

**VALIDACIÓN DE LA REPETIBILIDAD Y LA REPRODUCIBILIDAD DEL
ENSAYO BAJO CARGA MONOTÓNICA EN MEZCLAS ASFÁLTICAS**

**JUAN CARLOS RUIZ CARREÑO
ROBINSON MONTAÑEZ GÓMEZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2011

**VALIDACIÓN DE LA REPETIBILIDAD Y LA REPRODUCIBILIDAD DEL
ENSAYO BAJO CARGA MONOTÓNICA EN MEZCLAS ASFÁLTICAS**

**JUAN CARLOS RUIZ CARREÑO
ROBINSON MONTAÑEZ GÓMEZ**

Proyecto de grado para obtener el título de Ingeniero Civil

DIRECTOR.

EDUARDO ALBERTO CASTAÑEDA PINZON
Ingeniero Civil, M.Sc, Doctor

CODIRECTORA.

MARIA CRISTINA RIVERO OLARTE
Ingeniera Civil

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2011

AGRADECIMIENTOS.

Agradecemos a nuestro director de proyecto Ingeniero Eduardo Alberto Castañeda Pinzón por su guía y orientación.

A nuestra codirectora Ingeniera María Cristina Rivero Olarte por su colaboración en la construcción de este proyecto.

A nuestros sabios profesores que nos brindaron sus enseñanzas para formarnos como ingenieros civiles.

A todo el cuerpo administrativo de la escuela de Ingeniería Civil por su colaboración.

Dedicatoria.

A la vida, al destino, y a su maravilloso creador: Dios.

A los seres que me dieron la vida, por su apoyo y paciencia.

A mi madre y a su protección; a mi padre por su apoyo y respaldo.

A mis sabios profesores por su enseñanza y su gran conocimiento.

A mis compañeros por su tolerancia.

Y a tí por tu ayuda, por tu apoyo y por estos fructíferos diez años.

Juan Carlos Ruíz Carreño

Dedicatoria.

*A Dios y a mi madre, quien con su infinito amor
y dedicación me permitió alcanzar este logro.*

TABLA DE CONTENIDO

Introducción.....	22
1. Objetivo General	23
1.1 Objetivos Específicos.....	23
2. Marco Teórico	24
2.1 .1 Repetibilidad.....	26
2.1. 2 Reproducibilidad.....	26
2.3 Procedimiento Para Realizar El Estudio De Repetibilidad Y Reproducibilidad (R&R)	27
2.3.1 Método De Los Rangos	28
2.3.2 Método De Análisis De Varianza (Anova)	31
2.4. Propiedades Del Material Objeto De Estudio.....	36
3. Metodología	38
3.1 Materiales Usados En El Ensayo Bajo Carga Monotónica.....	38
3.2 Metodología De Ensayo Bajo Carga Monotónica	38
3.2.1 Metodología Utilizando El Marco De Carga De Operación Manual.....	38
3.2.1.1 Acondicionamiento De La Temperatura De Ensayo	39
3.2.1.2 Registro De Los Datos De La Prueba.....	40
3.2.1.3 Análisis De Datos	41
3.2.1.4 Módulos De Rigidez	51
3.2.1.5 Interpretación De Datos	54
3.2.2 Metodología Implementada Utilizando El Marco De Carga De La MTS-810	55

3.2.2.1 Procedimiento Del Ensayo	56
3.2.2.2 Análisis Del Módulo De Rigidez	57
3.2.2.3 Resultados	58
3.2.3 Metodología Implementada Utilizando Un Marco De Carga Semiautomatico	
MTA-1	62
3.2.3.1 Resultados	63
4. Análisis De Sensibilidad De La Mezcla Asfáltica	65
4.1 Mezcla Densa En Caliente (MDC-2)	65
4.2 Mezcla Abierta En Caliente (M1)	66
5. Estudio De Repetibilidad Y Reproducibilidad (R&R)	67
5.1 Estudio R&R Por Método Anova	67
5.2 Estudio R&R Por Métodos De Promedios Y Rango	80
6. Conclusiones	87
7. Recomendaciones	89
8. Bibliografía	90
9. Anexos	92

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Variación En El Sistema De Medición.	25
Figura 2. Representación Gráfica Del Concepto De Repetibilidad.....	26
Figura 3. Representación Gráfica Del Concepto De Reproducibilidad	26

LISTA DE FOTOGRAFIAS

Fotografía 1. Marco De Carga De Operación Manual.	39
Fotografía 2. Acondicionamiento De Las Probetas.....	40
Fotografía 3. Máquina Mts-810.....	55
Fotografía 4. Equipos De Control De Temperatura.	56
Fotografía 6. Marco De Carga Semiautomático Mta-1	62

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Valores De Las Constantes K ₁ Y K ₂	30
Tabla 2. Anova Para Un Sistema De Medición Con Dos Factores.....	32
Tabla 3. Valores De Deformación A Temperatura 7°C - Serie 1.....	42
Tabla 4. Valores De Deformación A Temperatura 7°C - Serie 2.....	43
Tabla 5. Valores De Deformación A Temperatura 7°C - Serie 3.....	44
Tabla 6. Valores De Deformación A Temperatura 24°C- Serie 1.....	45
Tabla 7. Valores De Deformación A Temperatura 24°C - Serie 2.....	46
Tabla 8. Valores De Deformación A Temperatura 24°C- Serie 3.....	47
Tabla 9. Valores De Deformación A Temperatura 35°C- Serie 1.....	48
Tabla 10. Valores De Deformación A Temperatura 35°C - Serie 2.....	49
Tabla 11. Valores De Deformación A Temperatura 35°C- Serie 3.....	50
Tabla 12. Resumen De Valores De Módulos A Temperatura 7°C.....	51
Tabla 13. Resumen De Valores De Módulos A Temperatura 35°C.....	51
Tabla 14. Resumen De Valores De Módulos A Temperatura 35°C.....	52
Tabla 15. Resumen Del Valor Promedio De Los Módulos.....	52
Tabla 16. Valores Obtenidos De Los Módulos A Sus Diferentes Temperaturas Y Velocidades En La Máquina MTS-810.....	59
Tabla 17. Valores Obtenidos De Los Módulos A Sus Diferentes Temperaturas Y Velocidades En La Máquina MTS-810.....	59
Tabla 18. Valores Obtenidos De Los Módulos A Sus Diferentes Temperaturas Y Velocidades En La Máquina MTS-810.....	60
Tabla 19. Resumen De Los Valores Obtenidos Del Módulo En La Máquina MTS-810.....	60
Tabla 20. Valores Obtenidos De Los Módulos A La Temperaturas De 19°C Y Velocidades De Deformación En La Máquina MTA-1.....	63
Tabla 21. Resumen De Los Valores Obtenidos Del Módulo En La Máquina MTS-810 Y MTA-1.....	64
Tabla 22. Datos De Valores De Módulos A Diferentes Velocidades Para Análisis En Demo Minitab 16.....	68

Tabla 23. Resultados De Análisis En Demo Minitab 16 De La Velocidad 1mm/Min.	74
Tabla 24. Resultados De Análisis En Demo Minitab 16 De La Velocidad 1mm/Min.	75
Tabla 25. Resultados De Análisis En Demo Minitab 16 De La Velocidad 1mm/Min.	75
Tabla 26. Resultados De Análisis En Demo Minitab 16 De La Velocidad 1mm/Min.	76
Tabla 27. Tablas De Resumen De Análisis De Repetibilidad Y Reproducibilidad A Las Diferentes Velocidades.....	80
Tabla 28. Tabla Datos De Análisis Para Estudio De Métodos De Rangos Para La Velocidad 1mm/Min.	81
Tabla 29-A. Análisis De Módulos Por Método De Rangos A La Velocidad De 1mm/Min..	82
Tabla 30. Resumen De Análisis Estadístico De Promedios Y Rangos.	85

LISTA DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Esfuerzo Vs Deformación Unitaria T 7°C Serie 1.	42
Gráfica 2. Esfuerzo Vs Deformación Unitaria T 7°C Serie 2.	43
Gráfica 3. Esfuerzo Vs Deformación Unitaria T 7°C Serie 3.	44
Gráfica 4. Esfuerzo Vs Deformación Unitaria T 24°C Serie 1.	45
Gráfica 5. Esfuerzo Vs Deformación Unitaria T 24°C Serie 2.	46
Gráfica 6. Esfuerzo Vs Deformación Unitaria T 24°C Serie 3.	47
Gráfica 7. Esfuerzo Vs Deformación Unitaria T 35°C Serie 1.	48
Gráfica 8. Esfuerzo Vs Deformación Unitaria T 35°C Serie 2.	49
Gráfica 9. Esfuerzo Vs Deformación Unitaria T 35°C Serie 3.	50
Gráfica 10. Comportamiento Módulo Vs Temperatura.	53
Gráfica 11. Comportamiento Módulo Vs Velocidad	53
Gráfica 12. Curva De Ajuste Esfuerzo Vs Deformación	57
Gráfica 13. Variación Del Módulo Para Diferentes Repeticiones	58
Gráfica 14. Comportamiento Módulo Vs Velocidad Datos De MTS-810.	61
Gráfica 15. Comportamiento Módulo Vs Temperatura Datos De MTS-810.	61
Gráfica 16. 16-A Media De Los Valores Del Módulo Vs Velocidad, 16-B Media De Los Valores Del Módulo Vs Temperatura	65
Gráfica 17. 17-A media De Los Valores Del Módulo Vs Velocidad, 17-b Media De Los Valores Del Módulo Vs Temperatura	66
Gráfica 18. Componentes De Variación Minitab 16 Velocidad 1.	70
Gráfica 19. Gráfica Xbarra Tiempo De Ejecución Y R Por Tiempo De Ejecución.	71
Gráfica 20. Gráfica Módulo Vs Tiempo De Ejecución.	72
Gráfica 21. Módulo Vs Réplica	72
Gráfica 22. Gráfica Interacción Réplica Vs Tiempo De Ejecución.	73

GLOSARIO

Carga Monotónica: es un pulso de carga de crecimiento lineal aplicado a una velocidad de deformación o esfuerzo constante.

Gráfica Xbarra: Medias de subgrupos, X-barra; Rangos de subgrupos, R; Desviaciones estándar de subgrupos, S.

Gráfica Xbarra Por Tiempo De Ejecución: es la relación de la medias de subgrupos con respecto a los datos encontrados en los diferentes tiempos de ejecución.

La gráfica compara la variación parte a parte con el componente de repetibilidad.

La gráfica consta de:

- Los puntos graficados, que representan, para cada operador, la medición promedio de cada parte.
- La línea central, que es el promedio general para todas las mediciones de las partes realizadas por todos los operadores.
- Los límites de control (LCS y LCI), que se basan en el número de mediciones en cada promedio y en el estimado de repetibilidad.

Gráfica Interacción Entre Replicas: La gráfica de la interacción Replica por Tiempo de Ejecución muestra las mediciones promedio por cada operador para cada parte. Cada línea conecta los promedios de un operador.

Gráfica De Modulo Por Tiempo De Ejecución: La gráfica muestra todas las mediciones del estudio organizadas por cada tiempo de ejecución. Para cada tiempo de ejecución se tiene 5 mediciones, los puntos representan las mediciones, los círculos negros representan las medias, y una línea las une. Los asteriscos indican posibles valores atípicos.

Interacción Réplica a Réplica: Es la comparación de los resultados obtenidos entre las diferentes partes de una muestra que son consideradas réplicas al tener las mismas proporciones de diseño.

Maduración De La Probeta: Hace referencia a los cambios de rigidez producidos en el asfalto de las mezclas debido al envejecimiento del ligante por el paso del tiempo.

Mezclas Asfálticas: Una mezcla asfáltica en general es una combinación de asfalto y agregados minerales pétreos en proporciones exactas. Las proporciones relativas de estos minerales determinan las propiedades físicas de la mezcla y, eventualmente, el desempeño de la misma como mezcla terminada para un determinado uso.

Módulo De Rigidez Monotónico: Constantes de rigidez de un elemento que caracterizan su deformabilidad en función de su geometría y su material.

Interacción Entre Partes (parte a parte): la variabilidad en las mediciones entre partes diferentes.

Tiempo de ejecución: es el intervalo de tiempo que existe en la realización de la prueba a cada replica, realizada en las diferentes condiciones del estudio.

Repetibilidad: variación debido al dispositivo de medición, o la variación observada cuando el mismo operador mide la misma parte repetidamente con el mismo dispositivo.

Reproducibilidad: variación debido al sistema de medición, o la variación observada cuando diferentes operadores miden la misma parte utilizando el mismo dispositivo.

Replica: es una probeta en la cual se intento mantener las condiciones de construcción conservando las especificaciones de materiales de los diseños expuestos en el estudio.

