

**INFLUENCIA DE LOS PARAMETROS DE DISEÑO DE UNA MEZCLA
ASFALTICA EN EL MODULO DE RIGIDEZ BAJO CARGA MONOTONICA**

**GUILLERMO ALBARRACIN ALFONSO
GUSTAVO FUENTES ROMAN**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOMECHANICAS
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
BUCARAMANGA**

2011

**INFLUENCIA DE LOS PARAMETROS DE DISEÑO DE UNA MEZCLA
ASFALTICA EN EL MODULO DE RIGIDEZ BAJO CARGA MONOTONICA**

**GUILLERMO ALBARRACIN ALFONSO
GUSTAVO FUENTES ROMAN**

Tesis de grado en la modalidad de investigación

Para optar el título de:

Ingeniero civil

Director

EDUARDO ALBERTO CASTAÑEDA PINZON

INGENIERO CIVIL, M.Sc, Doctor

Codirectora

MARÍA CRISTINA RIVERO OLARTE

Ingeniera Civil

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOMECHANICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2011

A mi madre y mi abuela, que siempre han creído en mí y lo han dado todo porque yo sea ingeniero.

A mi familia por su apoyo incondicional en todo momento.

A mis amigos, compañeros de muchas aventuras.

A Gustavo mi compañero de proyecto, que siempre conservo la calma y se llenó de paciencia en los momentos difíciles.

A todas las personas que conozco, creo que todos han dejado una huella que me ha permitido crecer como persona y de ahora en adelante como profesional.

GUILLERMO ALBARRACIN ALFONSO

A mis hermanas, en especial a Valentina que ha estado en todo momento animándome a continuar, y apoyándome en todo momento.

A mis Padres, por el apoyo que me ha dado en todo momento.

A mi María Cristina, ya que gracias a su colaboración y paciencia, logramos llevar a cabo este proyecto.

A mis amigos que nos acompañaron en todo momento, y me brindaron su amistad y colaboración cuando más los necesitaba.

GUSTAVO FUENTES ROMAN

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos a:

Ing. Eduardo Castañeda Pinzón.

Ing. María Cristina Olarte.

Ing. Robinson Montañez.

A todos nuestros compañeros de estudio, amigos y familiares.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCION.....	17
1 MARCO TEORICO.....	19
1.1 MEZCLAS ASFALTICAS.....	19
1.1.1 Mezclas asfálticas en caliente.....	19
1.1.2 Agregado mineral.....	20
1.1.3 Ligante asfáltico.....	21
1.1.4 Rigidez de la mezcla asfáltica.....	22
1.1.5 Efecto de los factores de diseño en el módulo de rigidez.....	23
1.2 DISEÑO DE EXPERIMENTOS.....	25
1.2.1 Método tradicional de experimentación.....	26
1.2.2 Diseños factoriales.....	30
1.2.3 Importancia de los diseños factoriales 2k.....	30
1.2.4 Diseño factorial completo 2K.....	32
1.2.5 Interacciones: definición y cálculo del efecto.....	36
2 METODOLOGIA DE ESTUDIO.....	38
2.1 CARACTERIZACION MECANICA DE LAS PROBETAS.....	39
2.1.1 Nomenclatura.....	39
2.2 Pruebas efectuadas sobre las muestras.....	40
2.3 INSTRUMENTACION.....	40
2.3.1 Máquina para realizar el ensayo. MTS- Test Sistem-810.....	40
2.3.2 Instrumento de control de temperatura.....	41
3 INFLUENCIA DE LAS VARIABLES EN EL MODULO MONOTONICO.....	43
3.1 EFECTOS PRINCIPALES DE LOS FACTORES DE DISEÑO EN EL MÓDULO DE RIGIDEZ.....	43
3.2 INTERACCIÓN ENTRE LOS FACTORES DE DISEÑO.....	49
4 CONCLUSIONES.....	60
BIBLIOGRAFIA.....	62
ANEXOS.....	64

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Factores de mezcla.....	39
Tabla 2. Análisis ANOVA	47
Tabla 3. Combinación de factores.	59

LISTA DE GRAFICAS

GRAFICA 1. Representación de un sistema en estudio: factores (x), respuestas (y)	26
GRAFICA 2. Experimentación variando un factor cada vez.	27
GRAFICA 3. Optimización de una respuesta variando un factor a la vez.	27
GRAFICA 4. Líneas de respuesta.	36
GRAFICA 5. Líneas de respuesta con interacción.	37
GRAFICA 6. Módulo vs Temperatura.	43
GRAFICA 7. Módulo vs Velocidad.	44
GRAFICA 8. Módulo vs Contenido de asfalto.	44
GRAFICA 9. Módulo vs tipo de asfalto	45
GRAFICA 10. Módulo vs Gradación.	46
GRAFICA 11. Módulo vs Fuente.	46
GRAFICA 12. Efectos Principales De Los Factores De Diseño En El Módulo De Rigidez Monotónico	48
GRAFICA 13. Interacción entre dos factores en el comportamiento de la rigidez.	50
GRAFICA 14. Interacción entre la temperatura (°C) y la velocidad de deformación (mm/min).	51
GRAFICA 15. Interacción entre la temperatura (°C) y el Contenido de asfalto.	52
GRAFICA 16. Interacción la temperatura y Tipo de asfalto (°C).	53
GRAFICA 17. Interacción entre el Contenido de asfalto y el tipo de asfalto.	53
GRAFICA 18. Interacción entre el Contenido de asfalto y el tipo de mezcla.	54
GRAFICA 19. Interacción entre el Contenido de asfalto y la fuente del agregado	55
GRAFICA 20. Interacción entre el Tipo de asfalto y la fuente del agregado.	56
GRAFICA 21. Interacción entre el Tipo de mezcla y la fuente del agregado.	56
GRAFICA 22. Interacción entre el contenido de asfalto y la velocidad de formación.	57
GRAFICA 23. Interacción entre el tipo de asfalto y el tipo de mezcla.	58

LISTA DE FOTOGRAFIAS

FOTOGRAFIA 1. Probetas	38
FOTOGRAFIA 2. Máquina MTS-810	41
FOTOGRAFIA 3. Instrumentos de control	42

ANEXOS

ANEXO A. DISEÑOS ELABORADOS PARA EL ANALISIS.....	64
ANEXO B. GRAFICAS MODULO Vs TEMPERATURA Y TABLAS DE RESPUESTA DEL MODULO DE LOS DISEÑOS A VELOCIDADES DE 1,7 Y 15 (mm/min).....	65
ANEXO C. TABLA DE VALORES DEL MODULO EN CADA ENSAYO REALIZADO.....	77
ANEXO D TABLAS DEL ANALISIS ESTADISTICO	95

TITULO:

INFLUENCIA DE LOS PARAMETROS DE DISEÑO DE UNA MEZCLA ASFALTICA EN EL MÓDULO DE RIGIDEZ BAJO CARGA MONOTÓNICA*

AUTORES

ALBARRACIN ALFONSO Guillermo

FUENTES ROMAN Gustavo

PALABRAS CLAVES:

Módulo de rigidez monotónico, Mezclas densas en caliente MDC-2, Mezclas abiertas M1, Asfaltita.

CONTENIDO

El presente estudio da a conocer la influencia de los parámetros de diseño que afectan el módulo de rigidez monotónico, los cuales corresponden a: la temperatura, la velocidad de deformación, el tipo de agregado, la granulometría, la fuente del agregado, y el contenido de asfalto.

Para el estudio se fabricaron las probetas teniendo en cuenta los cuatro siguientes factores: Tipo de asfalto (20/30 o 60/70), el contenido de asfalto (4.5, 5.0%, o 5.5%), la fuente del agregado (Chicamocha o Rionegro), y la granulometría (MDC-2 o M1). En total se realizaron 24 diseños diferentes con tres réplicas de cada uno.

Para cada ensayo las probetas se acondicionaron a tres temperaturas diferentes, de 7, 19, y 35°C iniciando con la temperatura más baja, para evitar la acumulación de deformación permanente. En cada ensayo se sometieron a una carga monotónica hasta obtener la deformación deseada y así calcular su módulo de rigidez monotónico.

En cada ensayo, las probetas mostraron un comportamiento por temperatura y por velocidad de deformación las cuales se tomaron de 1, 7, y 15 mm/min. En la temperatura más baja presentó un módulo mayor, por el contrario en la temperatura alta el módulo decrece. Para la velocidad de deformación menor el módulo fue bajo en comparación con la velocidad alta, es decir a mayor velocidad mayor es el módulo.

También se observó la influencia de la granulometría en donde el mayor módulo se presentó con la MDC-2, y con el contenido de asfalto el cual se observó que para los parámetros elegidos el mayor módulo fue con un contenido de 5.0%.

*Tesis de Grado.

** Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas. Ingeniería Civil. Ing. EDUARDO ALBERTO CASTAÑEDA PINZON. Ing. MARIA CRISTINA RIVERO OLARTE.

ABSTRAC

TITLE:

DESIGN PARAMETERS INFLUENCE OF A MIX ASPHALT IN THE MODULE OF RIGIDITY UNDER MONOTONIC LOADING*

AUTHORS

ALBARRACIN ALFONSO Guillermo
FUENTES ROMAN Gustavo

KEYWORDS

Modulus of monotonic rigidity, Dense hot mixtures MDC-2, Opened mixtures, Asphaltite.

DESCRIPTION

The aim of the study is to expose the design parameters influence of that affect the modulus of monotonic rigidity which correspond to: strain rate, aggregate type, grading, the source of aggregate and asphalt content.

Firstly the specimens were made taking into account the following four factors: type of asphalt (20/30 or 60/70), asphalt content (4.5, 5.0%, or 5.5%), the source of the aggregate (or Chicamocha Rionegro) and grain (MDC-2 or M1). Finally, there were 24 different designs with three copies of each one.

the test tubes were conditioned to each test at three different temperatures, 7, 19 and 35 ° C starting with the lowest temperature to avoid the permanent accumulation of deformation. The test tubes were subjected to a monotonic loading in each trial, until the desired deformation to calculate the modulus monotonically.

The test tubes showed a specific behavior with the different temperatures and strain rates (the strain rates were taken 1, 7, and 15 mm / min). the lowest temperature exhibited a large module, however at high temperature decreases the module. For the lower strain rate the module was low compared to high speed, that is to say when there is more faster the module become higher.

The study also analyzed the influence of particle size where the largest module were presented to the MDC-2, and the asphalt content where it was noticed that the parameters chosen for the largest module was a content of 5.0%.

* Degree Thesis.

** Physical Mechanical Engineering Faculty. Civil Engineering. Ing. EDUARDO ALBERTO CASTAÑEDA PINZON. Ing. MARIA CRISTINA RIVERO OLARTE.

INTRODUCCION

El módulo de rigidez del concreto asfáltico es una propiedad importante del material en cualquier procedimiento mecanístico de diseño y análisis de pavimentos flexibles. Para el diseño de pavimentos el módulo se ha convertido en un elemento fundamental debido a que caracteriza de manera racional el comportamiento esfuerzo-deformación de los materiales que conforman la estructura.

En la mezcla asfáltica existen diversos factores que influyen en el desempeño del material, entre los cuales se pueden enumerar: las características de los materiales usados para la fabricación del concreto asfáltico, los procesos de fabricación, además de las condiciones in situ que debe soportar la estructura de pavimento asfáltico.

El objetivo del estudio es determinar el comportamiento de la mezcla asfáltica al caracterizar su desempeño a través del módulo de rigidez cuando el material se somete a una carga monótonica y analizar la influencia en la rigidez debido al cambio de los factores de diseño. Entre los factores de diseño se tienen: contenido de asfalto, tipo de asfalto, granulometría (mezcla abierta o cerrada) y la procedencia del agregado. Además de lo anterior, durante las pruebas realizadas se determinó el comportamiento de la rigidez de la mezcla cuando se somete a diferentes temperaturas y velocidades de deformación.

De esta forma, se define la influencia de ciertos factores de diseño de la mezcla, en una característica fundamental del material como lo es la rigidez.

OBJETIVOS

Objetivo general:

- Determinar la influencia de los materiales de diseño de una mezcla asfáltica en el módulo de rigidez monotónica.

Objetivos específicos:

- Realizar el análisis del efecto de los materiales de diseño para pavimentos en el módulo de rigidez.
- Comparar el efecto de la variación en la composición de un pavimento a través de su módulo de rigidez.
- Contribuir a la validación de la prueba en la mezcla asfáltica con carga monotónica como método para determinar el comportamiento bajo esfuerzos.

1 MARCO TEORICO.

Para determinar la influencia de los parámetros de diseño de una mezcla asfáltica en el módulo de rigidez, es necesario estudiar y analizar los factores de diseño que lo componen, y así observar cómo interactúan entre ellos y cuál es la influencia en el comportamiento del módulo de rigidez monotónico, para esto se debe conocer cuáles son las propiedades de las mezclas asfálticas y el análisis que será empleado.

1.1 MEZCLAS ASFALTICAS.

La mezcla asfáltica es el producto obtenido de la incorporación y distribución uniforme de un material asfáltico en un pétreo, después de realizada la mezcla asfalto y agregado, el asfalto se enfría, y actúa como un pegamento que mantiene el agregado junto en una matriz sólida.

Las mezclas asfálticas según el procedimiento de mezclado se clasifican en:

- Mezclas asfálticas en caliente.
- Mezclas asfálticas en frío.

En este estudio solo se enfatiza en las mezclas asfálticas en caliente.

1.1.1 Mezclas asfálticas en caliente.

Elaboradas con cemento asfáltico y materiales pétreos, en una planta estacionaria o móvil, dotada de un equipo necesario para calentar los componentes de la

mezcla, según las viscosidades requeridas para proporcionar la adherencia entre los materiales (INV E-748). Estas mezclas a su vez se clasifican en:

1.1.1.1 Mezcla Asfáltica de Granulometría Densa.

Esta mezcla es uniforme y homogénea, elaborada con cemento asfáltico y materiales pétreos bien gradados, con tamaño nominal entre 1 1/2 `` y 3/8``, que satisfagan los requisitos dados, normalmente se utiliza en la construcción de carpetas asfálticas de pavimentos nuevos en los que se requiere una alta resistencia estructural o en las nivelaciones y refuerzo de pavimentos existentes.

1.1.1.2 Mezcla Asfáltica de Granulometría Abierta.

Igualmente uniforme y homogénea pero con un alto porcentaje de vacíos, elaborada con cemento asfáltico y materiales pétreos de granulometría uniforme, con tamaño nominal entre 1/2 `` y 1/4``, que satisfagan los requisitos, que habitualmente se usan para formar capas de rodadura. En comparación con la mezcla densa el porcentaje de vacíos de esta mezcla es mayor o igual al 10 % después de compactada.

1.1.2 Agregado mineral.

Son materiales que están conformados por partículas duras, de forma cúbica, y de caras angulares y rugosas, que ofrezcan propiedades mecánicas aptas para soportar las cargas de tránsito y proporcionar buena adherencia con el ligante. El tipo de agregado pétreo se puede determinar de acuerdo a la procedencia y a la técnica empleada para su aprovechamiento, pueden ser: trituración, artificiales, marginales y naturales siendo este último el utilizado, este tiene la característica

de que se emplean solamente después de una modificación de su distribución de tamaño para adaptarse a las exigencias según su disposición final.

Las mezclas asfálticas es el producto de unir este material granular con asfalto bajo criterios y normas establecidas. Esta mezcla actúa como esqueleto que aporta resistencia y rigidez a la estructura del pavimento, cuyos valores dependen de las propiedades individuales de los materiales. Los porcentajes de partículas de material granular (granulometría) que conforman las mezclas asfálticas hacen que se incrementen o disminuyan sus propiedades mecánicas y dinámicas, de ahí la importancia de escoger una mezcla específica al momento de diseñar, construir o rehabilitar una vía.

1.1.3 Ligante asfáltico.

El asfalto es un material altamente impermeable, adherente y cohesivo capaz de resistir altos esfuerzos instantáneos y fluir bajo la acción de cargas permanentes. El asfalto puede impermeabilizar la estructura del pavimento, proporcionar una íntima unión y cohesión entre agregados, para resistir la acción mecánica de disgregación producida por las cargas de los vehículos.

Los asfaltos se pueden dividir en convencionales y modificados, esta última una tecnología ampliamente utilizada para mejorar las características de los asfaltos convencionales. En este estudio se utiliza un asfalto convencional 60/70 y uno modificado con un asfalto natural (asfaltita) de penetración 20/30.

La incorporación de la asfaltita al ligante asfáltico convencional, produce importantes cambios de sus propiedades como las mencionadas a continuación: aumenta la viscosidad del ligante modificado a altas temperaturas, sin que se

vean afectadas sus propiedades a bajas temperaturas, es decir produce menor susceptibilidad térmica, proporcionando así el desempeño en un amplio rango de condiciones climáticas; disminuye ahuellamientos y desprendimientos; aumenta la estabilidad Marshall: del orden del 40% en las mezclas asfálticas; mejor adherencia asfalto-agregado y mayor resistencia a la acción de deterioro producida por el agua y por último aumento del módulo dinámico de la mezcla, siendo más resistentes a las deformaciones permanentes bajo el accionar de cargas lentas.

1.1.4 Rigidez de la mezcla asfáltica.

En una mezcla bituminosa el módulo de rigidez es la relación entre el esfuerzo y la deformación unitaria y es, quizás, la propiedad fundamental más importante pues proporciona información sobre cuanto se puede deformar el material bajo la acción de una carga dada y su relación con la rotura por fatiga, la deformación permanente y la distribución de las cargas. Se ha demostrado que el módulo de rigidez (E) de una mezcla bituminosa depende tanto de la temperatura como de la velocidad a la cual se le aplica la carga.

El módulo de rigidez en los asfaltos es una propiedad compleja para determinar debido a que las mezclas asfálticas pueden tener un comportamiento elástico lineal, no lineal o viscoso en función de la temperatura y el tiempo de aplicación de la carga. A bajas temperaturas el comportamiento es fundamentalmente elástico lineal, y al aumentar la temperatura se va comportando como un material elástico no lineal, con lo cual aparece la componente viscosa a medida que la temperatura continua aumentando.

Además de los factores ya mencionados el módulo de rigidez depende de otros factores entre los que se pueden mencionar:

- Nivel de la carga.
- Contenido del betún.
- Tipo de agregado.
- Contenido de vacíos.
- Tipos de prueba.
- Temperatura, y frecuencia de aplicación de las cargas.

1.1.5 Efecto de los factores de diseño en el módulo de rigidez.

Una mezcla bituminosa no actúa como la mayoría de los otros materiales. Esto es principalmente por que el asfalto, uno de sus componentes, es un material visco-elástico. Aunque en una mezcla asfáltica, el asfalto sea minoritario en proporción sus propiedades influyen de manera significativa en su comportamiento esto se refleja claramente en la dependencia del valor de módulo de rigidez con la frecuencia de aplicación de la carga: al someter un material a una sollicitación rápida (simulando el paso de un vehículo a alta velocidad) la deformación obtenida es pequeña, por lo cual el valor del módulo será mayor que el obtenido mediante una sollicitación lenta, esta particularidad se presenta debido a que el comportamiento del asfalto depende de la duración del periodo de carga, a mayor tiempo de carga más fluido se vuelve el asfalto.

Algo similar ocurre con el efecto de la temperatura, a altas temperaturas de servicio, puede que el ligante (asfalto) llegue a reblandecerse facilitando la deformación de la mezcla (ahuellamiento). El riesgo de estas deformaciones es aún mayor en pavimentos sometidos a la circulación de vehículos pesados, caso

contrario es lo que sucede a bajas temperaturas, el ligante se vuelve relativamente rígido y va perdiendo poder de resistencia a las tensiones, volviéndose frágil y siendo susceptible de fisuraciones. El grado de susceptibilidad a la fisuración está relacionado con la dureza del asfalto y su capacidad para absorber las sollicitaciones inducidas por el tráfico.

Es necesario buscar un punto óptimo de contenido de asfalto para el diseño de la mezcla de concreto asfáltico. Cuando se agrega asfalto con una cantidad por debajo de la óptima, la adherencia entre los agregados es deficiente, produce desprendimiento de las partículas, en cambio sí se agrega asfalto con una cantidad por arriba de la óptima, la mezcla se hace muy susceptible a grandes deformaciones las cuales llegan a ser permanentes, ya sea por temperatura o por cargas.

