando:

$$F_{tref} = at * F_{tbuscada}$$

$$\begin{aligned} F_{tref} &= 154.0450558 \\ G * (39.2^\circ\text{C y } 1\text{Hz}) &= G * (70^\circ\text{C y } 154.04\text{Hz}) \end{aligned}$$

Una vez determinada la frecuencia de referencia ( $F_{tref}$ ), se procede a determinar gráficamente el Módulo de Corte Dinamico  $G^*$  para una temperatura de 70°C Y 154,04 Hz el cual es equivalente al módulo para 39,2°C y 1Hz que corresponde al módulo que requerimos, como se muestra a continuación:



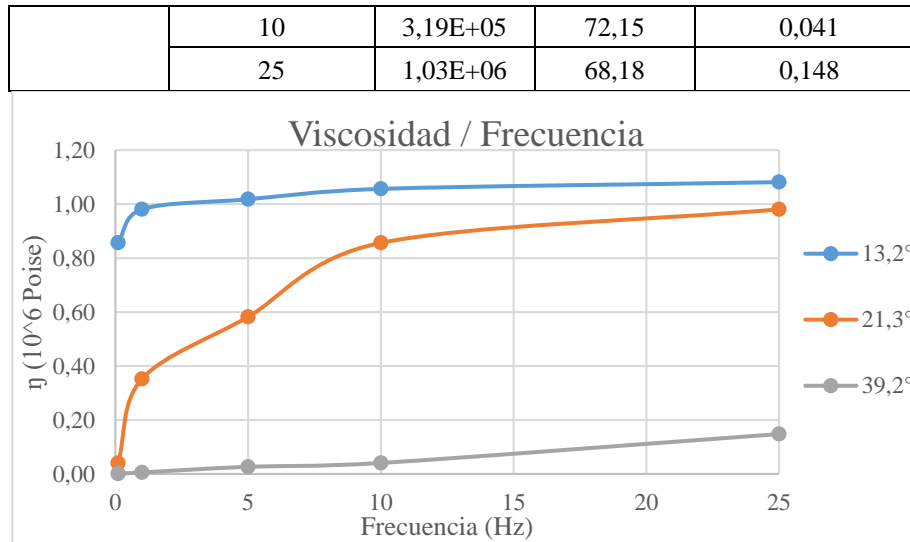
Grafica 12: Curvas maestra asfalto 60-70

Realizamos este procedimiento para cada una de las temperaturas y frecuencias de los rangos de aplicación de la ecuación de Witzack, obteniendo el modulo de corte dinámico  $G^*$  y su correspondiente Angulo de desfase ( $d$ ) para finalmente obtener la viscosidad requerida del asfalto para cada uno de dichos escenarios:

Tabla 5: Calculo de viscosidad

Temp (°c)	Frecuencia	$G^*$ (Pa)	$d$	$\eta$ ( $10^6$ Poise)
13,2°	0,1	4,55E+06	61,38	0,86
	1	4,98E+06	60,43	0,98
	5	5,08E+06	60,09	1,02
	10	5,18E+06	59,71	1,06
	25	5,26E+06	59,55	1,08
21,3°	0,1	3,05E+05	71,2	0,04
	1	2,13E+06	64,36	0,35
	5	3,30E+06	62,85	0,58
	10	4,55E+06	61,38	0,86
	25	4,98E+06	60,43	0,98
39,2°	0,1	5236	83,38	0,001
	1	48830	76,27	0,006
	5	2,13E+05	73,05	0,026





Grafica 13: Grafica Viscosidad Vs Frecuencia - Temp (13,2 – 21,3 y 39,2 °C)

### Agregados

Con relación a los agregados para poder aplicar la ecuación de Witzack es necesario contar con la información granulométrica para la obtención de los modulos dinámicos, como se muestra a continuación:

Tabla 6: Información granulométrica mezclas asfálticas a analizar

Sieve size	Sieve size (mm)	% Passing	
		Coarse aggregate	Fine aggregate
Aggregate gradation %			
1 1/2 in	37,5	100	
1 in	25	100	
3/4 in	19	100	
1/2 in	12,5	94	
3/8 in	9,5	86,3	
#4	4,75		68,2
#8	2,36		49,2
#16	1,18		38,4
#30	0,6		27,8
#50	0,3		15
#100	0,15		6,7
#200	0,075		4,5

Como ya se definió anteriormente, la información granulométrica con la cual se desarrollaron las diferentes mezclas asfálticas, tanto las desarrolladas a partir de agregados convencionales como

en las que se reemplazó dicho agregado con RCA en diferentes porcentajes de reemplazo es la misma.

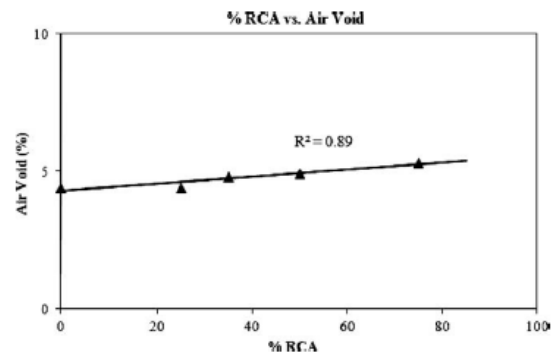
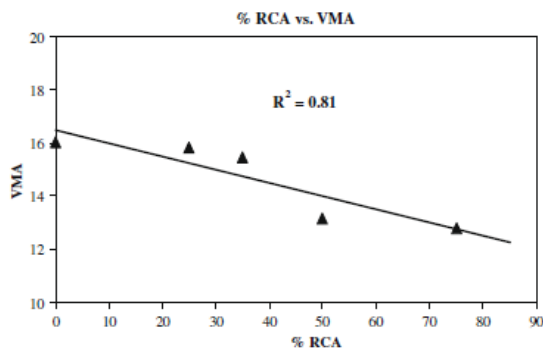
### Mezcla Asfáltica

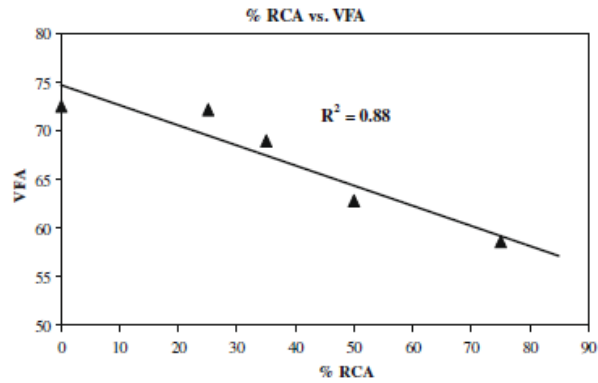
A partir de la investigación realizada por (Mills-Beale, 2010) se obtuvieron datos relevantes de las características volumétricas de las mezclas desarrolladas con reemplazo de Agregado convencional por RCA y de la mezcla asfáltica de control que se desarrolló únicamente con agregado convencional con el de establecer un comparativo.

