

**MÓDELO MICROMECAÍNICO DE  $(n+1)$  FASE DE HERVÉ Y ZAOUÍ, EN LA  
PREDICCIÓN DE LA RIGIDEZ COMPLEJA DE MEZCLAS ARENA-ASFALTO**

**JOAN SEBASTIAN VILLAML RAMÍREZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL  
BUCARAMANGA**

**2018**

**MÓDELO MICROMECAÁNICO DE  $(n+1)$  FASE DE HERVÉ Y ZAOUI, EN LA  
PREDICCIÓN DE LA RIGIDEZ COMPLEJA DE MEZCLAS ARENA-ASFALTO**

**JOAN SEBASTIAN VILLAMIL RAMÍREZ**

**TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

**DIRECTOR**

**EDUARDO ALBERTO CASTAÑEDA PINZÓN  
INGENIERO CIVIL**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL  
BUCARAMANGA**

**2018**

## **DEDICATORIA**

A Dios por darme la posibilidad y capacidad de hacerme ingeniero civil

A mis Padres Clemente y Nelsy por su apoyo y amor incondicional

A los ingenieros Guillermo y Clara, y a toda la familia de PI S.A.S. por inculcar en mí el amor por la ingeniería Civil.

A mis amigos por ser fortaleza en mis debilidades y celebrar conmigo mis éxitos

A mis familiares por confiar mí y creer conmigo que sí es posible alcanzar las metas propuestas.

A Valeria y Luciana, porque hacerlas felices me motiva a superarme.

## **AGRADECIMIENTOS**

Al ingeniero Eduardo Castañeda Pinzón, a la ingeniera Hebenly Celis, a la ingeniera Sandra Cote, a Cesar Méndez, Leonardo Montañez, Wilman Ortiz, Efraín Carreño, Jean Paul Nova, William Alfonso y de manera especial a la empresa Pi SAS Proyectos de Ingeniería, a todos muchas gracias por su colaboración y apoyo.

## TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN .....	13
1. OBJETIVOS.....	14
1.1 OBJETIVO GENERAL .....	14
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	14
3. CUERPO DEL TRABAJO .....	15
3.1 MARCO REFERENCIAL.....	15
3.1.1 Modelo (n+1) Fase de Hervé y Zaoui.....	17
3.1.2 Ecuaciones del modelo .....	17
3.1.3 Módulo complejo.....	18
3.1.4 Materiales .....	20
3.1.4.1 Agregado fino.....	20
3.1.4.2 Asfalto .....	21
3.1.5 Fase Experimental .....	22
3.1.5.3 Mezcla.....	23
3.1.6 Ensayos de laboratorio .....	24
3.1.7 Resultados del laboratorio .....	26
3.1.8 Implementación del modelo (n+1) fase de Hervé y Zaoui.....	28
3.2 Análisis y Resultados.....	30
3.2.1 Módulo calculados Hervé y Zaoui .....	30
3.2.2 Ajuste del modelo .....	32
4. CONCLUSIONES .....	38
BIBLIOGRAFÍA.....	40
ANEXOS.....	42

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Gravedad específica Bulk arena de río .....	21
Tabla 2 Módulo complejo del Asfalto a Temperatura ambiente del laboratorio [21.4°C~21.5°C].....	22
Tabla 3 Relación de Probetas.....	24
Tabla 4 Valores de módulo complejo Hervé y Zaoui, Relación 3:1 .....	29
Tabla 5 Valores de módulo complejo Hervé y Zaoui, Relación 4.5:1 .....	29
Tabla 6 Valores de módulo complejo Hervé y Zaoui, Relación 5.5:1.....	30
Tabla 7 Valores de módulo complejo Hervé y Zaoui, Relación 6.5:1.....	30
Tabla 8 Coeficiente de poisson para diferentes frecuencias y volúmenes de arena.....	33
Tabla 9 Coeficiente Complejo de Poisson: Máximos y Mínimos .....	34
Tabla 10 Valores ajustados del módulo complejo.....	35
Tabla 11 Tabla 11 radios y porcentajes de agregados y bitumen según la densidad de la probeta para la frecuencia de ensayo de 30 Hz y relación arena/asfalto 6,5:1. ....	37
Tabla 12 Ajuste de valores de módulo dinámico para dos probetas de relación 6,5:1 y frecuencia de ensayo 30 Hz.....	37

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Representación de Volumen Elemental Representativo y Medio Homogéneo Equivalente.....	17
Figura 2 Representación gráfica del ángulo de fase.....	19
Figura 3 Montaje de una probeta en porta muestras del Analizador Dinámico Metravib. ....	25
Figura 4 Esquema de porta muestras superior ajustado a la probeta para ensayo a tensión-compresión. ....	26
Figura 5 Resultados módulo dinámico relación 3 gramos de arena – 1 de asfalto. ....	27
Figura 6 Resultados módulo dinámico relación 4.5 gramos de arena – 1 de asfalto. ....	27
Figura 7 Resultados módulo dinámico relación 5.5 gramos de arena – 1 de asfalto ....	28
Figura 8 Resultados módulo dinámico relación 6.5 gramos de arena – 1 de asfalto ....	28
Figura 9 Comparación valores experimentales y con Hervé y Zaoui, relación: 3:1 .....	31
Figura 10 Comparación valores experimentales y con Hervé y Zaoui, relación: 4.5:1 .....	31
Figura 11 Comparación valores experimentales y con Hervé y Zaoui, relación: 5.5:1 .....	31
Figura 12 Comparación valores experimentales y con Hervé y Zaoui, relación: 6.5:1 .....	32
Figura 13 Comportamiento Parte real promedio del coeficiente de Poisson del asfalto ante la frecuencia del ensayo.....	36
Figura 14 Comportamiento Parte imaginaria promedio del coeficiente de Poisson del asfalto ante la frecuencia del ensayo .....	36

## LISTA DE ANEXOS

<b>ANEXO A</b>	Modelo simplificado de (n+1) fases de Hervé y Zaoui.....	42
<b>ANEXO B</b>	Resultados experimentales ensayo dinámico: Metravib +1000/2000.....	45
<b>ANEXO C</b>	Ensayo de Gravedad específica agregado fino.....	46

## RESUMEN ESPAÑOL

**TÍTULO:** MÓDELO MICROMECAÍNICO DE (n+1) FASE DE HERVÉ Y ZAOUI, EN LA PREDICCIÓN DE LA RIGIDEZ COMPLEJA DE MEZCLAS ARENA-ASFALTO.\*

**AUTOR:** JOAN SEBASTÍAN VILLAMIL RAMÍREZ\*\*

**PALABRAS CLAVE:** MODELO AUTOCOHERENTE, MODELO MICROMECAÍNICO, MÓDULO COMPLEJO, PROPIEDADES VISCO ELÁSTICAS.

**DESCRIPCIÓN:** Este proyecto de investigación implementa el modelo de (n+1) fase de Hervé y Zaoui, analizando los valores del módulo complejo frente a la variación del volumen de agregado en mezclas arena-asfalto. El modelo de Hervé y Zaoui se centra en un esquema autoconherente, reemplazando un material heterogéneo conformado por arena recubierta en asfalto por un material homogéneo que en teoría se comporta igual que la mezcla heterogénea, y así, establece la relación entre las propiedades individuales de los materiales con la estructura de la mezcla, permitiendo el cálculo del módulo complejo y las propiedades visco elásticas del composite.

El modelo se aplica a cuatro diferentes concentraciones arena-asfalto, en mezclas ensayadas en el laboratorio, mediante probetas cilíndricas, por medio de pruebas dinámicas a deformación controlada, que permiten determinar la rigidez compleja experimental de la mezcla. A su vez, conocidas las propiedades de los materiales, tales como la relación de poisson y módulo de Young para la arena y el módulo complejo para el asfalto, y fijado el volumen de arena y asfalto para cada mezcla, se emplea el modelo de (n+1) fase de Hervé y Zaoui, empleando el coeficiente de poisson complejo del asfalto como parámetro de ajuste, se determina el módulo complejo teórico de las mezclas y se analiza si los valores ajustados de poisson son coherentes con las teorías y literatura existente.

---

\* Trabajo de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Eduardo Alberto Castañeda Pinzón. Ingeniero Civil.

## ABSTRACT

**TITLE:** MÓDELO MICROMECAÁNICO DE (n+1) FASE DE HERVÉ Y ZAOUI, EN LA PREDICCIÓN DE LA RIGIDEZ COMPLEJA DE MEZCLAS ARENA-ASFALTO.\*

**AUTHOR:** JOAN SEBASTÍAN VILLAMIL RAMÍREZ\*\*

**KEYWORDS:** SELF-CONSISTENT MODEL, MICROMECHANICAL MODEL, COMPLEX MODULE, VISCOELASTIC PROPERTIES.

**DESCRIPTION:** This research project implements the (n + 1) model of Hervé and Zaoui, analyzing the values of the complex module versus the variation of the aggregate volume in sand-asphalt mixtures. Hervé and Zaoui model focuses on a self-coherent scheme, replacing a heterogeneous material made of asphalt-coated sand with a homogeneous material that theoretically behaves like the heterogeneous mixture, and thus establishes the relationship between the individual properties of the materials with the structure of the mixture, allowing the calculation of the complex module of the composite

The model is applied to four different sand-asphalt concentrations, in mixtures tested in the laboratory, by means of cylindrical test tubes, by means of dynamic tests to controlled deformation, which allow to determine the experimental complex rigidity of the mixture. At the same time, known properties of materials, such as Poisson's ratio and Young's modulus for sand and the complex modulus for asphalt. Fixed the volume of sand and asphalt for each mixture, the model of ( n + 1) phase of Hervé and Zaoui, using the complex poisson coefficient of the asphalt as an adjustment parameter, the theoretical complex modulus of the mixtures is determined and it is analyzed if the adjusted poisson values are coherent with the existing theories and literature.

---

\* Bachelor Tesis

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Eduardo Alberto Castañeda Pinzón. Ingeniero Civil.

## INTRODUCCIÓN

El objetivo de este trabajo es variar la concentración volumétrica del agregado en una mezcla arena -asfalto, con el fin de determinar la efectividad del método de (n+1) fases de Hervé y Zaoui en el cálculo del módulo complejo de composites. En general se desarrollan cuatro fases representativas e incidentes en la investigación: Elaboración de probetas, pruebas de laboratorio, implementación del modelo y análisis de los resultados.

Utilizando probetas de la mezcla elaboradas en el laboratorio, se determina experimentalmente el valor del módulo y el ángulo de desfase de la muestra por medio del analizador dinámico Metravib. Por otro lado, se fijan los parámetros de los materiales necesarios para alimentar el modelo, tales como el peso específico, viscosidad, geometría de las probetas y los respectivos volúmenes de los materiales. Una vez puesto en marcha el modelo, en esta ocasión programadas las ecuaciones en Mathematica 5.0, se obtienen los valores de módulo complejo de la mezcla, su valor elástico y viscoso respectivamente.

El enfoque principal de este trabajo es relacionar analíticamente las propiedades mecánicas del composite con sus compuestos constituyentes. Las mezclas trabajadas en esta investigación contienen asfalto 60-70 convencional con inclusiones de arena recubierta, despreciando la presencia de vacíos con aire, al variar la cantidad de arena por gramo de asfalto, el porcentaje en volumen de cada componente también varía. Aleatoriamente se escogieron cuatro relaciones arena-asfalto para probar el modelo, estas relaciones a su vez, consideran distintos tamaños granulométricos de una misma arena.

## **1. OBJETIVOS**

### **1.1 OBJETIVO GENERAL**

Determinar experimentalmente que el modelo de (n+1) fase de Hervé y Zaoui permite predecir la rigidez compleja de mezclas arena-asfalto.