Serie: es el número de ensayo que se le realiza a una probeta.

Tiempo De Ejecución: es el intervalo de tiempo que existe en la realización de la prueba a cada replica, realizada en las diferentes condiciones del estudio.

RESUMEN

TITULO

Validación de la repetibilidad y la reproducibilidad del ensayo bajo carga monotónica en mezclas asfálticas*.

AUTORES.

Juan Carlos Ruiz Carreño.
Robinson Montañés Gómez**.

PALABRAS CLAVES.

Repetibilidad, reproducibilidad, carga monotónica, mezclas asfálticas, media, desviación estándar.

RESUMEN.

Este proyecto se desarrolla como soporte a nuevos sistemas de caracterización de mezclas asfálticas, que tienen como objetivo definir las propiedades mecánicas de los materiales bituminosos. Para esto, se evalúa el sistema de medición implementado para determinar la repetibilidad y reproducibilidad de la metodología propuesta.

La metodología de ensayo a evaluar, consistió en someter los especímenes de concreto asfáltico a una carga a compresión axial controlando la velocidad de aplicación de la deformación. Las probetas antes de cada ensayo fueron acondicionadas a la temperatura correspondiente (7°C, 19°C y 35°C), y se aplicaron tres velocidades de deformación (1 mm/min, 7 mm/min, 15 mm/min).

La metodología implementada para determinar las características mecánicas de la mezcla asfáltica, debe asegurar que los datos obtenidos a través de ella, sean veraces y confiables. Para validar la repetibilidad y la reproducibilidad del ensayo bajo carga monotónica en mezclas asfálticas, se emplean varios métodos estadísticos que permiten determinar la calidad de los resultados. Uno de los métodos a emplear es el análisis de Anova y el de Rangos, con la finalidad de analizar las dispersiones que se obtienen en el ensayo y determinar si las desviaciones son acertadas o posibles, sospechosas o si estadísticamente se consideran aberrantes.

De acuerdo al análisis por el método estadístico de promedios y rangos realizado al diseño 15, diseño que tomamos de referencia, el comportamiento de los datos obtenidos para las diferentes réplicas (parte a parte) generan la mayor variación en el sistema de medición ratificando que las condiciones de fabricación y la variación generada por la maduración de las probetas no proporcionan las condiciones de reproducibilidad del sistema de medida, sin embargo para cada réplica (individualmente) se garantiza poca variación de los datos debido a la repetibilidad.

* Proyecto de Grado

** Facultad de Ciencias Físico Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Eduardo Alberto Castañeda Pinzó. Ingeniero Civil, M, Sc, Doctor.

ABSTRACT

TITLE

Validation of repeatability and reproducibility of the trial under monotonic charge in asphaltic mixtures*.

AUTHORES:

Juan Carlos Ruiz Carreño.
Robinson Montañés Gómez**.

KEY WORDS:

Repeatability, reproducibility, monotonic charge, asphaltic mixtures, media, standard deviation.

DESCRIPTION

This Project is developed as support of new systems of asphaltic mixtures characterization which have as objective to define the mechanical properties in bituminous materials. To do this, the measuring process is evaluated to determine the repeatability and reproducibility of the methodology proposed.

The trial methodology to test consisted in undergoing asphaltic concrete specimens to an axial compression charge controlling application speed of the deformation. The test-tubes were fitted-out to the corresponding temperature (7°C, 19°C and 35°C) before each trial. It was applied three deformation speeds (1 mm/min, 7 mm/min, 15 mm/min).

The methodology implemented to determine the mechanical characteristics of the asphaltic mixture must assure that data obtained through them is truthful and reliable. To validate repeatability and reproducibility of the trial under monotonic charge in asphaltic mixtures, it was used several statistics methods that let determine the results quality. One of the methods used is the Anova and Rangos Analysis, with the purpose of analyzing dispersions obtained in the trial, and determining if the deviations are corrects or possible, suspicious or if statistically are considered aberrant.

According to the analysis by statistical method of overage and ranges carried out in the design 15, design taken as a reference, data performance obtained for the different duplicates (part by part) generates a greater variation in the measuring system confirming that manufacturing conditions and variation generated by maturation of test-tubes do not provide the reproducibility conditions of the measuring system. However, for each duplicate (individually) is guaranteed a small variation of data obtained due to repeatability.

* Graduation Project

** Faculty of Physical Mechanical Sciences. School of Civil Engineering. Director: Eduardo Alberto Castañeda Pinzón. Civil Engineer M, Sc, Doctor.

INTRODUCCIÓN

Uno de los problemas que posee Colombia en tema de infraestructura vial, es el deterioro de las vías por la aparición de fallas en las capas asfálticas, debido tanto al tráfico como a los agentes climáticos a los cuales se ve expuesta la estructura.

Con el objetivo de evaluar el comportamiento de las mezclas asfálticas bajo diferentes niveles de carga, y de temperatura, la Escuela de Ingeniería Civil a través de proyectos de investigación ha desarrollado algunas propuestas en aras de definir metodologías que permitan caracterizar el comportamiento mecánico de las mezclas asfálticas utilizadas en Colombia.

Es necesario validar los resultados determinados a través de las metodologías propuestas para medir la rigidez y de los sistemas de medición empleados, los cuales deben ser apropiados para tener certeza sobre las variables medidas a partir de ellos.

Es vital el apoyo a estas investigaciones que promueven el desarrollo de metodologías alternas que caractericen el desempeño de las mezclas asfálticas colombianas, para proporcionar al ingeniero civil un mejor conocimiento y control del comportamiento de las estructuras asfálticas y de esta manera garantizar estructuras de pavimentos resistentes, confiables y durables que requieran menos inversión de mantenimiento, con altos índices de funcionalidad para los usuarios, siendo esto una medida muy positiva para los lugares donde se ubiquen estos proyectos.

1. OBJETIVO GENERAL

Determinar la repetibilidad y reproducibilidad del ensayo bajo carga monotónica en mezclas asfálticas.

1.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar los factores que influyen en la repetibilidad y reproducibilidad del ensayo bajo carga monotónica en mezclas asfálticas.
- Estimar la precisión y confiabilidad del ensayo bajo carga monotónica.
- Determinar la sensibilidad de la mezcla asfáltica a la temperatura y a la velocidad de deformación al aplicar una carga monotónica.
- Generar un protocolo para la ejecución del ensayo de carga monotónica en mezclas asfálticas.
- Generar una base de datos que den soporte a estudios posteriores.

2. MARCO TEÓRICO

El proceso de medición generalmente requiere de un instrumento como medio físico para determinar la magnitud de una variable, los instrumentos constituyen una extensión de las facultades humanas y en muchos casos permiten a las personas determinar el valor de una cantidad desconocida la cual no podría medirse utilizando solamente las facultades sensoriales.

El análisis estadístico de datos de mediciones es una práctica común ya que permite obtener una determinación analítica de la incertidumbre del resultado final. Las muestras de datos se obtienen mediante mediciones repetidas de una variable en condiciones de operación. Las condiciones de operación implican que las condiciones externas que controlan el proceso a partir del cual se obtiene el valor medido se mantienen en valores fijos mientras se realiza la prueba.

En la práctica de la ingeniería la habilidad para controlar las condiciones de operación en condiciones verdaderamente fijas puede ser imposible y el término de condiciones de operación fijas debe considerarse en un sentido nominal, es decir las condiciones del proceso se mantienen tanto como sea posible.

Cualquier tipo de proceso requiere un sistema de medición apropiado que permita medir la calidad de las características de los ensayos a realizar. Un sistema de medición está formado por el instrumento con el cual se mide y por las personas que lo utilizan. Tanto los operadores como el instrumento de medida producen dentro del sistema de medición dos tipos de variaciones: unas que se deben al azar y que son imposibles de eliminar y otras que se producen generalmente por descuido o accidente dentro del proceso y que pueden ser corregidas una vez que se detectan. El estudio de repetibilidad y reproducibilidad permite calcular la variabilidad de las medidas dentro de cualquier tipo de proceso y determinar si esta variación es aceptable o no.

Dentro de un sistema de medición la repetibilidad y reproducibilidad son conceptos centrales para el análisis de la variación de los datos, a continuación se describen los conceptos básicos y las metodologías usadas para realizar un estudio de repetibilidad y reproducibilidad (R&R).

Los estudios de R&R de las mediciones determinan qué porcentaje de la variación observada en el proceso se debe a la interacción entre las partes (réplicas), al equipo, al operador o a la interacción operador vs parte, ver Figura 1.

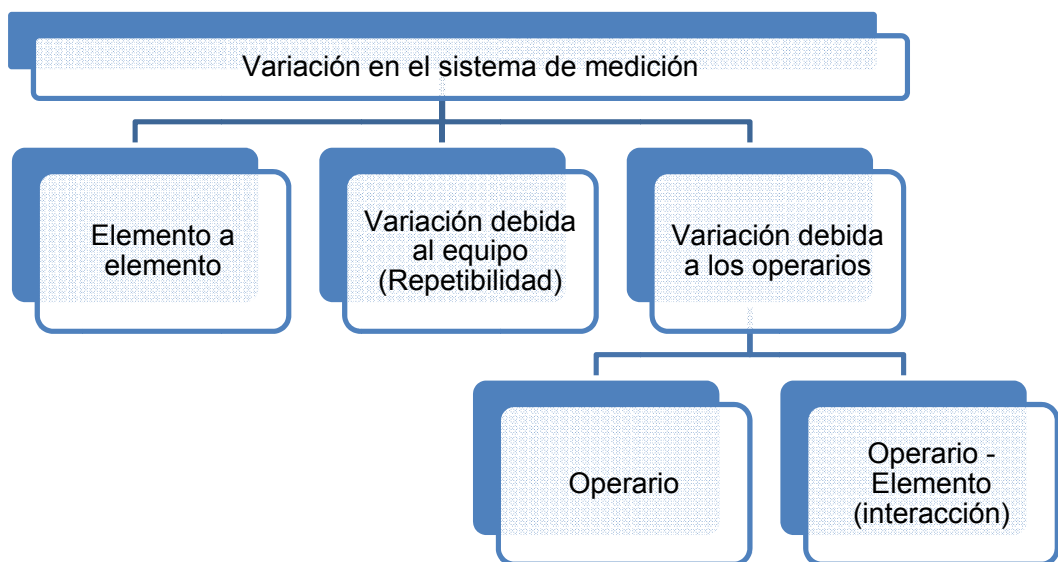


Figura 1. Variación En El Sistema De Medición (Demo-Minitab 16).

2.1 DEFINICIONES DE REPETIBILIDAD Y REPRODUCIBILIDAD

Los conceptos expuestos de repetibilidad, reproducibilidad junto al método de promedios y rangos fueron tomados de (Llamosa, Contreras y Botero 2007), estas definiciones están basadas en lo estipulado por la norma técnica NTC-ISO/IEC 17025.

2.1.1 Repetibilidad

Indica el grado de acuerdo entre resultados mutuamente independientes de un ensayo, obtenidos utilizando el mismo método, en idénticos materiales, en el mismo laboratorio, por el mismo operador, usando el mismo equipo y en un corto intervalo de tiempo. La repetibilidad puede ser expresada cuantitativamente en términos de la dispersión característica de los resultados.

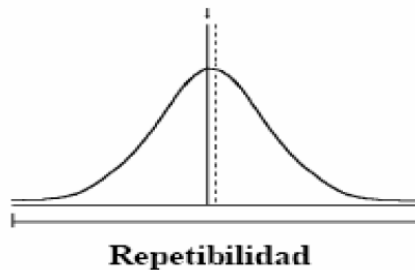


Figura 2.Representación Gráfica Del Concepto De Repetibilidad.

2.1.2 Reproducibilidad

Para la definición se tiene resultados mutuamente independientes de un ensayo obtenidos con el mismo método, en idénticos materiales, en diferentes laboratorios, con diferentes operadores y utilizando distintos equipos.

La reproducibilidad puede ser expresada cuantitativamente en términos de la dispersión característica de los resultados.

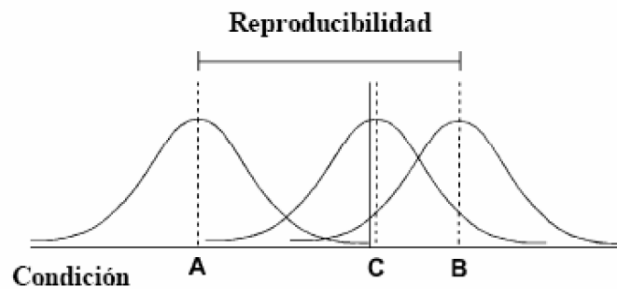


Figura 3.Representación Gráfica Del Concepto De Reproducibilidad.