En la gradación, la cantidad de finos es importante. Es de esperarse, que una mezcla con una mayor cantidad de finos se comporte mejor en su fabricación, y a su vez tenga mejor adhesión y así obtenga mayor resistencia y rigidez. La forma del agregado proporciona mayor estabilidad al esqueleto granular. Si el agregado es anguloso, hay mejor adherencia entre partículas y a su vez la mezcla obtiene una superficie rugosa la cual proporciona un mayor contacto o trabazón entre las partículas.

1.2 DISEÑO DE EXPERIMENTOS.³

Los conceptos relacionados con el diseño de experimentos han sido desarrollados a partir de la necesidad de obtener mayor conocimiento sobre ciertos procesos determinando los factores que lo afectan. Algunas definiciones y metodologías para crear y analizar diseños de experimentos son referenciadas a continuación:

Los modelos de diseño de experimentos son modelos estadísticos clásicos cuyo objetivo es definir si unos determinados factores influyen en la variable de interés del investigador y, si existe influencia de algún factor poder cuantificar su efecto en la respuesta que se desea estudiar.

La metodología del “Diseño de Experimentos” estudia cómo variar las condiciones habituales de realización de un proceso empírico para aumentar la probabilidad de detectar cambios significativos en la respuesta, de esta forma se obtiene un mayor conocimiento del comportamiento del proceso de interés.

Para que la metodología de diseño de experimentos sea eficaz es fundamental que el experimento esté bien diseñado. Un experimento se realiza por alguno de los siguientes motivos:

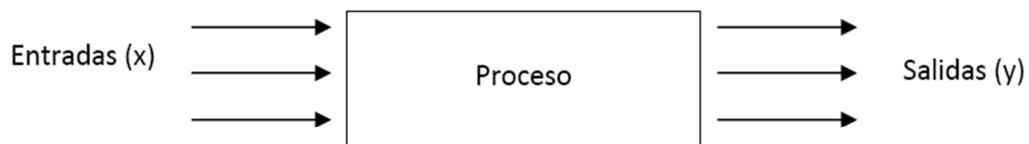
- Determinar las principales causas de variación en la respuesta.
- Encontrar las condiciones experimentales con las que se consigue un valor extremo en la variable de interés o respuesta
- Comparar las respuestas en diferentes niveles de observación de variables controladas.
- Obtener un modelo estadístico-matemático que permita hacer predicciones de respuestas futuras.

³<http://es.scribd.com/doc/20455310/Diseno-de-Experimentos>

1.2.1 Método tradicional de experimentación.⁴

El método tradicional de experimentación, es el que quizás surge de forma más intuitiva para estudiar el sistema de la gráfica 1. Consiste en variar uno de los factores a partir de unas condiciones iniciales, y se realizan experimentos en los que otros factores se mantienen constantes. De este modo, la variación de la respuesta se puede atribuir a la variación del factor. El procedimiento se repite para los otros factores. El razonamiento que soporta esta forma de actuar es que si se variaran dos o más factores entre dos experimentos consecutivos, no sería posible conocer si el cambio en la respuesta ha sido debido al cambio de un factor, al de otro, o al de todos a la vez.

GRAFICA 1. Representación de un sistema en estudio: factores (x), respuestas (y).⁵

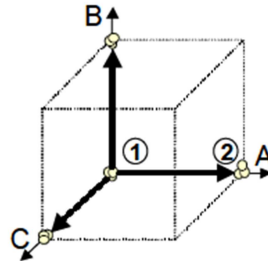


La gráfica 2, ilustra el estudio del efecto de tres factores (A, B y C) sobre una respuesta de interés del investigador. El método tradicional aplicado al factor A consiste en realizar un experimento a unos valores determinados (fijos) de B y C pero a dos valores distintos de A (puntos 1 y 2). La variación en la respuesta indica el efecto de A sobre la respuesta. El procedimiento se repite para los otros dos factores. Para reducir la incertidumbre de los efectos observados se pueden repetir los experimentos.

⁴FERRÉ & RIUS, INTRODUCCION AL DISEÑO ESTADISTICO DE EXPERIMENTOS

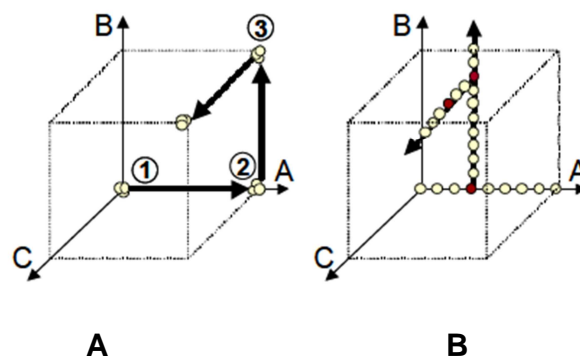
⁵ VALENZUELA CAMPOS, Análisis de los resultados de un diseño factorial con datos faltantes, 2010

GRAFICA 2. Experimentación variando un factor cada vez.⁶



El método tradicional también se utiliza para hallar qué valores de los factores optimizan una respuesta. Se experimenta en dos condiciones distintas (gráfica 3 A, puntos 1 y 2) variando el factor A. Se escoge como valor óptimo de A aquel que proporciona la mejor respuesta. Se fija este valor, y se utiliza como nuevo punto de partida para variar el factor B (punto 3) y así sucesivamente. El incremento al variar cada factor depende de la precisión con la que se desee localizar el óptimo (Gráfica 3 B).

GRAFICA 3. Optimización de una respuesta variando un factor a la vez.



⁶FERRÉ & RIUS, INTRODUCCION AL DISEÑO ESTADISTICO DE EXPERIMENTOS

El método tradicional de experimentación presenta inconvenientes importantes cuando existe interacción entre factores. Se dice que existe interacción entre dos factores A y B cuando el efecto del factor A es diferente según qué valor tome el factor B, y viceversa. Esta situación se presenta muy a menudo en química, física, biología, y demás... Cuando existen tales interacciones, el método tradicional no informa sobre como un factor interactúa con los otros factores o como estas interacciones afectan a la respuesta, con lo cual sólo se obtiene una comprensión limitada de los efectos de los factores.

Además no proporciona la posición del óptimo (gráfica 3 B). El experimentador percibe que se ha llegado al óptimo porque cambiando un factor cada vez la respuesta no mejora, pero se puede encontrar lejos del óptimo real. Aunque se puede reiniciar la experimentación partiendo del "óptimo" encontrado, esta solución es extremadamente ineficiente cuando se deben estudiar muchos factores a muchos valores distintos, puesto que el método tradicional requeriría demasiados experimentos y demasiado tiempo.

Los inconvenientes del método tradicional provienen de variar un factor cada vez. La solución, por lo tanto, debe consistir en variar más de un factor simultáneamente al realizar un nuevo experimento. Ello permitiría mejorar la eficiencia del esfuerzo experimentador, y obtener información sobre las interacciones. La dificultad estriba en diseñar una experimentación reducida, donde estos cambios simultáneos se complementen entre sí y permitan obtener la información buscada al combinar los resultados de todos los experimentos. El Diseño de Experimentos proporciona el marco matemático para cambiar todos los factores simultáneamente, y obtener la información buscada con un número reducido de experimentos, es decir, con la máxima eficiencia. El diseño debe conducir a una planificación con menos experimentos que el método tradicional para obtener un conocimiento equivalente.

1.2.1.1 Procedimiento de la aplicación de un diseño de experimentos.

La aplicación del diseño de experimentos requiere considerar las siguientes etapas que se comentarán seguidamente:

- Comprender el problema y definir claramente el objetivo.
- Identificar los factores que potencialmente podrían influir en la función objetivo, y los valores que éstos pueden tomar. Entre estos valores se buscará la información necesaria.
- Establecer una estrategia experimental, llamada plan de experimentación.
- Efectuar los experimentos con los valores de los factores decididos en el punto 3, para obtener los valores de las respuestas estudiadas.
- Responder las preguntas planteadas, sea directamente, o a través de un modelo matemático. Si es necesario, volver a la etapa 1.

1.2.1.2 Principios básicos en el diseño de experimentos.

Al planificar un experimento hay tres principios básicos que se deben tener siempre en cuenta:

- Aleatorizar todos los factores no controlados por el experimentador en el diseño experimental y que pueden influir en los resultados serán asignados al azar a las unidades experimentales.
- Se deben dividir o particionar las unidades experimentales en grupos llamados bloques de modo que las observaciones realizadas en cada

bloque se realicen bajo condiciones experimentales lo más parecidas posibles.

- Un diseño factorial es una estrategia experimental que consiste en cruzar los niveles de todos los factores tratamiento en todas las combinaciones posibles.

1.2.2 Diseños factoriales.

Una vez se han identificado o seleccionado los factores más importantes, el siguiente paso suele ser estudiar cuantitativamente su efecto sobre la respuesta y sus interacciones. Para este propósito se pueden utilizar los diseños factoriales completos o los factoriales fraccionados entre otros.

Por diseño factorial se entiende aquel en el que se investigan todas las posibles combinaciones de los niveles de los factores en cada ensayo completo o réplica del experimento. Por ejemplo, si existen “a” niveles del factor A y “b” niveles del factor B, entonces cada réplica del experimento contiene todas las “ab” combinaciones de los tratamientos. A menudo, se dice que los factores están cruzados cuando éstos se arreglan en un diseño factorial.

1.2.3 Importancia de los diseños factoriales 2^k .⁷

El diseño factorial consiste en realizar todas las combinaciones posibles de los niveles de varios factores, los más sencillos de estos son los diseños 2^k , donde existen k factores con 2 niveles cada uno, para estos diseños se requiere hacer 2^k experimentos, como algunas de las mayores ventajas de este tipo de experimentos tenemos:

⁷VALENZUELA CAMPOS, Análisis de los resultados de un diseño factorial con datos faltantes,2010.

- Fáciles de diseñar, realizar y analizar.
- Fáciles de combinar entre ellos para obtener diseños más sofisticados.
- Pueden incluir tanto valores cuantitativos como cualitativos.
- Permiten identificar interacciones

Además de que tienen una especial importancia por:

- Necesitan relativamente pocos experimentos por cada factor.
- Si los factores son cuantitativos y no se puede experimentar en todo el rango de valores, por lo menos se tiene una dirección que seguir para posteriores investigaciones.
- Si es necesario una exploración local más completa, estos diseños se pueden ampliar.

Por ser experimentos secuenciados permiten dividir las unidades experimentales en varias partes permitiendo analizar inicialmente una forma más general de posibles combinaciones y a medida que se avanza en la investigación se obtienen las conclusiones pertinentes para a obtener mejores resultados. De esta forma se abren las puertas a partir de un experimento inicial a otros más detallados y delimitados con menos más factores o incluso con los mismos pero con niveles diferentes.

Los diseños factoriales son muy importantes porque pueden permitir identificar interacciones entre dos factores y la forma en que un factor influye en el otro. Esta respuesta se puede apreciar observando en qué nivel se ve afectado un factor por el otro ya que esta clase de diseño permite experimentar con todas las posibles combinaciones de los niveles de los factores sin importar si estos sean cuantitativos o cualitativos.

1.2.4 Diseño factorial completo 2K.

Los diseños factoriales completos comprenden los experimentos óptimos para estudiar qué variables influyen en el sistema. Cuando el objetivo es medir cómo influyen k factores en un proceso y descubrir si interaccionan entre ellos, el **diseño factorial completo 2K** es la estrategia experimental óptima. Este diseño permite explorar una zona escogida del dominio experimental y encontrar una dirección prometedora para la optimización posterior. En el utilizamos un diseño factorial 2^2 para estudiar como un cambio de temperatura o de tiempo de reacción afectaban al rendimiento de una reacción. Para nuestro caso se estudiara los factores temperatura, velocidad, tipo de asfalto, contenido de asfalto, fuente y gradación.

1.2.4.1 Ventajas del diseño factorial.

Los diseños factoriales poseen algunas ventajas.

- Son más eficientes que los experimentos de un factor a la vez.
- Los diseños factoriales son necesarios cuando alguna interacción puede estar presente, para evitar hacer conclusiones engañosas.
- Los diseños factoriales permiten estimar los efectos de un factor en diversos niveles de los otros factores, produciendo conclusiones que son válidas sobre toda la extensión de las condiciones experimentales.

1.2.4.2 Generalización del diseño factorial 2k.

Los métodos de análisis que se han presentado hasta este punto pueden generalizarse para el caso de un diseño factorial 2k, es decir, un diseño con k factores que tienen dos niveles cada uno. El modelo estadístico incluye k efectos principales, $\binom{k}{2}$ interacciones de dos factores, $\binom{k}{3}$ interacciones de tres factores, y así hasta una interacción de k factores. Esto significa, que el modelo completo contendría $2^k - 1$ efectos.

El primer paso al trabajar con esta clase de experimentos es estimar los efectos de los factores y examinar sus signos y magnitudes. De esta manera, el experimentador obtiene información respecto de los factores y las interacciones que pueden ser importantes, en que direcciones deberán ajustarse estos factores para mejorar la respuesta. Para formar el modelo inicial del experimento, por lo general se elige el modelo completo, en el cual se involucran todos los efectos principales y las interacciones, siempre que se haya hecho al menos una réplica.

En general, el contraste del efecto AB... K se determina expandiendo el miembro derecho de:

$$\text{contraste}_{AB\dots K} = (a \pm 1)(b \pm 1) \dots (k \pm 1)$$

Donde el signo de cada grupo en paréntesis es negativo si el factor está incluido en el efecto y es positivo si el factor no está incluido. Una vez que se han obtenido los contrastes de los efectos, pueden estimarse los efectos involucrados en el modelo completo y las sumas de cuadrados asociadas, de acuerdo con:

$$\text{Efecto} = \frac{1}{2^{k-1}r} (\text{contraste}) = \frac{1}{2^{k-1}r} (a \pm 1)(b \pm 1) \dots (k \pm 1)$$

Y

$$SC(Efecto) = \frac{1}{2^{k_r}} [(a \pm 1)(b \pm 1) \dots (k \pm 1)]^2 = r2^{k-1}(Efecto)^2$$

Respectivamente. El valor esperado de la anterior suma de cuadrados es:

$$E[SC(Efecto)] = \sigma^2 + r2^{k-1}(Efecto)^2$$

Con base en estos resultados se puede determinar cuáles efectos de los factores son diferentes de cero. A continuación se presenta como calcular el error estándar de los efectos y como usarlo para construir intervalos de confianza para los efectos.

Si $y_{i1}, y_{i2}, \dots, y_{ir}$ son las observaciones del i-esimo tratamiento, entonces:

$$S_i = \frac{1}{r-1} \sum_{j=1}^r (y_{ij} - \bar{y}_i)^2; \quad i = 1, 2, \dots, 2^k$$

Es una estimación de la varianza del i-esimo tratamiento. Las estimaciones de la varianza del diseño 2^k pueden combinarse para dar una estimación de la varianza global:

$$S^2 = CME = \frac{1}{2^k(r-1)} \sum_{i=1}^{2^k} \sum_{j=1}^r (y_{ij} - \bar{y}_i)^2$$

La varianza de la estimación de cada efecto es:

$$V(Efecto) = V\left(\frac{\text{contraste}}{2^{k-1}r}\right) = \frac{1}{2^{k-1}r} V(\text{contraste})$$

Cada contraste es una combinación lineal de los 2^k totales de los tratamientos, y cada uno tiene r observaciones. Por consiguiente,

$$V(\text{contraste}) = r2^k \sigma^2$$

Y de este modo,

$$V(\text{Efecto}) = \frac{1}{2^{k-1}r} \sigma^2$$

El error estándar estimado se encuentra sacando la raíz cuadrada de esta última expresión y sustituyendo σ^2 por su estimación CME:

$$se(\text{Efecto}) = \sqrt{\frac{CME}{2^{k-1}r}}$$

Luego para contrastar la hipótesis $H_0: AB \dots K = 0$, se hace uso del estadístico de prueba:

$$F = \frac{SC(\text{Efecto})}{CME}$$

Y si este valor es mayor que $F_{(1;2^k(r-1);\alpha)}$ entonces rechaza la hipótesis nula y se concluye que el efecto es importante.

De la misma manera, los intervalos de confianza de $100(1-\alpha)\%$ para los efectos (por ejemplo, $AB \dots K$) se calculan a partir de:

$$\text{Efecto} \pm t_{(2^k(r-1);1-\alpha/2)} \sqrt{\frac{CME}{2^{k-1}r}}$$

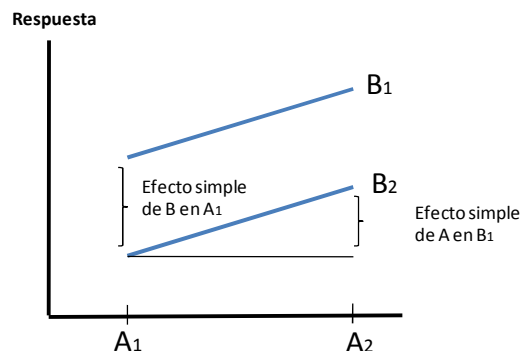
1.2.5 Interacciones: definición y cálculo del efecto.⁸

Una vez se dispone de los resultados experimentales se pueden calcular los efectos de los factores, así como sus interacciones. Los tests estadísticos permiten comprobar si los efectos calculados son significativos comparándolos con el error experimental. Si se construye un modelo de superficies de respuesta, se pueden calcular los coeficientes por el método de los mínimos cuadrados y se puede evaluar el modelo realizando réplicas de ciertos experimentos y aplicando el test ANOVA.

Se dice que dos factores interaccionan cuando el efecto que tiene uno de ellos sobre la respuesta, depende del nivel en que se encuentra el otro factor, es decir la interacción existe cuando tienen una influencia conjunta en la respuesta.

Estas interacciones son de difícil interpretación pero se pueden entender gráficamente como lo podemos observar en la siguientes graficas

GRAFICA 4. Líneas de respuesta⁹

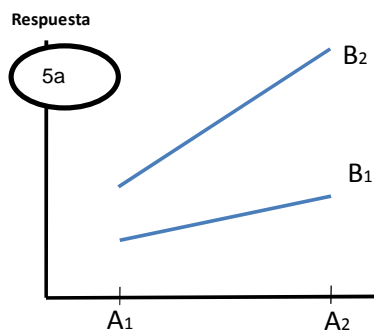


⁸KUEHL, Diseño de experimentos, 2001.

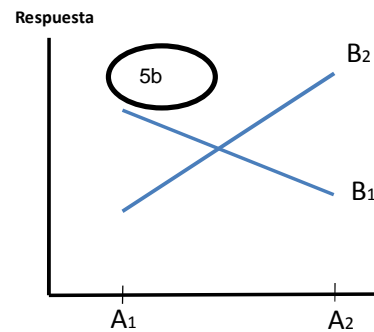
⁹MONTGOMERY & RUNGER, Applied Statistic and Probability for Engineers, 2003.

Cuando las líneas son casi paralelas no existe interacción entre los factores, pero en los casos siguientes, ver (gráfica 5a) las líneas de respuesta no son paralelas las respuestas representan la interacción entre los factores, y se concluye que estos no actúan de forma independiente y las interpretaciones deben basarse en los contrastes de los efectos simples. Igual como ocurre en el caso donde la gráficas se cruzan entre sí, ver (gráfica 5b), existe una fuerte interacción entre los factores de interés y la interacción entre los mismos es significativa.

GRAFICA 5. Líneas de respuesta con interacción⁶



a. La interacción como una diferencia en la magnitud de la respuesta.



b. La interacción como una diferencia en la dirección de la respuesta.

2 METODOLOGIA DE ESTUDIO.

El presente trabajo es el resultado de practicar un compendio de ensayos sobre probetas ya existentes de mezcla asfáltica¹⁰ (FOTOGRAFIA 1).

FOTOGRAFIA 1. Probetas



FUENTE: archivos personales de Guillermo Albarracín y Gustavo Fuentes.

En la tabla 1, se identifican las cuatro variables de diseño para la fabricación de las probetas. La primera es el contenido de asfalto, para el cual tomaron valores cercanos al óptimo para las mezclas asfálticas. El segundo es el tipo de asfalto, para el cual se utilizaron dos tipos de mezclas, una con asfalto convencional (60/70) y otra con asfalto modificado con asfaltita (20/30). El factor tres está definido por la porosidad de la mezcla: una mezcla densa (MDC-2) y una mezcla abierta (M1). El último factor es la fuente de origen de los agregados, los lugares de procedencia corresponden a las canteras del río Chicamocha y Rionegro.