Tabla 7: Composición RCA mezclas asfálticas

VA-RCA aggregate contributions	
Virgin aggregates (%)	RCA aggregates (%)
75	25
65	35
50	50
25	75

De otra parte, se llevó a cabo un análisis volumétrico a partir de la metodología Superpave con el cual se logró determinar características como los vacíos de aire, vacíos en el agregado y vacíos llenos de asfalto, tal y como se muestra a continuación:





Grafica 14: Información volumétrica de las mezclas - (Mills-Beale, 2010)

A partir de la información volumétrica obtenida del estudio realizado por (Mills-Beale, 2010) es posible obtener el volumen de asfalto efectivo a partir del volumen de vacíos en el agregado VMA y el contenido de asfalto VFA

$$VAM(\%) = Va + Vb \quad (4)$$

$$VFA = \frac{Vb}{VAM} * 100 \quad (5)$$

Tabla 8: Información volumétrica de las mezclas - (Mills-Beale, 2010)

% RCA	Va	VMA	VFA	Vasf
0	4%	16%	73%	12%
25	4%	16%	72%	11%
35	5%	16%	69%	11%
50	5%	13%	63%	8%
75	5%	13%	59%	7%

## 6. RESULTADOS

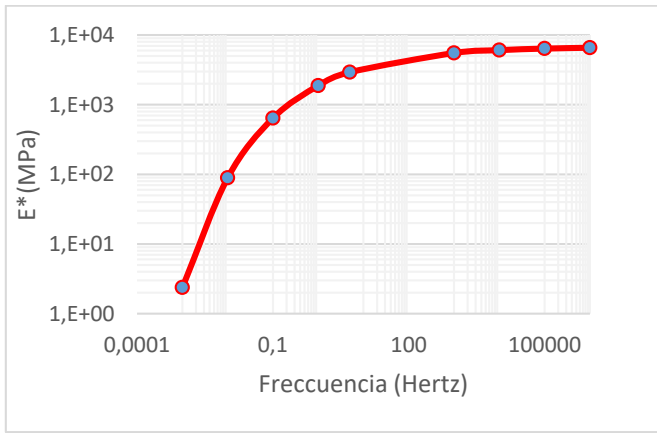
Una vez se han ajustado la totalidad de los datos al modelo de Witzack, procedemos a realizar el cálculo de los módulos dinámicos  $E^*$  para cada una de las mezclas asfálticas con reemplazo de RCA (0%, 25%, 35%, 50% y 75%) y para los rangos de temperatura (13,2 – 21,3 y 39,2)°C y Frecuencias (0,1 – 1 – 5 – 10 y 25) Hz en los cuales tiene aplicabilidad la ecuación (2).

Aplicando la fórmula del modelo de Witzack y teniendo claridad sobre cada uno de los datos requeridos (Información granulométrica, volumétrica, viscosidades del asfalto para los rangos definidos de temperatura y frecuencia de carga) obtenemos los datos de módulos dinámicos  $E^*$  que se presenta a continuación:

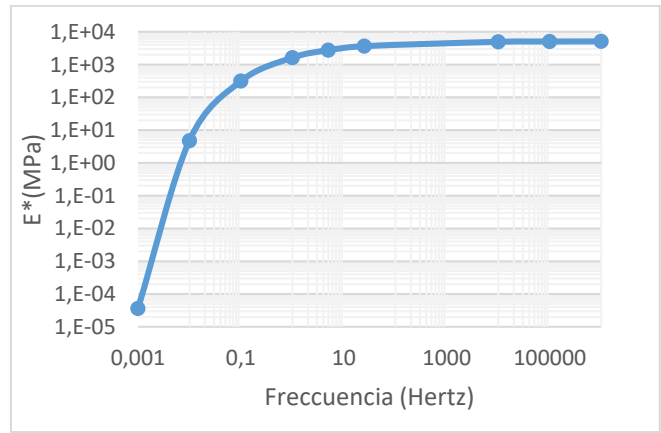
Tabla 9: Calculo de Modulo dinámico E\* a partir de la ecuación de Witzack

T (°C)	f (Hz)	RCA 25%			RCA 35%			RCA 50%			RCA 75%			RCA 0%		
		Log E*	E* (psi)	E* (MPa)	Log E*	E* (psi)	E* (MPa)	Log E*	E* (psi)	E* (MPa)	Log E*	E* (psi)	E* (MPa)	Log E*	E* (psi)	E* (MPa)
13,2°	0,1	5,36	228542,82	1575,75	5,38	237890,66	1640,20	5,44	273355,54	1884,72	5,47	292746,29	2018,41	5,34	219358,65	1512,42
	1	5,67	467021,58	3220,00	5,69	486123,66	3351,70	5,75	558595,26	3851,38	5,78	598219,79	4124,58	5,65	448253,96	3090,60
	5	5,86	727519,50	5016,07	5,88	757276,45	5221,24	5,94	870171,67	5999,62	5,97	931898,19	6425,21	5,84	698283,58	4814,50
	10	5,94	876529,63	6043,46	5,96	912381,39	6290,65	6,02	1048399,74	7228,46	6,05	1122769,04	7741,22	5,92	841305,63	5800,60
	25	6,04	1099367,14	7579,87	6,06	1144333,39	7889,90	6,12	1314931,28	9066,13	6,15	1408207,27	9709,25	6,02	1055188,25	7275,27
21,3°	0,1	4,85	71475,82	492,81	4,87	74399,32	512,97	4,93	85490,82	589,44	4,96	91555,19	631,25	4,84	68603,51	473,00
	1	5,51	323988,77	2233,82	5,53	337240,54	2325,19	5,59	387516,55	2671,83	5,62	415005,44	2861,36	5,49	310969,04	2144,06
	5	5,78	605470,64	4174,57	5,80	630235,56	4345,32	5,86	724191,45	4993,12	5,89	775562,70	5347,32	5,76	581139,35	4006,81
	10	5,91	820968,75	5660,38	5,93	854547,96	5891,90	5,99	981944,47	6770,27	6,02	1051599,70	7250,53	5,90	787977,50	5432,91
	25	6,03	1068334,63	7365,91	6,05	1112031,58	7667,19	6,11	1277813,90	8810,22	6,14	1368456,93	9435,18	6,01	1025402,80	7069,90
39,2°	0,1	4,21	16370,51	112,87	4,23	17040,09	117,49	4,29	19580,44	135,00	4,32	20969,40	144,58	4,20	15712,65	108,33
	1	4,83	68241,05	470,51	4,85	71032,25	489,75	4,91	81621,77	562,76	4,94	87411,70	602,68	4,82	65498,74	451,60
	5	5,30	199272,03	1373,93	5,32	207422,64	1430,13	5,38	238345,33	1643,33	5,41	255252,60	1759,90	5,28	191264,13	1318,72
	10	5,46	287325,28	1981,04	5,48	299077,44	2062,07	5,54	343664,08	2369,48	5,57	368042,24	2537,56	5,44	275778,90	1901,43
	25	5,77	587279,39	4049,15	5,79	611300,25	4214,77	5,85	702433,25	4843,11	5,88	752261,07	5186,66	5,75	563679,13	3886,43

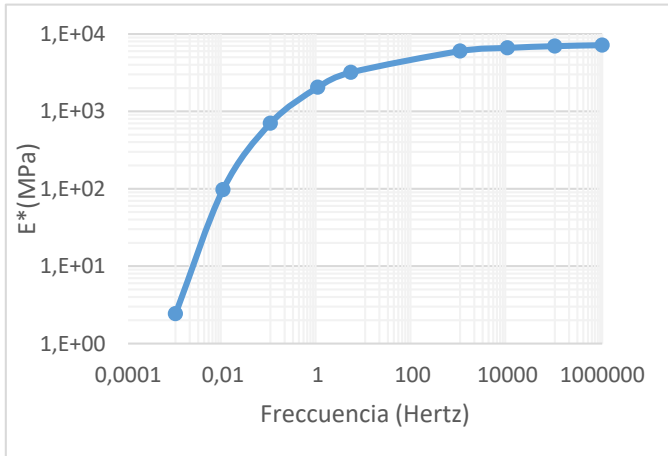
A partir de la información obtenida de los módulos dinámicos para diferentes condiciones de temperatura y frecuencia de carga, se procedió con la construcción de las curvas maestras para cada una de las mezclas asfálticas obtenidas a partir del reemplazo de agregado convencional por RCA en las siguientes proporciones (25%, 35%, 50% y 75%) RCA.