Para que la expresión de reproducibilidad sea válida es necesario especificar las condiciones variables durante el ensayo, las cuales pueden ser:

- Principios de medición.
- Métodos de medición.
- Observador.
- Instrumento de medición.
- Ubicación.
- Condiciones de utilización.
- Tiempo.

Para validar la repetibilidad y la reproducibilidad del ensayo bajo carga monotónica en mezclas asfálticas, se emplean varios métodos estadísticos que garanticen la calidad de los resultados obtenidos a través del sistema de medición propuesto. Uno de los métodos a emplear consiste en establecer promedios y rangos con la finalidad de analizar las dispersiones que se obtienen en el ensayo y determinar si las desviaciones son acertadas o posibles, sospechosas o si estadísticamente se consideran aberrantes. También se aplica el método ANOVA (análisis de varianza) el cual permite conocer la repetibilidad y reproducibilidad de las medidas, además de la interacción entre el equipo el operador.

2.3 PROCEDIMIENTO PARA REALIZAR EL ESTUDIO DE REPETIBILIDAD Y REPRODUCIBILIDAD (R&R)

Cuando se utiliza un sistema de medición para cuantificar la capacidad de un proceso, se obtiene información donde están mezcladas la variabilidad del proceso, la repetibilidad y la reproducibilidad del sistema de medición. Para separar estas variabilidades se diseñan y aplican experimentos en donde la variabilidad introducida en el proceso de medición puede llegar a ser identificada en las diferentes partes que componen un estudio de R&R.

2.3.1 Método De Los Rangos

Este método permite descomponer la variabilidad del sistema en dos componentes independientes: la repetibilidad y la reproducibilidad. Para realizar el análisis por este método se deben seguir los siguientes pasos:

1. Se determinan los equipos que se desean utilizar, el número de operadores y el número de ensayos que debe efectuar cada uno de ellos.
2. Cada operador realiza los ensayos correspondientes en cada equipo y consigna los resultados correspondientes en el formato respectivo para su posterior estudio.
3. Los operadores repiten las mediciones, pero esta vez en diferente orden y sin observar las mediciones realizadas anteriormente por sus compañeros.
4. Con los datos del formato se procede a calcular el rango de cada parte del equipo por medio de la ecuación (1).

$$R = X_{\text{máx}} - X_{\text{min}} \quad (1)$$

5. Se calcula el rango promedio de cada operador utilizando la ecuación (2).

$$\bar{R} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_i \quad (2)$$

6. Se calcula el rango promedio de todos los rangos por medio de la ecuación (3).

$$\bar{\bar{R}} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \bar{R}_i \quad (3)$$

Donde:

m: es el número de operadores y $\overline{R_i}$ es el rango promedio de cada operador

7. Se calcula el porcentaje de la repetibilidad de las mediciones utilizando la ecuación (4).

$$\% \text{Repetibilidad} = \frac{K_1 * \overline{R}}{T} * 100\% \quad (4)$$

Donde:

K_1 : es una constante que depende del número de mediciones realizadas por cada operador y proporciona un intervalo de confianza del 99% para estas características.

\overline{R} : es el rango promedio de todos los rangos.

T : es la tolerancia de la característica medida, en este caso del equipo ensayado.

Nota: los valores de K_1 se encuentran en la tabla 1.

8. Se calcula la medición promedio de cada operador utilizando la ecuación (5).

$$\overline{X}_i = \frac{1}{nr} \sum_{i=1}^n X_i \quad (5)$$

Donde:

n: es el número de ensayos por operador, r es el número de partes y x_i es cada una de las medidas del operador.

9. Se calcula la diferencia entre el promedio mayor y el promedio menor de los operadores por medio de la ecuación (6).

$$\overline{X}_D = X_{i\text{máx}} - X_{i\text{min}} \quad (6)$$

10. Se calcula el porcentaje de la reproducibilidad por medio de la ecuación

$$\% \text{Reproducibilidad} = \frac{\sqrt{(K_2 \cdot \bar{X}_D)^2 - \frac{(K_1 \bar{R})^2}{nr}}}{T} * 100\% \quad (7)$$

Donde:

K_2 : es una constante que depende del número de operadores y proporciona un intervalo de confianza del 99% para estas características.

\bar{X}_D : es la diferencia entre el promedio mayor y el promedio menor de los operadores.

n: es el número de ensayos por operador.

r: es el número de partes medidas.

T: es la tolerancia de la característica medida, en este caso del equipo ensayado.

Notas: los valores de K_2 se encuentran en la Tabla 1 y si el valor dentro de la raíz es un número negativo, el valor de la reproducibilidad se considera como cero.

Número de ensayos	2	3	4	5
K1	4,56	3,05	2,50	2,21
Número de operadores	2	3	4	5
K2	3,65	2,70	2,30	2,08

Tabla 1. Valores De Las Constantes K_1 Y K_2 .

11. Se calcula el porcentaje de la relación entre la repetibilidad y la reproducibilidad mediante la ecuación

$$\%R\&R = \sqrt{(\% \text{Repetibilidad})^2 + (\% \text{Reproducibilidad})^2} \quad (8)$$

12. Se interpretan los resultados obtenidos por medio de los siguientes criterios:

- Si $\%R\&R < 10\%$ el sistema de medición es aceptable.
- Si $10\% \leq \%R\&R < 30\%$ el sistema de medición puede ser aceptable según su uso, aplicación, costo del instrumento de medición, costo de reparación.
- Si $\%R\&R > 30\%$ el sistema de medición es considerado como no aceptable y requiere de mejoras en cuanto al operador, equipo, método, condiciones, etc.

Después de analizar la información que resulta del estudio de repetibilidad y reproducibilidad, es posible evaluar las causas que originan la variación del sistema o del instrumento:

- Si la repetibilidad es mayor a la reproducibilidad las posibles causas son: el instrumento necesita mantenimiento, el equipo requiere ser diseñado para ser más rígido, el montaje o ubicación donde se efectúan las mediciones necesita ser mejorado y/o existe una variabilidad excesiva entre las partes.
- Si la reproducibilidad es mayor a la repetibilidad, las causas pueden ser: el operador necesita mejor entrenamiento en cómo utilizar y como leer el instrumento, la indicación del instrumento no es clara. No se han mantenido condiciones de reproducibilidad (ambientales, montajes, ruidos, etc.) y/o el instrumento de medición presenta deriva.

2.3.2 Método de Análisis de Varianza (ANOVA)

Los conceptos expuestos para el método de Anova fueron tomados de (Botero, Arbeláez y Mendoza 2007).

El método Anova, conocido también como análisis de varianza es el método más exacto para calcular la variabilidad de un sistema de medición porque posee la

ventaja de cuantificar la variación debida a la interacción entre los operadores y las partes. Este método está basado en la misma técnica estadística utilizada para analizar los efectos de los diferentes factores en el diseño de experimentos.

Para un sistema de medición, el método Anova debe realizarse para estudiar Simultáneamente los efectos de dos fuentes de variación: Operadores y Partes.

Fuente de variación	Suma cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios
Operador	SSA	$a - 1$	$MSA = \frac{SSA}{a - 1}$
Partes	SSB	$b - 1$	$MSB = \frac{SSB}{b - 1}$
Interacción	$SSAB$	$(a - 1)(b - 1)$	$MSAB = \frac{SSAB}{(a - 1)(b - 1)}$
Error	SSE	$ab(n - 1)$	$MSE = \frac{SSE}{ab(n - 1)}$
Total	SST	$N - 1$	

Tabla 2. Anova para un sistema de medición con dos factores.

Donde: a es el número de operadores

B: es el número de partes

n es el número de medidas para cada parte por cada operador

N es el número total de datos

- Los pasos que se deben seguir para realizar la tabla del Anova de dos factores son:

1. Se calcula la suma total de todos los datos, como lo muestra la ecuación (1).

$$T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n X_{ijk} \quad (1)$$

Donde X_{ijk} son cada uno de los datos del experimento.

2. Se calcula la suma del cuadrado de todos los datos por medio de la ecuación (2).

$$T_x^2 = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n X_{ijk}^2 \quad (2)$$

Donde X_{ijk} son cada uno de los datos del experimento.

3. Se calcula la suma de los cuadrados totales de las combinaciones de factores dividido por el tamaño de la muestra respectivo como lo muestra la ecuación (3).

$$T_c^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b T_{ij}^2 \quad (3)$$

Donde T_{ij} es la suma de los datos de cada por cada operador.

4. Se calcula la suma de los totales para el factor 1 (Operadores) y se divide por su espacio muestral respectivo por medio de la ecuación (4).

$$T_1^2 = \frac{1}{bn} \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n T_{jk}^2 \quad (4)$$

Donde T_{jk} es la suma de los datos de cada operador.

5. Se calcula la suma de los totales para el factor 2 (Partes) y se divide por su tamaño muestral respectivo por medio de la ecuación (5).

$$T_2^2 = \frac{1}{an} \sum_{i=1}^a \sum_{k=1}^n T_{ik}^2 \quad (5)$$

Donde T_{ik} es la suma de los datos para cada parte.

6. Se calculan las sumas de los cuadrados necesarias por medio de las ecuaciones (6), (7), (8), (9) y (10).

$$SSA = T_1^2 - \frac{T^2}{N} \quad (6)$$

$$SSB = T_2^2 - \frac{T^2}{N} \quad (7)$$

$$SSAB = T_c^2 + \frac{T^2}{N} - T_1^2 - T_2^2 \quad (8)$$

$$SSE = T_x^2 - T_c^2 \quad (9)$$

$$SST = T_x^2 - \frac{T^2}{N} \quad (10)$$

- Después de obtener la Tabla del Anova, se procede a calcular la variación del sistema de medida, siguiendo los siguientes pasos:

- 1 La repetibilidad del sistema de medida está dada por la ecuación (11).

$$r = 5,15\sqrt{\text{MSE}} \quad (11)$$

2 El porcentaje de repetibilidad se calcula por medio de la ecuación (12).

$$\%r = \frac{r}{T} * 100\% \quad (12)$$

donde T es la tolerancia de la característica medida.

3 La reproducibilidad del sistema de medida está dada por la ecuación (13).

$$R = 5,15 \sqrt{\frac{\text{MSA} - \text{MSAB}}{bn}} \quad (13)$$

Nota: Si en algún caso el término de la raíz es un número negativo, entonces la reproducibilidad es cero.

4 El porcentaje de reproducibilidad se calcula por medio de la ecuación (14).

$$\%R = \frac{R}{T} * 100\% \quad (14)$$

donde T es la tolerancia de la característica medida

5 La interacción entre los operadores y las partes se calcula por medio de la ecuación (15).

$$I = 5,15 \sqrt{\frac{\text{MSAB} - \text{MSE}}{n}} \quad (15)$$

Nota: Si en algún caso el término de la raíz es un número negativo, la interacción entre operadores y partes es cero.

6 El porcentaje de la interacción entre los operadores y las partes se calcula por medio de la ecuación (16).

$$\%I = \frac{I}{T} * 100\% \quad (16)$$

donde T es la tolerancia de la característica medida.

7 La relación entre la repetibilidad y la reproducibilidad está dada por la ecuación (17).

$$r\&R = \sqrt{(r)^2 + (R)^2 + (I)^2} \quad (17)$$

8 El porcentaje de la relación entre la repetibilidad y la reproducibilidad está dada por la ecuación (18).

$$\%r\&R = \sqrt{(\%r)^2 + (\%R)^2 + (\%I)^2} \quad (18)$$

9 Se interpretan los resultados aplicando los criterios enunciados el método de promedios y rangos ítem 12 del numeral 2.3.1.

2.4. PROPIEDADES DEL MATERIAL OBJETO DE ESTUDIO

A través del procedimiento de laboratorio propuesto, se desea determinar el módulo de rigidez de la mezcla asfáltica. El módulo de rigidez, se define como la relación que existe entre el esfuerzo y la deformación unitaria, y es una propiedad

fundamental de los materiales ya que ofrece información sobre cuanto se puede deformar el material bajo la acción de una carga dada. Además, éste parámetro puede llegar a relacionarse con la rotura por fatiga, la deformación permanente y la forma en que se distribuyen los esfuerzos en la estructura del pavimento. Para la mezcla bituminosa, el módulo de rigidez (E) depende tanto de la temperatura del material como de la velocidad a la cual se le aplica la carga.

Este tipo de comportamiento se refleja claramente en la dependencia del valor del módulo cuando se aplica una carga a alta velocidad de deformación (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 la aplicación de una sollicitación lenta (simulando el paso de un vehículo a velocidades bajas o estacionado), en este caso la deformación obtenida es mayor y por lo tanto el valor del módulo menor. Ésta particularidad se presenta debido a que el comportamiento del componente viscoso de una mezcla (el asfalto) depende de la duración del período de carga.