¹⁰DAVILA PIÑERES & ALVARÉZ GÓMEZ, 2010

Tabla 1. Factores de mezcla

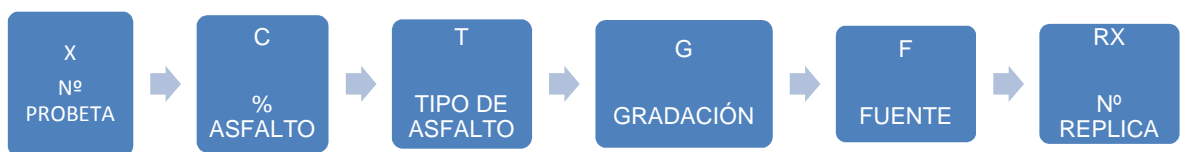
FACTOR 1			FACTOR 2		FACTOR 3		FACTOR 4	
CONTENIDO DE ASFALTO			TIPO DE ASFALTO		GRADACION		FUENTE	
C1	C2	C3	T1	T2	G1	G2	F1	F2
4.50%	5%	5.50%	20/30	60/70	MDC-2	M-1	Chicamocha	Rionegro

2.1 CARACTERIZACION MECANICA DE LAS PROBETAS.

2.1.1 Nomenclatura.

Cada probeta esta identifica con la cantidad de asfalto, el tipo de asfalto, la gradación y la procedencia de los agregados, ver Tabla 3.

Además de un número que identifica el diseño y otro que es el que indica el número de réplica de dicho diseño como se muestra a continuación.



ETIQUETA: X_CTGF_RX

2.2 Pruebas efectuadas sobre las muestras.

Las probetas fueron sometidas a un ensayo el cual consistió en aplicar una carga monotónica a compresión axial a diferentes velocidades de deformación: 1, 7, y 15 mm/min. Para cada aplicación de carga la probeta se acondicionó a diferentes temperaturas: 7, 19 y 35 °C. Para acondicionar las probetas a la temperatura deseada se utilizó una nevera u horno, según lo requerido para el ensayo. La deformación máxima que se aplicó sobre el espécimen fue 0.1mm. Para evitar que se acumule una deformación permanente en la probeta, se inició la serie de pruebas, iniciando con la temperatura fría. Para ver la gráficas de Módulo Vs Temperatura para cada diseño remitirse ANEXO A.

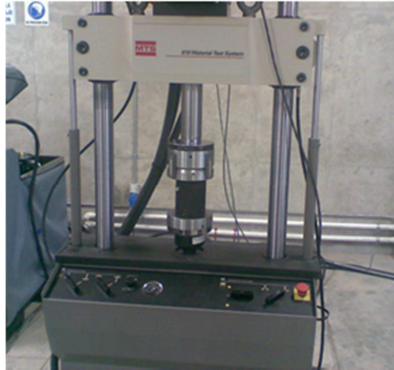
2.3 INSTRUMENTACION.

Corresponde a los instrumentos utilizados para la ejecución del ensayo monotónico, además de los elementos usados para la adecuación de las diferentes condiciones de la prueba.

2.3.1 Máquina para realizar el ensayo. MTS- Test Sistem-810.

Se utilizó el marco de carga construido por MTS, esta máquina tiene la capacidad de realizar pruebas de cargas estáticas y dinámicas en diferentes materiales. Posee un sistema variado de cargas controladas y diferentes grados de flujo en el servo-válvula. El sistema MTS-810 puede ser fácilmente configurado y tiene una capacidad desde 25kN hasta 100kN.

FOTOGRAFIA 2.Máquina MTS-810



FUENTE: archivos personales de Guillermo Albarracín y Gustavo Fuentes.

2.3.2 Instrumento de control de temperatura.

Para el acondicionamiento de las probetas a la temperatura de 7°C se controló por medio de una termocupla, la cual se introdujo en la nevera. Un total de tres probetas fueron acondicionadas por cada serie de ensayos, durante un tiempo de 12 horas, luego se procedió a retirar la primera probeta de la nevera y realizar el ensayo comenzando con la velocidad de deformación de 1 mm/min. Al terminar el ensayo se devuelve la probeta a la nevera por un tiempo mínimo de media hora para adecuarla nuevamente a la temperatura de 7°C y proceder con las probetas a otras velocidades

FOTOGRAFIA 3. Instrumentos de control



FUENTE: archivos personales de Guillermo Albarracín y Gustavo Fuentes.

Para la temperatura intermedia se tomó la del medio en el que se encuentra el laboratorio es decir 19°C.

Las probetas se acondicionaron a la temperatura de 35°C por medio de un horno digital el cual permitió mantener esta temperatura. Inicialmente se acondicionaron 3 probetas en el horno, 3 horas antes del ensayo, y después de cada ensayo se devolvían las probetas al horno por media hora, para acondicionarlas nuevamente para el ensayo a la siguiente velocidad.

3 INFLUENCIA DE LAS VARIABLES EN EL MODULO MONOTONICO.

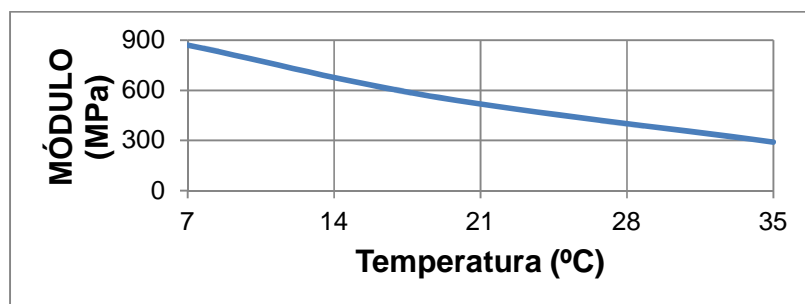
Al evaluar la influencia de los factores sobre el módulo de rigidez podemos realizar un análisis de los efectos principales de los factores individualmente, además de la influencia en la respuesta debido a la interacción de los diferentes factores.

3.1 EFECTOS PRINCIPALES DE LOS FACTORES DE DISEÑO EN EL MÓDULO DE RIGIDEZ.

El efecto principal se define como el cambio registrado en el comportamiento de la rigidez de la mezcla al variar el nivel en un factor, cuando se promedian todos los niveles de los otros factores, (ver gráfica 1).

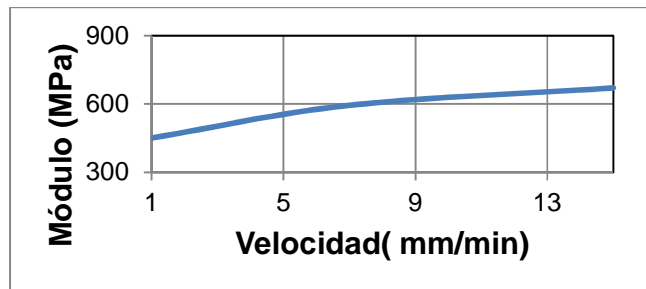
- La rigidez presenta una fuerte variación con la temperatura. Al aumentar la temperatura la rigidez disminuye (ver gráfica 6).

GRAFICA 6. Módulo vs Temperatura.



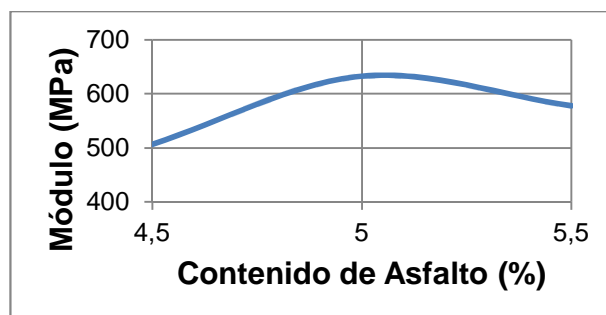
- La velocidad también afecta la rigidez de la mezcla (ver gráfica 2), al aumentar la velocidad con la cual es aplicada la deformación, el módulo de rigidez aumenta.

GRAFICA 7. Módulo vs Velocidad.



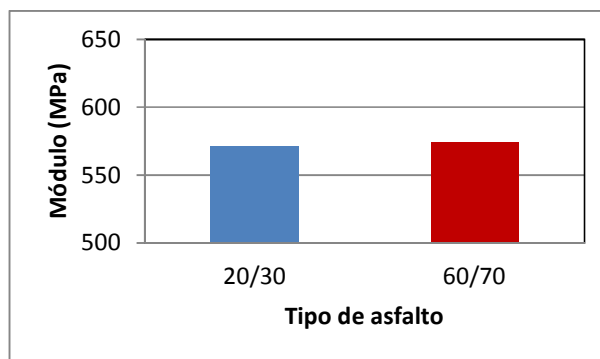
- Para el contenido de asfalto se observa que se puede determinar un punto óptimo de ligante para el cual se obtienen valores de rigidez mayores. Un porcentaje de asfalto alrededor de 5.0% presenta la mayor rigidez (ver gráfica 8).

GRAFICA 8. Módulo vs Contenido de asfalto.



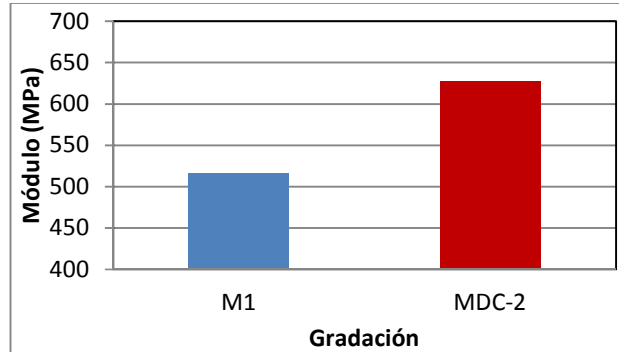
- Al evaluar la influencia del tipo de asfalto como efecto principal, a primera vista parece no ser determinante en el módulo de rigidez. Sin embargo en el análisis de interacciones (ver 3.2) se evalúa detalladamente la influencia del tipo de asfalto con los demás factores de diseño.

GRAFICA 9. Módulo vs tipo de asfalto



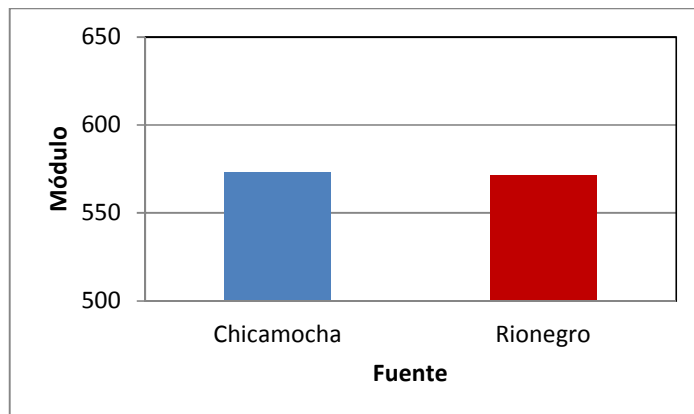
- La influencia del tipo de gradación utilizado para fabricar la mezcla tiene relevancia para los valores de módulo obtenidos, (ver gráfica 10). Se puede visualizar que en general las mezclas densas MDC-2 presentaron una tendencia a poseer valores de rigidez mayores que las mezclas con una gradación abierta M-1. Sin embargo, cuando se analiza el efecto de las interacciones, se podrá determinar la influencia de la gradación sobre el módulo de rigidez cuando esta combinada con los factores de diseño de la mezcla (ver 3.2).

GRAFICA 10. Módulo vs Gradación.



- La fuente de la cual es extraído el material granular parece no tener un efecto influyente en los valores del módulo de rigidez cuando es evaluado su efecto principal,(ver gráfica 11). Sin embargo, al analizar el efecto de la interacción de este factor con los demás factores de diseño su influencia llega a ser significativa sobre la respuesta (ver 3.2).

GRAFICA 11. Módulo vs Fuente.



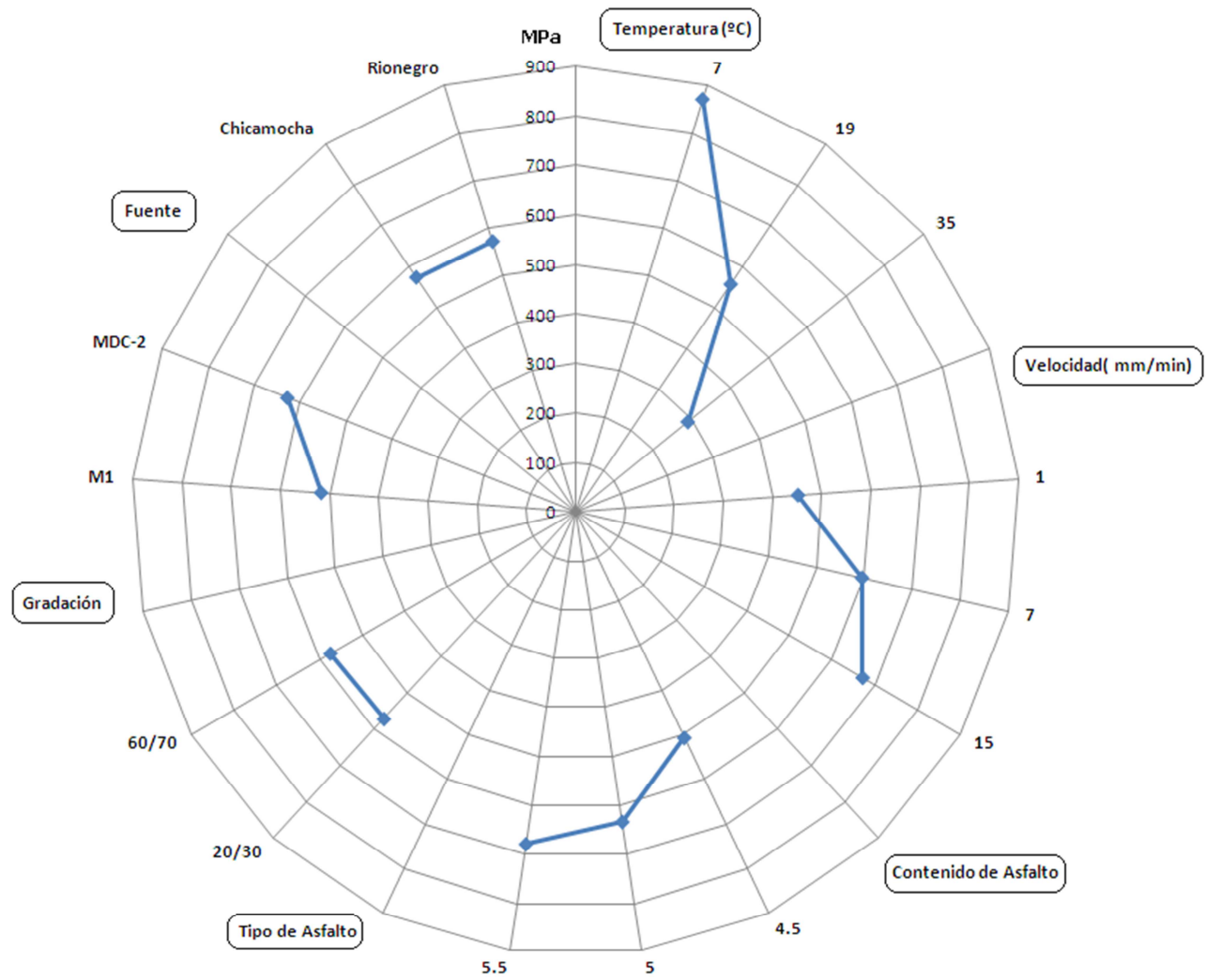
A continuación, en la Tabla 2 se consolida el análisis anova, donde una probabilidad (P) menor de 0.05 indica una fuerte influencia. Una alta probabilidad no necesariamente indica baja influencia, para determinarla se debe analizar la forma en que interactúan con los demás factores, y su influencia en el módulo.

En la gráfica 12, se visualizan los efectos principales por parte de los factores sobre la rigidez de la mezcla. En la medida que los valores se alejan del centro, la rigidez aumenta. En el sentido de las agujas del reloj, se observa cada uno de los factores, además de los respectivos niveles en los cuales fue variando.

Tabla 2. Análisis ANOVA

FACTORES	GL	SC SEC.	SC AJUST.	MC AJUST.	F	P
Temperatura (°C)	2	36415203	36415203	18207602	2422,51	0
Velocidad(mm/min)	2	5361947	5361947	2680974	356,7	0
Contenido de Asfalto (%)	2	1723119	1723119	861560	114,63	0
Tipo de Asfalto	1	1267	1267	1267	0,17	0,682
Gradación	1	1968225	1968225	1968225	261,87	0
Fuente	1	766	766	766	0,1	0,75

GRAFICA 12. Efectos Principales De Los Factores De Diseño En El Módulo De Rigidez Monotónico



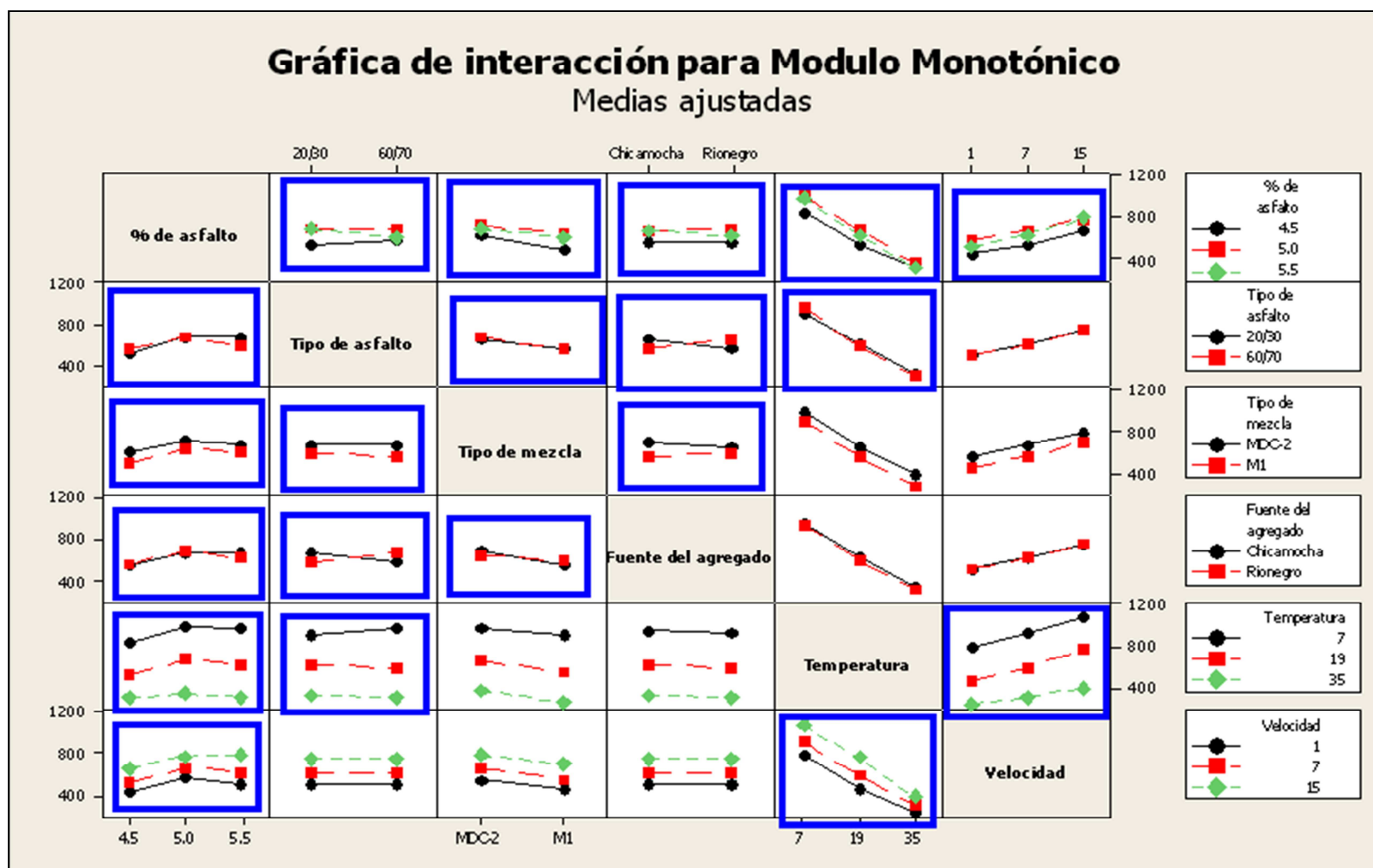
3.2 INTERACCIÓN ENTRE LOS FACTORES DE DISEÑO.

Una vez se dispone de los resultados experimentales se pueden calcular los efectos de los factores debido a sus interacciones. A continuación, se muestra el cambio en la respuesta de la rigidez ocasionada por la interacción de la combinación de dos factores en sus respectivos niveles.