### **1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Determinar experimentalmente en el laboratorio el módulo complejo de mezclas agregado – asfalto, en pruebas mediante Analizador Dinámico – Mecánico METRAVIB.

Modelar el módulo complejo de mezclas aren-asfalto mediante el método de (n+1) fase de Hervé y Zaoui.

### 3. CUERPO DEL TRABAJO

#### 3.1 MARCO REFERENCIAL

La investigación sobre el modelo autocoherente (n+1) fases de Hervé y Zaoui, se trabajó en el año 2005, dentro de un proyecto de grado, que estudió los modelos micromecánicos en la predicción de la reología en las mezclas asfálticas.<sup>1</sup> Allí basados en ensayos realizados por el Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, se determinó empleando el reómetro METRAVIB, para dos mezclas distintas, cómo el modelo de Hervé y Zaoui se adaptaba mejor al comportamiento de la mezcla. Las mezclas empleadas fueron definidas MA-1 y MA-2, la primera constaba de arena y asfalto 50 - 70, la segunda muestra presentada una granulometría diferente de los agregados, pero procedían de la misma roca madre, trabajado con asfalto 10 – 20. A estas mezclas se les varió el porcentaje de agregado y se ensayaron bajo diferentes frecuencias, comparando los resultados obtenidos de la aplicación computacional del método, con los obtenidos experimentalmente en el laboratorio. Los parámetros medidos en el laboratorio son el módulo viscoso y el módulo elástico de la muestra. Estos mismos parámetros se determinaron mediante el método de Hervé y Zaoui conociendo previamente el módulo complejo del asfalto, el volumen de los agregados que lo componen, el volumen de asfalto y el volumen de aire. Los análisis hechos por Gómez, demostraron que para las dos mezclas, el método de n + 1 fase, tuvo mejor predicción de la rigidez del composite que los otros métodos de análisis micromecánicos propuestos en su investigación, demostrando su coherencia para estas pruebas.<sup>2</sup>

---

<sup>1</sup>PEREZ, Marco; SANCHEZ, Monserrat. Fundamentos de la mecánica de los materiales compuestos. Cataluña: Universidad Politécnica de Cataluña, 2002.p.1.

<sup>2</sup>GOMEZ, Ricardo. Los modelos micromecánicos en la reología de las mezclas asfálticas. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2005. p.38.

El modelo de (n+1) fase, se ha empleado en otras investigaciones, estudiando no sólo las propiedades mecánicas de los materiales, sino también, el comportamiento térmico y termoplástico de la mezcla, ampliando el alcance del método, obteniendo predicciones acertadas del módulo complejo del composite.<sup>3</sup> Los resultados obtenidos, reflejan que el comportamiento de las fases ante la acción de la temperatura, concuerda con la reacción obtenida en con la mezcla final, ampliando un nuevo campo de acción del método.

Otra adaptación del método se dio en el 2014, a mano de E. Hervé, quien propone que el método permita predecir constantes elásticas efectivas de materiales compuestos que contienen recubiertas con condiciones de unión imperfectas.<sup>4</sup> Donde por medio de matriz de discontinuidad, introducen la condición de interface discontinua al modelo de (n+1) fase.

El modelamiento inverso del método, permite determinar el módulo elástico de los agregados presentes en el composite, antecedentes de este proceso, registran Alam & Hammoumc. <sup>5</sup>Afirman que el método por excelencia es la prueba de laboratorio, sin embargo, afirman que un cuerpo compuesto, esencialmente discontinuo y heterogéneo, y en ocasiones anisotrópico, puede ser reemplazado por un medio equivalente y continuo. La conclusión obtenida, es que el modelo se adapta bien a una estructura de concreto asfáltico, el modelo presentó una buena correspondencia entre los resultados experimentales y las predicciones realizadas, para el caso de temperaturas inferiores a los 4 °C y frecuencia mayores a 25 Hz. Además, hace énfasis en la exactitud, de la determinación de los módulos elástico y plástico de los agregados, debido a que una variación de tan solo el 3% en

---

<sup>3</sup> HERVÉ, Eveline. Thermal and thermoelastic behavior of multiply coated inclusion-reinforced composites. En: International Journal of Solids and Structures, 2002., vol. 39., p.1041–1058.

<sup>4</sup> HERVÉ, Eveline. Elastic behavior of composites containing multi-layer coated particles with imperfect interface bonding conditions and application to size effects and mismatch in these composites. En: International Journal of Solids and Structures, 2014, vol. 51. P. 2865–2877.

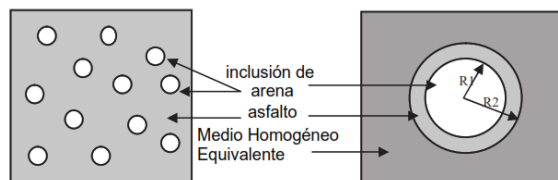
<sup>5</sup> S.Y. Alam; F. Hammoum. Viscoelastic properties of asphalt concrete using micromechanical self-consistent model. En: Elsevier, archives of civil and mechanical engineering, 2015, vol. 15., p.272 – 285.

algunos de estos valores, influye en aproximadamente el 20% en la predicción del módulo complejo.

**3.1.1 Modelo (n+1) Fase de Hervé y Zaoui** El modelo propuesto por Hervé y Zaoui, permite la predicción de propiedades de las mezclas como una función de las características mecánicas de sus compuestos, por medio de ecuaciones que relacionan los campos de esfuerzo y deformación de los materiales. La ley de los modelos micromecánicos<sup>6</sup> evalúa de qué manera afecta o podría afectar la microestructura una propiedad global de la macroestructura. El modelamiento gira en torno al concepto de Volumen Elemental Representativo y Medio Homogéneo Equivalente, donde por medio de un modelo de esferas concéntricas, se representan cada uno de los materiales que conforman la mezcla, siendo el más interno en nuestro caso, la arena y el siguiente el asfalto, inmersos en un medio homogéneo e infinito que tiene el mismo volumen que ambos materiales y las propiedades de la mezcla resultante.

En el modelo la “n” representa la última capa o la matriz donde se encuentran homogenizadas las propiedades de las demás capas en un medio equivalente y continuo.

**Figura 1 Representación de Volumen Elemental Representativo y Medio Homogéneo Equivalente.**



Fuente: S.Y. ALAM AND F. HAMMOUM, “Viscoelastic properties of asphalt concrete using micromechanical self-consistent model”. Elsevier, archives of civil and mechanical engineering, Vol. 15, 2015, 272 – 285.

**3.1.2 Ecuaciones del modelo** A continuación se presentan algunas de las ecuaciones más importantes del modelo de Hervé y Zaoui:

<sup>6</sup> GOMEZ, Ricardo. Los modelos micromecánicos en la reología de las mezclas asfálticas. Tesis pregrado. Universidad Industrial de Santander. 2005. 57p.

$$k = k_{(n)}^{eff} = k_n + \frac{R_{n-1}^3/R_n^3}{\frac{1}{k_{(n-1)}^{eff} - k_n} + \frac{3(R_n^3 - R_{n-1}^3)}{R_n^3} * \frac{1}{3k_n + 4\mu_n}} \quad Ec(1)$$

$$A \left( \frac{\mu^{eff}}{\mu_n} \right)^2 + B \left( \frac{\mu^{eff}}{\mu_n} \right) + C = 0 \quad Ec(2)$$

Donde la ecuación 1 relaciona el parámetro  $k_{(n)}^{eff}$  como el módulo bulk efectivo de la mezcla y la ecuación 2 a  $\mu^{eff}$  como el módulo cortante efectivo de la mezcla<sup>7</sup>. Y las constantes A, B y C de la ecuación dependen del módulo de corte, fracción volumétrica y relación de poisson  $\nu$  de cada fase. La fracción volumétrica  $Vol_{bitumen}$  y  $Vol_{arena}$  se expresan como un porcentaje que representa cada material del cien por ciento de la muestra total.

Para poder llevar a cabo el análisis se considera la fracción volumétrica de los agregados que componen la mezcla determinando el radio de cada capa de la siguiente manera<sup>8</sup>:

$$\frac{R_{arena}^3}{R_{asfalto}^3} = \frac{Vol \text{ de arena}}{Vol \text{ de asfalto} + Vol \text{ de arena}} \quad Ec(3)$$

Cada a cada radio le corresponde un valor de coeficiente de poisson y módulo complejo respectivamente.

**3.1.3 Módulo complejo** Es una formulación matemática para representar por medio de un número real (parte elástica) y uno imaginario (parte viscosa) las

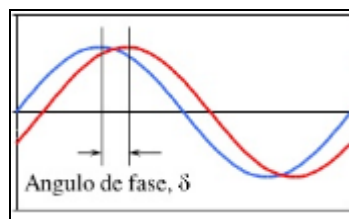
<sup>7</sup> HERVÉ, Eveline; ZAOU, André. N-Layered inclusión-based micromechanical modelling. Int. Engng Sci. 1993, vol. 31, N° 1, pp. 1-10.

<sup>8</sup> S.Y. Alam; F. Hammoum. Viscoelastic properties of asphalt concrete using micromechanical self-consistent model. En: Elsevier, archives of civil and mechanical engineering, 2015, vol. 15., p.272 – 285.

propiedades viscoelásticas de un material. Su conocimiento es de gran importancia en el diseño de mezclas asfálticas porque permite evaluar la resistencia del pavimento y su deformación permanente ante la aplicación de cargas y diferentes condiciones de temperatura. Materiales como los agregados, responden al rango de esfuerzo y deformación elásticos, y estas propiedades se pueden cuantificar a través del módulo de Young y el coeficiente de poisson<sup>9</sup>. Por el contrario, las mezclas asfálticas al contener ligantes bituminosos, adquieren propiedades viscoelásticas y termoplásticas, que requieren de funciones complejas para definir las, dado que dependen de la temperatura a la que se encuentren y de la frecuencia con que se aplica la carga, dando origen al módulo complejo para suplir la limitaciones de las constantes elásticas en estos materiales.

Cuando se analiza el estímulo o carga a una mezcla asfáltica frente a su respuesta o deformación, el retraso entre la señal de carga y la deformación es llamado ángulo de fase ( $\delta$ )<sup>10</sup>, en la figura N° 2, se puede apreciar en azul la carga sinusoidal aplicada a la muestra y su respuesta a la deformación en color rojo, produciendo el retraso entre estas dos señales, lo que se conoce como ángulo de fase o desfase para algunos autores.

**Figura 2 Representación gráfica del ángulo de fase**



La notación imaginaria del módulo complejo se describe de la siguiente manera en la ecuación 3:

---

<sup>9</sup>GOMEZ, Ricardo. Los modelos micromecánicos en la reología de las mezclas asfálticas. Tesis pregrado. Universidad Industrial de Santander. 2005. 38p.

GOMEZ, José; DELGADO, Horacio; FLORES, Mayra. Propuesta de método de prueba de módulo dinámico en mezclas asfálticas para México. IMT, Publicación Técnica, 2017, vol. 507., p.19.

$$E^* = E_1 + iE_2 \quad \text{Ec(3)}$$

Otra expresión en notación imaginaria es la relación de poisson cuyo valor imaginario es negativo como se muestra en la ecuación 4:

$$v^* = v_1 - iv_2 \quad \text{Ec(4)}$$

Si tenemos valores del módulo dinámico  $|E^*|$  y el ángulo de desfase ( $\delta$ ) de un composite, podemos determinar su módulo complejo de la siguiente manera:

$$E_1 \text{ módulo de almacenamiento (p elástica)} = |E^*| \cos \delta$$

$$E_2 \text{ módulo de pérdida (p viscosa)} = |E^*| \sen \delta$$

### 3.1.4 Materiales

**3.1.4.1 Agregado fino** Se empleó arena limpia, proveniente de cantera extraída de una formación de roca diorita. La arena fue preparada en el laboratorio, pasándola por los tamices del N° 4, 10, 40, 100 y 200, separándola por diferentes tamaños granulométricos pasa N° 4 y retenido en cada uno de los siguientes tamices. Se realizó el ensayo de gravedad específica INV E 222 -13<sup>11</sup>, a cada uno de los tamaños de arena, para poder de determinar el peso específico de las diferentes combinaciones de tamaños propuestas para el proyecto. Los resultados obtenidos en el laboratorio se presentan en la Tabla N°1 a continuación:

---

<sup>11</sup> Instituto Nacional de Vías, "Gravedad Específica y Absorción de Agregados Finos", INV E-222, 2013.