3. METODOLOGÍA

3.1 MATERIALES USADOS EN EL ENSAYO BAJO CARGA MONOTÓNICA

Se utilizaron probetas de concreto asfáltico, que fueron fabricadas en proyectos de investigación anteriores (Dávila y Álvarez, 2010)(Barajas y Pineda, 2010)(Camacho y Contreras, 2010), cada probeta posee una forma cilíndrica de diámetro de 4" (10.16 cm), y altura aproximada de 5" (12.7 cm). A continuación se describe el procedimiento utilizado para determinar la rigidez de la mezcla asfáltica con la aplicación de una carga monotónica.

3.2 METODOLOGÍA DE ENSAYO BAJO CARGA MONOTÓNICA

Para aplicar la carga monotónica sobre el espécimen asfáltico, inicialmente se planteó utilizar un marco de carga de operación manual y determinar la rigidez del material. Debido a la incertidumbre de los resultados obtenidos con este equipo de laboratorio, se implementó para el ensayo aplicar la carga mediante el marco automatizado de la MTS, y de esta forma, definir por métodos estadísticos la reproducibilidad y repetibilidad del procedimiento.

3.2.1 Metodología Utilizando El Marco De Carga De Operación Manual

Durante el ensayo las probetas fueron sometidas a una carga a compresión axial controlando manualmente la velocidad de aplicación de la deformación. Las probetas antes de cada ensayo fueron acondicionadas a la temperatura correspondiente (7°C, 24°C y 35°C), y se manejaron tres velocidades de deformación (1.27mm/min, 15.2mm/min, 50.8mm/min).

Las probetas se acondicionaron a la temperatura correspondiente antes del ensayo. Este acondicionamiento de las probetas tuvo una duración de tres horas para que todas las partículas adquirieran la temperatura requerida. Los ensayos se iniciaron con la temperatura de 7°C, hasta finalizar con la temperatura de 35°C, y así, evitar que el material acumulara deformación durante el proceso de carga a las diferentes combinaciones de temperatura y velocidad de deformación.



Fotografía 1. Marco De carga De Operación Manual.

3.2.1.1 Acondicionamiento De La Temperatura De Ensayo

El acondicionamiento de la temperatura de las probetas para realizar el ensayo fue el siguiente:

- Para controlar la temperatura de 7°C las probetas fueron sumergidas en un recipiente con agua y se mantuvo la temperatura mediante la adición de hielo.
- Para la temperatura de 24°C, las probetas fueron sumergidas en un recipiente con agua.

- En cuanto a la temperatura de 35°C, primero las probetas se acondicionaron en un horno, y durante la ejecución del ensayo se introdujeron en un recipiente metálico y se colocó sobre una cocineta eléctrica que ayudaba a mantener la temperatura. Para evitar un recalentamiento en la parte inferior de las probetas, se le acondicionó un soporte de madera para que no recibiera el calor directamente.

Las probetas fueron ensayadas en grupos de tres probetas, las cuales contaban con parámetros de diseño idénticos (réplicas). Además, la duración del ensayo no superó los dos minutos para evitar que la probeta perdiera la temperatura de ensayo.



Fotografía 2. Acondicionamiento De Las Probetas.

3.2.1.2 Registro De Los Datos De La Prueba

El marco de carga de operación manual utilizado para realizar el ensayo tiene dos dispositivos de medición. Cuenta con un anillo de carga, el cual registra las lecturas de carga que son aplicadas sobre el espécimen ensayado. Para controlar la velocidad de deformación se utilizó un deformímetro que registraba la deformación que se producía en la probeta.

- En el dispositivo que mide la carga, cada línea medida indica que la probeta está soportando un esfuerzo de 5.56 KPa. En la probeta se alcanzó a aplicar aproximadamente un esfuerzo máximo de 277,94 KPa.
- En el dispositivo que mide la deformación, cada línea medida indica que la probeta se está deformando 0.0254 mm. La deformación se controló de manera que no sobrepasara 1 mm de deformación.

El tiempo de ejecución del ensayo estaba comprendido en un intervalo de tiempo de 5 a 60 segundos para las velocidades de deformación correspondientes.

Para lograr visualizar los datos de carga y deformación, se necesitó de una cámara de video y por medio de un programa se extrajeron los datos. Para el registro de los datos se recomienda el uso de un solo dispositivo de captura, de tal forma que se puedan ver en un mismo instante de tiempo las lecturas de carga y deformación (ver Fotografía 1).

3.2.1.3 Análisis De Datos

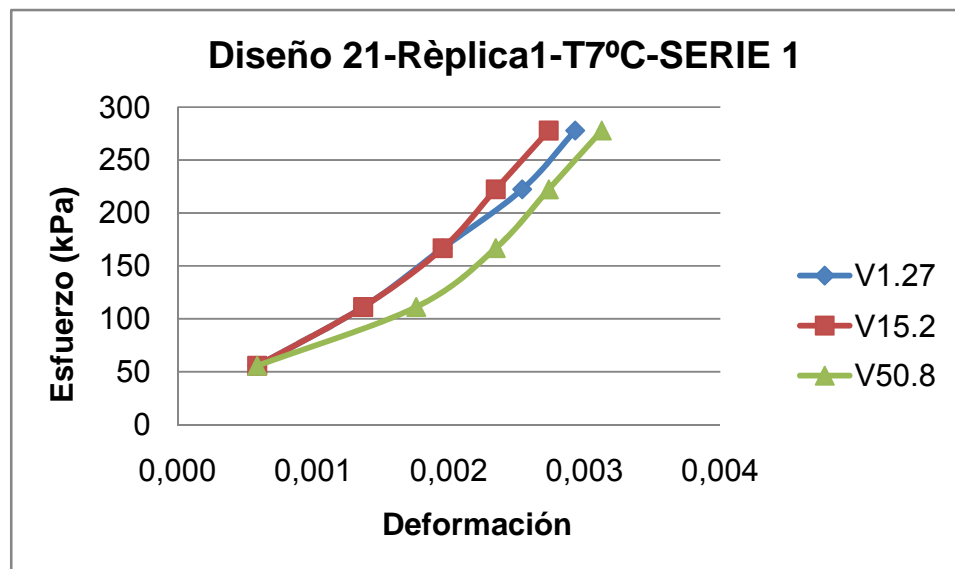
Para hacer el análisis y tener una referencia para comparar, se hicieron tres series por cada probeta a las diferentes combinaciones de temperatura y velocidad de deformación. Para el diseño de mezcla 21-1, las siguientes tablas muestran la deformación obtenida para los diferentes niveles de esfuerzo (50, 110, 170, 235 y 277 KPa) según la velocidad de deformación aplicada.

- Datos medidos para las diferentes repeticiones (3 series) a la temperatura de 7°C.

Serie 1:

"Diseño 21-Rèplica1"					
Velocidad de Deformación (mm/min)					
1.27		15.2		50.8	
Deformación (mm)	Deformación unitaria (mm/mm)	Deformación (mm)	Deformación unitaria (mm/mm)	Deformación (mm)	Deformación unitaria (mm/mm)
0.0762	0.000586	0.5334	0.000586	0.9906	0.000586
0.1778	0.001368	0.635	0.001368	1.143	0.001758
0.254	0.001954	0.7112	0.001954	1.2192	0.002345
0.3302	0.002540	0.762	0.002345	1.27	0.002735
0.381	0.002931	0.8128	0.002735	1.3208	0.003126

Tabla 3. Valores De Deformación A Temperatura 7°C - Serie 1.

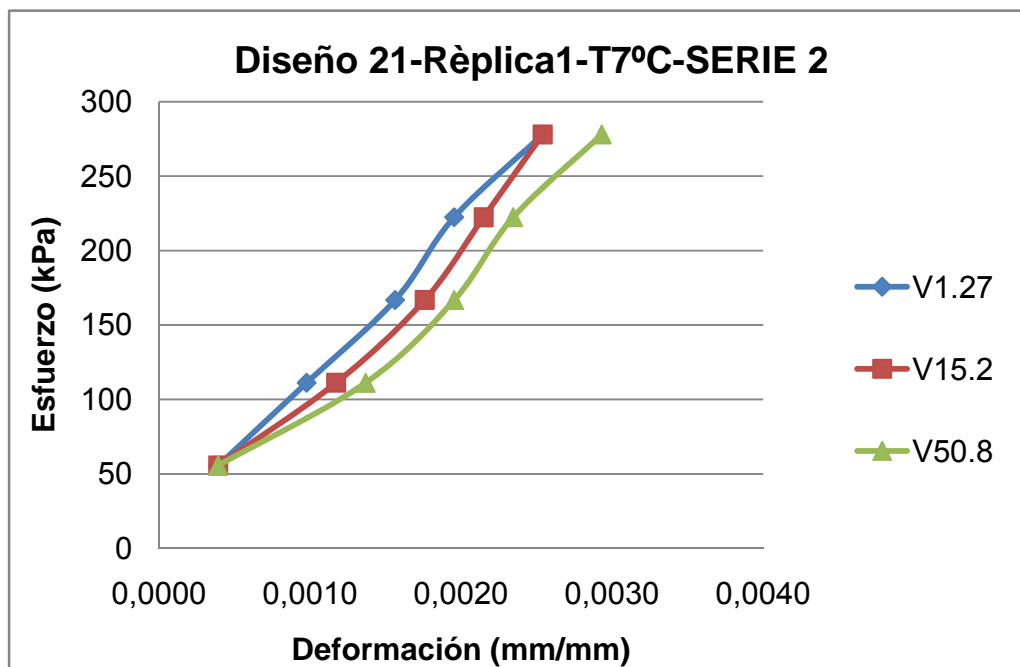


Gráfica 1. Esfuerzo Vs Deformación Unitaria T 7°C - Serie 1.

Serie 2:

"Diseño 21-Rèplica1"					
Velocidad de Deformación (mm/min)					
1.27		15.2		50.8	
Deformación (mm)	Deformación unitaria (mm/mm)	Deformación (mm)	Deformación unitaria (mm/mm)	Deformación (mm)	Deformación unitaria (mm/mm)
0.0508	0.000391	0.5334	0.000391	0.8128	0.000391
0.127	0.000977	0.635	0.001172	0.9398	0.001368
0.2032	0.001563	0.7112	0.001758	1.016	0.001954
0.254	0.001954	0.762	0.002149	1.0668	0.002345
0.3302	0.002540	0.8128	0.002540	1.143	0.002931

Tabla 4. Valores De Deformación A Temperatura 7°C - Serie 2.

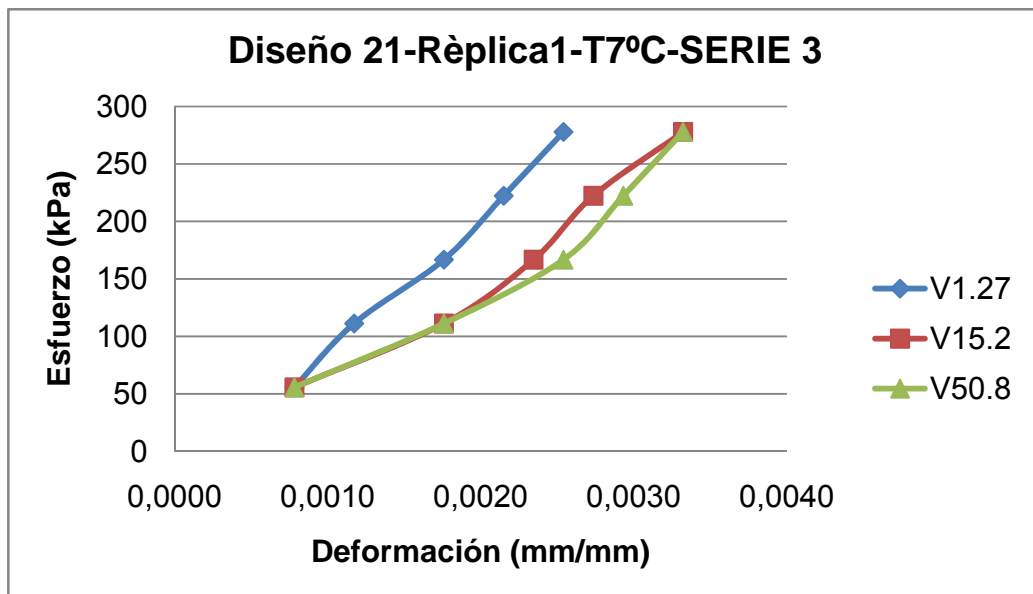


Gráfica 2. Esfuerzo Vs Deformación Unitaria T 7°C - Serie 2.