La gráfica 13 esquematiza una matriz en la cual la intersección de la fila con la columna representa la variación del módulo de rigidez por la interacción de los dos factores evaluados en sus diferentes niveles.

Las interacciones que presentan una influencia significativa en el valor del módulo son las marcadas dentro de un recuadro azul. A continuación se analizan una a una las interacciones que por un cambio de la magnitud de la respuesta o por un cambio en la dirección de la respuesta se convierten en factores de importancia para determinar el comportamiento de la rigidez del material asfáltico.

GRAFICA 13. Interacción entre dos factores en el comportamiento de la rigidez.



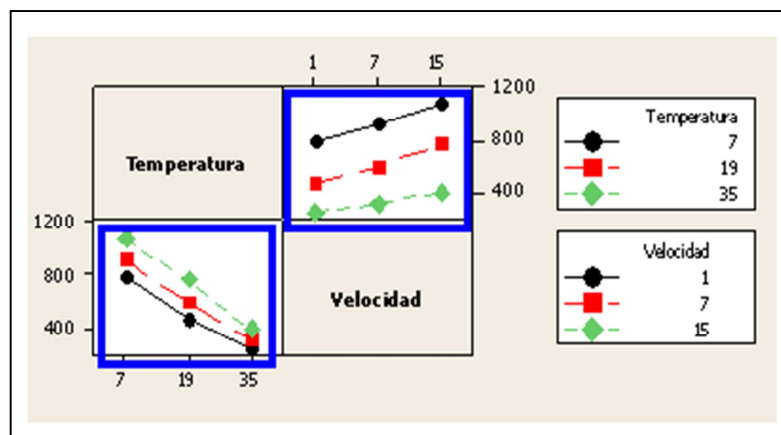
- **Temperatura y la velocidad de deformación.**

Los módulos de rigidez de la mezcla asfáltica presentan una sensibilidad diferente cuando se someten a una velocidad de deformación al cambiar la temperatura, esta sensibilidad se ve reflejada como la pendiente de la recta para cada una de las temperaturas (ver gráfica 14).

Las mezclas ensayadas a temperaturas de 7 y 19 °C presentan una sensibilidad a la velocidad similar, en cambio, a la temperatura de 35°C la diferencia entre los valores obtenidos para el módulo de rigidez a las diferentes velocidades de deformación es menor.

Se presentan los valores de mayor rigidez en las mezclas asfálticas cuando se somete la probeta a una temperatura de 7 °C y a una velocidad de deformación de 15 mm/min.

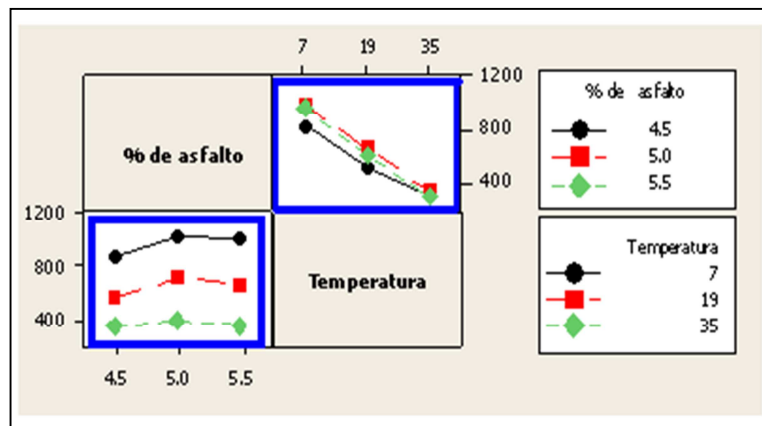
GRAFICA 14. Interacción entre la temperatura (°C) y la velocidad de deformación (mm/min)



- **Temperatura y Contenido de Asfalto.**

A una temperatura de 7°C el contenido de asfalto tiene una mayor influencia en la rigidez de la mezcla. A medida que se incrementa la temperatura para los diferentes porcentajes de asfalto no hay mayor variación de los módulos de rigidez(ver gráfica 15). A temperaturas altas el material que más aporta a la rigidez de la mezcla es el agregado.

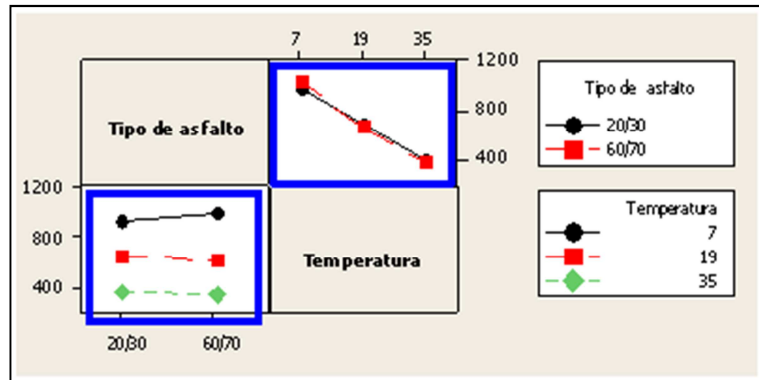
GRAFICA 15. Interacción entre la temperatura (°C) y el Contenido de asfalto.



- **Temperatura y Tipo de Asfalto.**

Al analizar los niveles del factor tipo de asfalto se observa que para temperaturas de 7°C se obtienen módulos de rigidez mayores para el asfalto de penetración 60/70. Para las temperaturas de 19 y 35 °C la mayor rigidez de la mezcla es con el asfalto de penetración 20/30, por lo cual el asfalto 20/30 proporciona una susceptibilidad menor a temperaturas altas(ver gráfica 16).

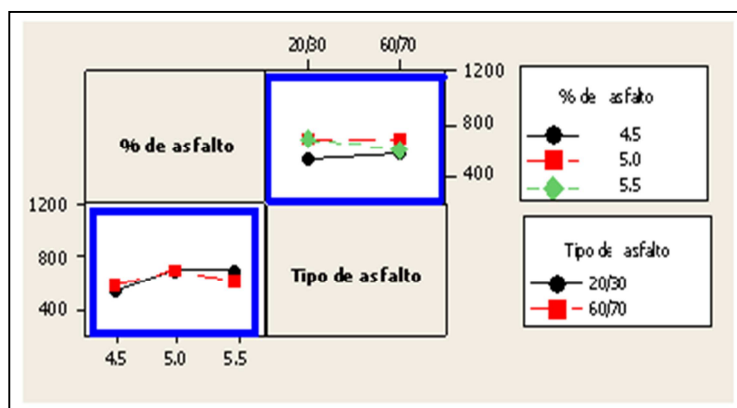
GRAFICA 16. Interacción la temperatura y Tipo de asfalto (°C).



- **Contenido de Asfalto y Tipo de Asfalto.**

El asfalto de penetración 20/30 presenta valores del módulo menores para el contenido de asfalto de 4.5%. Es posible que el origen de este comportamiento sea debido a una menor de fluidez del asfalto rígido (20/30) al momento de realizar la mezcla asfalto – agregado, y proporcionar mayores dificultades para dar el cubrimiento necesario de las partículas que garanticen la adecuada unión (ver gráfica 17).

GRAFICA 17. Interacción entre el Contenido de asfalto y el tipo de asfalto.

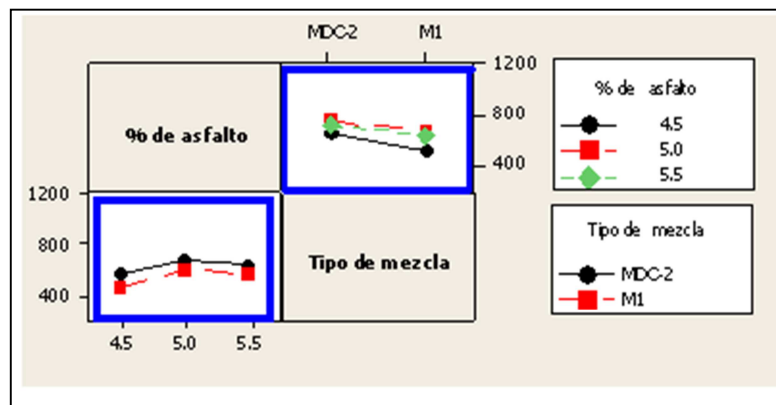


- **Contenido de Asfalto y Tipo de mezcla.**

Las mezclas densas MDC-2 presentan una mayor rigidez comparada con los valores obtenidos de rigidez para las mezclas con gradación abierta M1.

Observando la influencia de los diferentes contenidos de asfalto, se tiene que para las mezclas densas MDC-2 los valores de módulo no presentan diferencias altas en sus magnitudes. Por otro lado las mezclas con granulometría abierta M1, para un contenido de asfalto de 4.5% la magnitud del módulo disminuyó significativamente. Se puede deducir que para mezclas con un alto porcentaje de vacíos, para tener un mayor rigidez es necesario proveer una cantidad suficiente de ligante para garantizar una buena interacción entre las partículas(ver gráfica 18).

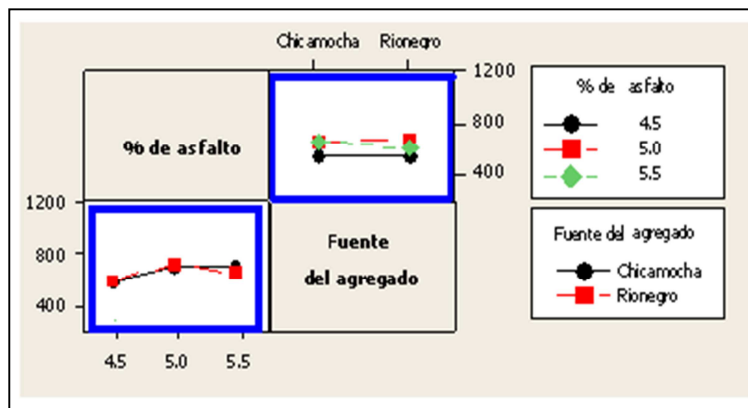
GRAFICA 18. Interacción entre el Contenido de asfalto y el tipo de mezcla.



- **Contenido de Asfalto y Fuente del agregado.**

Para contenidos de asfalto de 4.5 y 5.0%, no se presentó una variación del módulo al cambiar la fuente del agregado, sin embargo para un contenido de asfalto de 5.5%, las mezclas que tenían un agregado extraído de Rionegro presentaron menores módulo de rigidez(ver gráfica 19).

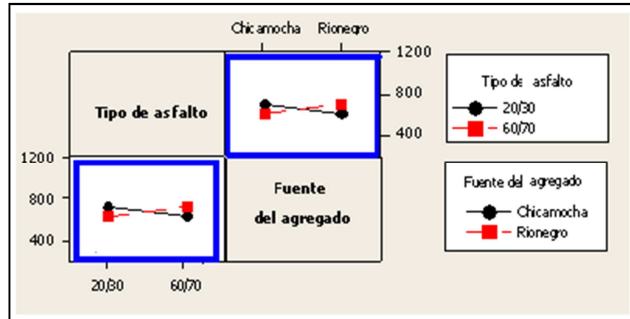
GRAFICA 19. Interacción entre el Contenido de asfalto y la fuente del agregado



- **Tipo de Asfalto y Fuente del agregado.**

Dependiendo de la combinación entre el tipo de asfalto y la fuente del agregado, se presenta los mayores módulos de rigidez cuando interactúan los niveles de los factores combinados de la siguiente manera: asfalto 20/30 con fuente de agregado del Chicamocha y asfalto 60/70 con fuente del agregado de Rionegro (ver gráfica 20).

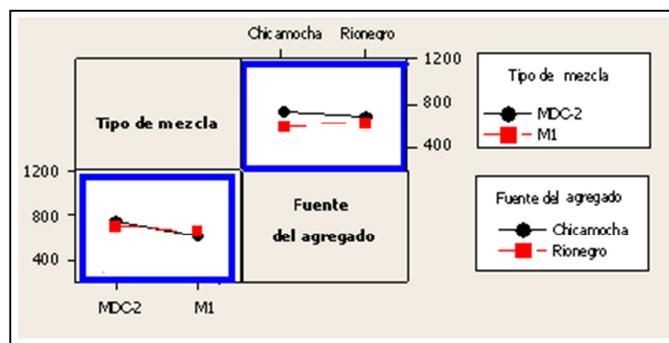
GRAFICA 20. Interacción entre el Tipo de asfalto y la fuente del agregado



- **Tipo de mezcla y Fuente del agregado.**

La mezcla densas MDC-2 presentan una mayor rigidez que las mezclas abiertas M1, sin importar la fuente con la cual se haya fabricado la mezcla. Sin embargo al evaluar la interacción que existe con el agregado se puede observar que las mezclas MDC-2 tienen una mayor rigidez cuando se fabrican a partir de agregados del Río Chicamocha. Mientras, si se observa el comportamiento de las mezclas M1, se tiene que presentaron módulos mayores cuando se combinó con agregado del Río Rionegro(ver gráfica 21).

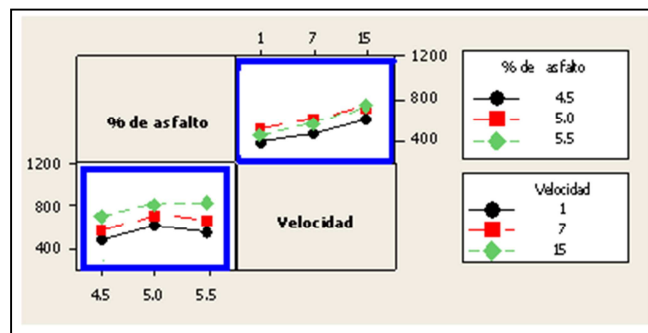
GRAFICA 21. Interacción entre el Tipo de mezcla y la fuente del agregado.



- **Contenido de asfalto y velocidad de deformación.**

Se observa en las velocidades de deformación de 1 y 7 mm/min, un comportamiento similar cuando se varía los contenidos de asfalto, la mayor rigidez se presenta con contenido de asfalto cercano al 5.0%. Sin embargo a la velocidad de deformación de 15 mm/min la rigidez con contenidos de asfalto entre 5.0 y 5.5%, no presenta un cambio considerable en el valor del módulo de rigidez (ver gráfica 22).

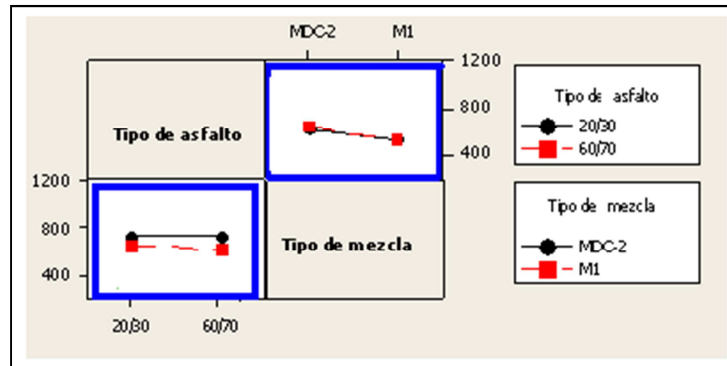
GRAFICA 22. Interacción entre el contenido de asfalto y la velocidad de deformación.



- **Tipo de asfalto y tipo de mezcla.**

El tipo de mezcla MDC-2 presenta los módulos de rigidez más altos sin presentar alguna variación al cambio del tipo de asfalto. Al observar el tipo de mezcla M1, se tiene la mayor rigidez al interactuar con un tipo de asfalto 20/30, (ver gráfica 23).

GRAFICA 23. Interacción entre el tipo de asfalto y el tipo de mezcla.



La tabla 3, presenta el análisis estadístico realizado para determinar la influencia en la rigidez del material, debido a las interacciones entre los factores de diseño de la mezcla.

Para probabilidades menores de 0.05 ($P < 0.05$) la interacción se considera significativa en la respuesta del módulo de rigidez monotónico.

Tabla 3. Combinación de factores.

COMBINACIÓN FACTORES	GL	SC SEC.	SC AJUST.	MC AJUST.	F	P
Temperatura (°C)*Velocidad(mm/min)	4	260374	260374	65094	8,66	0
Temperatura (°C)* Contenido de Asfalto	4	413788	413788	103447	13,76	0
Temperatura (°C)*Tipo de Asfalto	2	252783	252783	136392	16,82	0
Temperatura (°C)*Gradación	2	8091	8091	4046	0,54	0,584
Temperatura (°C)*Fuente	2	9924	9924	4962	0,66	0,517
Velocidad(mm/min)* Contenido de Asfalto	4	67046	67046	16761	2,23	0,002
Velocidad(mm/min)*Tipo de Asfalto	2	35888	35888	17944	2,39	0,093
Velocidad(mm/min)*Gradación	2	2723	2723	1361	0,18	0,834
Velocidad(mm/min)*Fuente	2	2215	2215	1108	0,15	0,863
Contenido de Asfalto*Tipo de Asfalto	2	394004	394004	197002	26,21	0.005
Contenido de Asfalto*Gradación	2	196625	196625	98312	13,08	0
Contenido de Asfalto*Fuente	2	500400	500400	250200	33,29	0
Tipo de Asfalto*Gradación	1	3224	3224	3224	0,43	0,027
Tipo de Asfalto*Fuente	1	979262	979262	979262	130,29	0
Gradación*Fuente	1	359493	359493	359493	47,83	0
Error	605	4547192	4547192	7516		
Total	647	53503559				

4 CONCLUSIONES.

Se estableció la influencia de los parámetros de diseño de una mezcla asfáltica en el módulo de rigidez monotónico. Los factores: contenido de asfalto y tipo de gradación, son los que afectan de forma considerable el módulo de rigidez obteniendo los mayores valores con un contenido de asfalto cercano al 5.0% y una mezcla densa (MDC-2), sin importar con que factor de diseño se realice el análisis.

La mezcla presenta menores módulos de rigidez cuando se incrementa la temperatura y se aplican esfuerzos a bajas velocidades de deformación.

La tendencia general del comportamiento de la rigidez de la mezcla dependiendo del contenido de asfalto, es el de presentar un contenido óptimo alrededor del 5.0% de asfalto. Sin embargo para contenido entre el 5.0% y 5.5% la rigidez de la mezcla se ve influenciada por la interacción con los otros factores de diseño, presentando una tendencia constante en el valor de rigidez del módulo.

Para el diseño de una mezcla asfáltica, se debe tener en cuenta las características de los componentes y la interacción entre ellos. Para los factores “tipo de asfalto” y “fuente del agregado” no se presentó influencia al analizar su efecto principal en la rigidez. Sin embargo, al evaluar la interacción con los demás factores de diseño, se observa que influyen en la variación del módulo de rigidez monotónico.

Se contribuyó a la validación de la prueba en la mezcla asfáltica con carga monotónica como método para determinar el comportamiento bajo esfuerzos. Los ensayos fueron realizados bajo condiciones que proporcionaron la repetibilidad del método de ensayo.

BIBLIOGRAFIA.