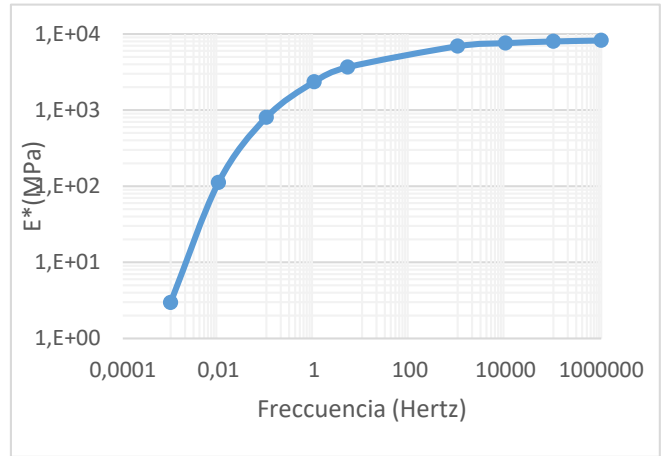
Grafica 15: Curva Maestra MDC - 0%RCA



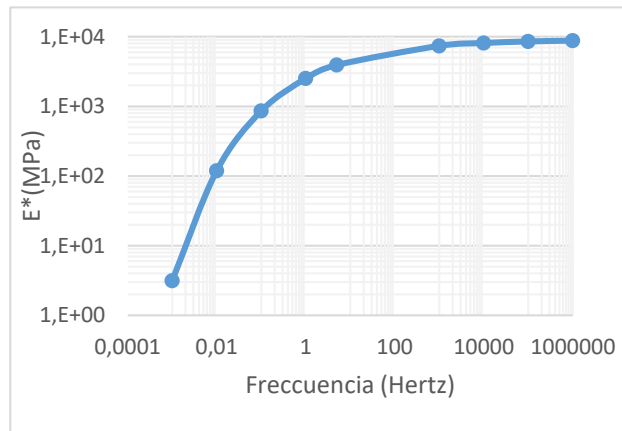
Grafica 16: Curva Maestra MDC - 25%RCA



Grafica 17: Curva Maestra MDC - 35%RCA



Grafica 18: Curva Maestra MDC - 50%RCA



Gráfica 19: Curva Maestra MDC - 75%RCA

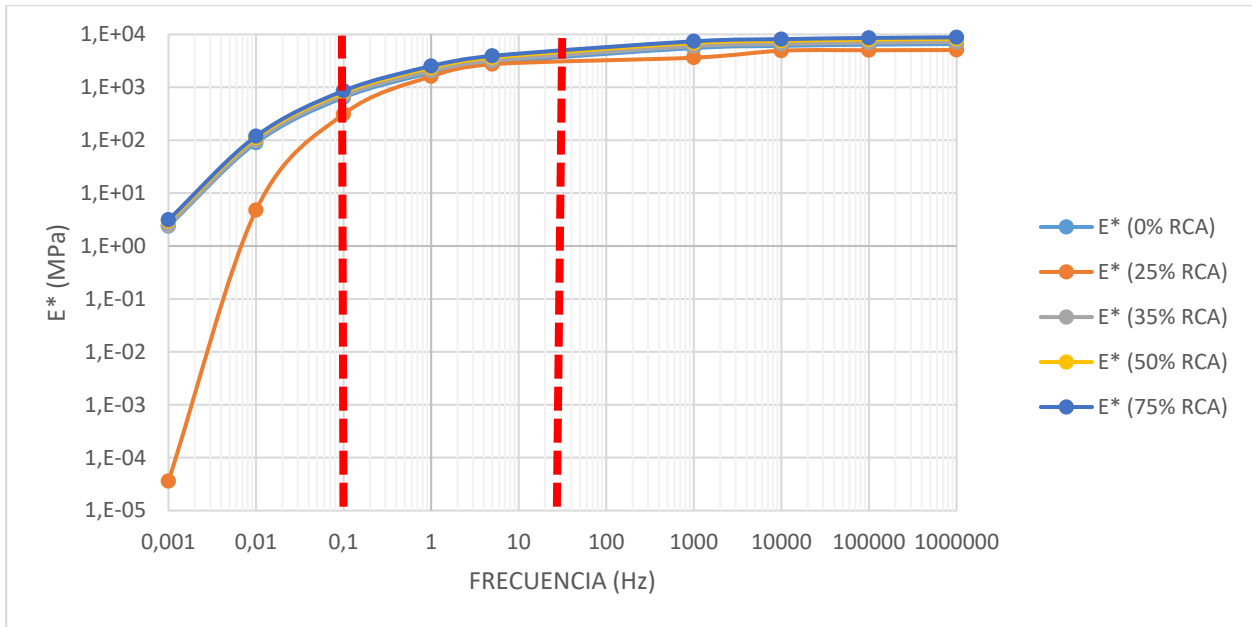
Finalmente, procedemos a realizar un análisis comparativo entre los resultados obtenidos a partir del modelo desarrollado con la ecuación de Witzack y los resultados experimentales obtenidos en el estudio realizado por (Mills-Beale, 2010), el cual se presenta a continuación.

### 6.1. FASE 3: ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE LOS RESULTADOS

De acuerdo con los resultados obtenidos a partir de la ecuación de Witzack para calcular los módulos dinámicos de mezclas asfálticas que utilizan RCA como reemplazo de agregado convencional en diferentes proporciones (0%, 25%, 35%, 50% y 75%), los cuales se presentaron en el capítulo 6. anterior, se presenta una gráfica comparativa de las curvas maestras cada una de las mezclas asfálticas analizadas.

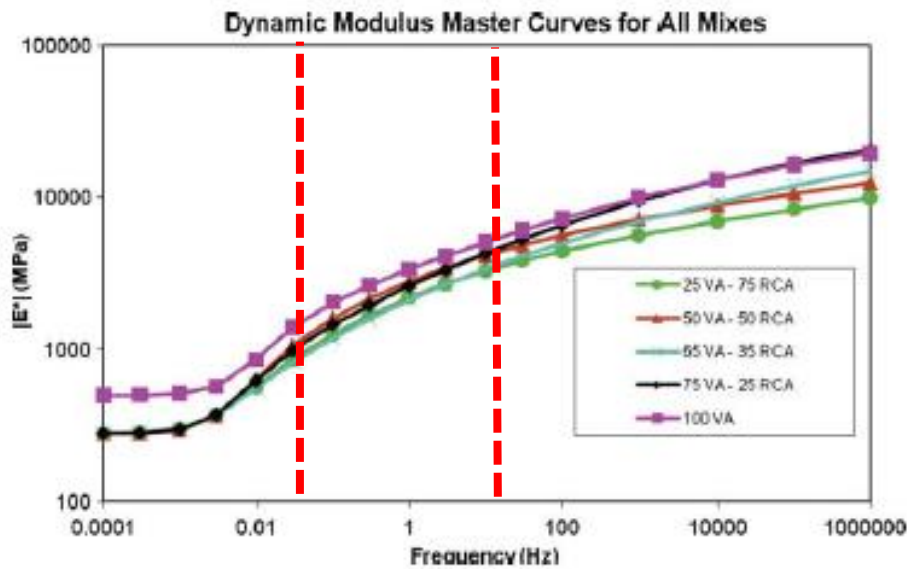
Es importante tener en cuenta que la ecuación de Witzack es empleada para obtener el módulo dinámico de una mezcla asfáltica para un rango de temperatura que varía entre (-17,7 y 54,4 °C), y frecuencias de carga que oscilan entre (0,1 - 25 Hz) teniendo en cuenta escenarios de envejecimiento con información disponible de las especificaciones de materiales o características volumétricas de la mezcla.

Es por ello que para efectos de la comparación de los resultados se tendrá en cuenta el rango de frecuencia de cargas (0,1 a 25 Hz) ya que es en este rango en el cual tiene aplicabilidad la fórmula de Witzack.



Gráfica 20: Curvas maestras  $E^*$  para todas las mezclas RCA - obtenidas a partir de la fórmula de Witzack

A continuación, se presenta los resultados experimentales obtenidos en el estudio realizado por (Mills-Beale, 2010):



Gráfica 21: Curvas maestras  $E^*$  para todas las mezclas RCA – (Mills-Beale, 2010)

Tal y como se logra observar tanto en los resultados obtenidos a partir de la ecuación de Witzack como en los resultados experimentales, la tendencia que se muestra en las gráficas es similar ya que en ambos casos la mezcla que utiliza un 25% de RCA es la que presenta el peor desempeño mecánico toda vez que en todo el espectro de repeticiones de carga (0,1 a 25 Hz) es la mezcla que



presenta módulos dinámicos desde los 311MPa para una frecuencia de 0,1 Hz que corresponde a una velocidad aproximada de 10Km/h hasta 3160 MPa para una frecuencia de 10 Hz que corresponde a una velocidad aproximada de 70Km/h.