Serie 3:

"Diseño 21-Rèplica1"					
Velocidad de Deformación (mm/min)					
1.27		15.2		50.8	
Deformación (mm)	Deformación unitaria (mm/mm)	Deformación (mm)	Deformación unitaria (mm/mm)	Deformación (mm)	Deformación unitaria (mm/mm)
0.1016	0.000782	0.6858	0.000782	0.7366	0.000782
0.1524	0.001172	0.8128	0.001758	0.8636	0.001758
0.2286	0.001758	0.889	0.002345	0.9652	0.002540
0.2794	0.002149	0.9398	0.002735	1.016	0.002931
0.3302	0.002540	1.016	0.003322	1.0668	0.003322

Tabla 5. Valores De Deformación A Temperatura 7°C - Serie 3.



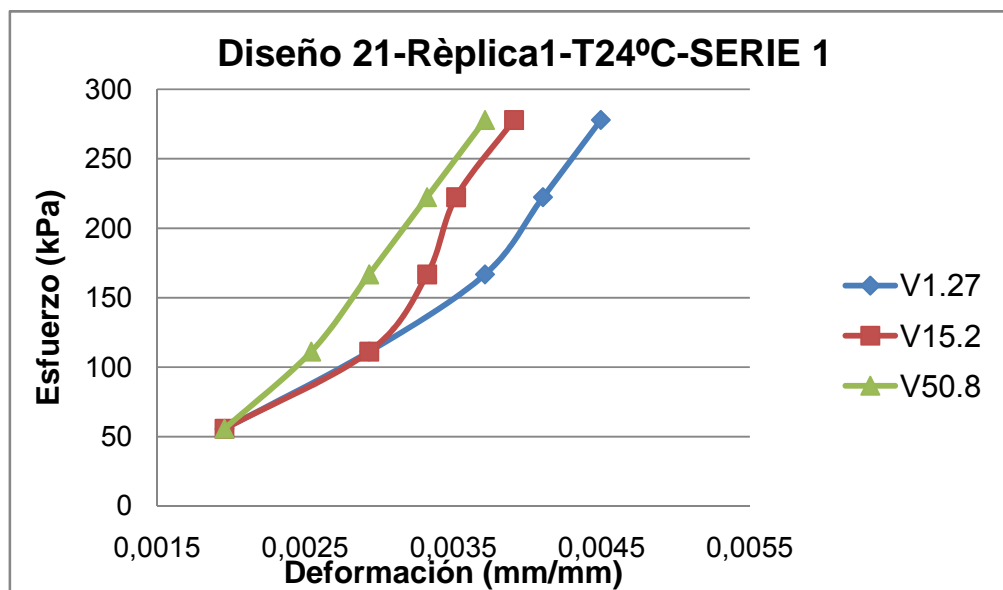
Gráfica 3. Esfuerzo Vs Deformación Unitaria T 7°C - Serie 3.

- Datos medidos para las diferentes repeticiones (3 series) a la temperatura de 24°C.

Serie 1:

"Diseño 21-Rèplica1"					
Velocidad de Deformación (mm/min)					
1.27		15.2		50.8	
Deformación (mm)	Deformación unitaria (mm/mm)	Deformación (mm)	Deformación unitaria (mm/mm)	Deformación (mm)	Deformación unitaria (mm/mm)
0.254	0.001954	0.254	0.001954	0.127	0.001954
0.381	0.002931	0.381	0.002931	0.2032	0.002540
0.4826	0.003712	0.4318	0.003322	0.254	0.002931
0.5334	0.004103	0.4572	0.003517	0.3048	0.003322
0.5842	0.004494	0.508	0.003908	0.3556	0.003712

Tabla 6. Valores De Deformación A Temperatura 24°C- Serie 1.

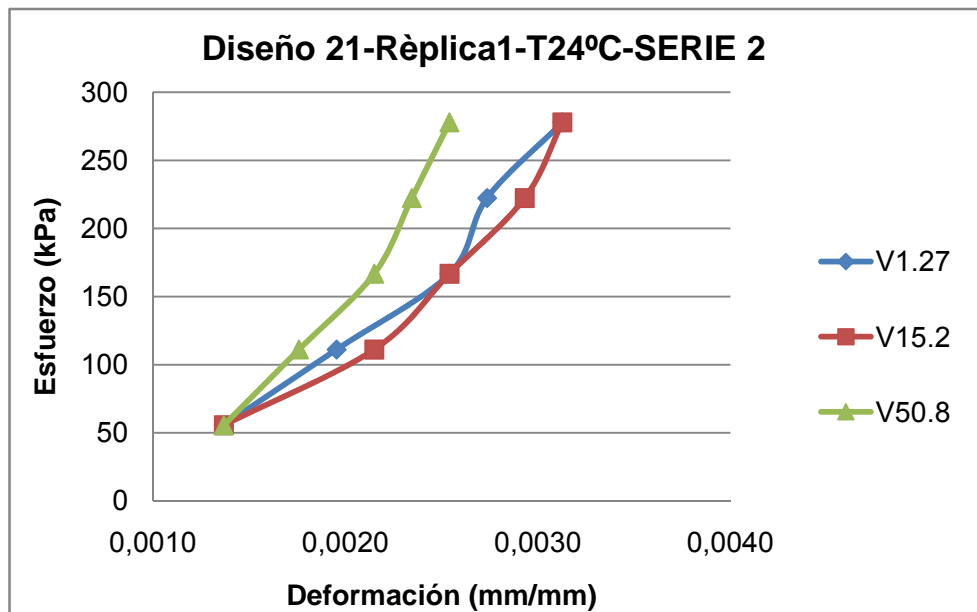


Gráfica 4. Esfuerzo Vs Deformación Unitaria T 24°C- Serie 1.

Serie 2:

"Diseño 21-Rèplica1"					
Velocidad de Deformación (mm/min)					
1.27		15.2		50.8	
Deformación (mm)	Deformación unitaria (mm/mm)	Deformación (mm)	Deformación unitaria (mm/mm)	Deformación (mm)	Deformación unitaria (mm/mm)
0.1778	0.001368	0.127	0.001368	0.1524	0.001368
0.254	0.001954	0.2286	0.002149	0.2032	0.001758
0.3302	0.002540	0.2794	0.002540	0.254	0.002149
0.3556	0.002735	0.3302	0.002931	0.2794	0.002345
0.4064	0.003126	0.3556	0.003126	0.3048	0.002540

Tabla 7. Valores De Deformación A Temperatura 24°C - Serie 2.

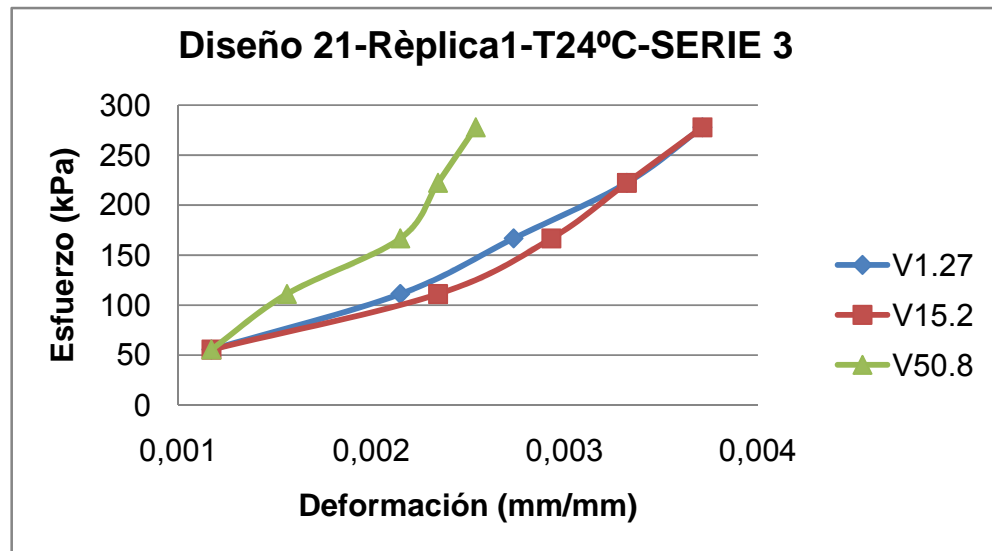


Gráfica 5. Esfuerzo Vs Deformación Unitaria T 24°C- Serie 2.

Serie 3:

"Diseño 21-Rèplica1"					
Velocidad de Deformación (mm/min)					
1.27		15.2		50.8	
Deformación (mm)	Deformación unitaria (mm/mm)	Deformación (mm)	Deformación unitaria (mm/mm)	Deformación (mm)	Deformación unitaria (mm/mm)
0.1524	0.001172	0.2794	0.001172	0.1778	0.001172
0.2794	0.002149	0.4318	0.002345	0.2286	0.001563
0.3556	0.002735	0.508	0.002931	0.3048	0.002149
0.4318	0.003322	0.5588	0.003322	0.3302	0.002345
0.4826	0.003712	0.6096	0.003712	0.3556	0.002540

Tabla 8. Valores De Deformación A Temperatura 24°C- Serie 3.



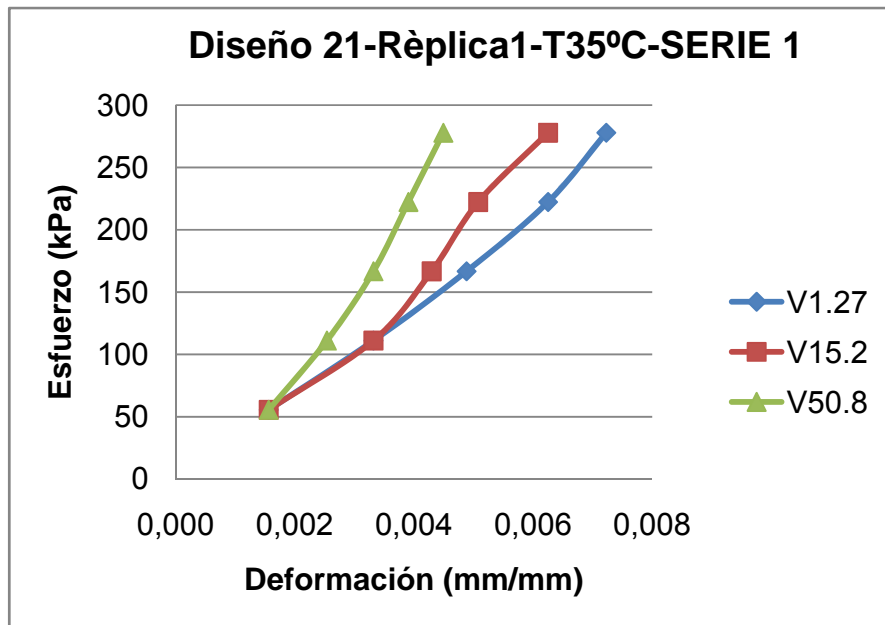
Gráfica 6. Esfuerzo Vs Deformación Unitaria T 24°C- Serie 3.

- Datos medidos para las diferentes repeticiones (3 series) a la temperatura de 35°C.

Serie 1:

"Diseño 21-Rèplica1"					
Velocidad de Deformación (mm/min)					
1.27		15.2		50.8	
Deformación (mm)	Deformación unitaria (mm/mm)	Deformación (mm)	Deformación unitaria (mm/mm)	Deformación (mm)	Deformación unitaria (mm/mm)
0.2032	0.001563	0.2286	0.001563	0.2032	0.001563
0.4318	0.003322	0.4572	0.003322	0.3302	0.002540
0.635	0.004885	0.5842	0.004298	0.4318	0.003322
0.8128	0.006252	0.6858	0.005080	0.508	0.003908
0.9398	0.007229	0.8382	0.006252	0.5842	0.004494

Tabla 9. Valores De Deformación A Temperatura 35°C- Serie 1.

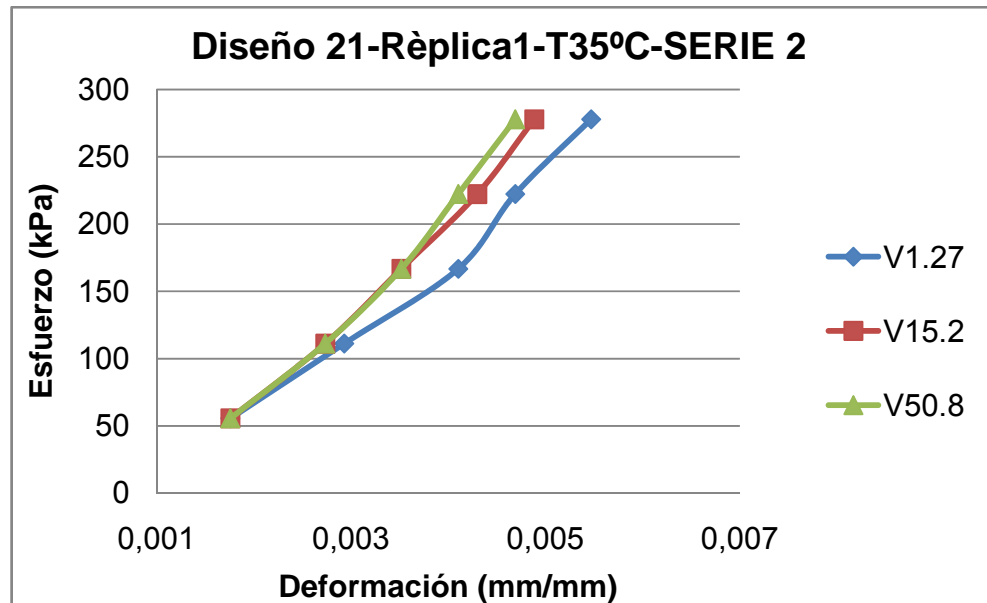


Gráfica 7. Esfuerzo Vs Deformación Unitaria T 35°C- Serie 1.