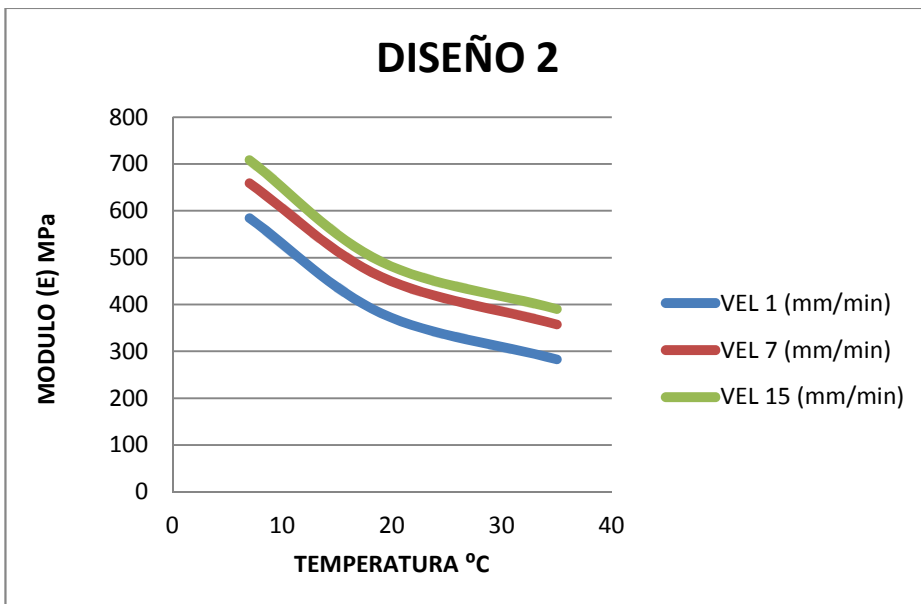
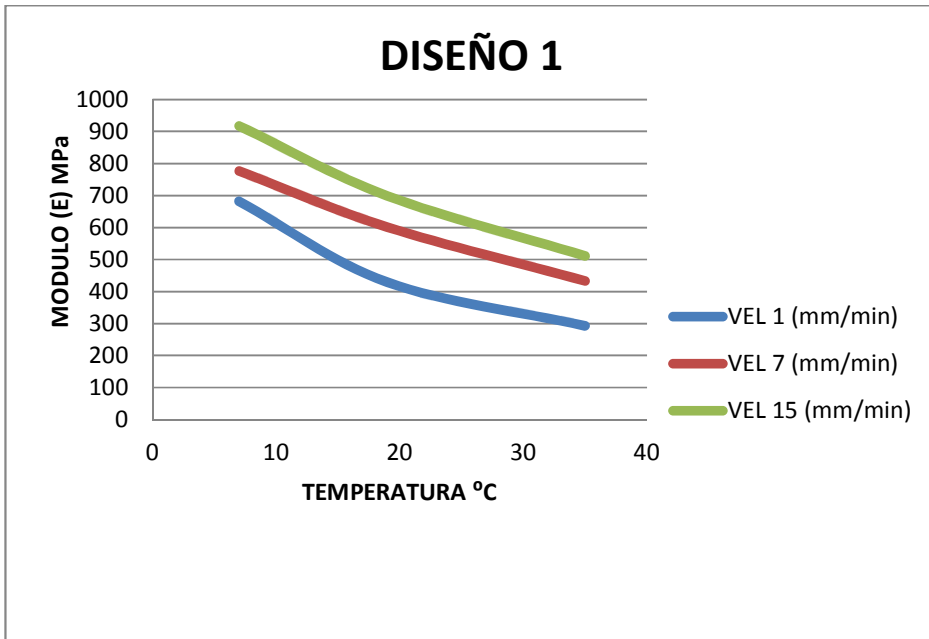
- scribd.* (10 de 01 de 2009). Obtenido de <http://es.scribd.com/doc/20455310/Diseno-de-Experimentos>
- ARENAS, E., & SERRANO, A. (2006). *Análisis comparativo de propiedades de deformación en mezclas MDC-2, MDC-3, M-1 Y Stone matrix Asphalt.* Bucaramanga.
- BARAJAS GONZALEZ, Y. Y., & PINEDA DURAN, L. J. (2010). *Comportamiento del Modulo Dinamico de la Mezcla Asfaltica para Diferentes Tipos de Agregado.* BUCARAMANGA.
- BOQUÉ, R., & MAROTO, A. (s.f.). *Facultat de Química de Tarragona.* Obtenido de <http://www.quimica.urv.es/quimio/general/anovacast.pdf>
- CAMACHO LASSO, E. d., & CONTRERAS MARIN, L. E. (2010). *Influencia de la Temperatura, en la Variación, del Modulo Dinámico de Mezclas Asfálticas Colombianas.* BUCARAMANGA.
- CHAVEZ VESGA, S. A. (2008). *Relación entre Propiedades Mecánicas de Concretos Asfálticos Bajo Carga Estática y Dinámica.* BUCARAMANGA.
- DAVILA PIÑERES, N. K., & ALVARÉZ GÓMEZ, M. A. (2010). *Caracterización de la Rigidez de una Mezcla Asfaltica Usando Diferentes Tipos de Asfalto.* BUCARAMANGA.
- e-asfalto.* (s.f.). Obtenido de <http://www.e-asfalto.com.ar/propiedades/propiedades.htm>
- FERRÉ, J. (s.f.). *Facultat de Química de Tarragona.* Obtenido de <http://www.quimica.urv.es/quimio/general/doecast.pdf>
- FERRÉ, J., & RIUS, X. (s.f.). INTRODUCCION AL DISEÑO ESTADISTICO DE EXPERIMENTOS.
- Gonzalez, d. (s.f.). *Universidad de Puerto Rico Recinto Universitario de Mayagües.* Obtenido de <http://academic.uprm.edu/dgonzalez/6005/factoriales%20%20a%20la%20k.pdf>
- KUEHL, R. (2001). *Diseño de experimentos.* THOMSON LEARNING.

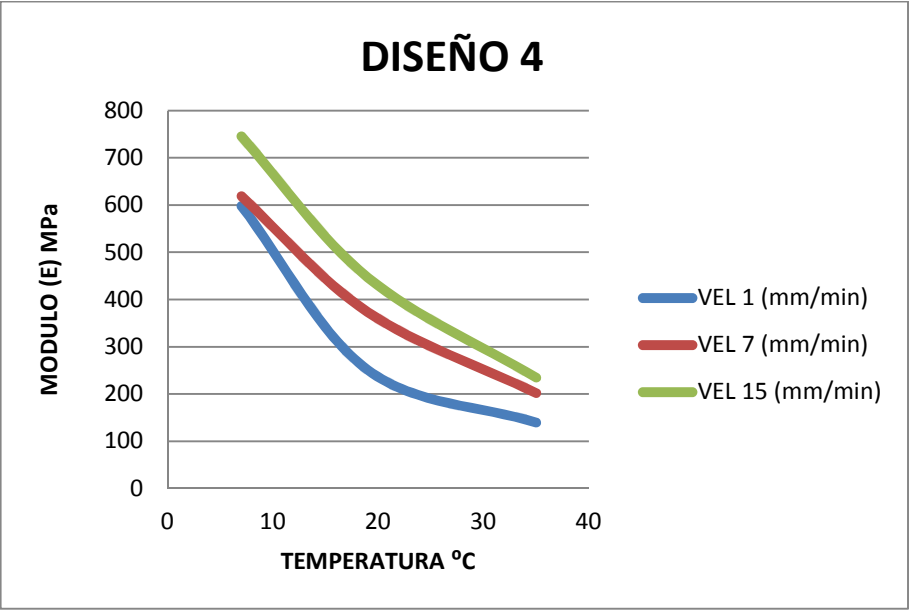
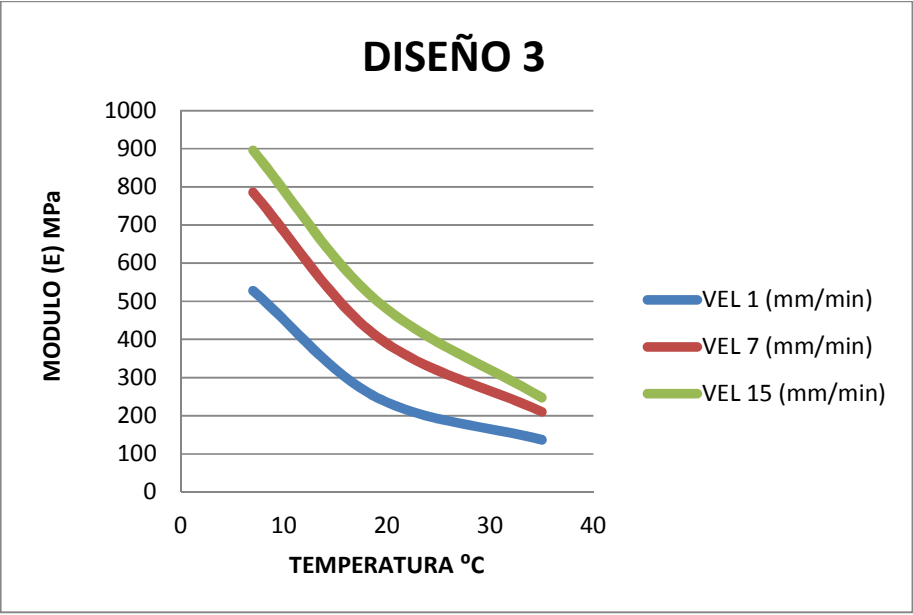
- MENDEZ, A., & NUÑEZ, Y. M. (2008). *Mezclas de asfaltos naturales con asfaltos de refinería para producir asfaltos duros en la elaboración de mezclas con un módulo alto*. Bucaramanga.
- MONTGOMERY, D. C., & RUNGER, G. C. (2003). *Applied Statistic and Probability for Engineers*. Jonh Wiley Y Sons, Inc.
- Reyes Ortiz, O. J., & Camacho Tauta, J. (2008). *Influencia de la Granulometría en la Resistencia al Ahuellamiento de Mezclas Asfálticas*. Universidad Militar Nueva Granada.
- REYES, P. (2007). *Diseño De Experimentos Factoriales 2K*.
- SOLIS REYNA, N. I., MÁRQUEZ MELÉNDEZ, J. D., CÁRDENAS CERVANTES, E., & ARMIJO WONG, J. G. (s.f.). *scribd*. Obtenido de <http://www.scribd.com/doc/2249621/Diseño-de-Experimentos>
- Universales, M. d. (s.f.). *Labomecanica*. Obtenido de <http://labomecanica.tol.itesm.mx/laboratorio/documentacion/MTS.pdf>
- Universidad Coplutense Madrid*. (s.f.). Obtenido de http://www.ucm.es/info/socivmyt/paginas/D_departamento/materiales/analisis_datosyMultivariable/15anova2_SPSS.pdf
- VALENZUELA CAMPOS, V. M. (2010). *ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE UN DISEÑO FACTORIAL CON DATOS FALTANTES*. Universitat Politècnica de Catalunya.

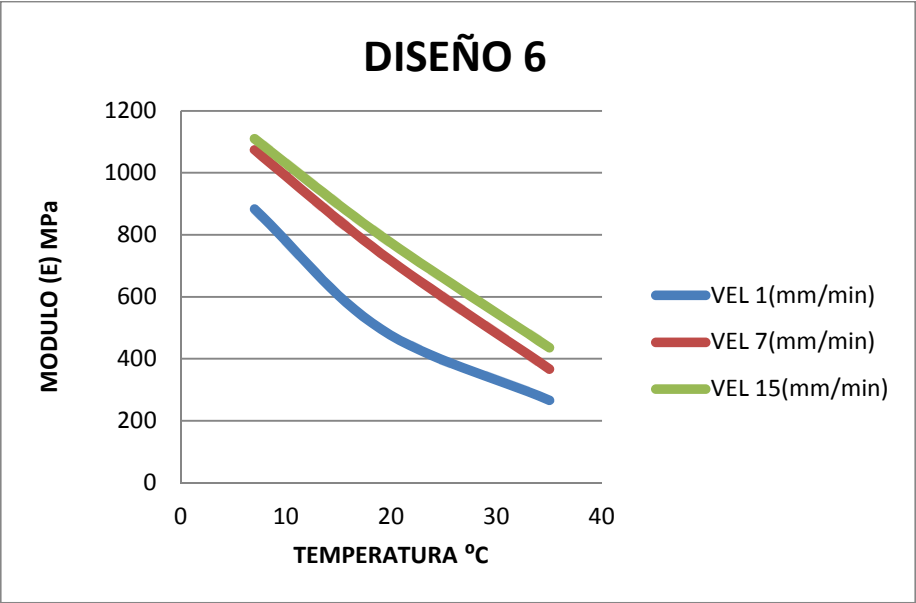
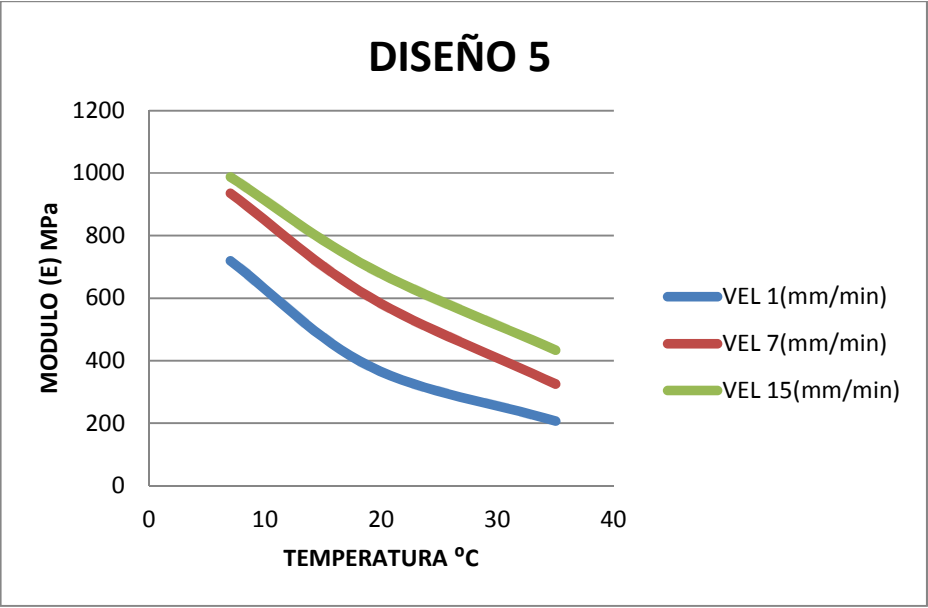
ANEXO A. DISEÑOS ELABORADOS PARA EL ANALISIS.

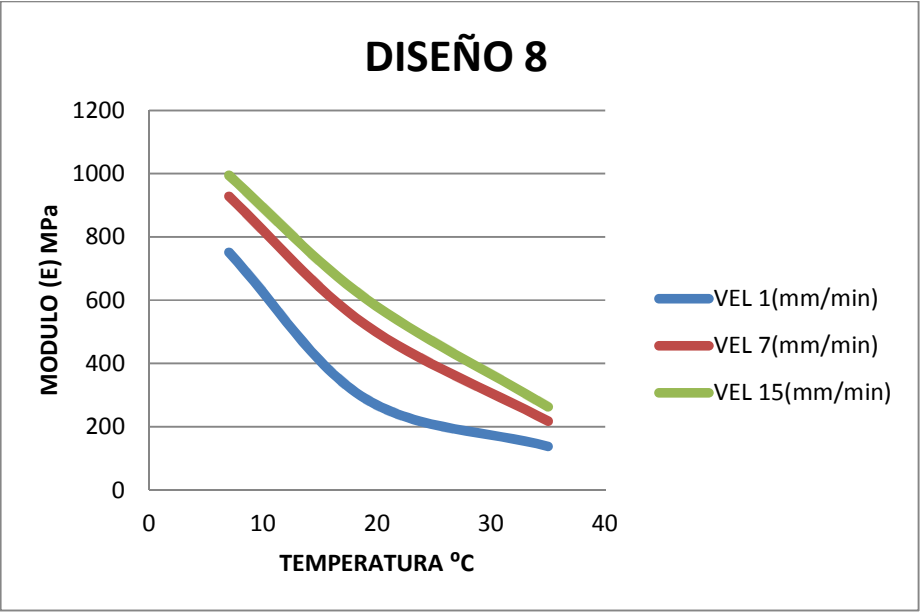
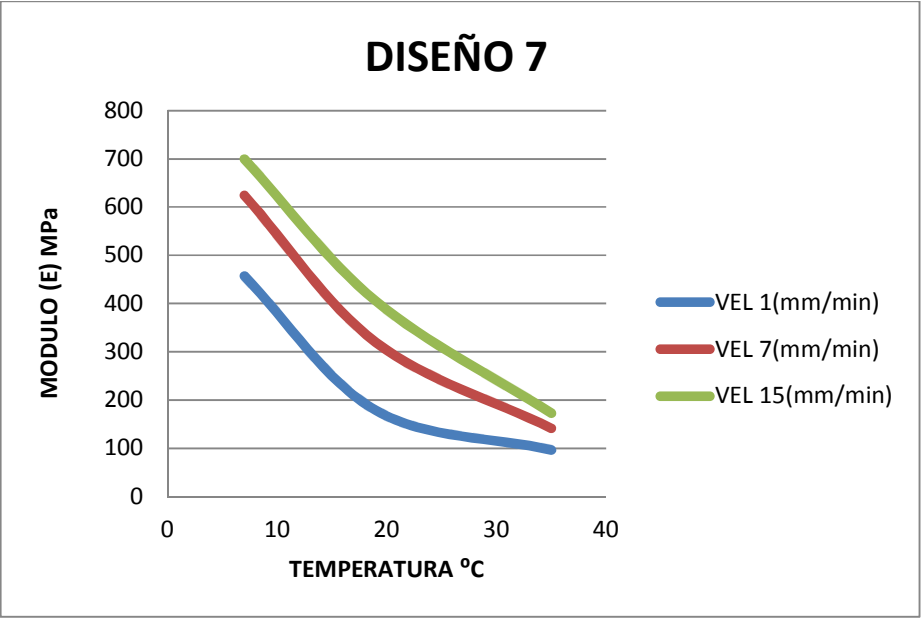
DISEÑO	FACTOR 1	FACTOR 2	FACTOR 3	FACTOR 4
	CONTENIDO ASFALTO (%)	TIPO DE ASFALTO	TIPO DE MEZCLA	FUENTE AGREGADO
1	4.5	20/30	MDC-2	CHICAMOCHA
2	4.5	20/30	MDC-2	RIONEGRO
3	4.5	20/30	M-1	CHICAMOCHA
4	4.5	20/30	M-1	RIONEGRO
5	4.5	60/70	MDC-2	CHICAMOCHA
6	4.5	60/70	MDC-2	RIONEGRO
7	4.5	60/70	M-1	CHICAMOCHA
8	4.5	60/70	M-1	RIONEGRO
9	5.0	20/30	MDC-2	CHICAMOCHA
10	5.0	20/30	MDC-2	RIONEGRO
11	5.0	20/30	M-1	CHICAMOCHA
12	5.0	20/30	M-1	RIONEGRO
13	5.0	60/70	MDC-2	CHICAMOCHA
14	5.0	60/70	MDC-2	RIONEGRO
15	5.0	60/70	M-1	CHICAMOCHA
16	5.0	60/70	M-1	RIONEGRO
17	5.5	20/30	MDC-2	CHICAMOCHA
18	5.5	20/30	MDC-2	RIONEGRO
19	5.5	20/30	M-1	CHICAMOCHA
20	5.5	20/30	M-1	RIONEGRO
21	5.5	60/70	MDC-2	CHICAMOCHA
22	5.5	60/70	MDC-2	RIONEGRO
23	5.5	60/70	M-1	CHICAMOCHA
24	5.5	60/70	M-1	RIONEGRO

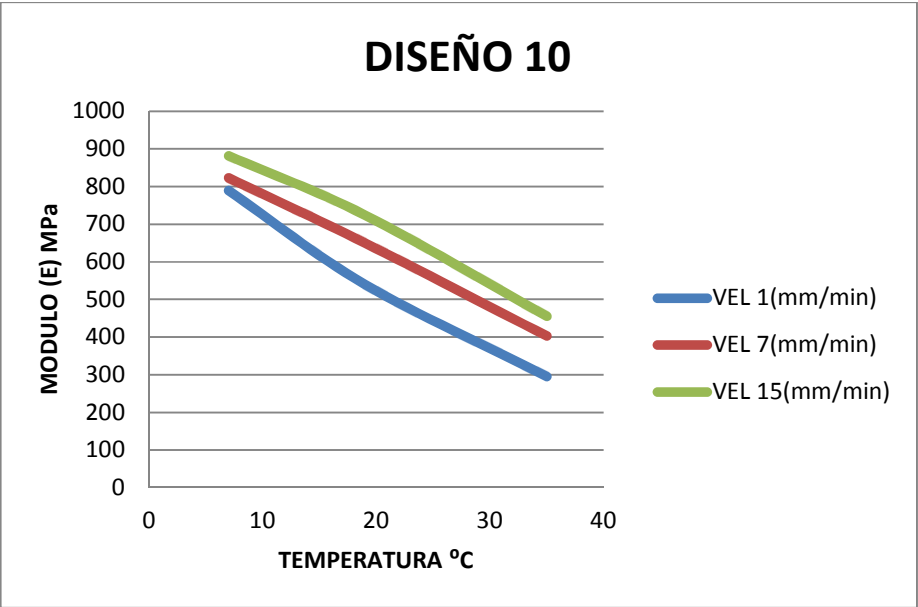
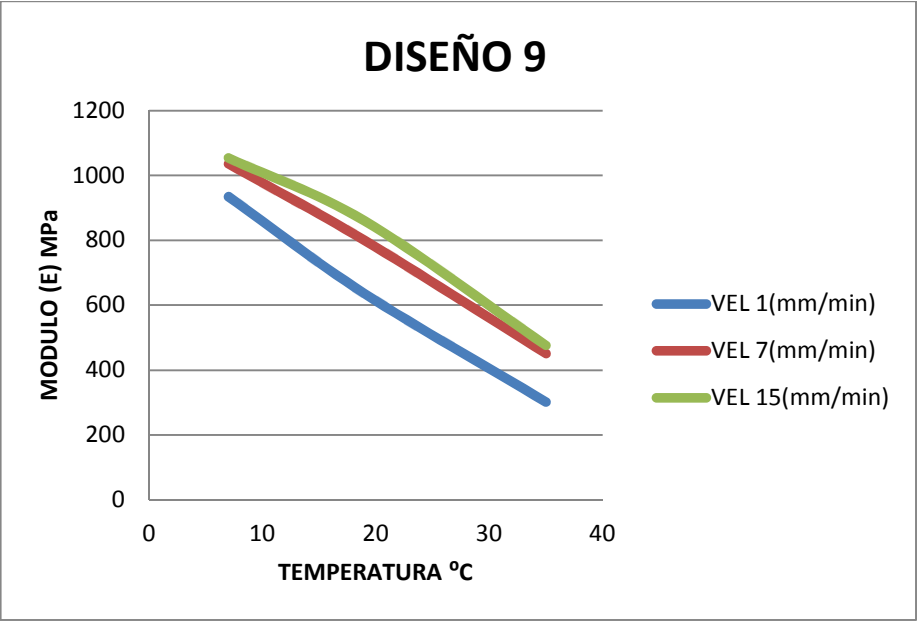
ANEXO B. GRAFICAS MODULO Vs TEMPERATURA Y TABLAS DE RESPUESTA DEL MODULO DE LOS DISEÑOS A VELOCIDADES DE 1,7 Y 15 (mm/min)