Tabla 1 Gravedad específica Bulk arena de río

GRANULOMETRÍA	Gs <sub>bulk</sub>
RET N° 200	2.65
RET N° 100	2.68
RET N° 40	2.58
RET N° 10	2.69

El módulo de Young y coeficiente de poisson de la arena, se tomaron de la roca Diorita de origen:

$$\text{Módulo de Young (E)} = 104000[\text{Mpa}]$$

$$\text{Coeficiente de poisson (v)} = 0,25$$

**3.1.4.2 Asfalto** Las diferentes probetas fueron trabajadas con el mismo asfalto 60 – 70, cuya densidad fue calculada empleando probetas cilindras de diámetro, altura y peso conocidos cuyo proceso de elaboración se realizó teniendo en cuenta los mismos parámetros de temperatura y moldeo de las probetas de prueba para la investigación.

$$\text{Densidad del asfalto promedio (22°C)} = 1.035 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}$$

La medición del módulo complejo del asfalto se realiza empleando el analizador dinámico Metravib, ensayando 2 probetas hechas únicamente en asfalto 60-70, y sometiéndolo a condiciones de carga sinusoidal y frecuencia idénticas que las probetas que se estudien en este proyecto. La tabla N° 2, presenta los resultados obtenidos en el laboratorio del módulo complejo a temperatura ambiente en el laboratorio.

**Tabla 2 Módulo complejo del Asfalto a Temperatura ambiente del laboratorio [21.4°C~21.5°C]**

Asfalto 60/70				
Freq Hz	$\delta$ °	E Pa	$E^* \cos(\delta)$ MPa	$E^* \sin(\delta)$ MPa
1	65	5,21,E+06	2,2229	4,7133
3	61	1,13,E+07	5,4678	9,8773
5	59	1,58,E+07	8,0837	13,5857
10	57	2,46,E+07	13,4774	20,5627
15	55	3,15,E+07	17,9750	25,9191
25	53	4,28,E+07	25,5590	34,3241
30	53	4,75,E+07	28,8626	37,7806

La relación de poisson es siempre inferior a 0.50 y en la mayoría de los materiales tiene valores cercanos a 0.333<sup>12</sup>, este valor es función de la temperatura, presentando, en bajas temperaturas su comportamiento es elásticos y se aproxima a 0.32 y a altas temperaturas se torna viscoso y su coeficiente de poisson oscila cerca a los 0.5<sup>13</sup>.

### 3.1.5 Fase Experimental

#### 3.1.5.1 Elaboración de probetas<sup>14</sup>

##### Protocolo

##### -Materiales:

- ✓ Termómetro con capacidad de hasta 200°C.
- ✓ Mezclador
- ✓ Recipiente metálico para preparación de la mezcla
- ✓ Balanza de 0.01 gramos de sensibilidad.
- ✓ Moldes en caucho
- ✓ Ligas
- ✓ Horno de temperatura graduable.

<sup>12</sup> TSCHOEGL, N.W; KNAUSS, Wolfgang; EMRI, Igor. Poisson's ratio in linear, viscoelasticity – a critical review, *Mechanics of Time- Dependent Materials* 6, 2002, p. 3–51.

<sup>13</sup> GOMEZ, Ricardo. Los modelos micromecánicos en la reología de las mezclas asfálticas. Tesis pregrado. Universidad Industrial de Santander. 2005. 45p.

<sup>14</sup> El protocolo fue establecido por el Autor y el ingeniero director de este proyecto, con el fin de garantizar igualdad de condiciones en las diferentes probetas que se empleen en este proyecto.

- ✓ Nevera
- ✓ Cuchara grande
- ✓ Recipiente para calentar el asfalto
- ✓ Asfalto 60/70
- ✓ Pie de Rey digital precisión 0.1 milímetro.

#### **3.1.5.2. Procedimiento:**

- a. Establecer la relación de volumen a trabajar para cada componente, % porcentaje de asfalto y % porcentaje de arena.
- b. Establecer el diámetro de la partícula de arena con la que se realizará la probeta.
- c. Calentar el asfalto hasta alcanzar una temperatura de 150 °C.
- d. Determinar la cantidad de arena presente en la mezcla de acuerdo a la relación arena/asfalto respectiva.
- e. Mezclar la arena y el asfalto durante un intervalo de 2 minutos.
- f. Preparar el molde y asegurarlo con las ligas para evitar la separación de este.
- g. Verter la mezcla en la probeta.
- h. Dejar enfriar a temperatura ambiente durante 1 horas.
- i. Refrigerar a temperatura constante -2 a 3 °C.
- j. Sacar el molde
- k. Determinar su peso, diámetro y altura.

**3.1.5.3 Mezcla** Se trabajaron 4 relaciones arena/asfalto para la elaboración de las probetas, se elaboraron como mínimo dos probetas idénticas por cada relación arena/asfalto. El número de probetas elaboradas para cada relación y el porcentaje de cada tamaño de arena retenido empleado como agregado, se relaciona en la tabla N°3 a continuación:

**Tabla 3 Relación de Probetas**

Relación arena/asfalto[gr]	Cantidad de probetas	Granulometría [Tamaño retenido]	
3,0:1	3	50% N°10	50% N°100
4,5:1	2	50% N°40	50% N°100
5,5:1	2	50% N°40	50% N°200
6,5:1	2	50% N°40	50% N°200

**3.1.6 Ensayos de laboratorio** El equipo empleado para realizar el análisis es la Máquina de prueba de visco elasticidad dinámica Metravib DMA +1000/2000<sup>15</sup>. Este equipo se encuentra disponible en las instalaciones del Laboratorio de caracterización de materiales Álvaro Beltrán Pinzón de la Universidad Industrial de Santander. A continuación la figura N°3 expone el porta muestras donde se ubican las probetas para ser falladas, a su vez al lado derecho de la imagen, el dial electrónico de color indica la temperatura ambiente en grados Celsius a la que se realizará el ensayo.

---

<sup>15</sup> La 1000/2000 serie de DMA+ es conveniente para el uso en el análisis de características visco elásticas. Se utiliza para las pruebas de fatiga de diversos materiales industriales. También, la unidad se utiliza para la carta recordativa del crecimiento de grieta. Además, el equipo proporciona una frecuencia de 0.00001 hertzios hasta 1000 hertzios. Ofrece una dislocación de 12 milímetros, y de la fuerza de 300 N. hasta 2000. ACOEM Direct industry. [En línea] (Recuperado en 28 de Mayo de 2018). Disponible en <http://www.directindustry.es> [citado el 9 de mayo de 2018].

**Figura 3 Montaje de una probeta en porta muestras del Analizador Dinámico Metravib.**



Para la realización de las pruebas, la máquina se opera desde un computador, donde por medio del Software DYNATEST, se carga el proyecto con las frecuencias y temperaturas solicitadas para el ensayo.

**3.1.6.1 Temperatura de ensayo** El ensayo se realiza a temperatura ambiente, por lo cual, las pruebas se ejecutaron en varios días pero a la misma hora, para evitar cambio considerables en la temperatura del ensayo. Aproximadamente se registró entre 21.4 y 21.5 °C.

**3.1.6.2 Frecuencias del ensayo** La carga de prueba se aplica en forma sinusoidal y en varias frecuencias que representan la acción del tránsito sobre la mezcla, para este proyecto las frecuencias a trabajar son: 1, 3, 5, 10, 15, 25 y 30 Hz.

**3.1.6.3 Datos de entrada al DYNATEST** El software una vez establecidas la temperatura y la frecuencia del proyecto que se va a ejecutar, solicita definir la geometría de la muestra a ensayar, en esta ocasión se trabajaron probetas cilíndricas con diámetros entre 14.8 y 15 mm y alturas entre 28,8 y 30 mm. La figura N° 4 muestra la probeta ajustada a los porta muestras, que son los

encargados de someterla a cargas de tracción y compresión a diferentes frecuencias.<sup>16</sup>

**Figura 4 Esquema de porta muestras superior ajustado a la probeta para ensayo a tensión-compresión.**



Las pruebas se realizan bajo deformación controlada empleando un desplazamiento de  $1e-5$ [m].

### **3.1.7 Resultados del laboratorio**

**3.1.7.1 Pruebas a Temperatura ambiente** A continuación se muestran los valores de módulo dinámico hallados para las diferentes relaciones volumétricas de arena-asfalto.

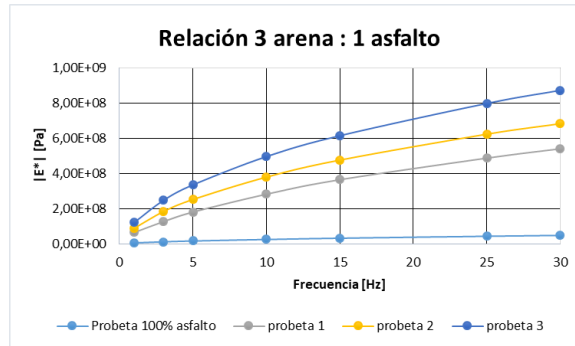
Los parámetros obtenidos del ensayo para esta investigación son principalmente el módulo dinámico y el ángulo de fase, para poder determinar el módulo complejo experimental de las mezclas.

La figura N° 5 contiene los resultados experimentales de laboratorio para la relación 3:1, en un gráfico de módulo dinámico vs frecuencia de carga.

---

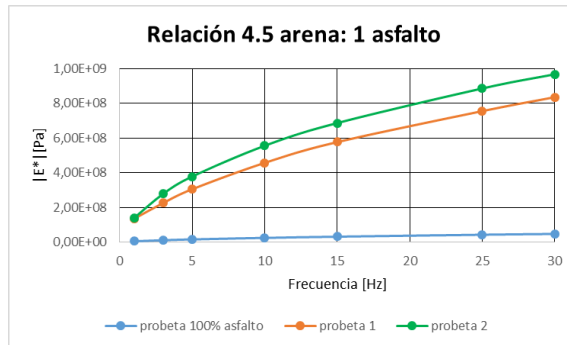
<sup>16</sup> Es necesario emplear algún tipo de pegamento de secado instantáneo, para garantizar que la probeta siempre este en contacto con el transmisor de carga, en especial, cuando está siendo sometida a tracción de carga, una probeta que se desprenda durante el ensayo, debe ser descartada de los análisis.

**Figura 5 Resultados módulo dinámico relación 3 gramos de arena – 1 de asfalto.**



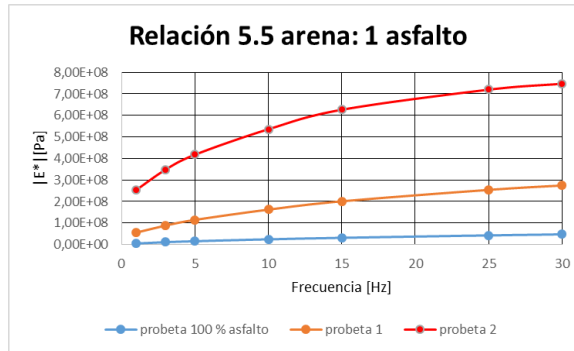
La figura N° 6 contiene los resultados experimentales de laboratorio para la relación 4.5:1, en un gráfico de módulo dinámico vs frecuencia de carga.