Serie 2:

"Diseño 21-Rèplica1"					
Velocidad de Deformación (mm/min)					
1.27		15.2		50.8	
Deformación (mm)	Deformación unitaria (mm/mm)	Deformación (mm)	Deformación unitaria (mm/mm)	Deformación (mm)	Deformación unitaria (mm/mm)
0.2286	0.001758	0.1778	0.001758	0.254	0.001758
0.381	0.002931	0.3048	0.002735	0.381	0.002735
0.5334	0.004103	0.4064	0.003517	0.4826	0.003517
0.6096	0.004689	0.508	0.004298	0.5588	0.004103
0.7112	0.005471	0.5842	0.004885	0.635	0.004689

Tabla 10. Valores De Deformación A Temperatura 35°C - Serie 2.

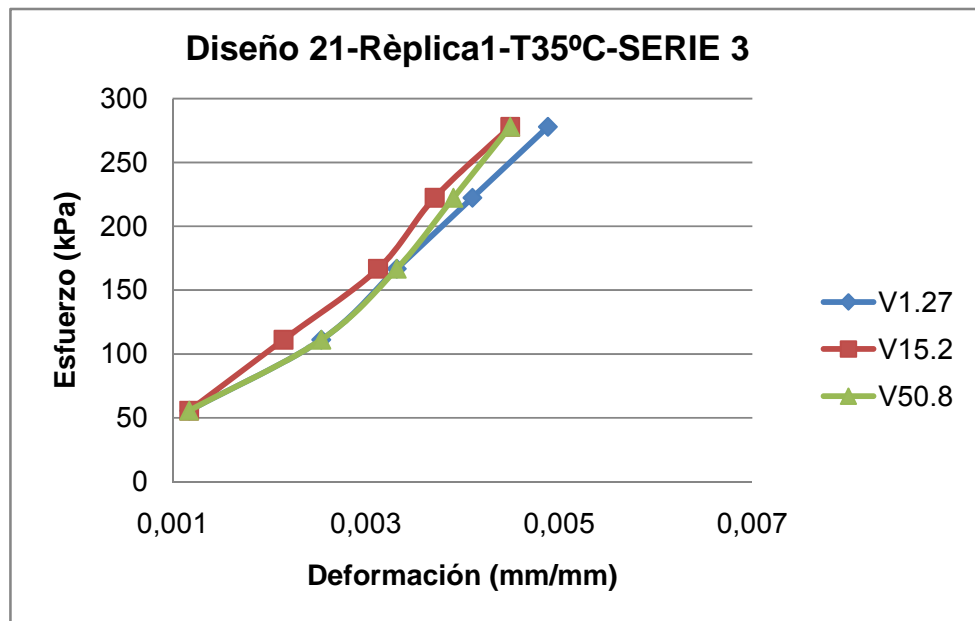


Gráfica 8. Esfuerzo Vs Deformación Unitaria T 35°C - Serie 2.

Serie 3:

"Diseño 21-Rèplica1"					
Velocidad de Deformación (mm/min)					
1.27		15.2		50.8	
Deformación (mm)	Deformación unitaria (mm/mm)	Deformación (mm)	Deformación unitaria (mm/mm)	Deformación (mm)	Deformación unitaria (mm/mm)
0.1524	0.001172	0.3556	0.001172	0.254	0.001172
0.3302	0.002540	0.4826	0.002149	0.4318	0.002540
0.4318	0.003322	0.6096	0.003126	0.5334	0.003322
0.5334	0.004103	0.6858	0.003712	0.6096	0.003908
0.635	0.004885	0.7874	0.004494	0.6858	0.004494

Tabla 11. Valores De Deformación A Temperatura 35°C- Serie 3.



Gráfica 9. Esfuerzo Vs Deformación Unitaria T 35°C- Serie 3.

3.2.1.4 Módulos de Rigidez

A partir de la curva Esfuerzo vs Deformación se determinó el módulo de rigidez monotónico. Las tablas 12, 13 y 14 muestran los módulos del diseño 21-1 para cada una de las repeticiones, realizadas a las diferentes temperaturas y velocidades de deformación.

- Módulos a temperatura 7°C:

Repetición	Probeta	Temperatura(°C)	Velocidad(mm/min)	Módulo(kPa)	Módulo(Mpa)
1	"21-1	7	1.27	93600	93.6
	"21-1	7	15.2	102700	102.7
	"21-1	7	50.8	85800	85.8
2	"21-1	7	1.27	104900	104.9
	"21-1	7	15.2	102700	102.7
	"21-1	7	50.8	89300	89.3
3	"21-1	7	1.27	123000	123
	"21-1	7	15.2	89300	89.3
	"21-1	7	50.8	84900	84.9
PROMEDIO	"21-1	7	1.27	107166.7	107.167
	"21-1	7	15.2	98233.3	98.233
	"21-1	7	50.8	86666.7	86.667

Tabla 12. Resumen De Valores De Módulos A Temperatura 7°C.

Módulos a temperatura 24°C:

Repetición	Probeta	Temperatura(°C)	Velocidad(mm/min)	Módulo (kPa)	Módulo (Mpa)
1	"21-1	24	1.27	84900	84.9
	"21-1	24	15.2	112800	112.8
	"21-1	24	50.8	128300	128.3
2	"21-1	24	1.27	125200	125.2
	"21-1	24	15.2	122200	122.2
	"21-1	24	50.8	183900	183.9
3	"21-1	24	1.27	86500	86.5
	"21-1	24	15.2	85800	85.8
	"21-1	24	50.8	150600	150.6
PROMEDIO	"21-1	24	1.27	98866.7	98.867
	"21-1	24	15.2	106933.3	106.933
	"21-1	24	50.8	154266.7	154.267

Tabla 13. Resumen De Valores De Módulos A Temperatura 35°C.

- Módulos a temperatura 35°C:

Repetición	Probeta	Temperatura(°C)	Velocidad(mm/min)	Módulo (kPa)	Módulo (Mpa)
1	"21-1	35	1.27	38500	38.5
	"21-1	35	15.2	48800	48.8
	"21-1	35	50.8	75800	75.8
2	"21-1	35	1.27	59400	59.4
	"21-1	35	15.2	70600	70.6
	"21-1	35	50.8	75800	75.8
3	"21-1	35	1.27	60800	60.8
	"21-1	35	15.2	67100	67.1
	"21-1	35	50.8	66700	66.7
PROMEDIO	"21-1	35	1.27	52900	52.900
	"21-1	35	15.2	62166.7	62.167
	"21-1	35	50.8	72766.7	72.767

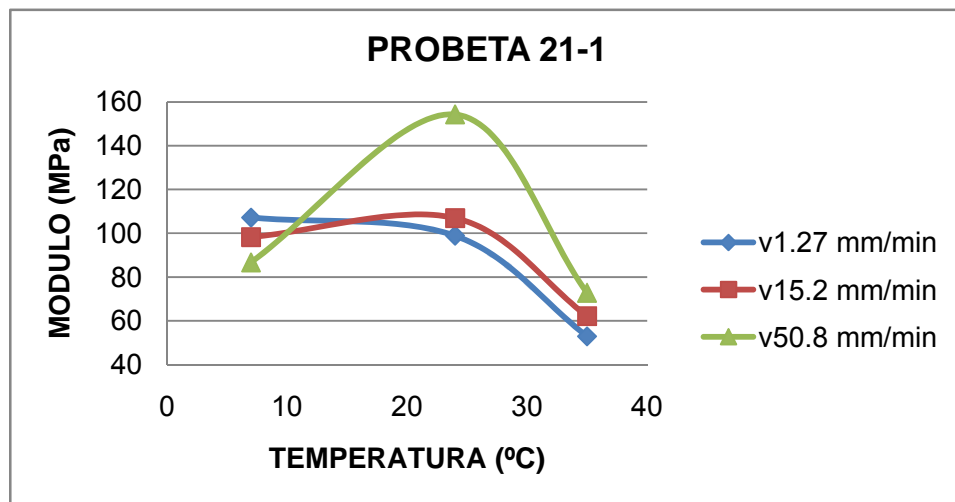
Tabla 14. Resumen De Valores De Módulos A Temperatura 35°C.

Promedios de los valores de módulos de rigidez:

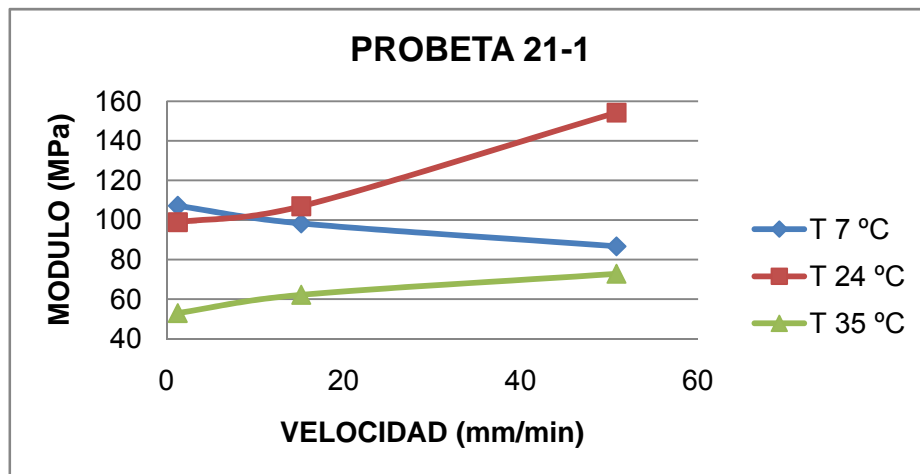
Código	Temperatura (°C)	Velocidad (mm/min)	Módulo promedio (MPa)
21_3212_R1	7	1.27	107.167
21_3212_R1	7	15.2	98.233
21_3212_R1	7	50.8	86.667
21_3212_R1	24	1.27	98.867
21_3212_R1	24	15.2	106.933
21_3212_R1	24	50.8	154.267
21_3212_R1	35	1.27	52.900
21_3212_R1	35	15.2	62.167
21_3212_R1	35	50.8	72.767

Tabla 15. Resumen Del Valor Promedio De Los Módulos.

Gráficamente se puede observar el comportamiento del módulo de rigidez monotónico a las diferentes temperaturas y velocidades realizadas en el marco de operación manual, ver Gráfica 10 y 11.



Gráfica 10. Comportamiento Módulo Vs Temperatura.



Gráfica 11. Comportamiento Módulo Vs Velocidad.

3.2.1.5 Interpretación De Datos

Debido a la influencia del asfalto en el comportamiento de la rigidez de la mezcla, y la susceptibilidad de este material a la temperatura se espera que la rigidez del concreto asfáltico aumente con la disminución de la temperatura. Además, para diferentes velocidades de deformación el módulo debe tender a disminuir para aplicaciones a baja velocidad. Con base en lo anterior, los módulos encontrados no se ajustan a los criterios expuestos para las diferentes combinaciones de temperatura y velocidad de deformación.

La metodología utilizada para obtener los datos de módulo monotónico utilizando el marco de carga de operación manual, no proporcionó un proceso confiable para caracterizar el comportamiento de la mezcla asfáltica debido a posibles factores que se enumeran a continuación:

- El tiempo requerido para realizar el montaje de la probeta en la máquina afecta la temperatura de la probeta.
- Al aplicar la velocidad de deformación sobre el espécimen, se dificultó el procedimiento de mantener constante la aplicación, debido a que se realizaba de forma manual.

Sobre la base de las consideraciones anteriores, se decidió utilizar otro equipo de medición. El equipo utilizado fue el marco de carga de la máquina universal (MTS-810) y la forma de acondicionar la temperatura de las probetas también se modificó. Se utilizó una nevera y un horno para que las probetas al momento del ensayo estuvieran a la temperatura requerida.

3.2.2 Metodología Implementada Utilizando El Marco De Carga De La MTS-810

El equipo empleado para realizarlos ensayos consta de 4 partes principales: un sistema hidráulico, la torre de enfriamiento, el panel de control, el sistema de adquisición de datos.

Fotografía 3. Máquina MTS-810.