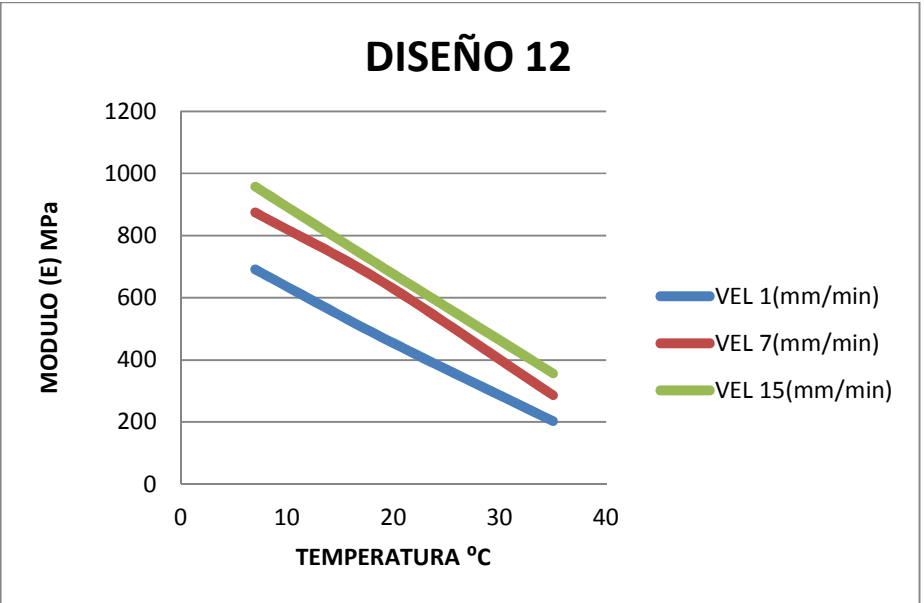
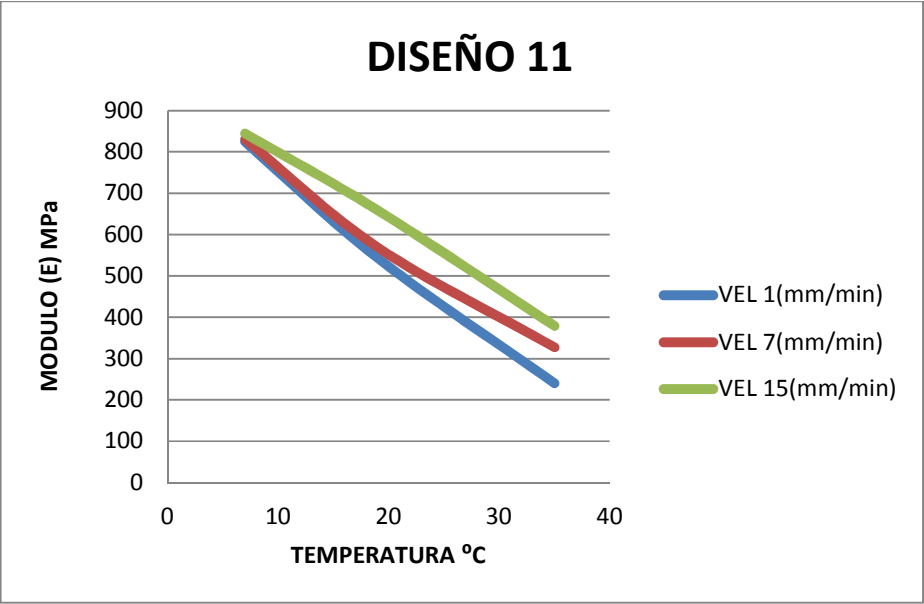




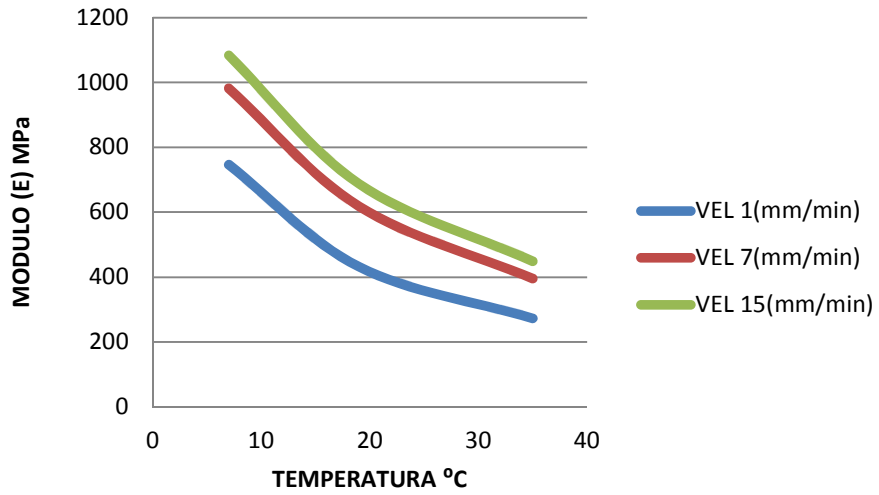




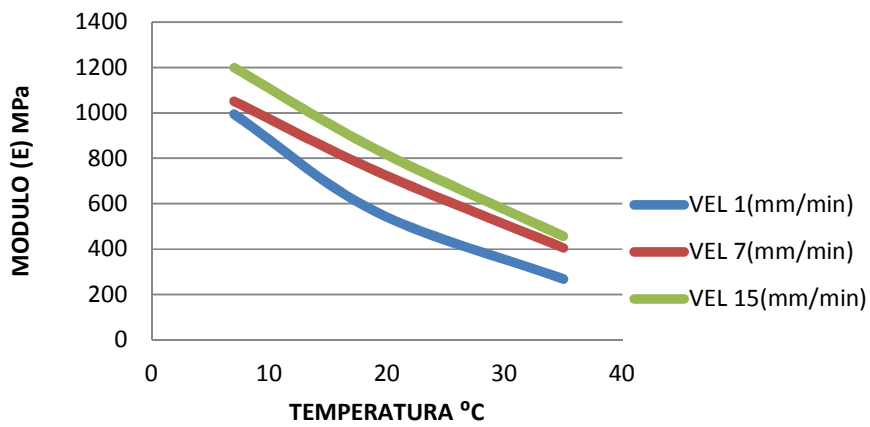




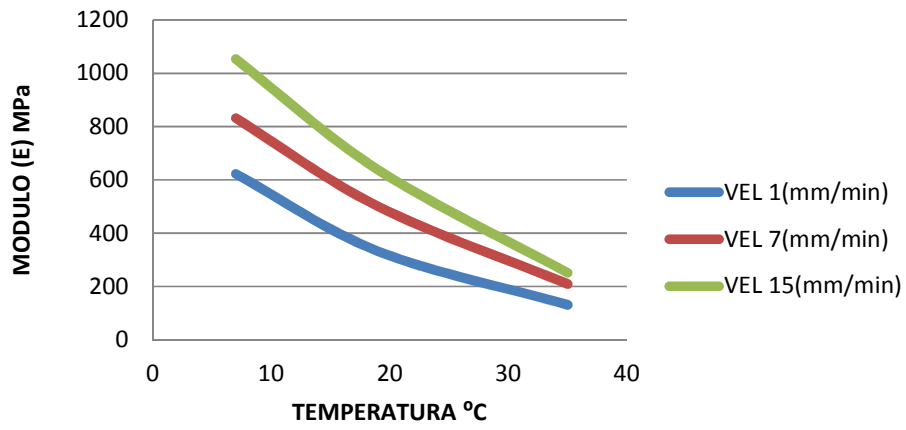
DISEÑO 13



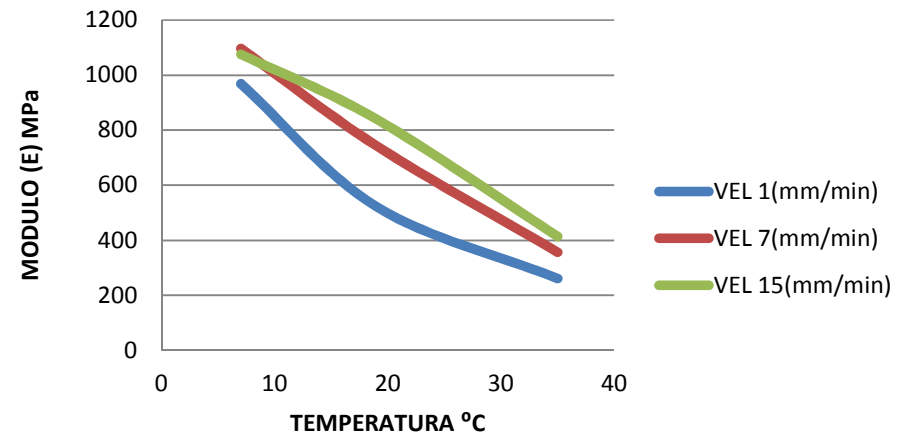
DISEÑO 14

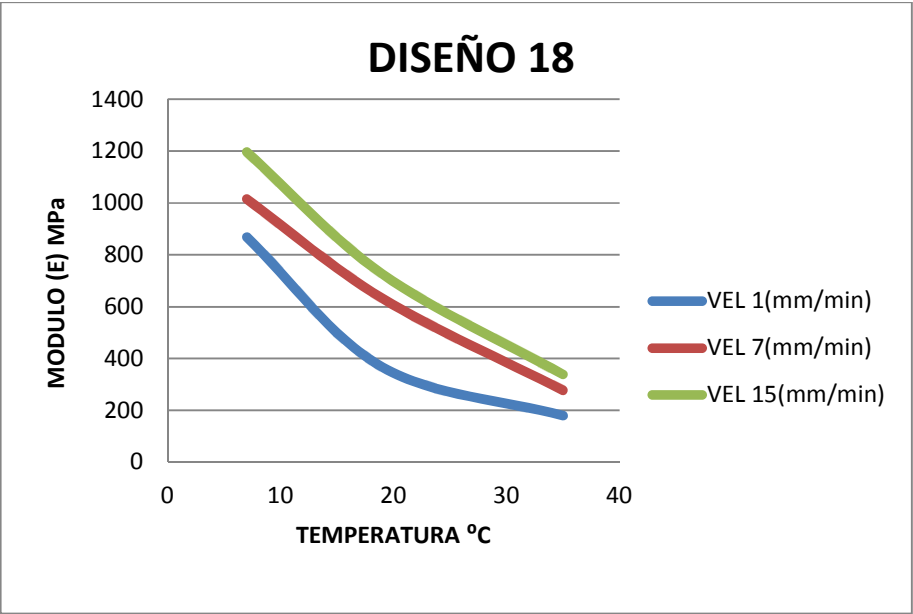
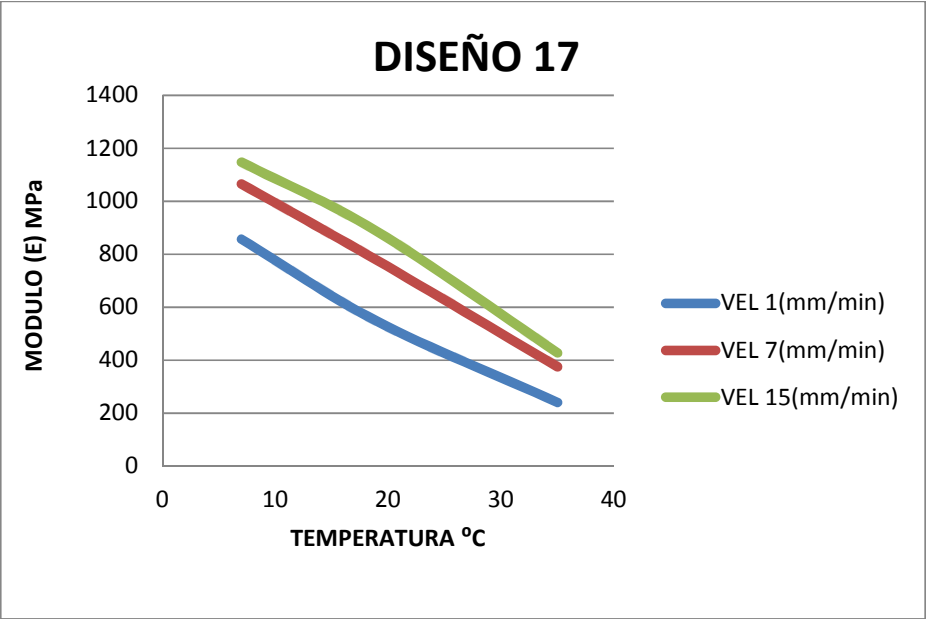


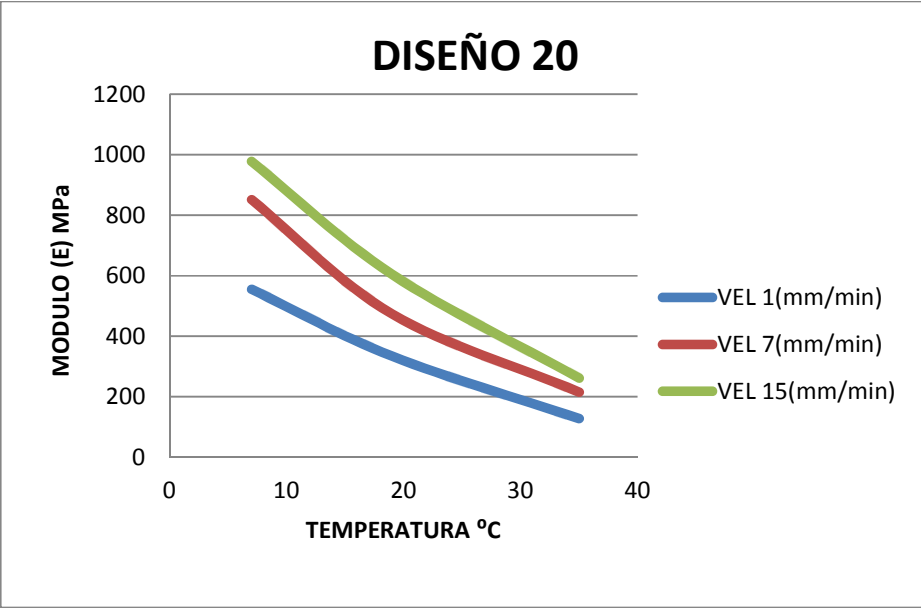
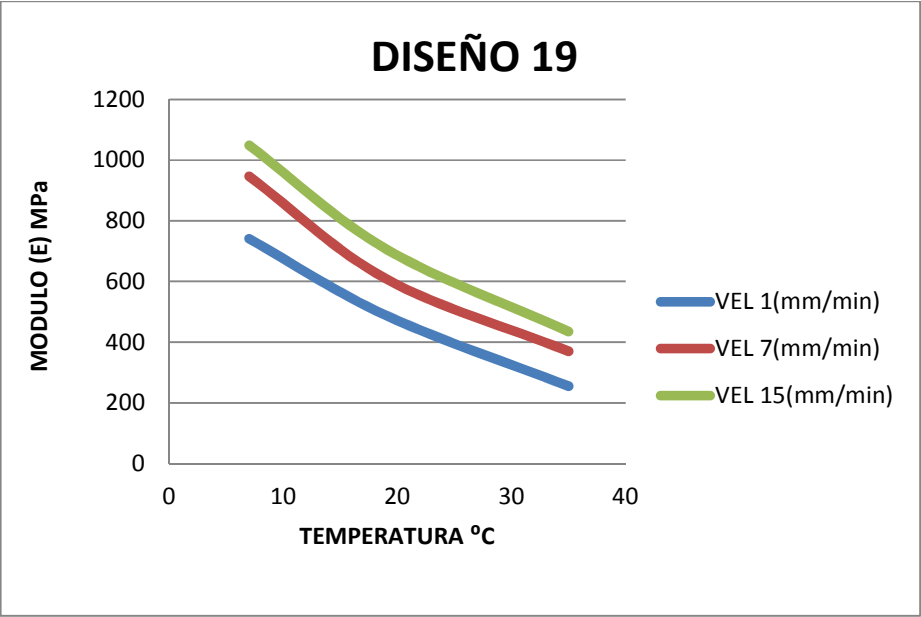
DISEÑO 15

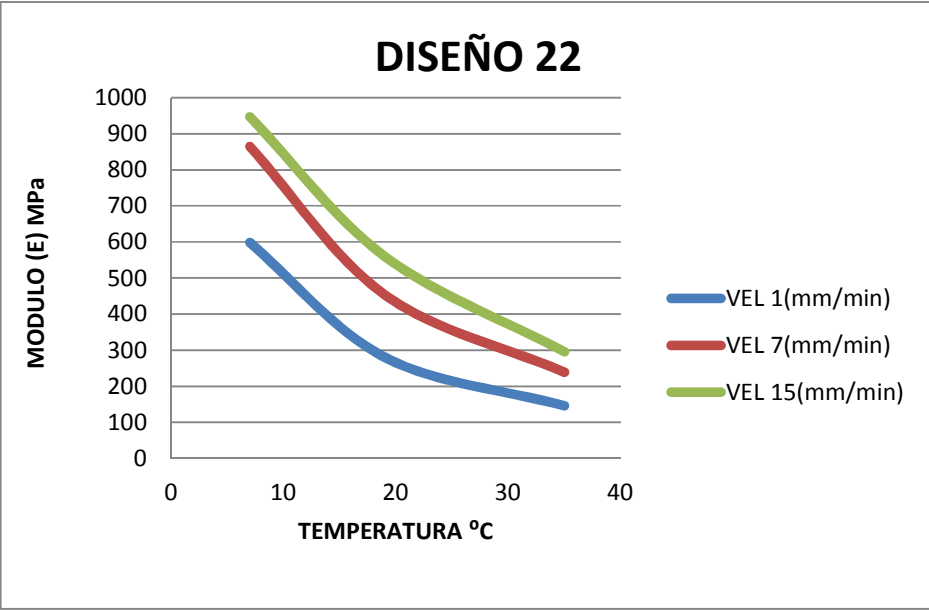
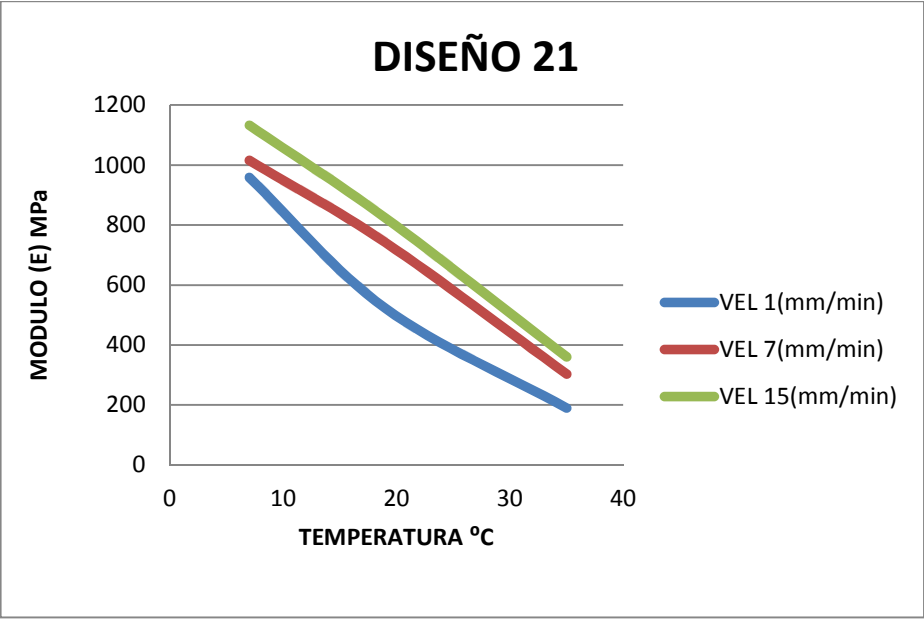