De igual manera la tendencia que se presenta en los resultados experimentales con relación al decrecimiento del módulo dinámico a medida que aumenta el porcentaje de utilización del RCA, se presenta en los resultados obtenidos a partir del modelo desarrollado con la ecuación de Witzack.

El módulo dinámico resultante de la utilización de la ecuación de Witzack para frecuencias de carga inferiores a 0,1 Hz presentan una distorsión importante frente a los resultados experimentales, dicha distorsión obedece a la limitación con la que cuenta la utilización de la ecuación de Witzack en frecuencias que se encuentran por fuera de su rango de aplicación (0,1 a 25 Hz).

Por lo anterior, es posible afirmar que la ecuación de Witzack puede ser utilizada para la obtención de módulos dinámicos de mezclas asfálticas producidas a partir del reemplazo de agregado convencional por RCA (Recycle Concrete Aggregate) teniendo en cuenta la aproximación resultante entre los resultados obtenidos de manera experimental y los obtenidos a partir de un modelo generado a partir de la utilización de esta fórmula siempre y cuando se realice en temperaturas que oscilen entre (-17,7 - 54,4 °C) y frecuencias de aplicación de carga que varían entre (0,1 - 25 Hz).

En cuanto al uso de RCA para la fabricación de mezclas asfálticas, es posible recomendar su utilización en porcentajes de reemplazo cercanos al 35%, toda vez que su afectación al comportamiento mecánico no es tan significativo como lo es en mezclas con porcentajes de reemplazo del 25%, de otra parte debido a la importante disminución al módulo dinámico sería recomendable también usarse en vías de bajo tráfico o en capas granulares donde deberán realizarse los ensayos necesarios para garantizar su utilización.

## **6.2. ALCANCES Y LIMITACIONES**

Tal y como se mencionó, la presente investigación tiene como objetivo principal predecir los resultados de modulo dinámico en mezclas asfálticas que implementan el reemplazo de agregados convencionales con RCA, por lo que la recopilación de información necesaria para la presente investigación debe incluir información volumétrica y granulométrica de este tipo de mezclas asfálticas, información que es bastante limitada ya que aunque existen una serie de investigaciones relacionadas con la implementación del uso de RCA en mezclas asfálticas, son muy pocas en las que se desarrollaron ensayos de modulo dinámico para poder comparar los resultados de nuestro modelo matemático con los resultados de ensayos de laboratorio con mezclas de este tipo.

De igual forma, como resultado de las medidas tomadas en nuestro país por la emergencia sanitaria decretada por el covid-19, la principal limitación del presente estudio está relacionada con la dificultad en la realización de ensayos de laboratorio que permitan contrastar los resultados de un modelo matemático con el desempeño en laboratorio de las mezclas asfálticas producidas con RCA, debido a la influencia que podría tener en los resultados la utilización de diferentes materiales.

Esta investigación está enfocada en el estudio del comportamiento de la fracción gruesa del RCA como reemplazo de agregado convencional en la fabricación de mezclas MDC y podría plantearse como punto de partida para otras investigaciones como, por ejemplo: Análisis de ahuellamiento en MDC con reemplazo de RCA o estudio de la fracción fina de RCA como reemplazo de distintas tipologías de mezclas asfálticas.

## 7. CONCLUSIONES

- Tanto en los resultados obtenidos a partir de la ecuación de Witzack como en los resultados experimentales, la tendencia que se muestra en las gráficas es similar ya que en ambos casos la mezcla que utiliza un 25% de RCA es la que presenta el peor desempeño mecánico toda vez que en todo el espectro de repeticiones de carga (0,1 a 25 Hz) es la mezcla que presenta módulos dinámicos desde los 311MPa para una frecuencia de 0,1 Hz que corresponde a una velocidad aproximada de 10Km/h hasta 3160 MPa para una frecuencia de 10 Hz que corresponde a una velocidad aproximada de 70Km/h.
- De igual manera la tendencia que se presenta en los resultados experimentales con relación al decrecimiento del módulo dinámico a medida que aumenta el porcentaje de utilización del RCA, se presenta en los resultados obtenidos a partir del modelo desarrollado con la ecuación de Witzack.
- El módulo dinámico resultante de la utilización de la ecuación de Witzack para frecuencias de carga inferiores a 0,1 Hz presentan una distorsión importante frente a los resultados experimentales, dicha distorsión obedece a la limitación con la que cuenta la utilización de la ecuación de Witzack en frecuencias que se encuentran por fuera de su rango de aplicación (0,1 a 25 Hz).
- Es posible afirmar que la ecuación de Witzack puede ser utilizada para la predicción de módulos dinámicos de mezclas asfálticas producidas a partir del reemplazo de agregado convencional por RCA (Recycle Concrete Aggregate) teniendo en cuenta la aproximación resultante entre los resultados obtenidos de manera experimental y los obtenidos a partir de un modelo generado a partir de la utilización de esta fórmula siempre y cuando se realice en un rango de temperaturas (-17,7 a 54,4 °C) y frecuencia de cargas (0,1 a 25 Hz).
- En cuanto al uso de RCA para la fabricación de mezclas asfálticas, es posible recomendar su utilización en porcentajes de reemplazo cercanos al 35%, toda vez que su afectación al comportamiento mecánico no es tan significativo como lo es en mezclas con porcentajes de reemplazo del 25%, de otra parte debido a la importante disminución al módulo dinámico sería recomendable también usarse en vías de bajo tráfico o en capas granulares donde deberán realizarse los ensayos necesarios para garantizar su utilización.
- Se logra evidenciar que el volumen de asfalto efectivo a partir del volumen de vacíos en el agregado VMA y el contenido de asfalto VFA disminuye a medida que aumenta el porcentaje de remplazo de RCA en la fabricación de mezclas asfáltica.

## REFERENCIAS

- A.R. Pasandín & I. Pérez “Laboratory evaluation of hot-mix asphalt containing construction and demolition waste” Universidad da Coruña, E.T.S.I. Caminos, Canales y Puertos, A Coruña, España; 2017
- Julian Mills-Beale. “The mechanical properties of asphalt mixtures with Recycled Concrete Aggregates” , Department of Civil and Environmental Engineering, Michigan Technological University, Houghton, Michigan 49931-1295, United States; 2010
- Motter J., Rosembach L & Bariani L.. “Performance of Hot Mix Asphalt Concrete Produced with Coarse Recycled Concrete Aggregate”, Ph.D.2; American Society of Civil Engineers, New York, NY, USA, 2015.
- Radevic A., Isailovic I., Wistuba M., Zakic D., Oreškovic M. & Mladenovic´ G. “The Impact of Recycled Concrete Aggregate on the Stiffness, Fatigue, and Low-Temperature Performance of Asphalt Mixtures for Road Construction”; Faculty of Civil Engineering, University of Belgrade; 2020.
- Nwakaire C., Poh S., Yuen C., Onn C., Koting S. & Babalghaith M. “Laboratory study on recycled concrete aggregate based asphalt mixtures for sustainable flexible pavement surfacing”, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Malaya, Malasia; 2020
- Gian Andrea Blengini,& Elena Garbarino “Gestión de recursos y residuos en Turín (Italia): el papel de los áridos reciclados en el mix de suministro sostenible”, Universidad Politecnica de Turín – Italia; 2010.
- Shi-Cong Kou, Chi-Sun Poon. “Properties of concrete prepared with PVAimpregnated recycled concrete aggregates”. Cement & Concrete Composites (2010).
- Iqbal Marie & Hisham Qasrawi. “Closed-loop recycling of recycled concrete aggregates”. Journal of cleaner production. Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, The Hashemite University, Zarka, Jordan (2012)
- Bacca, I. y Piragauta, A. (2015) Análisis dinámico de una mezcla densa en caliente tipo 2 (MDC19) modificada con desechos de caucho-cuero provenientes de una remontadora de calzado - cemento asfáltico 60-70 y agregado de peña. Bogotá: Universidad Católica de Colombia, Facultad de Ingeniería.
- ASOPAC (2004) Cartilla del pavimento asfáltico. Bogotá D. C.: Asociación de Productores y Pavimentadores Asfálticos de Colombia.
- Bastidas, Juan Gabriel & Rondón, Hugo Alexander (2020). Caracterización de Mezclas de Concreto asfáltico. Universidad Piloto de Colombia. Bogotá (Colombia).
- Especificaciones técnicas generales de materiales y construcción, para proyectos de infraestructura vial y de espacio público, para Bogotá D.C. - 2018 <https://www.idu.gov.co/page/especificaciones-tecnicas-generales-de-materiales>
- Especificaciones técnicas para construcción de carreteras INVIAS- 2013 - <https://www.invias.gov.co/index.php/normativa/documentos-tecnicos1>
- Ramirez J. & Caro S. “Construcción Sostenible de Pavimentos: concreto reciclado y mezclas asfálticas tibias”; Universidad de los Andes; Bogotá Colombia; 2013