Las temperaturas y velocidades para los ensayos utilizando el marco de carga automático fueron: 7°C, 19°C, 35°C y 1 mm/min, 7 mm/min, 15 mm/min respectivamente. Para lograr acondicionar las probetas a la temperatura de 7°C se utilizó una nevera en la cual se acondicionaban las probetas durante un periodo de tiempo aproximado de 12 horas. Para la temperatura de 19 °C se utilizaba la temperatura proporcionada por el aire acondicionado del salón donde se encuentra la máquina MTS y la temperatura de 35°C se controló mediante el uso de un horno.

Para comprobar que las probetas se encontraban acondicionadas a la temperatura de ensayo requerida, se utilizó una probeta testigo a la cual se le adecuó una

termocupla en el centro de la probeta para controlar la temperatura de las probetas a ensayar.



Fotografía 4. Equipos De Control De Temperatura.

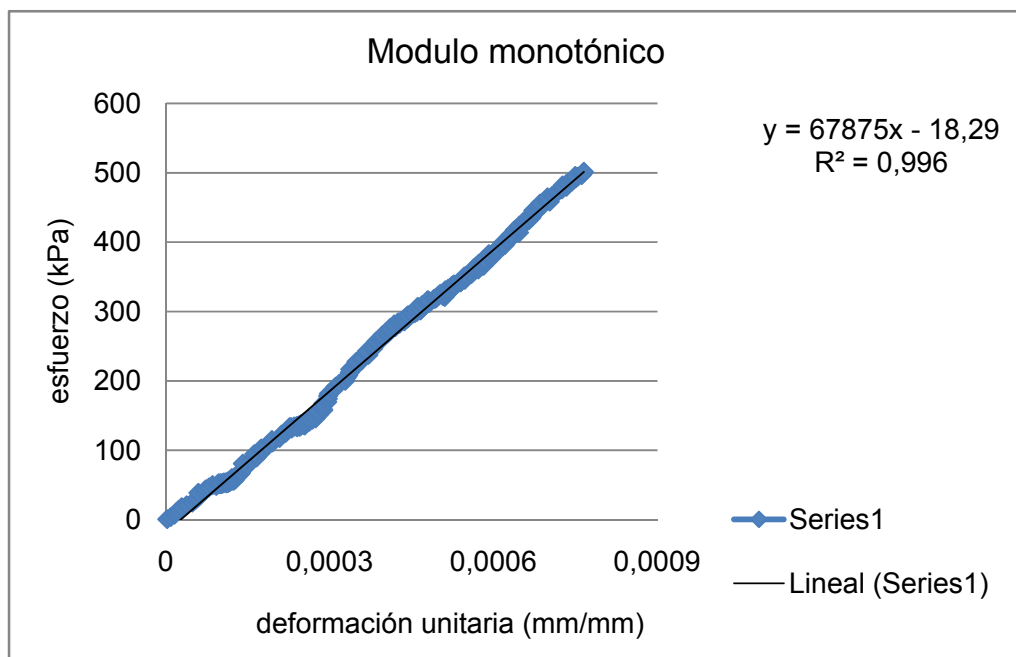
El tiempo de ejecución del ensayo debía ser inferior a los dos minutos, contando desde el momento en el cual eran extraídas las probetas del lugar de acondicionamiento de la temperatura. Con el fin de garantizar que la diferencia de temperatura no afectará el resultado, después de cada aplicación de velocidad se proporcionaba por lo menos 30 minutos de acondicionamiento a las probetas, antes de la siguiente prueba.

3.2.2.1 Procedimiento Del Ensayo

A continuación se describe los pasos seguidos para determinar el módulo de rigidez de la mezcla asfáltica.

- Acondicionar las probetas a la temperatura del ensayo.

- Se coloca la probeta sobre el soporte que proporciona la MTS para realizar la prueba.
- Se somete la probeta a una deformación axial máxima de 0.1 mm, controlando la velocidad de deformación sobre el espécimen.
- Se calcula el módulo monotónico graficando el esfuerzo vs deformación unitaria y ajustando los datos a una línea, ver Gráfica 12.

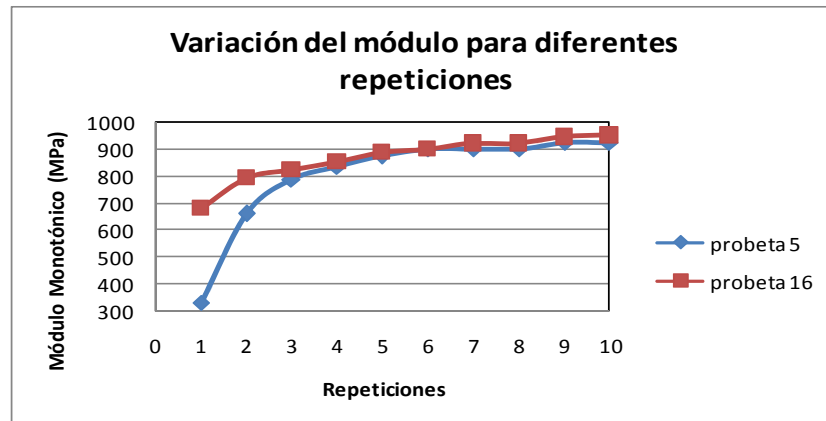


Gráfica 12. Curva De Ajuste Esfuerzo VS Deformación.

3.2.2.2 Análisis Del Módulo De Rigidez

Para obtener el valor del módulo de rigidez de cada una de las probetas, se requirió hacer varias veces la prueba para observar el comportamiento del módulo a las diferentes repeticiones. Con los datos determinados se concluyó que se debía ejecutar como mínimo cinco veces la prueba sobre la misma probeta para la combinación de temperatura y velocidad correspondiente, debido a que el módulo

empezaba a estabilizarse después del quinto registró. A partir de este dato, el módulo no presentó mayores incrementos, ver Gráfica 13.



Gráfica 13. Variación Del Módulo Para Diferentes Repeticiones.

3.2.2.3 Resultados

A continuación se muestran los resultados de los módulos monotónicos determinados en el ensayo utilizando el marco de carga de la MTS-810, se toma el quinto valor para el cual el módulo no presenta mayor variación considerando que la probeta no debía mantenerse más de 2 minutos fuera del equipo de control de temperatura.

Repetición	Probeta	Temperatura (°C)	Velocidad (mm/min)	Módulo (kPa)	Módulo (MPa)
1	"15-1	7	1	240588,57	240,59
	"15-1	7	7	494841,48	494,84
	"15-1	7	15	600021,16	600,02
2	"15-1	7	1	386386,67	386,39
	"15-1	7	7	657200,99	657,20
	"15-1	7	15	894435,55	894,44
3	"15-1	7	1	431100,34	431,10
	"15-1	7	7	790144,80	790,14

Repetición	Probeta	Temperatura (°C)	Velocidad (mm/min)	Módulo (kPa)	Módulo (MPa)
	"15-1	7	15	939978,03	939,98
4	"15-1	7	1	349304,17	349,30
	"15-1	7	7	803666,18	803,67
	"15-1	7	15	967468,46	967,47
5	"15-1	7	1	509387,07	509,39
	"15-1	7	7	759483,08	759,48
	"15-1	7	15	983661,25	983,66

Tabla 16. Valores obtenidos de los módulos a sus diferentes temperaturas y velocidades en la máquina MTS-810.

Repetición	Probeta	Temperatura (°C)	Velocidad (mm/min)	Módulo (kPa)	Módulo (MPa)
1	"15-1	19	1	119678,52	119,68
	"15-1	19	7	211473,34	211,47
	"15-1	19	15	289181,24	289,18
2	"15-1	19	1	218142,22	218,14
	"15-1	19	7	339459,90	339,46
	"15-1	19	15	487142,85	487,14
3	"15-1	19	1	288365,43	288,37
	"15-1	19	7	422144,18	422,14
	"15-1	19	15	567515,90	567,52
4	"15-1	19	1	328253,05	328,25
	"15-1	19	7	480764,98	480,76
	"15-1	19	15	647754,36	647,75
5	"15-1	19	1	367115,94	367,12
	"15-1	19	7	511428,06	511,43
	"15-1	19	15	655102,32	655,10

Tabla 17. Valores obtenidos de los módulos a sus diferentes temperaturas y velocidades en la máquina MTS-810.

Repetición	Probeta	Temperatura (°C)	Velocidad (mm/min)	Módulo (kPa)	Módulo (MPa)
1	"15-1	35	1	47256,62	47,26
	"15-1	35	7	103049,16	103,05
	"15-1	35	15	128884,57	128,88
2	"15-1	35	1	82029,06	82,03
	"15-1	35	7	159215,76	159,22
	"15-1	35	15	199901,74	199,90
3	"15-1	35	1	113804,85	113,80
	"15-1	35	7	194015,18	194,02
	"15-1	35	15	235048,88	235,05
4	"15-1	35	1	135636,18	135,64
	"15-1	35	7	205899,27	205,90
	"15-1	35	15	252292,30	252,29
5	"15-1	35	1	152685,88	152,69
	"15-1	35	7	220521,13	220,52
	"15-1	35	15	250879,77	250,88

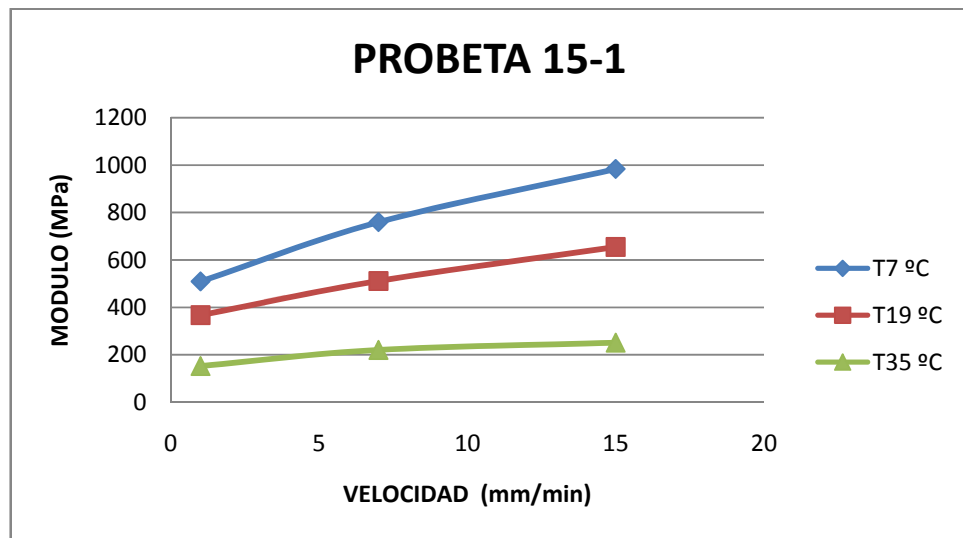
Tabla 18. Valores obtenidos de los módulos a sus diferentes temperaturas y velocidades en la máquina MTS-810.

Módulos de rigidez correspondientes al quinto dato registrado

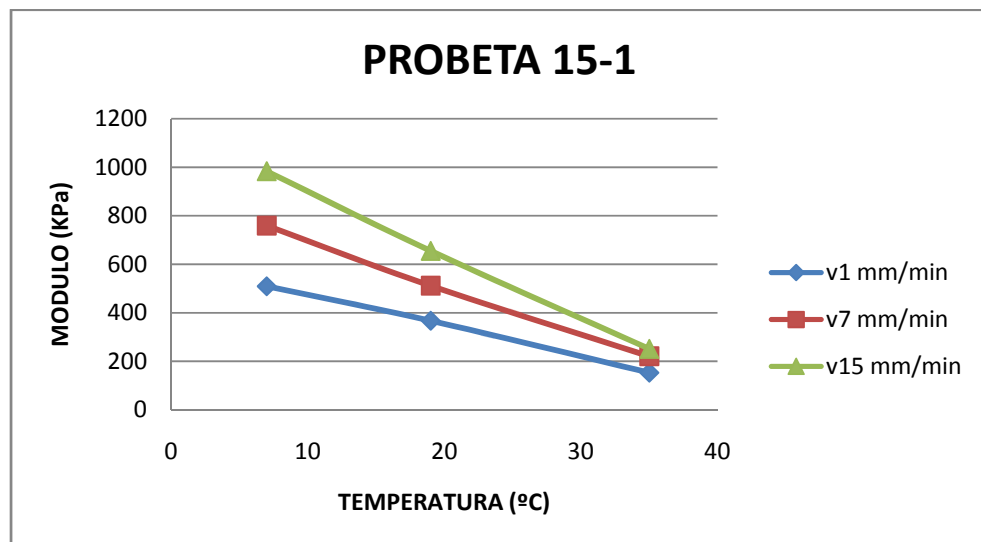
Código	Temperatura (°C)	Velocidad (mm/min)	Módulo (MPa)
15_2221_R1	7	1	509,39
15_2221_R1	7	7	759,48
15_2221_R1	7	15	983,66
15_2221_R1	19	1	367,12
15_2221_R1	19	7	511,43
15_2221_R1	19	15	655,10
15_2221_R1	35	1	152,69
15_2221_R1	35	7	220,52
15_2221_R1	35	15	250,88

Tabla 19. Resumen De Los Valores Obtenidos Del Módulo En La Máquina MTS-810.