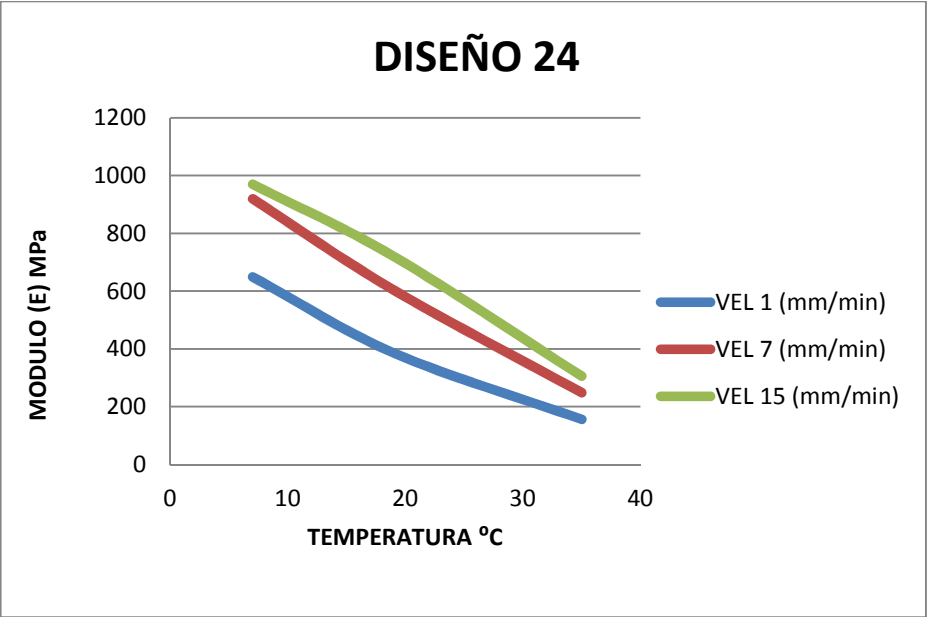
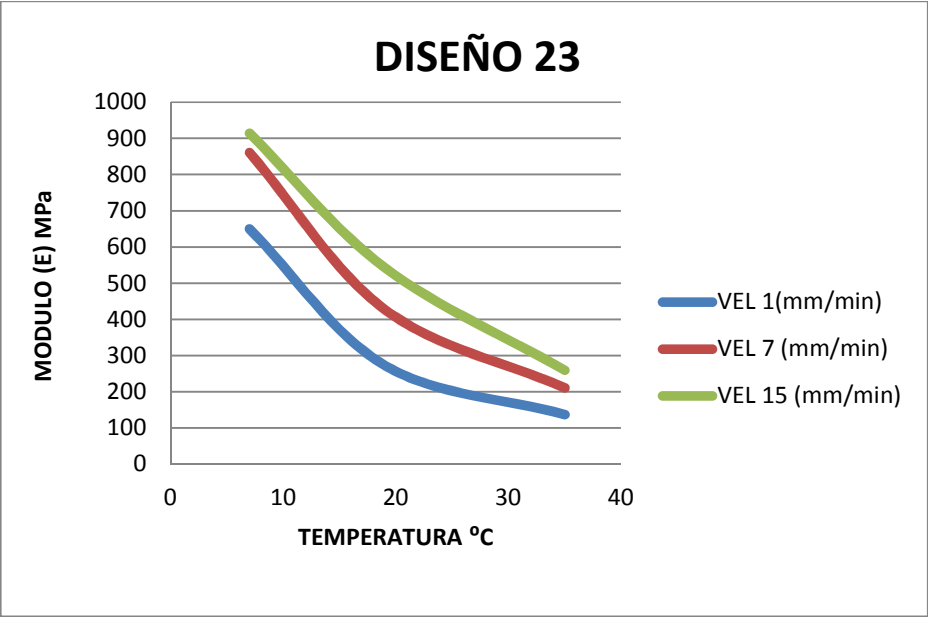
DISEÑO 16











**ANEXO C. TABLA DE VALORES DEL MODULO EN CADA ENSAYO
REALIZADO**

Nº Serie	Código	Temp. (°C)	Vel. (mm/min)	Módulo (MPa)
1	1_1111_R1	7	1	681.993
1	1_1111_R1	7	7	776.742
1	1_1111_R1	7	15	917.544
1	1_1111_R1	19	1	429.264
1	1_1111_R1	19	7	601.336
1	1_1111_R1	19	15	698.971
1	1_1111_R1	35	1	292.876
1	1_1111_R1	35	7	433.166
1	1_1111_R1	35	15	511.214
1	1_1111_R2	7	1	579.806
1	1_1111_R2	7	7	670.399
1	1_1111_R2	7	15	765.028
1	1_1111_R2	19	1	337.226
1	1_1111_R2	19	7	526.370
1	1_1111_R2	19	15	621.930
1	1_1111_R2	35	1	250.218
1	1_1111_R2	35	7	356.947
1	1_1111_R2	35	15	443.937
1	1_1111_R3	7	1	784.181
1	1_1111_R3	7	7	883.084
1	1_1111_R3	7	15	1.070.059
1	1_1111_R3	19	1	521.302
1	1_1111_R3	19	7	676.301
1	1_1111_R3	19	15	776.011
1	1_1111_R3	35	1	335.534
1	1_1111_R3	35	7	509.386
1	1_1111_R3	35	15	578.491
2	2_1112_R1	7	1	692.528
2	2_1112_R1	7	7	786.951
2	2_1112_R1	7	15	822.953
2	2_1112_R1	19	1	439.385
2	2_1112_R1	19	7	540.161
2	2_1112_R1	19	15	589.132
2	2_1112_R1	35	1	312.137

Nº Serie	Código	Temp. (°C)	Vel. (mm/min)	Módulo (MPa)
2	2_1112_R1	35	7	407.671
2	2_1112_R1	35	15	438.546
2	2_1112_R2	7	1	576.059
2	2_1112_R2	7	7	665.757
2	2_1112_R2	7	15	755.223
2	2_1112_R2	19	1	351.108
2	2_1112_R2	19	7	472.215
2	2_1112_R2	19	15	503.085
2	2_1112_R2	35	1	251.607
2	2_1112_R2	35	7	342.598
2	2_1112_R2	35	15	385.050
2	2_1112_R3	7	1	484.297
2	2_1112_R3	7	7	524.176
2	2_1112_R3	7	15	546.733
2	2_1112_R3	19	1	353.523
2	2_1112_R3	19	7	364.619
2	2_1112_R3	19	15	381.051
2	2_1112_R3	35	1	284.044
2	2_1112_R3	35	7	321.449
2	2_1112_R3	35	15	347.113
3	3_1121_R1	7	1	251.737
3	3_1121_R1	7	7	573.187
3	3_1121_R1	7	15	805.683
3	3_1121_R1	19	1	212.025
3	3_1121_R1	19	7	363.387
3	3_1121_R1	19	15	462.121
3	3_1121_R1	35	1	109.183
3	3_1121_R1	35	7	180.067
3	3_1121_R1	35	15	210.342
3	3_1121_R2	7	1	503.247
3	3_1121_R2	7	7	852.288
3	3_1121_R2	7	15	929.569
3	3_1121_R2	19	1	240.064
3	3_1121_R2	19	7	423.083
3	3_1121_R2	19	15	511.031
3	3_1121_R2	35	1	133.965
3	3_1121_R2	35	7	215.603

Nº Serie	Código	Temp. (°C)	Vel. (mm/min)	Módulo (MPa)
3	3_1121_R2	35	15	252.074
3	3_1121_R3	7	1	827.788
3	3_1121_R3	7	7	931.280
3	3_1121_R3	7	15	952.470
3	3_1121_R3	19	1	291.152
3	3_1121_R3	19	7	437.521
3	3_1121_R3	19	15	530.303
3	3_1121_R3	35	1	167.629
3	3_1121_R3	35	7	235.395
3	3_1121_R3	35	15	279.495
4	4_1122_R1	7	1	410.646
4	4_1122_R1	7	7	569.106
4	4_1122_R1	7	15	652.517
4	4_1122_R1	19	1	226.297
4	4_1122_R1	19	7	335.573
4	4_1122_R1	19	15	409.709
4	4_1122_R1	35	1	128.132
4	4_1122_R1	35	7	185.336
4	4_1122_R1	35	15	212.243
4	4_1122_R2	7	1	750.329
4	4_1122_R2	7	7	490.885
4	4_1122_R2	7	15	695.843
4	4_1122_R2	19	1	262.506
4	4_1122_R2	19	7	405.306
4	4_1122_R2	19	15	503.239
4	4_1122_R2	35	1	152.594
4	4_1122_R2	35	7	219.588
4	4_1122_R2	35	15	259.741
4	4_1122_R3	7	1	633.296
4	4_1122_R3	7	7	796.115
4	4_1122_R3	7	15	888.483
4	4_1122_R3	19	1	263.526
4	4_1122_R3	19	7	379.223
4	4_1122_R3	19	15	426.748
4	4_1122_R3	35	1	136.895
4	4_1122_R3	35	7	200.095
4	4_1122_R3	35	15	231.481

Nº Serie	Código	Temp. (°C)	Vel. (mm/min)	Módulo (MPa)
5	5_1211_R1	7	1	719.508
5	5_1211_R1	7	7	935.431
5	5_1211_R1	7	15	987.662
5	5_1211_R1	19	1	381.730
5	5_1211_R1	19	7	603.283
5	5_1211_R1	19	15	697.146
5	5_1211_R1	35	1	206.954
5	5_1211_R1	35	7	325.062
5	5_1211_R1	35	15	433.547
5	5_1211_R2	7	1	799.351
5	5_1211_R2	7	7	967.128
5	5_1211_R2	7	15	978.619
5	5_1211_R2	19	1	414.995
5	5_1211_R2	19	7	618.703
5	5_1211_R2	19	15	714.390
5	5_1211_R2	35	1	227.842
5	5_1211_R2	35	7	344.706
5	5_1211_R2	35	15	458.074
5	5_1211_R3	7	1	639.665
5	5_1211_R3	7	7	903.734
5	5_1211_R3	7	15	996.704
5	5_1211_R3	19	1	348.465
5	5_1211_R3	19	7	587.862
5	5_1211_R3	19	15	679.901
5	5_1211_R3	35	1	186.067
5	5_1211_R3	35	7	305.418
5	5_1211_R3	35	15	409.020
6	6_1212_R1	7	1	903.323
6	6_1212_R1	7	7	1.065.560
6	6_1212_R1	7	15	1.066.902
6	6_1212_R1	19	1	416.446
6	6_1212_R1	19	7	663.080
6	6_1212_R1	19	15	688.925
6	6_1212_R1	35	1	252.439
6	6_1212_R1	35	7	370.345
6	6_1212_R1	35	15	426.714
6	6_1212_R2	7	1	861.992

Nº Serie	Código	Temp. (°C)	Vel. (mm/min)	Módulo (MPa)
6	6_1212_R2	7	7	1.081.274
6	6_1212_R2	7	15	1.151.314
6	6_1212_R2	19	1	574.452
6	6_1212_R2	19	7	817.176
6	6_1212_R2	19	15	904.038
6	6_1212_R2	35	1	279.495
6	6_1212_R2	35	7	362.562
6	6_1212_R2	35	15	443.705
6	6_1212_R3	7	1	882.658
6	6_1212_R3	7	7	1.073.417
6	6_1212_R3	7	15	1.109.108
6	6_1212_R3	19	1	495.449
6	6_1212_R3	19	7	740.128
6	6_1212_R3	19	15	796.481
6	6_1212_R3	35	1	265.967
6	6_1212_R3	35	7	366.454
6	6_1212_R3	35	15	435.209
7	7_1221_R1	7	1	465.418
7	7_1221_R1	7	7	651.366
7	7_1221_R1	7	15	741.028
7	7_1221_R1	19	1	204.420
7	7_1221_R1	19	7	349.542
7	7_1221_R1	19	15	433.693
7	7_1221_R1	35	1	105.858
7	7_1221_R1	35	7	141.466
7	7_1221_R1	35	15	180.641
7	7_1221_R2	7	1	451.092
7	7_1221_R2	7	7	598.722
7	7_1221_R2	7	15	667.190
7	7_1221_R2	19	1	170.623
7	7_1221_R2	19	7	278.954
7	7_1221_R2	19	15	365.214
7	7_1221_R2	35	1	93.360
7	7_1221_R2	35	7	142.985
7	7_1221_R2	35	15	171.729
7	7_1221_R3	7	1	454.320
7	7_1221_R3	7	7	622.542

Nº Serie	Código	Temp. (°C)	Vel. (mm/min)	Módulo (MPa)
7	7_1221_R3	7	15	689.527
7	7_1221_R3	19	1	160.366
7	7_1221_R3	19	7	330.090
7	7_1221_R3	19	15	415.975
7	7_1221_R3	35	1	90.406
7	7_1221_R3	35	7	139.830
7	7_1221_R3	35	15	165.696
8	8_1222_R1	7	15	924.079
8	8_1222_R1	19	1	241.569
8	8_1222_R1	19	7	463.761
8	8_1222_R1	19	15	544.174
8	8_1222_R1	35	1	119.270
8	8_1222_R1	35	7	193.421
8	8_1222_R1	35	15	233.938
8	8_1222_R2	7	1	750.966
8	8_1222_R2	7	7	927.981
8	8_1222_R2	7	15	994.508
8	8_1222_R2	19	1	288.160
8	8_1222_R2	19	7	521.513
8	8_1222_R2	19	15	604.832
8	8_1222_R2	35	1	138.149
8	8_1222_R2	35	7	217.524
8	8_1222_R2	35	15	263.133
8	8_1222_R3	7	1	867.213
8	8_1222_R3	7	7	963.380
8	8_1222_R3	7	15	1.064.936
8	8_1222_R3	19	1	334.751
8	8_1222_R3	19	7	579.264
8	8_1222_R3	19	15	665.490
8	8_1222_R3	35	1	157.027
8	8_1222_R3	35	7	241.628
8	8_1222_R3	35	15	292.327
9	9_2111_R1	7	1	897.835
9	9_2111_R1	7	7	999.700
9	9_2111_R1	7	15	1.028.371
9	9_2111_R1	19	1	635.157
9	9_2111_R1	19	7	825.387

Nº Serie	Código	Temp. (°C)	Vel. (mm/min)	Módulo (MPa)
9	9_2111_R1	19	15	877.663
9	9_2111_R1	35	1	294.739
9	9_2111_R1	35	7	462.269
9	9_2111_R1	35	15	492.699
9	9_2111_R2	7	1	935.994
9	9_2111_R2	7	7	1.023.780
9	9_2111_R2	7	15	1.043.070
9	9_2111_R2	19	1	649.786
9	9_2111_R2	19	7	776.982
9	9_2111_R2	19	15	857.285
9	9_2111_R2	35	1	344.819
9	9_2111_R2	35	7	485.946
9	9_2111_R2	35	15	487.884
9	9_2111_R3	7	1	970.088
9	9_2111_R3	7	7	1.083.034
9	9_2111_R3	7	15	1.089.974
9	9_2111_R3	19	1	622.527
9	9_2111_R3	19	7	796.620
9	9_2111_R3	19	15	844.224
9	9_2111_R3	35	1	265.380
9	9_2111_R3	35	7	404.425
9	9_2111_R3	35	15	447.952
10	10_2112_R1	7	1	738.679
10	10_2112_R1	7	7	799.736
10	10_2112_R1	7	15	859.581
10	10_2112_R1	19	1	544.615
10	10_2112_R1	19	7	644.732
10	10_2112_R1	19	15	727.735
10	10_2112_R1	35	1	304.563
10	10_2112_R1	35	7	403.617
10	10_2112_R1	35	15	449.824
10	10_2112_R2	7	1	810.340
10	10_2112_R2	7	7	831.140
10	10_2112_R2	7	15	883.764
10	10_2112_R2	19	1	581.028
10	10_2112_R2	19	7	706.835
10	10_2112_R2	19	15	807.982

Nº Serie	Código	Temp. (°C)	Vel. (mm/min)	Módulo (MPa)
10	10_2112_R2	35	1	311.175
10	10_2112_R2	35	7	412.956
10	10_2112_R2	35	15	477.397
10	10_2112_R3	7	1	819.115
10	10_2112_R3	7	7	838.340
10	10_2112_R3	7	15	901.326
10	10_2112_R3	19	1	494.377
10	10_2112_R3	19	7	598.836
10	10_2112_R3	19	15	637.134
10	10_2112_R3	35	1	270.077
10	10_2112_R3	35	7	392.102
10	10_2112_R3	35	15	439.101
11	11_2121_R1	7	1	783.428
11	11_2121_R1	7	7	896.639
11	11_2121_R1	7	15	1.038.145
11	11_2121_R1	19	1	609.202
11	11_2121_R1	19	7	611.252
11	11_2121_R1	19	15	721.610
11	11_2121_R1	35	1	275.368
11	11_2121_R1	35	7	417.249
11	11_2121_R1	35	15	457.033
11	11_2121_R2	7	1	722.728
11	11_2121_R2	7	7	777.414
11	11_2121_R2	7	15	859.192
11	11_2121_R2	19	1	477.385
11	11_2121_R2	19	7	560.853
11	11_2121_R2	19	15	601.799
11	11_2121_R2	35	1	222.034
11	11_2121_R2	35	7	288.054
11	11_2121_R2	35	15	300.037
11	11_2121_R3	7	1	966.822
11	11_2121_R3	7	7	817.619
11	11_2121_R3	7	15	636.585
11	11_2121_R3	19	1	542.088
11	11_2121_R3	19	7	534.569
11	11_2121_R3	19	15	652.390
11	11_2121_R3	35	1	223.257

Nº Serie	Código	Temp. (°C)	Vel. (mm/min)	Módulo (MPa)
11	11_2121_R3	35	7	275.938
11	11_2121_R3	35	15	378.489
12	12_2122_R1	7	1	752.553
12	12_2122_R1	7	7	886.377
12	12_2122_R1	7	15	976.335
12	12_2122_R1	19	1	468.561
12	12_2122_R1	19	7	664.688
12	12_2122_R1	19	15	670.315
12	12_2122_R1	35	1	233.456
12	12_2122_R1	35	7	320.422
12	12_2122_R1	35	15	388.203
12	12_2122_R2	7	1	735.882
12	12_2122_R2	7	7	875.603
12	12_2122_R2	7	15	976.335
12	12_2122_R2	19	1	475.672
12	12_2122_R2	19	7	622.929
12	12_2122_R2	19	15	730.586
12	12_2122_R2	35	1	194.557
12	12_2122_R2	35	7	248.456
12	12_2122_R2	35	15	313.883
12	12_2122_R3	7	1	584.810
12	12_2122_R3	7	7	861.219
12	12_2122_R3	7	15	919.388
12	12_2122_R3	19	1	468.995
12	12_2122_R3	19	7	662.275
12	12_2122_R3	19	15	691.964
12	12_2122_R3	35	1	179.788
12	12_2122_R3	35	7	289.390
12	12_2122_R3	35	15	367.124
13	13_2211_R1	7	1	963.601
13	13_2211_R1	7	7	1.072.920
13	13_2211_R1	7	15	1.118.086
13	13_2211_R1	19	1	417.367
13	13_2211_R1	19	7	635.375
13	13_2211_R1	19	15	730.506
13	13_2211_R1	35	1	227.485
13	13_2211_R1	35	7	359.786