- Romero S. & Rodríguez C. & Espinos L.. “Estudio del impacto de la inclusión de los agregados reciclados de concreto en las propiedades mecánicas e hidráulicas de una mezcla drenante” Universidad Católica de Colombia; Bogotá Colombia; 2019
- SABHNAN, Priyanka Sunil y MOHANAN, Vidya P., Feasibility of recycled concrete in pavements with demolished building waste in UAE. International Journal of Recent Technology and Engineering, 2019. vol. 8, no. 3, p. 5773-5778. ISSN 22773878. DOI 10.35940/ijrte.B3329.098319.
- CASTAÑO, Jesús, MISLE, Rodrigo, LASSO, Leonardo, GOMEZ, Adriana, OCAMPO, Manuel. Gestión de residuos de construcción y demolición (RCD) en Bogotá: Perspectivas y limitantes. Tecnura. Vol. 17. No 38. P 121-129. Octubre – Diciembre de 2013.
- Valdez, V. (2017). EL AGUA PARA CONSTRUCCION. [online] Academia.edu. Available at: [https://www.academia.edu/8929938/EL\\_AGUA\\_PARA\\_CONSTRUCCION?auto=download](https://www.academia.edu/8929938/EL_AGUA_PARA_CONSTRUCCION?auto=download) [Accessed 23 Nov. 2017].
- Camacho, J. y Reyes, O. (2006). Influencia de la Temperatura y Nivel de Energía de Compactación en las Propiedades Dinámicas de una mezcla Asfáltica. Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia.

## **ANEXOS**

ANEXO 1

CURVA MAESTRA RCA – 25%

Frecuencia (Hz)	13,2	21,3	39,2
-1	3,1974866	2,69267816	2,052581
0	3,5078559	3,34904896	2,672565
0,69897	3,7003636	3,62061209	3,137965
1	3,7812856	3,75284563	3,296893
1,39794001	3,8796618	3,86722631	3,607364

Shift Factor (a)
------------------

Frecuencia reducida (Hz)		
13,2	21,3	39,2
5000	1	0,5
500	0,1	0,05
5000	1	0,5
25000	5	2,5
50000	10	5
125000	25	12,5

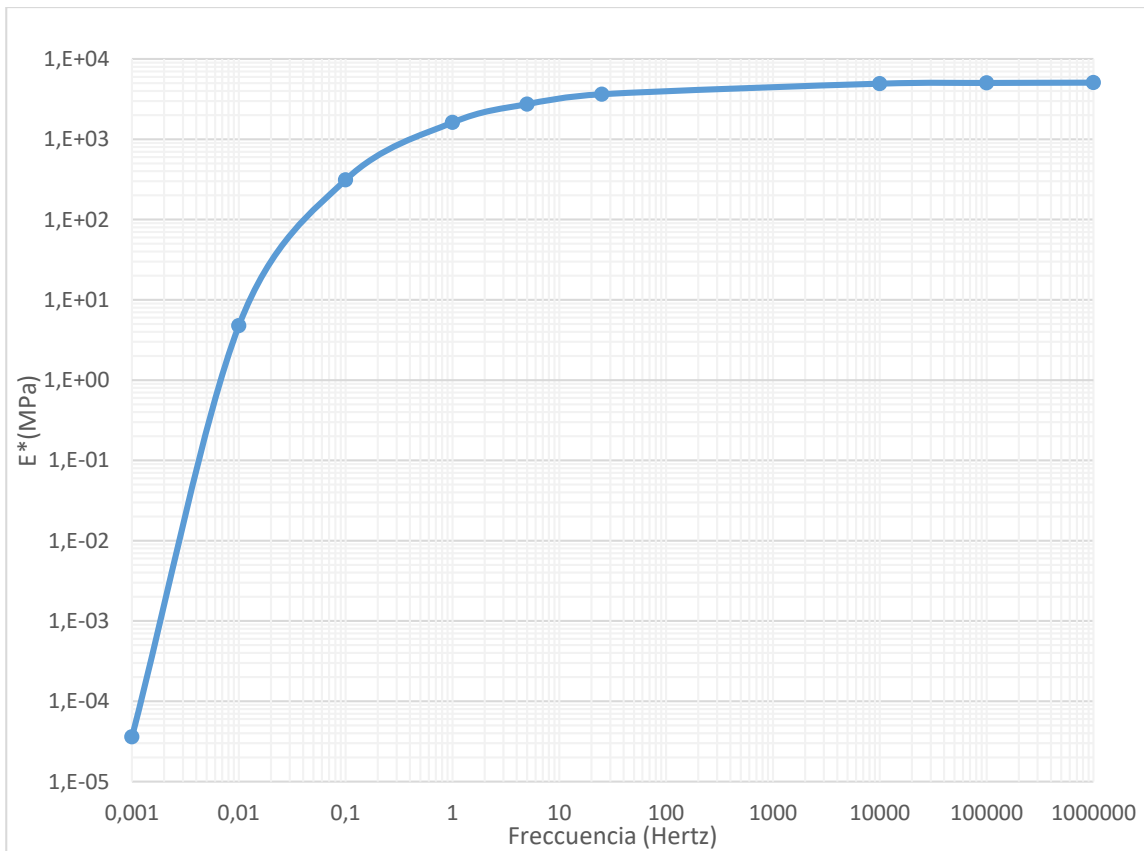
Frecuencia (Hz)	Temperatura °C		
	13,2	21,3	39,2
0,1	1575,74732	492,808465	112,870682
1	3220,00056	2233,82403	470,505528
5	5016,07058	4174,57328	1373,93235
10	6043,45931	5660,38052	1981,03814
25	7579,86995	7365,90828	4049,14902

Ecuacion de Witzack							Modelo matematico						Error		
F (Hz)	E*			Log (E*)			Frecuencias reducidas (Wr) Hz			Log (E*) Hz			Error		
	Temperatura °C			Temperatura °C			Temperatura °C			Temperatura °C			Temperatura °C		
	13,2	21,3	39,2	13,2	21,3	39,2	13,2	21,3	39,2	13,2	21,3	39,2	13,2	21,3	39,2
0,1	1575,75	492,81	112,87	3,20	2,69	2,05	500,00	0,10	0,05	3,66	2,49	2,12	0,21	0,04	0,00
1	3220,00	2233,82	470,51	3,51	3,35	2,67	5000,00	1,00	0,50	3,69	3,21	3,06	0,03	0,02	0,15
5	5016,07	4174,57	1373,93	3,70	3,62	3,14	25000,00	5,00	2,50	3,70	3,44	3,36	0,00	0,03	0,05
10	6043,46	5660,38	1981,04	3,78	3,75	3,30	50000,00	10,00	5,00	3,70	3,50	3,44	0,01	0,06	0,02
25	7579,87	7365,91	4049,15	3,88	3,87	3,61	125000,00	25,00	12,50	3,70	3,56	3,52	0,03	0,09	0,01
													0,28	0,25	0,23
													0,76		

Delta	3,70768797
Alfa	36,8690905
Beta	4,31473688
Gama	0,86860111

$$\text{Log } |G^*| = \delta + \frac{\alpha}{1 + \exp(\beta - \gamma \cdot \text{Log}(\omega_r))}$$

curva maestra RCA 25%		
frecuencias (Hz)	Log E*	E*
0,001	-4,44	0,00
0,01	0,68	4,75
0,1	2,49	311,92
1	3,21	1614,60
5	3,44	2735,93
25	3,56	3636,92
10000	3,69	4925,04
100000	3,70	5026,66
1000000	3,70	5069,90