**Figura 6 Resultados módulo dinámico relación 4.5 gramos de arena – 1 de asfalto.**



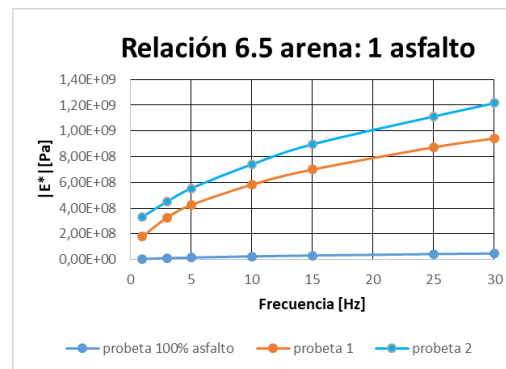
La figura N° 7 contiene los resultados experimentales de laboratorio para la relación 5.5:1, en un gráfico de módulo dinámico vs frecuencia de carga.

**Figura 7 Resultados módulo dinámico relación 5.5 gramos de arena – 1 de asfalto**



La figura N° 8 contiene los resultados experimentales de laboratorio para la relación 6.5:1, en un gráfico de módulo dinámico vs frecuencia de carga.

**Figura 8 Resultados módulo dinámico relación 6.5 gramos de arena – 1 de asfalto**



### 3.1.8 Implementación del modelo (n+1) fase de Hervé y Zaoui

Para emplear las ecuaciones del modelo se debe contar con la siguiente información previa:

- Módulo complejo del asfalto, para las frecuencias y temperaturas solicitadas.
- Porcentaje de volumen de arena.
- Porcentaje de volumen de asfalto.

Las ecuaciones están programadas en el software Mathematica 5.0. Los resultados del modelamiento para las diferentes fracciones volumétricas y frecuencias se presentan a continuación.

La tabla N° 4 contiene los valores empleados para el cálculo del módulo complejo por Hervé y Zaoui para la relación 3:1, con volumen de bitumen 46.4 % y volumen de arena 53.6%, un radio de la inclusión de arena de 10 y un radio de MHE 12.3.

**Tabla 4 Valores de módulo complejo Hervé y Zaoui, Relación 3:1**

RELACION 3.0 a 1												
		ASFALTO				ARENA				MEZCLA		
Temp	Freq	Modulo complejo		Coeficiente de poisson		Modulo E		Poisson		Módulo calculado		
°C	Hz	E1[MPa]	E2[Mpa]	v1	v2	E1[Mpa]	E2[Mpa]	v1	v2	E1[Mpa]	E2[Mpa]	E* [Mpa]
21,4	1	2,22285641	4,71330056	0,4979	0,0016	104000	0	0,25	0	26,891	56,850	62,889
21,4	3	5,46775333	9,87729718	0,4967	0,0016	104000	0	0,25	0	64,774	116,000	132,860
21,4	5	8,08366521	13,5857467	0,4964	0,0016	104000	0	0,25	0	95,319	159,108	185,475
21,4	10	13,4774474	20,5627063	0,4958	0,0016	104000	0	0,25	0	157,438	237,922	285,296
21,4	15	17,9750499	25,9191368	0,4954	0,0016	104000	0	0,25	0	208,692	297,475	363,378
21,4	25	25,5589567	34,3240906	0,4948	0,0034	104000	0	0,25	0	290,620	384,895	482,291
21,4	30	28,8626435	37,7805537	0,4946	0,0034	104000	0	0,25	0	327,251	421,969	533,995

La tabla N° 5 contiene los valores empleados para el cálculo del módulo complejo por Hervé y Zaoui para la relación 4.5:1, con volumen de bitumen 36.1 % y volumen de arena 63.9%, un radio de la inclusión de arena de 10 y un radio de MHE 11.6.

**Tabla 5 Valores de módulo complejo Hervé y Zaoui, Relación 4.5:1**

RELACION 4.5 a 1												
		ASFALTO				ARENA				MEZCLA		
Temp	Freq	Modulo complejo		Coeficiente de poisson		Modulo E		Poisson		Módulo calculado		
°C	Hz	E1[MPa]	E2[Mpa]	v1	v2	E1[Mpa]	E2[Mpa]	v1	v2	E1[Mpa]	E2[Mpa]	E* [Mpa]
21,5	1	2,22285641	4,71330056	0,4979	0,0016	104000	0	0,25	0	77,036	114,465	137,974
21,5	3	5,46775333	9,87729718	0,4967	0,0016	104000	0	0,25	0	160,639	217,180	270,133
21,5	5	8,08366521	13,5857467	0,4964	0,0016	104000	0	0,25	0	227,866	290,372	369,105
21,5	10	13,4774474	20,5627063	0,4958	0,0016	104000	0	0,25	0	354,680	417,895	548,119
21,5	15	17,9750499	25,9191368	0,4954	0,0016	104000	0	0,25	0	453,920	509,977	682,730
21,5	25	25,5589567	34,3240906	0,4948	0,0024	104000	0	0,25	0	610,247	645,103	888,009
21,5	30	28,8626435	37,7805537	0,4946	0,0024	104000	0	0,25	0	679,857	694,252	971,695

La tabla N° 6 contiene los valores empleados para el cálculo del módulo complejo por Hervé y Zaoui para la relación 5.5:1, con volumen de bitumen 31.5 % y volumen de arena 68.5%, un radio de la inclusión de arena de 10 y un radio de MHE 11.3.

**Tabla 6 Valores de módulo complejo Hervé y Zaoui, Relación 5.5:1**

RELACION 5.5 a 1												
		ASFALTO				ARENA				MEZCLA		
Temp	Freq	Modulo complejo		Coeficiente de poisson		Modulo E		Poisson		Módulo calculado		
°C	Hz	E1[MPa]	E2[Mpa]	v1	v2	E1[Mpa]	E2[Mpa]	v1	v2	E1[Mpa]	E2[Mpa]	E*  [Mpa]
21,5	1	2,22285641	4,71330056	0,4999	0,0036	104000	0	0,25	0	210,080	124,174	244,034
21,5	3	5,46775333	9,87729718	0,4966	0,0052	104000	0	0,25	0	292,191	198,175	353,057
21,5	5	8,08366521	13,5857467	0,4945	0,0059	104000	0	0,25	0	344,032	247,9850	424,093
21,5	10	13,4774474	20,5627063	0,4907	0,0060	104000	0	0,25	0	423,260	351,021	549,877
21,5	15	17,9750499	25,9191368	0,4884	0,0061	104000	0	0,25	0	490,575	418,527	644,848
21,5	25	25,5589567	34,3240906	0,4812	0,0065	104000	0	0,25	0	514,986	479,039	703,341
21,5	30	28,8626435	37,7805537	0,4790	0,0066	104000	0	0,25	0	541,420	506,342	741,295

La tabla N° 7 contiene los valores empleados para el cálculo del módulo complejo por Hervé y Zaoui para la relación 6.5:1, con volumen de bitumen 28.0 % y volumen de arena 72.0%, un radio de la inclusión de arena de 10 y un radio de MHE 11.15.

**Tabla 7 Valores de módulo complejo Hervé y Zaoui, Relación 6.5:1**

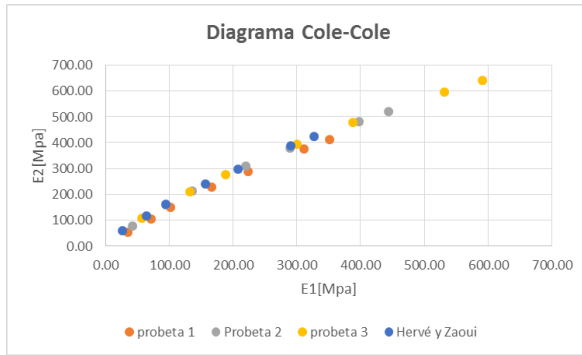
RELACION 6.5 a 1												
		ASFALTO				ARENA				MEZCLA		
Temp	Freq	Modulo complejo		Coeficiente de poisson		Modulo E		Poisson		Módulo calculado		
°C	Hz	E1[MPa]	E2[Mpa]	v1	v2	E1[Mpa]	E2[Mpa]	v1	v2	E1[Mpa]	E2[Mpa]	E*  [Mpa]
21,4	1	2,22285641	4,71330056	0,4993	0,0032	104000	0	0,25	0	297,296	161,698	338,425
21,4	3	5,46775333	9,87729718	0,4958	0,0043	104000	0	0,25	0	382,654	276,742	472,240
21,4	5	8,08366521	13,5857467	0,494	0,0043	104000	0	0,25	0	451,112	363,6960	579,463
21,4	10	13,4774474	20,5627063	0,4915	0,0043	104000	0	0,25	0	583,902	503,148	770,778
21,4	15	17,9750499	25,9191368	0,4905	0,0043	104000	0	0,25	0	710,879	606,424	934,398
21,4	25	25,5589567	34,3240906	0,4886	0,0049	104000	0	0,25	0	886,965	716,759	1140,373
21,4	30	28,8626435	37,7805537	0,4883	0,0049	104000	0	0,25	0	976,940	776,362	1247,858

## 3.2 Análisis y Resultados

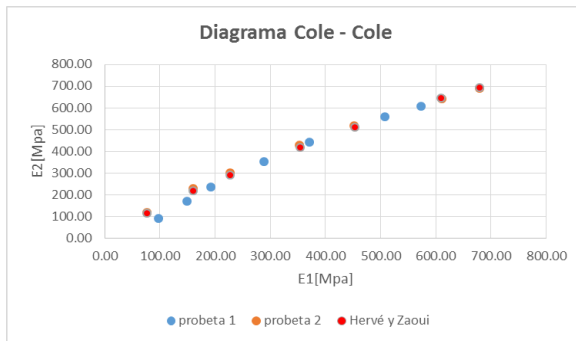
### 3.2.1 Módulo calculados Hervé y Zaoui

**3.2.1.1 Ensayo a temperatura Ambiente** Los valores de Módulo complejo que se obtuvieron para por el modelo (n+1) fase de Hervé y Zaoui se graficaron en un diagrama Cole-Cole, para observar su comportamiento frente a los valores hallados experimentalmente en el laboratorio.

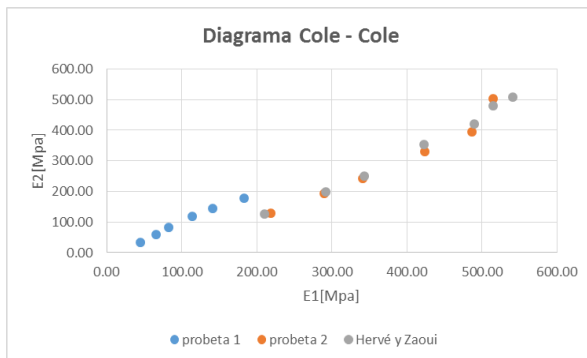
**Figura 9 Comparación valores experimentales y con Hervé y Zaoui, relación: 3:1**



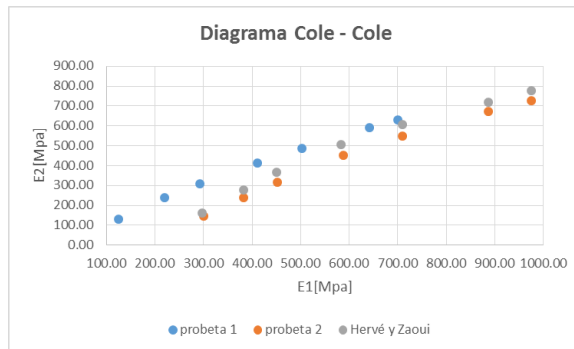
**Figura 10 Comparación valores experimentales y con Hervé y Zaoui, relación: 4.5:1**



**Figura 11 Comparación valores experimentales y con Hervé y Zaoui, relación: 5.5:1**



**Figura 12 Comparación valores experimentales y con Hervé y Zaoui, relación: 6.5:1**



### 3.2.2 Ajuste del modelo

**3.2.2.1 Relación de poisson asfalto** El modelo emplea las propiedades mecánicas de los materiales que forman la mezcla, los cálculos presentados en este informe, se hacen ajustando el parámetro de la relación de poisson del asfalto, de tal manera que los resultados obtenidos por el método, se ajusten a los valores experimentales.