Nº Serie	Código	Temp. (°C)	Vel. (mm/min)	Módulo (MPa)
13	13_2211_R1	35	15	431.816
13	13_2211_R2	7	1	852.105
13	13_2211_R2	7	7	1.022.473
13	13_2211_R2	7	15	1.110.003
13	13_2211_R2	19	1	419.908
13	13_2211_R2	19	7	619.240
13	13_2211_R2	19	15	678.970
13	13_2211_R2	35	1	287.955
13	13_2211_R2	35	7	429.000
13	13_2211_R2	35	15	509.123
13	13_2211_R3	7	1	423.995
13	13_2211_R3	7	7	849.909
13	13_2211_R3	7	15	1.022.328
13	13_2211_R3	19	1	457.479
13	13_2211_R3	19	7	599.174
13	13_2211_R3	19	15	651.951
13	13_2211_R3	35	1	302.043
13	13_2211_R3	35	7	396.590
13	13_2211_R3	35	15	405.069
14	14_2212_R1	7	1	977.577
14	14_2212_R1	7	7	1.008.400
14	14_2212_R1	7	15	1.192.430
14	14_2212_R1	19	1	530.803
14	14_2212_R1	19	7	813.970
14	14_2212_R1	19	15	883.350
14	14_2212_R1	35	1	266.743
14	14_2212_R1	35	7	379.257
14	14_2212_R1	35	15	433.903
14	14_2212_R2	7	1	1.044.760
14	14_2212_R2	7	7	1.144.687
14	14_2212_R2	7	15	1.213.040
14	14_2212_R2	19	1	561.360
14	14_2212_R2	19	7	668.353
14	14_2212_R2	19	15	764.320
14	14_2212_R2	35	1	263.733
14	14_2212_R2	35	7	397.927
14	14_2212_R2	35	15	451.147

Nº Serie	Código	Temp. (°C)	Vel. (mm/min)	Módulo (MPa)
14	14_2212_R3	7	1	962.843
14	14_2212_R3	7	7	1.000.793
14	14_2212_R3	7	15	1.192.567
14	14_2212_R3	19	1	605.113
14	14_2212_R3	19	7	754.690
14	14_2212_R3	19	15	877.017
14	14_2212_R3	35	1	273.550
14	14_2212_R3	35	7	437.823
14	14_2212_R3	35	15	484.237
15	15_2221_R1	7	1	429.931
15	15_2221_R1	7	7	784.431
15	15_2221_R1	7	15	963.703
15	15_2221_R1	19	1	327.911
15	15_2221_R1	19	7	471.446
15	15_2221_R1	19	15	623.458
15	15_2221_R1	35	1	134.042
15	15_2221_R1	35	7	206.812
15	15_2221_R1	35	15	246.074
15	15_2221_R2	7	1	702.665
15	15_2221_R2	7	7	924.038
15	15_2221_R2	7	15	1.026.512
15	15_2221_R2	19	1	315.678
15	15_2221_R2	19	7	477.252
15	15_2221_R2	19	15	613.920
15	15_2221_R2	35	1	132.410
15	15_2221_R2	35	7	209.686
15	15_2221_R2	35	15	271.537
15	15_2221_R3	7	1	735.223
15	15_2221_R3	7	7	787.205
15	15_2221_R3	7	15	1.170.138
15	15_2221_R3	19	1	352.324
15	15_2221_R3	19	7	553.568
15	15_2221_R3	19	15	676.140
15	15_2221_R3	35	1	126.194
15	15_2221_R3	35	7	209.765
15	15_2221_R3	35	15	235.310
16	16_2222_R1	7	1	1.038.760

Nº Serie	Código	Temp. (°C)	Vel. (mm/min)	Módulo (MPa)
16	16_2222_R1	7	7	1.172.710
16	16_2222_R1	7	15	1.161.677
16	16_2222_R1	19	1	516.530
16	16_2222_R1	19	7	750.650
16	16_2222_R1	19	15	868.970
16	16_2222_R1	35	1	260.520
16	16_2222_R1	35	7	365.343
16	16_2222_R1	35	15	427.677
16	16_2222_R2	7	1	998.110
16	16_2222_R2	7	7	1.112.557
16	16_2222_R2	7	15	1.080.570
16	16_2222_R2	19	1	543.820
16	16_2222_R2	19	7	771.947
16	16_2222_R2	19	15	858.733
16	16_2222_R2	35	1	282.067
16	16_2222_R2	35	7	360.067
16	16_2222_R2	35	15	420.253
16	16_2222_R3	7	1	869.577
16	16_2222_R3	7	7	1.003.780
16	16_2222_R3	7	15	984.770
16	16_2222_R3	19	1	504.983
16	16_2222_R3	19	7	705.143
16	16_2222_R3	19	15	791.377
16	16_2222_R3	35	1	240.817
16	16_2222_R3	35	7	344.620
16	16_2222_R3	35	15	393.703
17	17_3111_R1	7	1	925.483
17	17_3111_R1	7	7	1.090.883
17	17_3111_R1	7	15	1.187.000
17	17_3111_R1	19	1	561.723
17	17_3111_R1	19	7	813.823
17	17_3111_R1	19	15	922.620
17	17_3111_R1	35	1	259.889
17	17_3111_R1	35	7	391.213
17	17_3111_R1	35	15	441.673
17	17_3111_R2	7	1	859.097
17	17_3111_R2	7	7	1.110.843

Nº Serie	Código	Temp. (°C)	Vel. (mm/min)	Módulo (MPa)
17	17_3111_R2	7	15	1.228.370
17	17_3111_R2	19	1	559.557
17	17_3111_R2	19	7	786.173
17	17_3111_R2	19	15	915.420
17	17_3111_R2	35	1	227.080
17	17_3111_R2	35	7	359.713
17	17_3111_R2	35	15	419.703
17	17_3111_R3	7	1	784.573
17	17_3111_R3	7	7	993.123
17	17_3111_R3	7	15	1.026.417
17	17_3111_R3	19	1	519.143
17	17_3111_R3	19	7	731.143
17	17_3111_R3	19	15	820.003
17	17_3111_R3	35	1	233.613
17	17_3111_R3	35	7	373.090
17	17_3111_R3	35	15	421.893
18	18_3112_R1	7	1	729.409
18	18_3112_R1	7	7	926.335
18	18_3112_R1	7	15	1.054.604
18	18_3112_R1	19	1	297.263
18	18_3112_R1	19	7	538.080
18	18_3112_R1	19	15	593.512
18	18_3112_R1	35	1	160.618
18	18_3112_R1	35	7	250.710
18	18_3112_R1	35	15	332.955
18	18_3112_R2	7	1	918.865
18	18_3112_R2	7	7	1.024.982
18	18_3112_R2	7	15	1.381.927
18	18_3112_R2	19	1	359.242
18	18_3112_R2	19	7	716.355
18	18_3112_R2	19	15	774.948
18	18_3112_R2	35	1	172.952
18	18_3112_R2	35	7	297.031
18	18_3112_R2	35	15	321.191
18	18_3112_R3	7	1	956.217
18	18_3112_R3	7	7	1.094.586
18	18_3112_R3	7	15	1.153.911

Nº Serie	Código	Temp. (°C)	Vel. (mm/min)	Módulo (MPa)
18	18_3112_R3	19	1	444.271
18	18_3112_R3	19	7	642.604
18	18_3112_R3	19	15	809.115
18	18_3112_R3	35	1	204.318
18	18_3112_R3	35	7	284.191
18	18_3112_R3	35	15	361.319
19	19_3121_R1	7	1	619.517
19	19_3121_R1	7	7	842.060
19	19_3121_R1	7	15	936.043
19	19_3121_R1	19	1	477.652
19	19_3121_R1	19	7	592.413
19	19_3121_R1	19	15	668.800
19	19_3121_R1	35	1	258.500
19	19_3121_R1	35	7	358.007
19	19_3121_R1	35	15	418.427
19	19_3121_R2	7	1	861.717
19	19_3121_R2	7	7	1.044.817
19	19_3121_R2	7	15	1.140.497
19	19_3121_R2	19	1	534.853
19	19_3121_R2	19	7	648.567
19	19_3121_R2	19	15	780.967
19	19_3121_R2	35	1	271.350
19	19_3121_R2	35	7	394.740
19	19_3121_R2	35	15	457.863
19	19_3121_R3	7	1	742.083
19	19_3121_R3	7	7	954.317
19	19_3121_R3	7	15	1.070.390
19	19_3121_R3	19	1	451.430
19	19_3121_R3	19	7	585.420
19	19_3121_R3	19	15	671.917
19	19_3121_R3	35	1	235.683
19	19_3121_R3	35	7	357.867
19	19_3121_R3	35	15	428.857
20	20_3122_R1	7	1	617.957
20	20_3122_R1	7	7	861.995
20	20_3122_R1	7	15	986.828
20	20_3122_R1	19	1	284.861

Nº Serie	Código	Temp. (°C)	Vel. (mm/min)	Módulo (MPa)
20	20_3122_R1	19	7	349.963
20	20_3122_R1	19	15	560.059
20	20_3122_R1	35	1	120.059
20	20_3122_R1	35	7	220.776
20	20_3122_R1	35	15	270.332
20	20_3122_R2	7	1	586.414
20	20_3122_R2	7	7	945.961
20	20_3122_R2	7	15	964.939
20	20_3122_R2	19	1	350.777
20	20_3122_R2	19	7	503.747
20	20_3122_R2	19	15	618.932
20	20_3122_R2	35	1	125.819
20	20_3122_R2	35	7	221.087
20	20_3122_R2	35	15	257.216
20	20_3122_R3	7	1	460.954
20	20_3122_R3	7	7	746.464
20	20_3122_R3	7	15	981.220
20	20_3122_R3	19	1	368.055
20	20_3122_R3	19	7	568.328
20	20_3122_R3	19	15	635.411
20	20_3122_R3	35	1	138.838
20	20_3122_R3	35	7	205.658
20	20_3122_R3	35	15	257.682
21	21_3211_R1	7	1	860.003
21	21_3211_R1	7	7	933.267
21	21_3211_R1	7	15	1.098.583
21	21_3211_R1	19	1	482.427
21	21_3211_R1	19	7	672.303
21	21_3211_R1	19	15	812.880
21	21_3211_R1	35	1	172.280
21	21_3211_R1	35	7	268.540
21	21_3211_R1	35	15	319.580
21	21_3211_R2	7	1	986.797
21	21_3211_R2	7	7	994.240
21	21_3211_R2	7	15	1.141.677
21	21_3211_R2	19	1	548.717
21	21_3211_R2	19	7	761.703

Nº Serie	Código	Temp. (°C)	Vel. (mm/min)	Módulo (MPa)
21	21_3211_R2	19	15	823.400
21	21_3211_R2	35	1	192.650
21	21_3211_R2	35	7	322.483
21	21_3211_R2	35	15	377.537
21	21_3211_R3	7	1	1.028.333
21	21_3211_R3	7	7	1.119.410
21	21_3211_R3	7	15	1.157.240
21	21_3211_R3	19	1	536.083
21	21_3211_R3	19	7	791.637
21	21_3211_R3	19	15	835.007
21	21_3211_R3	35	1	203.797
21	21_3211_R3	35	7	317.817
21	21_3211_R3	35	15	382.823
22	22_3212_R1	7	1	583.904
22	22_3212_R1	7	7	681.576
22	22_3212_R1	7	15	788.515
22	22_3212_R1	19	1	257.157
22	22_3212_R1	19	7	404.690
22	22_3212_R1	19	15	464.128
22	22_3212_R1	35	1	145.743
22	22_3212_R1	35	7	251.947
22	22_3212_R1	35	15	303.716
22	22_3212_R2	7	1	486.178
22	22_3212_R2	7	7	907.068
22	22_3212_R2	7	15	945.891
22	22_3212_R2	19	1	305.405
22	22_3212_R2	19	7	488.867
22	22_3212_R2	19	15	644.636
22	22_3212_R2	35	1	147.250
22	22_3212_R2	35	7	232.850
22	22_3212_R2	35	15	303.716
22	22_3212_R3	7	1	725.070
22	22_3212_R3	7	7	1.004.609
22	22_3212_R3	7	15	1.105.052
22	22_3212_R3	19	1	279.491
22	22_3212_R3	19	7	467.444
22	22_3212_R3	19	15	571.584

Nº Serie	Código	Temp. (°C)	Vel. (mm/min)	Módulo (MPa)
22	22_3212_R3	35	1	145.160
22	22_3212_R3	35	7	232.382
22	22_3212_R3	35	15	279.211
23	23-3221_R1	7	1	750.331
23	23-3221_R1	7	7	875.700
23	23-3221_R1	7	15	910.455
23	23-3221_R1	19	1	322.798
23	23-3221_R1	19	7	455.923
23	23-3221_R1	19	15	548.388
23	23-3221_R1	35	1	162.728
23	23-3221_R1	35	7	249.823
23	23-3221_R1	35	15	298.398
23	23-3221_R2	7	1	422.848
23	23-3221_R2	7	7	777.727
23	23-3221_R2	7	15	868.905
23	23-3221_R2	19	1	248.125
23	23-3221_R2	19	7	414.474
23	23-3221_R2	19	15	551.724
23	23-3221_R2	35	1	125.192
23	23-3221_R2	35	7	177.753
23	23-3221_R2	35	15	239.257
23	23-3221_R3	7	1	777.409
23	23-3221_R3	7	7	929.620
23	23-3221_R3	7	15	963.886
23	23-3221_R3	19	1	248.508
23	23-3221_R3	19	7	412.458
23	23-3221_R3	19	15	529.391
23	23-3221_R3	35	1	123.569
23	23-3221_R3	35	7	205.441
23	23-3221_R3	35	15	240.918
24	24_3222_R1	7	1	573.747
24	24_3222_R1	7	7	867.970
24	24_3222_R1	7	15	898.580
24	24_3222_R1	19	1	347.073
24	24_3222_R1	19	7	551.893
24	24_3222_R1	19	15	657.573
24	24_3222_R1	35	1	125.427

Nº Serie	Código	Temp. (°C)	Vel. (mm/min)	Módulo (MPa)
24	24_3222_R1	35	7	209.969
24	24_3222_R1	35	15	255.907
24	24_3222_R2	7	1	812.947
24	24_3222_R2	7	7	990.953
24	24_3222_R2	7	15	1.053.000
24	24_3222_R2	19	1	418.367
24	24_3222_R2	19	7	639.693
24	24_3222_R2	19	15	768.640
24	24_3222_R2	35	1	178.067
24	24_3222_R2	35	7	284.413
24	24_3222_R2	35	15	344.327
24	24_3222_R3	7	1	562.560
24	24_3222_R3	7	7	901.037
24	24_3222_R3	7	15	959.313
24	24_3222_R3	19	1	393.730
24	24_3222_R3	19	7	621.397
24	24_3222_R3	19	15	735.653
24	24_3222_R3	35	1	166.000
24	24_3222_R3	35	7	252.020
24	24_3222_R3	35	15	318.140

ANEXO D. TABLAS DEL ANALISIS ESTADISTICO

FACTOR	NIVELES	VALOR POR NIVEL		
		1	2	3
Velocidad(mm/min)	3	1	7	15
Temperatura (°C)	3	7	19	35
Contenido de Asfalto	3	4,5	5	5,5
Tipo de Asfalto	2	20/30	60/70	-----
Gradación	2	MDC-2	M1	-----
Fuente	2	CHICAMOCHA	RIONEGRO	-----

Medias de cuadrado mínimo para Módulo (MPa)			
FACTORES		MEDIA MODULO	MEDIA DEL ERROR ESTANDAR
Factor I	Factor II		
Contenido de Asfalto	Fuente		
4,5	Chicamocha	491,3	8,342
4,5	Rionegro	522	8,342
5	Chicamocha	611	8,342
5	Rionegro	654,3	8,342
5,5	Chicamocha	618	8,342
5,5	Rionegro	537,5	8,342
Tipo de Asfalto	Gradación		
20/30	M1	518,1	6,811
20/30	MDC-2	623,8	6,811
60/70	M1	516,4	6,811
60/70	MDC-2	631,1	6,811
Tipo de Asfalto	Fuente		
20/30	Chicamocha	610,9	6,811
20/30	Rionegro	531	6,811
60/70	Chicamocha	536	6,811
60/70	Rionegro	611,5	6,811
Gradación	Fuente		
M1	Chicamocha	494,8	6,811
M1	Rionegro	539,7	6,811
MDC-2	Chicamocha	652,1	6,811
MDC-2	Rionegro	602,8	6,811

Medias de cuadrado mínimo para Módulo (MPa)			
FACTORES		MEDIA MODULO	MEDIA DEL ERROR ESTANDAR
Factor I	Factor II		
Temperatura (°C)	Velocidad(mm/min)		
7	1	735,5	10,217
7	7	894,4	10,217
7	15	980,9	10,217
19	1	412,2	10,217
19	7	584,2	10,217
19	15	673,3	10,217
35	1	206,8	10,217
35	7	305,2	10,217
35	15	358,7	10,217
Temperatura (°C)	Contenido de Asfalto		
7	4,5	777,5	10,217
7	5	926,9	10,217
7	5,5	906,3	10,217
19	4,5	471,7	10,217
19	5	636	10,217
19	5,5	562,1	10,217
35	4,5	270,8	10,217
35	5	335,1	10,217
35	5,5	264,8	10,217
Temperatura (°C)	Tipo de Asfalto		
7	20/30	841,9	8,342
7	60/70	898,6	8,342
19	20/30	562,2	8,342
19	60/70	550,9	8,342
35	20/30	308,7	8,342
35	60/70	271,7	8,342

Medias de cuadrado mínimo para Módulo (MPa)			
FACTORES		MEDIA MODULO	MEDIA DEL ERROR ESTANDAR
Factor I	Factor II		
Temperatura (°C)	Gradación		
7	M1	816,2	8,342
7	MDC-2	924,3	8,342
19	M1	496,7	8,342
19	MDC-2	616,4	8,342
35	M1	238,8	8,342
35	MDC-2	341,7	8,342
Temperatura (°C)	Fuente		
7	Chicamocha	866,4	8,342
7	Rionegro	874,2	8,342
19	Chicamocha	558,1	8,342
19	Rionegro	555,1	8,342
35	Chicamocha	295,9	8,342
35	Rionegro	284,6	8,342
Velocidad(mm/min)	Contenido de Asfalto		
1	4,5	392,3	10,217
1	5	524,4	10,217
1	5,5	437,9	10,217
7	4,5	528,3	10,217
7	5	651,4	10,217
7	5,5	604,1	10,217
15	4,5	599,5	10,217
15	5	722,2	10,217
15	5,5	691,3	10,217
Velocidad(mm/min)	Tipo de Asfalto		
1	20/30	460,6	8,342
1	60/70	442,4	8,342
7	20/30	588,7	8,342
7	60/70	600,6	8,342
15	20/30	663,6	8,342
15	60/70	678,3	8,342

Medias de cuadrado mínimo para Módulo (MPa)			
FACTORES		MEDIA MODULO	MEDIA DEL ERROR ESTANDAR
Factor I	Factor II		
Velocidad(mm/min)	Gradación		
1	M1	399,3	8,342
1	MDC-2	503,7	8,342
7	M1	537,9	8,342
7	MDC-2	651,3	8,342
15	M1	614,6	8,342
15	MDC-2	727,4	8,342
Velocidad(mm/min)	Fuente		
1	Chicamocha	450,9	8,342
1	Rionegro	452,2	8,342
7	Chicamocha	594,9	8,342
7	Rionegro	594,4	8,342
15	Chicamocha	674,6	8,342
15	Rionegro	667,3	8,342
Contenido de Asfalto	Tipo de Asfalto		
4,5	20/30	478,5	8,342
4,5	60/70	534,9	8,342
5	20/30	625,3	8,342
5	60/70	640	8,342
5,5	20/30	609,1	8,342
5,5	60/70	546,4	8,342
Contenido de Asfalto	Gradación		
4,5	M1	426,9	8,342
4,5	MDC-2	586,4	8,342
5	M1	590,2	8,342
5	MDC-2	675,1	8,342
5,5	M1	534,6	8,342
5,5	MDC-2	620,9	8,342

Medias de cuadrado mínimo para Módulo (MPa)		
FACTOR	MEDIA MODULO	MEDIA DEL ERROR ESTANDAR
Temperatura (°C)		
7	870,3	5,899
19	556,6	5,899
35	290,2	5,899
Velocidad(mm/min)		
1	451,5	5,899
7	594,6	5,899
15	671	5,899
Contenido de Asfalto		
4,5	506,7	5,899
5	632,6	5,899
5,5	677,8	5,899
Tipo de Asfalto		
20/30	571	4,816
60/70	573,8	4,816
Gradación		
M1	517,2	4,816
MDC-2	627,5	4,816
Fuente		
Chicamocha	573,4	4,816
Rionegro	571,3	4,816