*Curva Maestra MDC - 25%RCA*



ANEXO 2

CURVA MAESTRA RCA – 35%

Frecuencia (Hz)	13,2	21,3	39,2
-1	3,21489639	2,71008797	2,06999097
0	3,52526576	3,36645877	2,68997455
0,69897	3,71777345	3,63802191	3,15537516
1	3,79869542	3,77025544	3,31430265
1,39794001	3,89707157	3,88463612	3,62477358

Shift Factor (a)
------------------

Frecuencia reducida (Hz)		
13,2	21,3	39,2
250	1	0,1
25	0,1	0,01
250	1	0,1
25000	5	1250
2500	10	1
6250	25	2,5

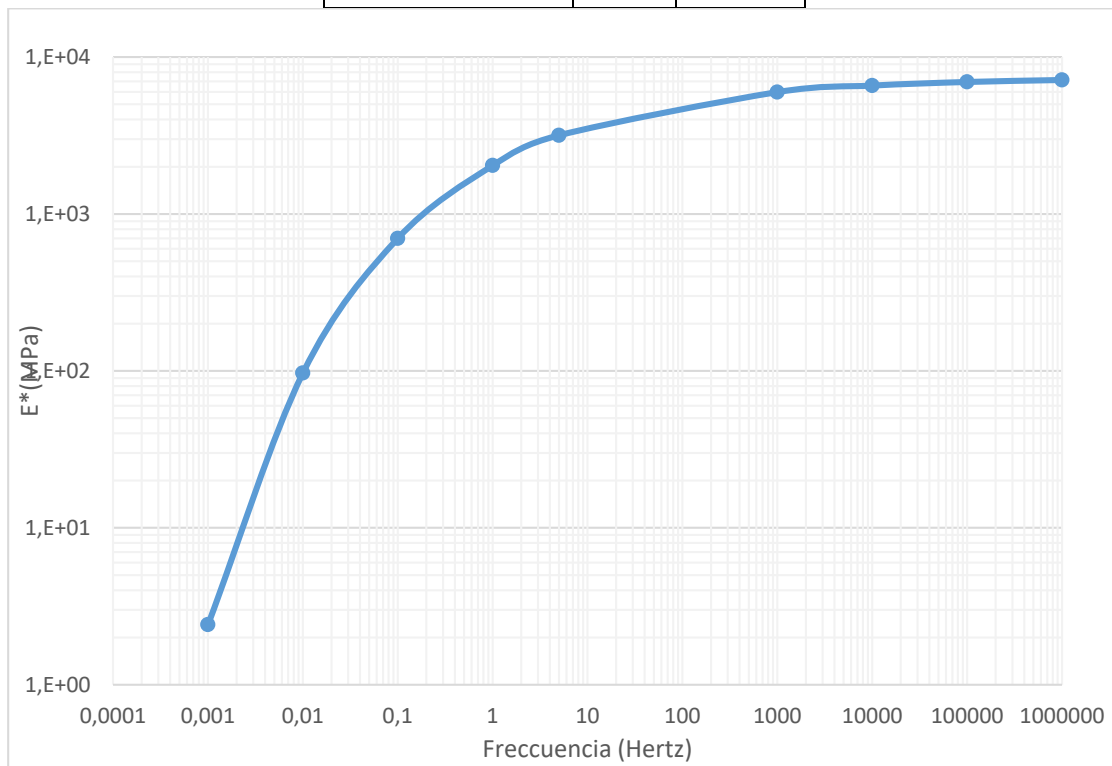
Frecuencia (Hz)	Temperatura °C		
	13,2	21,3	39,2
0,1	1640,19843	512,965285	117,487311
1	3351,70482	2325,19176	489,750115
5	5221,23757	4345,32141	1430,12884
10	6290,64849	5891,90104	2062,06643
25	7889,90131	7667,18819	4214,76705

Ecuacion de Witzack							Modelo matematico									
F (Hz)	E*			Log (E*)			Frecuencias reducidas (Wr) Hz			Log (E*) Hz			Error			
	Temperatura °C			Temperatura °C			Temperatura °C			Temperatura °C			Temperatura °C			
	13,2	21,3	39,2	13,2	21,3	39,2	13,2	21,3	39,2	13,2	21,3	39,2	13,2	21,3	39,2	
0,1	1640,2	513,0	117,5	3,2	2,7	2,1	25,0	0,1	0,0	3,6	2,8	2,0	0,2	0,0	0,0	
1	3351,7	2325,2	489,8	3,5	3,4	2,7	250,0	1,0	0,1	3,7	3,3	2,8	0,0	0,0	0,0	
5	5221,2	4345,3	1430,1	3,7	3,6	3,2	1250,0	5,0	0,5	3,8	3,5	3,2	0,0	0,0	0,0	
10	6290,6	5891,9	2062,1	3,8	3,8	3,3	2500,0	10,0	1,0	3,8	3,6	3,3	0,0	0,0	0,0	
25	7889,9	7667,2	4214,8	3,9	3,9	3,6	6250,0	25,0	2,5	3,8	3,6	3,4	0,0	0,1	0,0	
												0,23	0,15	0,07		
												0,45				

Delta	3,86971116
Alfa	88,818594
Beta	5,07205352
Gama	0,59861709

$$\log |G^*| = \delta + \frac{\alpha}{1 + \exp(\beta - \gamma \cdot \log(\omega_r))}$$

curva maestra RCA 35%		
frecuencias (Hz)	Log E*	E*
0,001	0,38	2,42
0,01	1,99	97,03
0,1	2,84	699,47
1	3,31	2038,67
5	3,50	3174,94
1000	3,78	5986,67
10000	3,82	6590,00
100000	3,84	6946,82
1000000	3,85	7151,00



*Curva Maestra MDC - 35%RCA*

ANEXO 3

CURVA MAESTRA RCA – 50%

Frecuencia (Hz)	13,2	21,3	39,2
-1	3,27524688	2,77043846	2,13034145
0	3,58561625	3,42680926	2,75032503
0,69897	3,77812394	3,69837239	3,21572565
1	3,85904591	3,83060593	3,37465314
1,39794001	3,95742206	3,94498661	3,68512406

Shift Factor (a)
------------------

Frecuencia reducida (Hz)		
13,2	21,3	39,2
250	1	0,1
25	0,1	0,01
250	1	0,1
25000	5	1250
2500	10	1
6250	25	2,5