Es importante aclarar que determinar de manera directa o indirecta la relación de poisson como función de la frecuencia, requiere un control exigente de la temperatura del ensayo, por lo cual se asume una metodología experimental para establecer el valor de la relación de poisson a diferentes frecuencias.

La tabla N° 8 contiene los valores de relación de poisson obtenidos con el modelo de Hervé y Zaoui, para ajustar los valores de módulo complejo calculados a los obtenidos en el laboratorio.

Tabla 8 Coeficiente de poisson para diferentes frecuencias y volúmenes de arena.

Freq	3 ARENA/1 ASFALTO		4.5 ARENA/1 ASFALTO		5.5 ARENA/1 ASFALTO		6.5 ARENA/1 ASFALTO	
	Coeficiente de poisson		Coeficiente de poisson		Coeficiente de poisson		Coeficiente de poisson	
Hz	v1	v2	v1	v2	v1	v2	v1	v2
1	0.4999	0.0018	0.4999	0.0016	0.4999	0.0036	0.4993	0.0032
3	0.4967	0.0020	0.4967	0.0016	0.4966	0.0052	0.4958	0.0043
5	0.4964	0.0022	0.4964	0.0016	0.4945	0.0059	0.494	0.0043
10	0.4958	0.0024	0.4958	0.0016	0.49065	0.0060	0.4915	0.0043
15	0.4954	0.0028	0.4954	0.0016	0.4884	0.0061	0.4905	0.0043
25	0.4948	0.0034	0.4948	0.0024	0.4812	0.0065	0.4886	0.0049
30	0.4946	0.0034	0.4946	0.0024	0.479	0.0066	0.4883	0.0049

El asfalto varía su coeficiente de poisson en las diferentes frecuencias a las que fue ensayado, además, presenta una variación entre las probetas sometidas a las mismas frecuencias, motivo por el cual se decide ajustar los valores de coeficiente de poisson obtenidos para establecer rangos de análisis de estos valores y la confiabilidad del modelo para ajustar este parámetro. Ya que en teoría estos valores sólo dependen de la frecuencia y temperatura del ensayo, sin verse afectada su magnitud por la concentración de agregado. Para realizar este análisis se estableció como rango de ajuste el comprendido entre el máximo y mínimo valor ajustado v1 y v2, para luego determinar el valor promedio.

La tabla N° 9 contiene los valores máximos y mínimos del coeficiente complejo de poisson del bitumen 60-70 empleado en estas pruebas.

**Tabla 9 Coeficiente Complejo de Poisson: Máximos y Mínimos**

Freq	Coeficiente de poisson		Coeficiente de poisson	
	v1 máximo	v2 máximo	v1 mínimo	v2 mínimo
1	0.4999	0.0036	0.4993	0.0016
3	0.4967	0.0052	0.4958	0.0016
5	0.4964	0.0059	0.4940	0.0016
10	0.4958	0.006	0.4907	0.0016
15	0.4954	0.0061	0.4884	0.0016
25	0.4948	0.0065	0.4812	0.0024
30	0.4946	0.0066	0.4790	0.0024

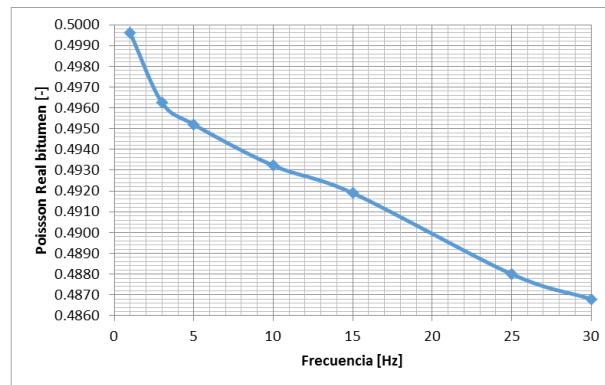
Una vez establecidos los valores de la tabla N°9, se determina el promedio entre el máximo y el mínimo valor obtenido tanto en la parte real como en la imaginaria respectivamente, obteniendo un solo valor de coeficiente de poisson para cada frecuencia. Con la relación de poisson promedio, se calcula nuevamente el módulo complejo de las muestras, para evaluar la variación de los resultados y la sensibilidad del modelo al valor  $v^*$ . La tabla N° 10 muestra los valores promedio obtenidos de v1 y v2 y el módulo complejo ajustado a estos valores.

Tabla 10 Valores ajustados del módulo complejo

Rel	Freq	Relación de Poisson		Módulo calculado Hervé y Zaoui			Módulo experimental			Error relativo porcentual
		v1 promedio	v2 promedio	E1[Mpa]	E2[Mpa]	E* [Mpa]	E1[Mpa]	E2[Mpa]	E* [Mpa]	
	Hz									
RELACION 3.0 - 1	1	0.49960	0.00260	29.19	47.65	55.88	36.00	52.78	63.89	14%
	3	0.49625	0.00340	61.56	87.61	107.07	71.68	103.68	126.05	18%
	5	0.49520	0.00375	96.39	115.83	150.69	102.20	148.08	179.92	19%
	10	0.49323	0.00380	154.53	176.68	234.73	166.83	226.92	281.64	20%
	15	0.49190	0.00385	218.40	210.33	303.21	223.58	287.17	363.95	20%
	25	0.48800	0.00445	308.90	262.33	405.26	312.21	373.03	486.44	20%
	30	0.48680	0.00450	348.50	284.56	449.92	351.51	409.67	539.80	20%
RELACION 4.5 - 1	1	0.49960	0.00260	106.51	114.15	156.13	77.42	116.40	139.79	10%
	3	0.49625	0.00340	171.09	183.78	251.09	160.94	227.16	278.40	11%
	5	0.49520	0.00375	228.68	233.58	326.89	227.22	301.94	377.88	16%
	10	0.49323	0.00380	486.20	439.50	655.40	353.99	427.84	555.30	15%
	15	0.49190	0.00385	512.80	389.01	643.66	452.32	515.72	685.98	7%
	25	0.48800	0.00445	589.30	549.56	805.79	611.62	640.01	885.27	10%
	30	0.48680	0.00450	650.80	645.90	916.91	679.58	688.18	967.17	5%
RELACION 5.5 - 1	1	0.49960	0.00260	203.21	161.68	259.68	219.43	126.89	253.48	2%
	3	0.49625	0.00340	278.66	254.48	377.37	290.59	192.15	348.37	8%
	5	0.49520	0.00375	360.33	318.13	480.67	341.00	241.16	417.65	13%
	10	0.49323	0.00380	407.68	471.31	623.17	423.98	327.94	536.01	14%
	15	0.49190	0.00385	533.14	510.08	737.85	487.17	394.13	626.64	15%
	25	0.48800	0.00445	652.68	590.88	880.41	515.19	502.66	719.78	18%
	30	0.48680	0.00450	693.01	627.30	934.76	540.92	515.71	747.36	20%
RELACION 6.5 - 1	1	0.49960	0.00260	335.27	197.07	388.90	300.43	143.34	332.87	14%
	3	0.49625	0.00340	408.96	325.51	522.70	382.73	236.12	449.71	14%
	5	0.49520	0.00375	508.25	399.46	646.44	453.41	316.29	552.83	14%
	10	0.49323	0.00380	666.62	551.68	865.29	588.50	448.82	740.12	14%
	15	0.49190	0.00385	780.09	653.06	1017.37	709.95	546.29	895.80	12%
	25	0.48800	0.00445	850.97	730.12	1121.26	886.96	671.72	1112.61	1%
	30	0.48680	0.00450	896.82	773.07	1184.03	976.55	724.49	1215.95	3%

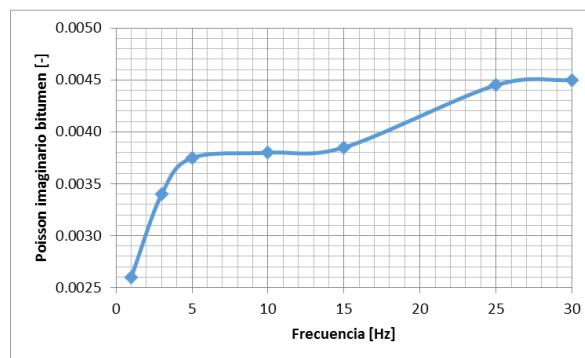
Podemos analizar el comportamiento del coeficiente de Poisson en su parte imaginaria y real en función de la frecuencia, la figura N°13 muestra cómo a medida que la frecuencia aumenta, el coeficiente de Poisson promedio en su parte elástica disminuye. Donde el aumento de la frecuencia, aumenta la rigidez de la mezcla, permitiéndole comprimirse más.

**Figura 13 Comportamiento Parte real promedio del coeficiente de Poisson del asfalto ante la frecuencia del ensayo.**



La figura N°14 muestra el comportamiento de la parte viscosa del bitumen, en función del cambio de frecuencia de ensayo.

**Figura 14 Comportamiento Parte imaginaria promedio del coeficiente de Poisson del asfalto ante la frecuencia del ensayo**



**3.2.2.2 Ajuste de la rigidez de las probetas** Las probetas fueron elaboradas en parejas con las mismas concentraciones de arena, con el fin de comparar los

resultados entre ellas, sin embargo, se obtuvieron diferencias en las rigideces bastantes importantes entre probetas que poseen las mismas características de fabricación, por lo cual, se analizó la densidad para un juego de probetas de relación 6.5 gramos de arena y 1 gramos de asfalto. Una vez determinado el peso y el volumen real de cada probeta en laboratorio, y conociendo el peso específico del asfalto y la arena, se calcularon los porcentajes reales de volumen de arena y asfalto para cada probeta y el radio correspondiente al medio homogéneo equivalente. Una vez conseguidos estos valores, se aplica el modelo para calcular la rigidez de cada probeta a la frecuencia de 30 Hz.

La tabla 11 contiene los resultados obtenidos mediante el ajuste de los radios y porcentajes de agregados y bitumen según la densidad de la probeta.

**Tabla 11** Tabla 11 radios y porcentajes de agregados y bitumen según la densidad de la probeta para la frecuencia de ensayo de 30 Hz y relación arena/asfalto 6,5:1.

Probeta	Densidad [gr/cm <sup>3</sup> ]	Vol. Arena [%]	Vol. Asfalto [%]	Radio MHE
1	2.17	72.0	28.0	11.150
2	2.12	69.5	30.5	11.296

**Tabla 12** Ajuste de valores de módulo dinámico para dos probetas de relación 6,5:1 y frecuencia de ensayo 30 Hz.

Una vez ajustadas las proporciones de los compuestos de la mezcla, se calcula el módulo dinámico mediante el modelo de (n+1) fase de Hervé y Zaoui.

La tabla N°12 contiene los valores del módulo dinámico calculado y experimental para un par de probetas de relación 6.5:1 y frecuencia de 30 Hz.