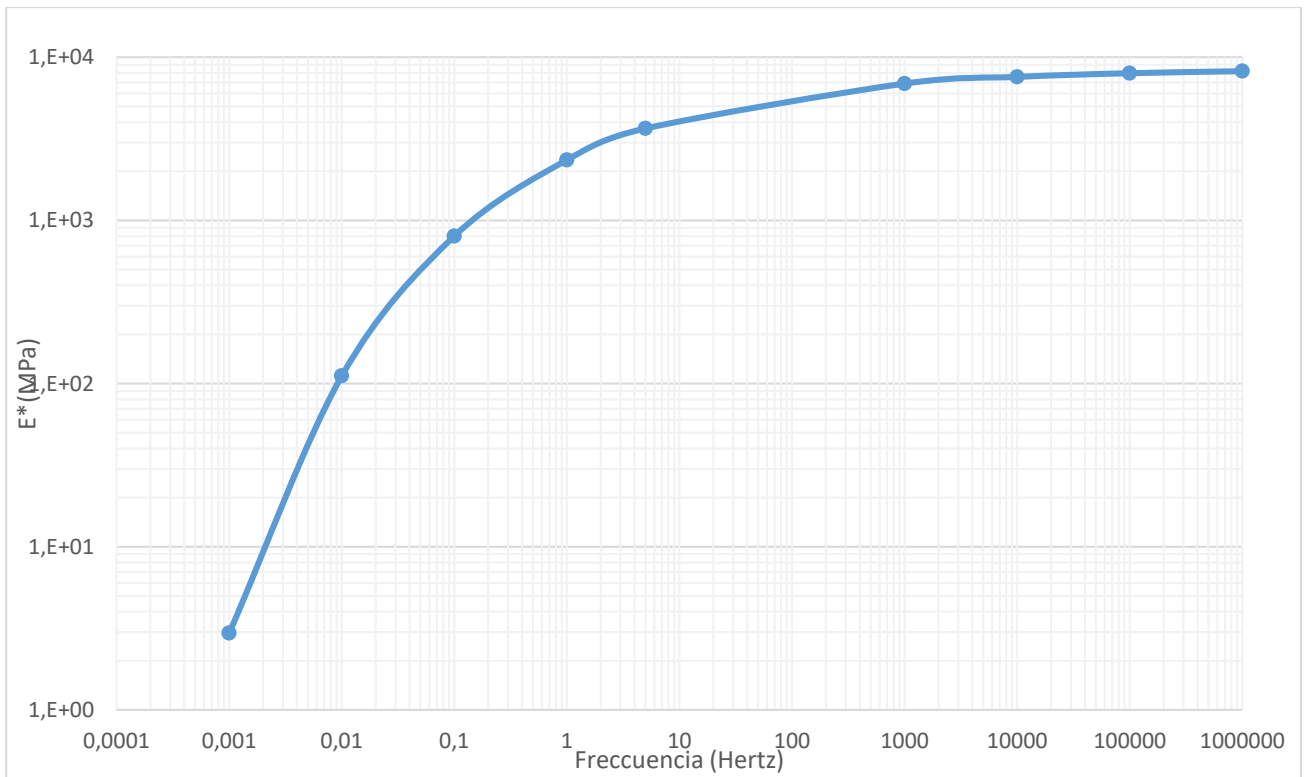
Frecuencia (Hz)	Temperatura °C		
	13,2	21,3	39,2
0,1	1884,72017	589,438449	135,002388
1	3851,37893	2671,8327	562,762349
5	5999,62272	4993,12446	1643,33328
10	7228,46205	6770,26909	2369,4805
25	9066,13241	8810,21709	4843,10699

Ecuacion de Witzack							Modelo matematico							Error		
F (Hz)	E*			Log (E*)			Frecuencias reducidas (Wr) Hz			Log (E*) Hz			Error			
	Temperatura °C			Temperatura °C			Temperatura °C			Temperatura °C			Temperatura °C			
	13,2	21,3	39,2	13,2	21,3	39,2	13,2	21,3	39,2	13,2	21,3	39,2	13,2	21,3	39,2	
0,1	1884,7	589,4	135,0	3,3	2,8	2,1	25,0	0,1	0,0	3,7	2,9	2,0	0,2	0,0	0,0	
1	3851,4	2671,8	562,8	3,6	3,4	2,8	250,0	1,0	0,1	3,8	3,4	2,9	0,0	0,0	0,0	
5	5999,6	4993,1	1643,3	3,8	3,7	3,2	1250,0	5,0	0,5	3,8	3,6	3,3	0,0	0,0	0,0	
10	7228,5	6770,3	2369,5	3,9	3,8	3,4	2500,0	10,0	1,0	3,9	3,6	3,4	0,0	0,0	0,0	
25	9066,1	8810,2	4843,1	4,0	3,9	3,7	6250,0	25,0	2,5	3,9	3,7	3,5	0,0	0,1	0,0	
												0,23	0,15	0,07		
												0,45				

Delta	3,92895535
Alfa	928,016096
Beta	7,41610668
Gama	0,60668651

$$\log |G^*| = \delta + \frac{\alpha}{1 + \exp(\beta - \gamma \cdot \log(\omega_r))}$$

curva maestra RCA 50%		
frecuencias (Hz)	Log E*	E*
0,001	0,47	2,96
0,01	2,05	111,41
0,1	2,90	801,52
1	3,37	2346,55
5	3,56	3660,49
1000	3,84	6894,63
10000	3,88	7579,69
100000	3,90	7981,38
1000000	3,91	8209,24



*Curva Maestra MDC - 50%RCA*

ANEXO 4

CURVA MAESTRA RCA – 75%

Frecuencia (Hz)	13,2	21,3	39,2
-1	3,30501041	2,80020199	2,16010498
0	3,61537978	3,45657279	2,78008856
0,69897	3,80788747	3,72813592	3,24548918
1	3,88880943	3,86036946	3,40441667
1,39794001	3,98718558	3,97475014	3,71488759

Shift Factor (a)
------------------

Frecuencia reducida (Hz)		
13,2	21,3	39,2
250	1	0,1
25	0,1	0,01
250	1	0,1
25000	5	1250
2500	10	1
6250	25	2,5

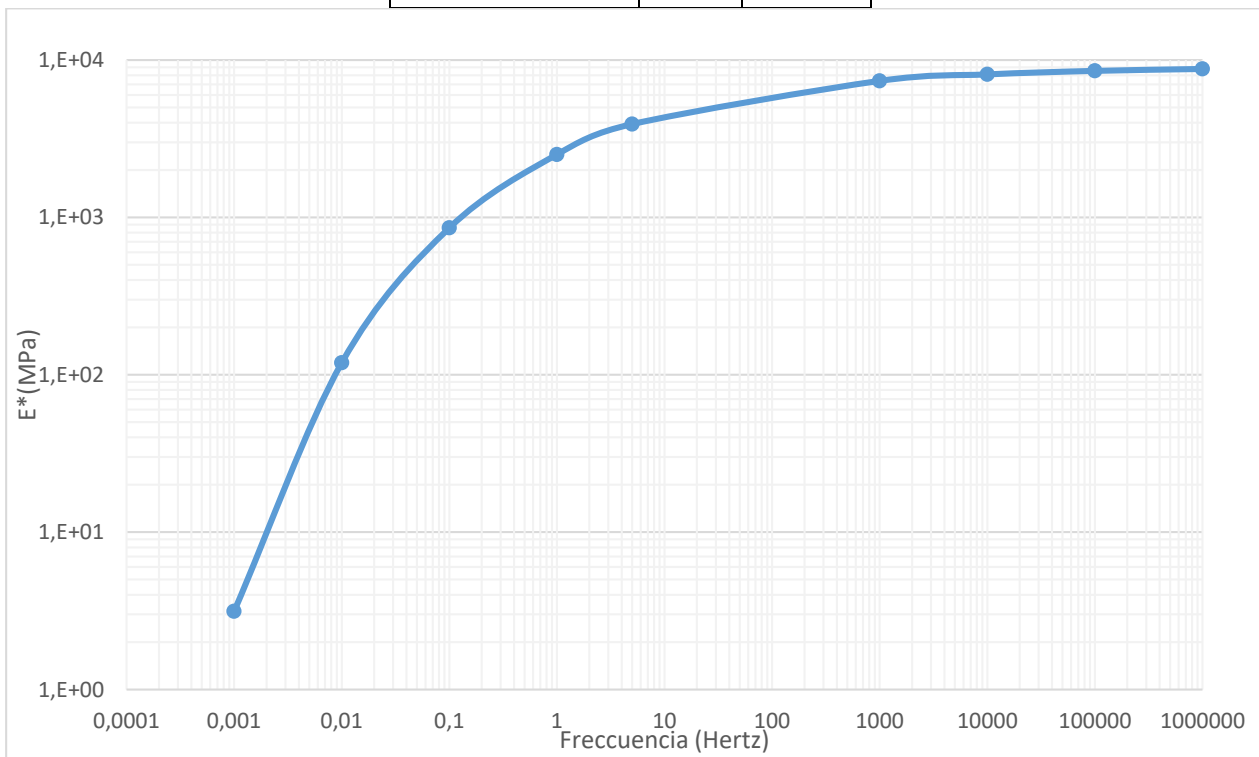
Frecuencia (Hz)	Temperatura °C		
	13,2	21,3	39,2
0,1	2018,41472	631,250868	144,578921
1	4124,58043	2861,36188	602,68247
5	6425,21209	5347,31685	1759,90481
10	7741,22038	7250,52504	2537,56202
25	9709,24777	9435,17884	5186,65773

Ecuacion de Witzack							Modelo matematico							Error		
F (Hz)	E*			Log (E*)			Frecuencias reducidas (Wr) Hz			Log (E*) Hz			Error			
	Temperatura °C			Temperatura °C			Temperatura °C			Temperatura °C			Temperatura °C			
	13,2	21,3	39,2	13,2	21,3	39,2	13,2	21,3	39,2	13,2	21,3	39,2	13,2	21,3	39,2	
0,1	2018,4	631,3	144,6	3,3	2,8	2,2	25,0	0,1	0,0	3,7	2,9	2,1	0,2	0,0	0,0	
1	4124,6	2861,4	602,7	3,6	3,5	2,8	250,0	1,0	0,1	3,8	3,4	2,9	0,0	0,0	0,0	
5	6425,2	5347,3	1759,9	3,8	3,7	3,2	1250,0	5,0	0,5	3,9	3,6	3,3	0,0	0,0	0,0	
10	7741,2	7250,5	2537,6	3,9	3,9	3,4	2500,0	10,0	1,0	3,9	3,7	3,4	0,0	0,0	0,0	
25	9709,2	9435,2	5186,7	4,0	4,0	3,7	6250,0	25,0	2,5	3,9	3,7	3,5	0,0	0,1	0,0	
													0,23	0,15	0,07	
													0,45			

Delta	3,95842087
Alfa	599,961152
Beta	6,98062299
Gama	0,60652797

$$\log |G^*| = \delta + \frac{\alpha}{1 + \exp(\beta - \gamma \cdot \log(\omega_r))}$$

curva maestra RCA 75%		
frecuencias (Hz)	Log E*	E*
0,001	0,50	3,14
0,01	2,08	119,19
0,1	2,93	858,31
1	3,40	2512,49
5	3,59	3918,70
1000	3,87	7378,91
10000	3,91	8111,83
100000	3,93	8541,62
1000000	3,94	8785,47



*Curva Maestra MDC - 75%RCA*

ANEXO 5

CURVA MAESTRA RCA – 0%

Frecuencia (Hz)	13,2	21,3	39,2
-1	3,17967377	2,67486535	2,03476834
0	3,49004314	3,33123615	2,65475192
0,69897	3,68255083	3,60279928	3,12015254
1	3,7634728	3,73503282	3,27908003
1,39794001	3,86184895	3,8494135	3,58955095

Shift Factor (a)
------------------

Frecuencia reducida (Hz)		
13,2	21,3	39,2
250	1	0,1
25	0,1	0,01
250	1	0,1
25000	5	1250
2500	10	1
6250	25	2,5

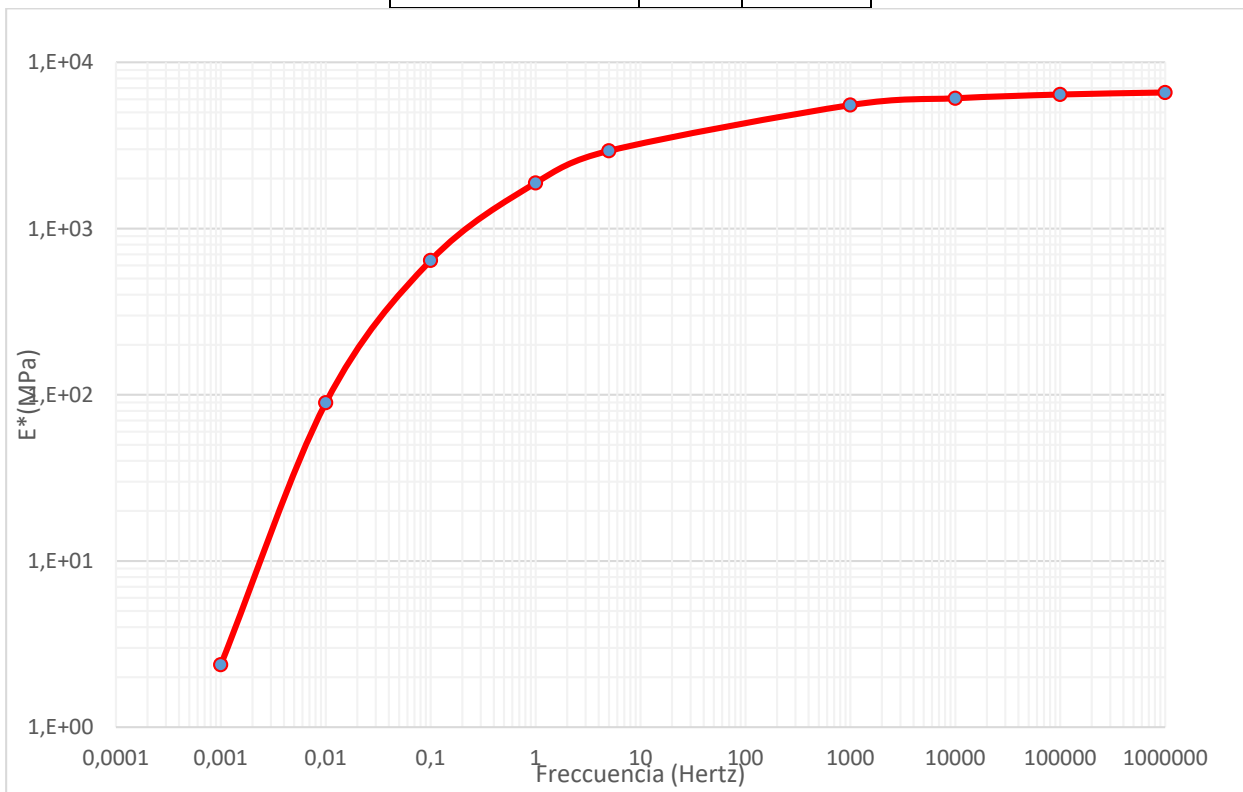
Frecuencia (Hz)	Temperatura °C		
	13,2	21,3	39,2
0,1	1512,42473	473,004587	108,334889
1	3090,60242	2144,05613	451,59791
5	4814,49601	4006,81492	1318,71984
10	5800,59836	5432,91388	1901,42863
25	7275,26719	7069,90373	3886,43093

Ecuacion de Witzack							Modelo matematico							Error		
F (Hz)	E*			Log (E*)			Frecuencias reducidas (Wr) Hz			Log (E*) Hz			Temperatura °C			
	Temperatura °C			Temperatura °C			Temperatura °C			Temperatura °C			Temperatura °C			
	13,2	21,3	39,2	13,2	21,3	39,2	13,2	21,3	39,2	13,2	21,3	39,2	13,2	21,3	39,2	
0,1	1512,4	473,0	108,3	3,2	2,7	2,0	25,0	0,1	0,0	3,6	2,8	2,0	0,2	0,0	0,0	
1	3090,6	2144,1	451,6	3,5	3,3	2,7	250,0	1,0	0,1	3,7	3,3	2,8	0,0	0,0	0,0	
5	4814,5	4006,8	1318,7	3,7	3,6	3,1	1250,0	5,0	0,5	3,7	3,5	3,2	0,0	0,0	0,0	
10	5800,6	5432,9	1901,4	3,8	3,7	3,3	2500,0	10,0	1,0	3,8	3,5	3,3	0,0	0,0	0,0	
25	7275,3	7069,9	3886,4	3,9	3,8	3,6	6250,0	25,0	2,5	3,8	3,6	3,4	0,0	0,1	0,0	
													0,23	0,15	0,07	
													0,45			

Delta	3,83344087
Alfa	607,053266
Beta	6,99130315
Gama	0,60584949

$$\text{Log } |G^*| = \delta + \frac{\alpha}{1 + \exp(\beta - \gamma \cdot \text{Log}(\omega_r))}$$

curva maestra RCA 0%		
frecuencias (Hz)	Log E*	E*
0,001	0,38	2,38
0,01	1,95	89,51
0,1	2,81	643,10
1	3,27	1881,61
5	3,47	2934,94
1000	3,74	5530,07
10000	3,78	6080,67
100000	3,81	6403,83
1000000	3,82	6587,33



*Curva Maestra MDC - 0%RCA*