#### 4. CONCLUSIONES

- En el modelo de Hervé y Zaoui sólo obtenemos componente viscosa en el módulo complejo, siempre y cuando los materiales empleados en el modelamiento también la posean, permitiendo una primera verificación de los resultados modelados.
- Los valores obtenidos para la relación de poisson, concuerdan con lo planteado por Tschoegl, en sus investigaciones, en temperaturas altas el coeficiente de poisson es próximo a 0.5 y en temperaturas bajas es aproximadamente 0.32. En estos resultados se obtuvo un comportamiento similar para el asfalto como material viscoelástico, con valores próximos a 0.5 a temperatura ambiente y el cual disminuyó a medida que aumento su frecuencia, presentando un comportamiento similar al planteado por Tschoegl [7] ante la temperatura.
- La parte viscosa o imaginaria del coeficiente de poisson obtenida mediante el modelo de (n+1) fase de Hervé y Zaoui, se ajusta lo planteado por Tschoegl, que plantea que siempre muy inferior a la parte elástica y su comportamiento sigue una curva de campana.
- El modelo parece ajustarse cuando empleamos el promedio del coeficiente de poisson en su parte elástica y viscosa, de tal manera que utilizando estos

valores	E*  Calculado		E*  Experimental		para
las	Probeta	1	2	1	2
	E*	1247.85	1050.24	1215.95	942.44
	[MPa]				

respectivas frecuencias y diferentes volúmenes de concentración, los resultados del módulo complejo difieren en un porcentaje menor o igual al

20% con respecto a los obtenidos en el laboratorio. Para garantizar mayor precisión en el ajuste del modelo es necesario implementar una metodología que permita medir de manera directa o indirecta la relación de poisson a diferentes frecuencias y temperaturas, para comparar los valores de poisson empleados en el modelo con los exactos calculados, y si no cambian mucho pensar que el modelo se ajusta.

- Es necesaria una inspección rigurosa de las probetas, mediante una técnica que permita establecer con certeza la composición y homogeneidad de las muestras a ensayar. Cambios sustanciales en la densidad de la probeta, pueden representar una mala distribución de las partículas de la arena o la presencia de burbujas de aire, afectando los porcentajes de volumen y los radios de las esferas del modelo, alejando el resultado de calculado por Hervé y Zaoui su valor real obtenido por ensayos de laboratorio.

## BIBLIOGRAFÍA

GOMEZ, José; DELGADO, Horacio; FLORES, Mayra. Propuesta de método de prueba de módulo dinámico en mezclas asfálticas para México. IMT, Publicación Técnica, 2017, vol. 507., p.19.

GOMEZ, Ricardo. Los modelos micromecánicos en la reología de las mezclas asfálticas. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2005.

HERVÉ, Eveline. Elastic behavior of composites containing multi-layer coated particles with imperfect interface bonding conditions and application to size effects and mismatch in these composites. En: International Journal of Solids and Structures, 2014, vol. 51. P. 2865–2877.

HERVÉ, Eveline. Thermal and thermoelastic behavior of multiply coated inclusion-reinforced composites. En: International Journal of Solids and Structures, 2002., vol. 39., p.1041–1058.

HERVÉ, Eveline; ZAOU, André. N-Layered inclusion-based micromechanical modelling. Int. Engng Sci. 1993, vol. 31, N° 1, pp. 1-10.

INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS, “Gravedad Específica y Absorción de Agregados Finos”, INV E-222, 2013.

PEREZ, Marco; SANCHEZ, Monserrat. Fundamentos de la mecánica de los materiales compuestos. Cataluña: Universidad Politécnica de Cataluña, 2002.p.1.

S.Y. Alam; F. Hammoum. Viscoelastic properties of asphalt concrete using micromechanical self-consistent model. En: Elsevier, archives of civil and mechanical engineering, 2015, vol. 15. p.272 – 285.

TSCHOEGL, N.W; KNAUSS, Wolfgang; EMRI, Igor. Poisson's ratio in linear, viscoelasticity – a critical review, *Mechanics of Time- Dependent Materials* 6, 2002, p. 3–51.

## ANEXOS

### ANEXO A

#### Modelo simplificado de (n+1) fases de Hervé y Zaoui

La solución final de Hervé y Zaoui para calcular el módulo  $G^*$  de un composite particular está dado por la siguiente ecuación:

$$X \left( \frac{G_c^*}{G_m^*} \right)^2 + Y \left( \frac{G_c^*}{G_m^*} \right) + Z = 0$$

Donde X, Y y Z son constantes.

#### Modelo a 3 fases

Para un composite particular con 2 capas (modelo a 3 fases), los índices p y m corresponden a la matriz y a la partícula respectivamente:

$$X = 4R_2^{10}(1 - 2v_m)(7 - 10v_m)H_{12} + 20R_2^7(7 - 12v_m + 8v_m^2)H_{42} + 12R_2^5(1 - 2v_m)(H_{14} - 7H_{23})$$

$$+ 20R_2^3(1 - 2v_m)^2H_{13} + 16(4 - 5v_m)(1 - 2v_m)H_{43}$$

$$Y = 3R_2^{10}(1 - 2v_m)(15v_m - 7)H_{12} + 60R_2^7(v_m - 3)v_mH_{42} - 24R_2^5(1 - 2v_m)(H_{14} - 7H_{23})$$

$$- 40R_2^3(1 - 2v_m)^2H_{13} - 8(1 - 5v_m)(1 - 2v_m)H_{43}$$

$$Z = -R_2^{10}(1 - 2v_m)(7 + 5v_m)H_{12} + 10R_2^7(7 - v_m^2)H_{42} + 12R_2^5(1 - 2v_m)(H_{14} - 7H_{23})$$

$$+ 20R_2^3(1 - 2v_m)^2H_{13} - 8(7 - 5v_m)(1 - 2v_m)H_{43}$$

Donde  $H_{\eta\beta}$  son los elementos de una matriz H;  $\eta$  y  $\beta$  equivalen respectivamente a los números de la fila y la columna de la matriz H.

$$\begin{aligned} H_{12} &= P_{11} * P_{22} - P_{21} * P_{12} \\ H_{13} &= P_{11} * P_{32} - P_{31} * P_{12} \\ H_{14} &= P_{11} * P_{42} - P_{41} * P_{12} \\ H_{23} &= P_{21} * P_{32} - P_{31} * P_{22} \\ H_{42} &= P_{41} * P_{22} - P_{21} * P_{42} \\ H_{43} &= P_{41} * P_{32} - P_{31} * P_{42} \end{aligned}$$

La matriz P, está dada por:

$$P = \frac{1}{5(1-v_m)} \begin{bmatrix} \frac{c}{3} & \frac{R_1^2(3b-7c)}{5(1-2v_p)} & \frac{-12\alpha}{R_1^5} & \frac{4(f-27\alpha)}{15(1-v_p)R_1^3} \\ 0 & \frac{(1-2v_m)b}{7(1-2v_p)} & \frac{-20(1-2v_m)\alpha}{7R_1^7} & \frac{-12\alpha(1-2v_m)}{7(1-2v_p)R_1^5} \\ \frac{R_1^5\alpha}{2} & \frac{-R_1^7(2a+147\alpha)}{70(1-2v_p)} & \frac{d}{7} & \frac{R_1^2[105(1-v_m)+12\alpha(7-10v_m)-7e]}{35(1-2v_p)} \\ -\frac{5}{6}(1-2v_{mm})\alpha R_1^3 & \frac{7(1-2v_m)\alpha R_1^5}{2(1-2v_p)} & 0 & \frac{e(1-2v_m)}{3(1-2v_p)} \end{bmatrix}$$

Donde

$$a = \left(\frac{G_p^*}{G_m^*}\right)(7-5v_p)(7-10v_m) - (7-10v_p)(7+5v_m)$$

$$b = 4(7-10v_p) + \left(\frac{G_p^*}{G_m^*}\right)(7+5v_p)$$

$$c = (7-5v_m) + 2\left(\frac{G_p^*}{G_m^*}\right)(4-5v_m)$$

$$d = (7+5v_m) + 4\left(\frac{G_p^*}{G_m^*}\right)(7-10v_m)$$

$$e = 2(4-5v_p) + \left(\frac{G_p^*}{G_m^*}\right)(7+5v_p)$$

$$f = (4 - 5v_p)(7 - 5v_m) - \left(\frac{G_p^*}{G_m^*}\right)(4 - 5v_m)(7 - 5v_p)$$

$$\alpha = \left(\frac{G_p^*}{G_m^*}\right) - 1$$

## ANEXO B

Resultados experimentales ensayo dinámico: METRAVIB +1000/2000.

**Tabla 13 Resultados pruebas de laboratorio Relación 3.0 gramos de arena: 1 gramo de asfalto**

f (Hz)	Probeta 1		EXPERIMENTAL		Probeta 2		EXPERIMENTAL		Probeta 3		EXPERIMENTAL	
	E*   [Pa]	$\delta^\circ$	E*Sen( $\delta^\circ$ )Mpa	E*Cos( $\delta^\circ$ )Mpa	E*   [Pa]	$\delta^\circ$	E*Sen( $\delta^\circ$ )Mpa	E*Cos( $\delta^\circ$ )Mpa	E*   [Pa]	$\delta^\circ$	E*Sen( $\delta^\circ$ )Mpa	E*Cos( $\delta^\circ$ )Mpa
1	6,39E+07	5,57,E+01	52,78	36,00	8,81E+07	6,11,E+01	77,11	42,61	1,21E+08	6,1,E+01	106,35	57,92
3	1,26E+08	5,53,E+01	103,68	71,68	1,83E+08	5,88,E+01	156,95	95,04	2,47E+08	5,8,E+01	208,44	132,47
5	1,80E+08	5,54,E+01	148,08	102,20	2,52E+08	5,71,E+01	211,19	136,73	3,35E+08	5,6,E+01	276,03	189,01
10	2,82E+08	5,37,E+01	226,92	166,83	3,79E+08	5,43,E+01	307,64	221,00	4,95E+08	5,3,E+01	393,41	300,80
15	3,64E+08	5,21,E+01	287,17	223,58	4,75E+08	5,25,E+01	377,27	289,34	6,14E+08	5,1,E+01	475,43	388,43
25	4,86E+08	5,01,E+01	373,03	312,21	6,23E+08	5,02,E+01	478,61	398,32	7,97E+08	4,8,E+01	594,15	531,51
30	5,40E+08	4,94,E+01	409,67	351,51	6,82E+08	4,94,E+01	517,66	444,10	8,72E+08	4,7,E+01	640,03	591,72

**Tabla 14 Resultados pruebas de laboratorio Relación 4.5 gramos de arena: 1 gramo de asfalto**

f (Hz)	PROBETA 1		EXPERIMENTAL		PROBETA 2		EXPERIMENTAL	
	E*   [Pa]	$\delta^\circ$	E*Sen( $\delta^\circ$ )Mpa	E*Cos( $\delta^\circ$ )Mpa	E*   [Pa]	$\delta^\circ$	E*Sen( $\delta^\circ$ )Mpa	E*Cos( $\delta^\circ$ )Mpa
1	1,35E+08	4,32,E+01	92,30	98,35	1,40E+08	5,64,E+01	116,40	77,42
3	2,26E+08	4,83,E+01	168,49	149,97	2,78E+08	5,47,E+01	227,16	160,94
5	3,05E+08	5,06,E+01	235,65	193,42	3,78E+08	5,30,E+01	301,94	227,22
10	4,57E+08	5,07,E+01	353,65	288,97	5,55E+08	5,04,E+01	427,84	353,99
15	5,76E+08	4,98,E+01	440,15	372,25	6,86E+08	4,87,E+01	515,72	452,32
25	7,55E+08	4,76,E+01	557,40	508,72	8,85E+08	4,63,E+01	640,01	611,62
30	8,35E+08	4,65,E+01	606,23	574,59	9,67E+08	4,54,E+01	688,18	679,58

**Tabla 15 Resultados pruebas de laboratorio Relación 5.5 gramos de arena: 1 gramo de asfalto**



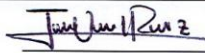
f (Hz)	PROBETA 1		EXPERIMENTAL		PROBETA 2		EXPERIMENTAL	
	E*   [Pa]	$\delta^\circ$	E*Sen( $\delta^\circ$ )Mpa	E*Cos( $\delta^\circ$ )Mpa	E*   [Pa]	$\delta^\circ$	E*Sen( $\delta^\circ$ )Mpa	E*Cos( $\delta^\circ$ )Mpa
1	5,57E+07	3,60,E+01	32,74	45,02	2,53E+08	3,00,E+01	126,89	219,43
3	8,85E+07	4,15,E+01	58,61	66,33	3,48E+08	3,35,E+01	192,15	290,59
5	1,15E+08	4,41,E+01	80,01	82,53	4,18E+08	3,53,E+01	241,16	341,00
10	1,63E+08	4,56,E+01	116,17	113,77	5,36E+08	3,77,E+01	327,94	423,98
15	2,01E+08	4,52,E+01	142,71	141,78	6,27E+08	3,90,E+01	394,13	487,17
25	2,54E+08	4,40,E+01	176,70	182,84	7,20E+08	4,43,E+01	502,66	515,19
30	2,75E+08	4,32,E+01	187,97	200,44	7,47E+08	4,36,E+01	515,71	540,92

**Tabla 16 Resultados pruebas de laboratorio Relación 6.5 gramos de arena: 1 gramo de asfalto**

f (Hz)	PROBETA 1		EXPERIMENTAL		PROBETA 2		EXPERIMENTAL	
	E*   [Pa]	$\delta^\circ$	E*Sen( $\delta^\circ$ )Mpa	E*Cos( $\delta^\circ$ )Mpa	E*   [Pa]	$\delta^\circ$	E*Sen( $\delta^\circ$ )Mpa	E*Cos( $\delta^\circ$ )Mpa
1	1,81E+08	4,61,E+01	130,06	125,27	3,33E+08	2,55,E+01	143,34	300,43
3	3,24E+08	4,71,E+01	237,69	220,56	4,50E+08	3,17,E+01	236,12	382,73
5	4,24E+08	4,63,E+01	306,45	292,54	5,53E+08	3,49,E+01	316,29	453,41
10	5,82E+08	4,51,E+01	412,36	411,11	7,40E+08	3,73,E+01	448,82	588,50
15	7,00E+08	4,40,E+01	485,99	503,53	8,96E+08	3,76,E+01	546,29	709,95
25	8,73E+08	4,25,E+01	590,18	643,35	1,11E+09	3,71,E+01	671,72	886,96
30	9,42E+08	4,19,E+01	629,62	701,26	1,22E+09	3,66,E+01	724,49	976,55



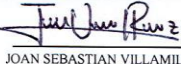
## ANEXO C

### Ensayo de gravedad específica agregado fino

	<b>PESO ESPECIFICO Y ABSORCION DE AGREGADOS FINOS INV E-222</b>					RT-L-054											
						Versión 1											
						Enero de 2013											
						Página 1 de 1											
<b>OBRA :</b> PROYECTO DE GRADO INGENIERIA CIVIL <b>CLIENTE :</b> JOAN SEBASTIAN VILLAMIL RAMIREZ <b>FECHA :</b> NOVIEMBRE DE 2017 <b>LOCALIZACIÓN :</b> LABORATORIO RUTOQUE ALTO					<b>CONSECUTIVO</b> Ensayo No      1												
<b>PRUEBAS</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>PROMEDIO</b>											
A, grs	493.3	493.5	493.4														
V, c. c.	500.0	500.0	500.0														
W, c. c.	311.1	309.6	310.4														
V - W	188.9	190.4	189.6														
B	500.0	500.0	500.0														
B-A	6.7	6.5	6.6														
(V - W) - (B - A)	182.2	183.9	183.0														
Gs, BULK = $\frac{A}{V - W}$	2.611	2.592	2.602			<b>2.602</b>											
Gs, BULK SSS = $\frac{B}{V - W}$	2.647	2.626	2.637			<b>2.637</b>											
Gs, Aparente = $\frac{A}{(V - W) - (B - A)}$	2.707	2.684	2.696			<b>2.696</b>											
ABSORCION % = $\frac{B-A}{A} \times 100$	1.36%	1.32%	1.34%			<b>0.013</b>											
<table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="width: 15%;"><b>A</b></td> <td style="width: 60%;">PESO EN AIRE DE LA MUESTRA SECA, grs</td> <td rowspan="5" style="width: 25%; vertical-align: top; padding-left: 20px;"> <b>NOTA :</b> LAS PRUEBAS NO DEBEN VARIAR MAS DE 0,02 EN DE 0,31 EN ABSORCION.                 </td> </tr> <tr> <td><b>B</b></td> <td>PESO EN AIRE DE LA MUESTRA SATURADA, SUPERFICIE SECA, grs</td> </tr> <tr> <td><b>C</b></td> <td>PESO EN AGUA DE LA MUESTRA SATURADA SUPERFICIE SECA, grs</td> </tr> <tr> <td><b>Gs</b></td> <td>PESO ESPECIFICO</td> </tr> <tr> <td><b>V</b></td> <td>VOLUMEN DEL PICNOMETRO, ml.</td> </tr> </table> <p><b>OBSERVACIONES :</b>      Arena retenida tamiz N°4.</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p>							<b>A</b>	PESO EN AIRE DE LA MUESTRA SECA, grs	<b>NOTA :</b> LAS PRUEBAS NO DEBEN VARIAR MAS DE 0,02 EN DE 0,31 EN ABSORCION.	<b>B</b>	PESO EN AIRE DE LA MUESTRA SATURADA, SUPERFICIE SECA, grs	<b>C</b>	PESO EN AGUA DE LA MUESTRA SATURADA SUPERFICIE SECA, grs	<b>Gs</b>	PESO ESPECIFICO	<b>V</b>	VOLUMEN DEL PICNOMETRO, ml.
<b>A</b>	PESO EN AIRE DE LA MUESTRA SECA, grs	<b>NOTA :</b> LAS PRUEBAS NO DEBEN VARIAR MAS DE 0,02 EN DE 0,31 EN ABSORCION.															
<b>B</b>	PESO EN AIRE DE LA MUESTRA SATURADA, SUPERFICIE SECA, grs																
<b>C</b>	PESO EN AGUA DE LA MUESTRA SATURADA SUPERFICIE SECA, grs																
<b>Gs</b>	PESO ESPECIFICO																
<b>V</b>	VOLUMEN DEL PICNOMETRO, ml.																
 PEDRO PABLO PICO Ingeniero Civil - M.P. 68202-259231 REVISÓ			 JOAN SEBASTIAN VILLAMIL RAMIREZ Aux. Laboratorista - C.C.1098693956 ENSAYO Y CALCULO														



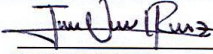
## ANEXO C

### Ensayo de gravedad específica agregado fino

 <b>PI S.A.S.</b> <small>Laboratorio de Ingeniería</small>	<b>PESO ESPECIFICO Y ASOCIACION DE AGREGADOS FINOS INV E-222</b>					<b>RT-L-054</b>
						Versión 1
						Enero de 2013
						Página 1 de 1
<b>OBRA :</b> PROYECTO DE GRADO INGENIERÍA CIVIL <b>CLIENTE :</b> JOAN SEBASTIAN VILLAMIL RAMIREZ <b>FECHA :</b> NOVIEMBRE DE 2017 <b>LOCALIZACIÓN :</b> LABORATORIO RUITOQUE ALTO					<b>CONSECUTIVO</b> Ensayo No      1	
<b>PRUEBAS</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>PROMEDIO</b>
A, grs	491.0	491.0	491.0			
V, c. c.	500.0	500.0	500.0			
W, c. c.	308.3	307.3	307.8			
V - W	191.7	192.7	192.2			
B	500.0	500.0	500.0			
B-A	9.0	9.0	9.0			
(V - W) - (B - A)	182.7	183.7	183.2			
Gs, BULK = $\frac{A}{V - W}$	2.561	2.548	2.555			2.555
Gs, BULK SSS = $\frac{B}{V - W}$	2.608	2.595	2.601			2.601
Gs, Aparente = $\frac{A}{(V - W) - (B - A)}$	2.687	2.673	2.680			2.680
ABSORCIÓN % = $\frac{B-A}{A} \times 100$	1.83%	1.83%	1.83%			0.018
<p> <b>A</b> PESO EN AIRE DE LA MUESTRA SECA grs  <b>B</b> PESO EN AIRE DE LA MUESTRA SATURADA, SUPERFICIE SECA, grs  <b>C</b> PESO EN AGUA DE LA MUESTRA SATURADA, SUPERFICIE SECA, grs  <b>Gs</b> PESO ESPECIFICO  <b>V</b> VOLUMEN DEL PICNOMETRO, ml.                 </p> <p style="text-align: right;"><b>NOTA :</b> LAS PRUEBAS NO DEBEN VARIAR MAS DE 0,02 EN DE 0,31 EN ABSORCION.</p> <p><b>OBSERVACIONES :</b> _____ Arena retenida tamiz N°10.                  _____                  _____</p>						
 PEDRO PABLO PICO Ingeniero Civil - M.P. 68202-259231 REVISÓ			 JOAN SEBASTIAN VILLAMIL RAMIREZ Aux. Laboratorista - C.C.1098693956 ENSAYO Y CALCULO			


## ANEXO C

### Ensayo de gravedad específica agregado fino

	<b>PESO ESPECIFICO Y ABSORCION DE AGREGADOS FINOS INV E-222</b>					RT-L-054											
						Versión 1											
						Enero de 2013											
						Página 1 de 1											
OBRA : <u>PROYECTO DE GRADO INGENIERIA CIVIL</u> CLIENTE <u>JOAN SEBASTIAN VILLAMIL RAMIREZ</u> FECHA : <u>NOVIEMBRE DE 2017</u> LOCALIZACIÓN <u>LABORATORIO RUITOQUE ALTO</u>					CONSECUTIVO  Ensayo No      1												
<b>PRUEBAS</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>PROMEDIO</b>											
A, grs	491.3	494.9	493.1														
V, c. c.	500.0	500.0	500.0														
W, c. c.	310.0	308.8	309.4														
V - W	190.0	191.2	190.6														
B	500.0	500.0	500.0														
B-A	8.7	5.1	6.9														
(V - W) - (B - A)	181.3	186.1	183.7														
Gs, BULK = $\frac{A}{V - W}$	2.586	2.588	2.587			2.587											
Gs, BULK SSS = $\frac{B}{V - W}$	2.632	2.615	2.623			2.623											
Gs, Aparente = $\frac{A}{(V - W) - (B - A)}$	2.710	2.659	2.684			2.684											
ABSORCION % = $\frac{B-A}{A} \times 100$	1.77%	1.03%	1.40%			0.014											
<table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="width: 20%;"><b>A</b></td> <td style="width: 50%;">PESO EN AIRE DE LA MUESTRA SECA, grs</td> <td rowspan="5" style="width: 30%; vertical-align: top; padding-left: 20px;"><b>NOTA :</b> LAS PRUEBAS NO DEBEN VARIAR MAS DE 0,02 EN DE 0,31 EN ABSORCION.</td> </tr> <tr> <td><b>B</b></td> <td>PESO EN AIRE DE LA MUESTRA SATURADA, SUPERFICIE SECA, grs</td> </tr> <tr> <td><b>C</b></td> <td>PESO EN AGUA DE LA MUESTRA SATURADA SUPERFICIE SECA, grs</td> </tr> <tr> <td><b>Gs</b></td> <td>PESO ESPECIFICO</td> </tr> <tr> <td><b>V</b></td> <td>VOLUMEN DEL PICNOMETRO, ml.</td> </tr> </table> <p><b>OBSERVACIONES :</b>      Arena retenida tamiz N°40.</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p>							<b>A</b>	PESO EN AIRE DE LA MUESTRA SECA, grs	<b>NOTA :</b> LAS PRUEBAS NO DEBEN VARIAR MAS DE 0,02 EN DE 0,31 EN ABSORCION.	<b>B</b>	PESO EN AIRE DE LA MUESTRA SATURADA, SUPERFICIE SECA, grs	<b>C</b>	PESO EN AGUA DE LA MUESTRA SATURADA SUPERFICIE SECA, grs	<b>Gs</b>	PESO ESPECIFICO	<b>V</b>	VOLUMEN DEL PICNOMETRO, ml.
<b>A</b>	PESO EN AIRE DE LA MUESTRA SECA, grs	<b>NOTA :</b> LAS PRUEBAS NO DEBEN VARIAR MAS DE 0,02 EN DE 0,31 EN ABSORCION.															
<b>B</b>	PESO EN AIRE DE LA MUESTRA SATURADA, SUPERFICIE SECA, grs																
<b>C</b>	PESO EN AGUA DE LA MUESTRA SATURADA SUPERFICIE SECA, grs																
<b>Gs</b>	PESO ESPECIFICO																
<b>V</b>	VOLUMEN DEL PICNOMETRO, ml.																
 PEDRO PABLO PICO Ingeniero Civil - M.P. 68202-259231 REVISÓ			 JOAN SEBASTIAN VILLAMIL RAMIREZ Aux. Laboratorista - C.C. 1098693956 ENSAYO Y CALCULO														

## ANEXO C


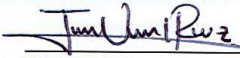
### Ensayo de gravedad específica agregado fino

	<b>PESO ESPECIFICO Y ABSORCION DE AGREGADOS FINOS INV E-222</b>					<b>RT-L-054</b> Versión 1 Enero de 2013 Página 1 de 1																																																																																			
	<b>OBRA :</b> PROYECTO DE GRADO INGENIERÍA CIVIL <b>CLIENTE :</b> JOAN SEBASTIAN VILLAMIL RAMIREZ <b>FECHA :</b> NOVIEMBRE DE 2017 <b>LOCALIZACIÓN :</b> LABORATORIO RUITOQUE ALTO					<b>CONSECUTIVO</b>  Ensayo No      1																																																																																			
	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 20%;">PRUEBAS</th> <th style="width: 10%;">1</th> <th style="width: 10%;">2</th> <th style="width: 10%;">3</th> <th style="width: 10%;">4</th> <th style="width: 10%;">5</th> <th style="width: 10%;">PROMEDIO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>A, grs</td> <td style="text-align: center;">495.8</td> <td style="text-align: center;">99.1</td> <td style="text-align: center;">99.1</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>V, c. c.</td> <td style="text-align: center;">500.0</td> <td style="text-align: center;">100.0</td> <td style="text-align: center;">100.0</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>W, c. c.</td> <td style="text-align: center;">314.7</td> <td style="text-align: center;">63.1</td> <td style="text-align: center;">63.1</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>V - W</td> <td style="text-align: center;">185.3</td> <td style="text-align: center;">36.9</td> <td style="text-align: center;">36.9</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>B</td> <td style="text-align: center;">500.0</td> <td style="text-align: center;">100.0</td> <td style="text-align: center;">100.0</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>B-A</td> <td style="text-align: center;">4.2</td> <td style="text-align: center;">0.9</td> <td style="text-align: center;">0.9</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>(V - W) - (B - A)</td> <td style="text-align: center;">181.1</td> <td style="text-align: center;">36.0</td> <td style="text-align: center;">36.0</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Gs, BULK = <math>\frac{A}{V - W}</math></td> <td style="text-align: center;">2.676</td> <td style="text-align: center;">2.686</td> <td style="text-align: center;">2.686</td> <td></td> <td></td> <td style="text-align: center;"><b>2.681</b></td> </tr> <tr> <td>Gs, BULK SSS = <math>\frac{B}{V - W}</math></td> <td style="text-align: center;">2.698</td> <td style="text-align: center;">2.710</td> <td style="text-align: center;">2.710</td> <td></td> <td></td> <td style="text-align: center;"><b>2.704</b></td> </tr> <tr> <td>Gs, Aparente = <math>\frac{A}{(V - W) - (B - A)}</math></td> <td style="text-align: center;">2.738</td> <td style="text-align: center;">2.753</td> <td style="text-align: center;">2.753</td> <td></td> <td></td> <td style="text-align: center;"><b>2.745</b></td> </tr> <tr> <td>ABSORCION % = <math>\frac{B-A}{A} \times 100</math></td> <td style="text-align: center;">0.85%</td> <td style="text-align: center;">0.91%</td> <td style="text-align: center;">0.91%</td> <td></td> <td></td> <td style="text-align: center;"><b>0.009</b></td> </tr> </tbody> </table>						PRUEBAS	1	2	3	4	5	PROMEDIO	A, grs	495.8	99.1	99.1				V, c. c.	500.0	100.0	100.0				W, c. c.	314.7	63.1	63.1				V - W	185.3	36.9	36.9				B	500.0	100.0	100.0				B-A	4.2	0.9	0.9				(V - W) - (B - A)	181.1	36.0	36.0				Gs, BULK = $\frac{A}{V - W}$	2.676	2.686	2.686			<b>2.681</b>	Gs, BULK SSS = $\frac{B}{V - W}$	2.698	2.710	2.710			<b>2.704</b>	Gs, Aparente = $\frac{A}{(V - W) - (B - A)}$	2.738	2.753	2.753			<b>2.745</b>	ABSORCION % = $\frac{B-A}{A} \times 100$	0.85%	0.91%	0.91%		
PRUEBAS	1	2	3	4	5	PROMEDIO																																																																																			
A, grs	495.8	99.1	99.1																																																																																						
V, c. c.	500.0	100.0	100.0																																																																																						
W, c. c.	314.7	63.1	63.1																																																																																						
V - W	185.3	36.9	36.9																																																																																						
B	500.0	100.0	100.0																																																																																						
B-A	4.2	0.9	0.9																																																																																						
(V - W) - (B - A)	181.1	36.0	36.0																																																																																						
Gs, BULK = $\frac{A}{V - W}$	2.676	2.686	2.686			<b>2.681</b>																																																																																			
Gs, BULK SSS = $\frac{B}{V - W}$	2.698	2.710	2.710			<b>2.704</b>																																																																																			
Gs, Aparente = $\frac{A}{(V - W) - (B - A)}$	2.738	2.753	2.753			<b>2.745</b>																																																																																			
ABSORCION % = $\frac{B-A}{A} \times 100$	0.85%	0.91%	0.91%			<b>0.009</b>																																																																																			

**A** PESO EN AIRE DE LA MUESTRA SECA, grs  
**B** PESO EN AIRE DE LA MUESTRA SATURADA, SUPERFICIE SECA, grs  
**C** PESO EN AGUA DE LA MUESTRA SATURADA, SUPERFICIE SECA, grs  
**Gs** PESO ESPECIFICO  
**V** VOLUMEN DEL PICNOMETRO, ml.



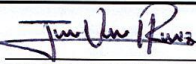
**NOTA :** LAS PRUEBAS NO DEBEN VARIAR MAS DE 0.02 EN DE 0.31 EN ABSORCION.

**OBSERVACIONES :** \_\_\_\_\_ Arena retenida tamiz N°100.  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_

 PEDRO PABLO PICO Ingeniero Civil - M.P. 68202-259231 REVISÓ	 JOAN SEBASTIAN VILLAMIL RAMIREZ Aux. Laboratorista - C.C.1098693956 ENSAYO Y CALCULO
--	---

## ANEXO C

### Ensayo de gravedad específica agregado fino

	<b>PESO ESPECIFICO Y ABSORCION DE AGREGADOS FINOS INV E-222</b>					<b>RT-L-054</b>															
						Versión 1															
						Enero de 2013															
					Página 1 de 1																
<b>OBRA :</b> PROYECTO DE GRADO INGENIERÍA CIVIL <b>CLIENTE :</b> JOAN SEBASTIAN VILLAMIL RAMIREZ <b>FECHA :</b> NOVIEMBRE DE 2017 <b>LOCALIZACIÓN :</b> LABORATORIO RUITOQUE ALTO					<b>CONSECUTIVO</b>  Ensayo No      1																
<b>PRUEBAS</b>																					
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>PROMEDIO</b>															
A, grs	98.8	98.7	98.8																		
V, c. c.	100.0	100.0	100.0																		
W, c. c.	63.5	63.5	63.5																		
V - W	36.5	36.5	36.5																		
B	100.0	100.0	100.0																		
B-A	1.2	1.3	1.2																		
(V - W) - (B - A)	35.3	35.2	35.3																		
Gs, BULK = $\frac{A}{V - W}$	2.707	2.704	2.707			2.706															
Gs, BULK SSS = $\frac{B}{V - W}$	2.740	2.740	2.740			2.740															
Gs, Aparente = $\frac{A}{(V - W) - (B - A)}$	2.799	2.804	2.799			2.801															
ABSORCION % = $\frac{B-A}{A} \times 100$	1.21%	1.32%	1.21%			0.013															
<table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="width: 20px;"><b>A</b></td> <td>PESO EN AIRE DE LA MUESTRA SECA, grs</td> <td></td> </tr> <tr> <td><b>B</b></td> <td>PESO EN AIRE DE LA MUESTRA SATURADA, SUPERFICIE SECA, grs</td> <td></td> </tr> <tr> <td><b>C</b></td> <td>PESO EN AGUA DE LA MUESTRA SATURADA SUPERFICIE SECA, grs</td> <td></td> </tr> <tr> <td><b>Gs</b></td> <td>PESO ESPECIFICO</td> <td style="text-align: right;"><b>NOTA :</b> LAS PRUEBAS NO DEBEN VARIAR MAS DE 0,02 EN DE 0,31 EN ABSORCION.</td> </tr> <tr> <td><b>V</b></td> <td>VOLUMEN DEL PICNOMETRO, ml.</td> <td></td> </tr> </table> <p><b>OBSERVACIONES :</b>      Arena retenida tamiz N°200.</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p>							<b>A</b>	PESO EN AIRE DE LA MUESTRA SECA, grs		<b>B</b>	PESO EN AIRE DE LA MUESTRA SATURADA, SUPERFICIE SECA, grs		<b>C</b>	PESO EN AGUA DE LA MUESTRA SATURADA SUPERFICIE SECA, grs		<b>Gs</b>	PESO ESPECIFICO	<b>NOTA :</b> LAS PRUEBAS NO DEBEN VARIAR MAS DE 0,02 EN DE 0,31 EN ABSORCION.	<b>V</b>	VOLUMEN DEL PICNOMETRO, ml.	
<b>A</b>	PESO EN AIRE DE LA MUESTRA SECA, grs																				
<b>B</b>	PESO EN AIRE DE LA MUESTRA SATURADA, SUPERFICIE SECA, grs																				
<b>C</b>	PESO EN AGUA DE LA MUESTRA SATURADA SUPERFICIE SECA, grs																				
<b>Gs</b>	PESO ESPECIFICO	<b>NOTA :</b> LAS PRUEBAS NO DEBEN VARIAR MAS DE 0,02 EN DE 0,31 EN ABSORCION.																			
<b>V</b>	VOLUMEN DEL PICNOMETRO, ml.																				
 PEDRO PABLO PICO Ingeniero Civil - M.P. 68202-259231 REVISÓ			 JOAN SEBASTIAN VILLAMIL RAMIREZ Aux. Laboratorista - C.C. 1098693956 ENSAYO Y CALCULO																		