En la Gráfica 14 y 15 se observa el comportamiento del módulo de rigidez monotónico a las diferentes temperaturas y velocidades realizadas en la máquina MTS-810.



Gráfica 14. Comportamiento Módulo VS Velocidad Datos De MTS-810.



Gráfica 15. Comportamiento Módulo VS Temperatura Datos De MTS-810.

3.2.3 Metodología Implementada Utilizando Un Marco De Carga Semiautomático MTA-1

Para verificar la reproducibilidad de la metodología del ensayo propuesto se requirió determinar el módulo de rigidez utilizando un equipo diferente al usado en la Universidad Industrial de Santander, por tal razón se contrató los servicios del laboratorio de Corasfaltos.

Para garantizar condiciones similares en la ejecución de los ensayos las actividades fueron supervisadas, además se proporcionó un entrenamiento al operador en el proceso de aplicación de la carga.

Se acondicionaron las probetas a 19°C en una cámara de temperatura y la aplicación de carga se realizó en un marco semiautomático MTA-1 el cual permite que el operario controle la deformación máxima aplicada de 0.1 mm a las diferentes velocidades de deformación (1, 7 y 15 mm/min).



Fotografía 5. Marco De Carga Semiautomático MTA-1

3.2.3.1 Resultados

A continuación se muestran los resultados de los módulos monotónicos determinados en el ensayo utilizando el marco de carga MTA-1, para cada una de las repeticiones realizadas se toma como valor de módulo monotónico el valor de mayor magnitud obtenido.

Repetición	Probeta	Temperatura(°C)	Velocidad (mm/min)	Módulo (MPa)
1	15_1 R1	19	1	23,73
	15_1 R1	19	7	75,63
	15_1 R1	19	15	134,43
2	15_1 R1	19	1	9,62
	15_1 R1	19	7	119,11
	15_1 R1	19	15	105,83
3	15_1 R1	19	1	39,93
	15_1 R1	19	7	116,35
	15_1 R1	19	15	127,02
4	15_1 R1	19	1	40,89
	15_1 R1	19	7	116,25
	15_1 R1	19	15	204,44
5	15_1 R1	19	1	78,57
	15_1 R1	19	7	127,66
	15_1 R1	19	15	177,91

Tabla 20. Valores obtenidos de los módulos a la temperatura de 19°C y velocidades de deformación en la máquina MTA-1.

En la Tabla 21, se registran los resultados de los módulos obtenidos por la máquina MTS de la Universidad Industrial de Santander UIS y la máquina MTA-1

de CORASFALTOS. Los datos determinados utilizando equipos de laboratorios diferentes muestran poca similitud para definir la reproducibilidad del ensayo.

Repetición	Probeta	Temperatura(°C)	Velocidad (mm/min)	Módulo UIS(MPa)	Módulo Corasfaltos(MPa)
1	15_1 R1	19	1	119,68	23,73
	15_1 R1	19	7	211,47	75,63
	15_1 R1	19	15	289,18	134,43
2	15_1 R1	19	1	218,14	9,62
	15_1 R1	19	7	339,46	119,11
	15_1 R1	19	15	487,14	105,83
3	15_1 R1	19	1	288,37	39,93
	15_1 R1	19	7	422,14	116,35
	15_1 R1	19	15	567,52	127,02
4	15_1 R1	19	1	328,25	40,89
	15_1 R1	19	7	480,76	116,25
	15_1 R1	19	15	647,75	204,44
5	15_1 R1	19	1	367,12	78,57
	15_1 R1	19	7	511,43	127,66
	15_1 R1	19	15	655,1	177,91

Tabla 21. Resumen De Los Valores Obtenidos Del Módulo En La Máquina MTS-810 y MTA-1.

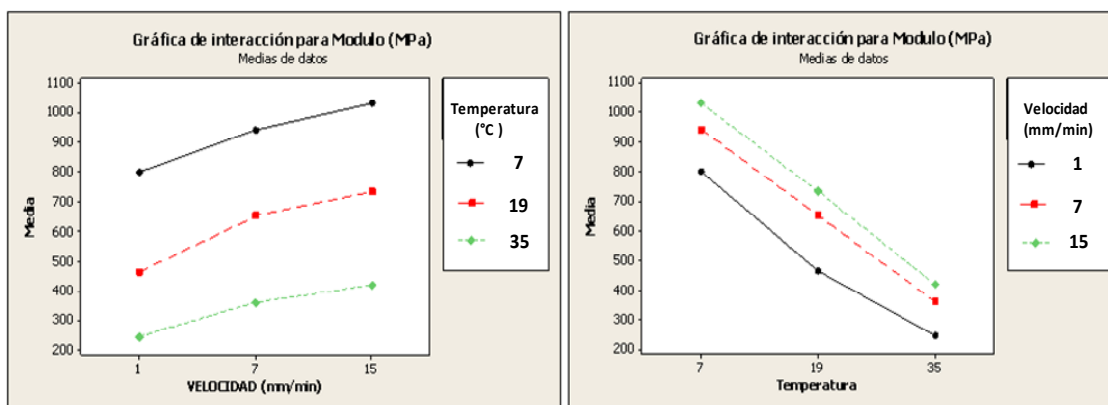
En los anexos D se encuentran los análisis del diseño 15 a las velocidades de deformación de 1, 7 y 15 mm/min realizados para la temperatura de 19°C entregados por Corasfaltos.

4. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LA MEZCLA ASFÁLTICA

En este proyecto se utilizaron mezclas asfálticas en caliente las cuales se subdividen en mezcla densa en caliente (MDC-2) y mezcla abierta en caliente (M1). El comportamiento del módulo de rigidez de la mezcla asfáltica es analizado para determinar la influencia de la temperatura y velocidad de aplicación de la deformación sobre el material. A continuación se muestra la variación del módulo de rigidez de la mezcla asfáltica para los diferentes tipos de mezcla ensayados.

4.1 MEZCLA DENSA EN CALIENTE (MDC-2)

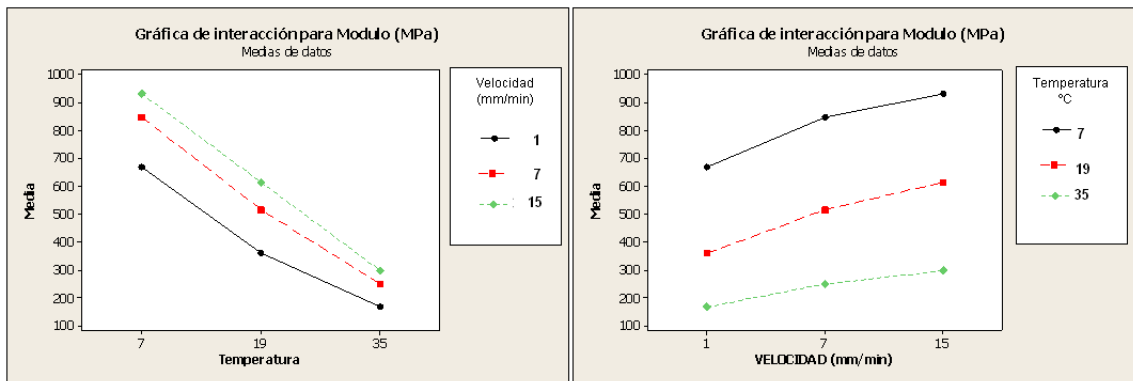
En la gráfica 16, se observa la interacción que existe entre el módulo de rigidez monotónico con la velocidad de deformación y la temperatura. Es significativa la variación del módulo de rigidez para cada velocidad de deformación aplicada, presentado mayores módulos a velocidades de 15 mm/min (ver Gráfica 16-a). Además, se ve el efecto de la temperatura a la cual se ejecutó el ensayo, obteniendo valores de rigidez mayores a la temperatura de 7°C, (ver Gráfica 16-b).



Gráfica 16.16-a Media de los valores del Módulo vs Velocidad, 16-b Media de los valores del módulo vs temperatura.

4. 2 MEZCLA ABIERTA EN CALIENTE (M1)

En la gráfica 17, se observa la interacción que existe entre el módulo de rigidez monotónico con la velocidad de deformación y la temperatura. Es significativa la variación del módulo de rigidez para cada velocidad de deformación aplicada, presentado mayores módulos a velocidades de 15 mm/min (ver Gráfica 17-a). Además, se ve el efecto de la temperatura a la cual se ejecutó el ensayo, obteniendo valores de rigidez menores a la temperatura de 35°C, (ver Gráfica 17-b).



Gráfica 17. 17-a Media de los valores del Módulo vs Velocidad, 17-b Media de los valores del módulo vs temperatura.

En las gráficas anteriores de módulo VS velocidad y módulo Vs temperatura se observa la diferencia que presentan los valores de los módulos de las curvas en las mezclas densa en caliente (MDC-2) y mezcla abierta en caliente (M1) de esta manera se puede concluir que las mezclas densas en caliente (MDC-2) presentaron mayores valores en su rigidez que las mezclas abiertas en caliente (M1) en función de las diferentes temperaturas y velocidades de deformación.

5. ESTUDIO DE REPETIBILIDAD Y REPRODUCIBILIDAD (R&R)

5.1 ESTUDIO R&R POR MÉTODO ANOVA

El análisis de la repetibilidad y reproducibilidad fue realizado sobre una mezcla abierta en caliente M1 a una temperatura de 19 grados. Para este diseño de mezcla se analizaron 6 réplicas las cuales fueron ensayadas en cuatro tiempos diferentes por el mismo operador y utilizando el mismo equipo. Para implementar el método estadístico de anova se organizaron los datos obtenidos de la siguiente manera y fueron ingresados al Programa Minitab_(demo- MINITAB 16).

Velocidad 1 mm/ min			Velocidad 7 mm/ min			Velocidad 15 mm/ min		
REPLICA	TIEMPO DE EJECUCIÓN	MODULO (Mpa)	REPLICA	TIEMPO DE EJECUCIÓN	MODULO (Mpa)	REPLICA	TIEMPO DE EJECUCIÓN	MODULO (Mpa)
1	1	472	1	1	710	1	1	805
1	1	491	1	1	737	1	1	812
1	2	537	1	2	738	1	2	844
1	2	538	1	2	749	1	2	858
1	3	575	1	3	784	1	3	935
1	3	623	1	3	818	1	3	970
1	4	634	1	4	845	1	4	925
1	4	665	1	4	843	1	4	967
2	1	517	2	1	730	2	1	804
2	1	546	2	1	715	2	1	834
2	2	527	2	2	749	2	2	813
2	2	549	2	2	797	2	2	859
2	3	576	2	3	832	2	3	935
2	3	628	2	3	858	2	3	942
2	4	653	2	4	844	2	4	956
2	4	683	2	4	863	2	4	965
3	1	517	3	1	792	3	1	941
3	1	545	3	1	808	3	1	955
3	2	499	3	2	789	3	2	939
3	2	558	3	2	809	3	2	923
3	3	657	3	3	812	3	3	991
3	3	688	3	3	866	3	3	1000
3	4	696	3	4	911	3	4	1048
3	4	722	3	4	902	3	4	1013
4	1	291	4	1	499	4	1	624
4	1	309	4	1	493	4	1	640
4	2	264	4	2	537	4	2	616
4	2	311	4	2	546	4	2	626
4	3	244	4	3	563	4	3	692
4	3	288	4	3	565	4	3	701
4	4	400	4	4	579	4	4	716
4	4	405	4	4	587	4	4	702
5	1	418	5	1	688	5	1	804
5	1	433	5	1	686	5	1	803
5	2	466	5	2	710	5	2	796
5	2	479	5	2	707	5	2	805
5	3	530	5	3	781	5	3	924
5	3	555	5	3	787	5	3	905
5	4	570	5	4	792	5	4	949
5	4	575	5	4	814	5	4	954
6	1	179	6	1	469	6	1	562
6	1	210	6	1	476	6	1	570
6	2	293	6	2	521	6	2	618
6	2	321	6	2	534	6	2	637
6	3	359	6	3	577	6	3	705
6	3	391	6	3	601	6	3	702
6	4	400	6	4	574	6	4	704
6	4	396	6	4	612	6	4	688

Tabla 22. Datos de valores de módulos a diferentes velocidades para análisis en demo MINITAB 16.

5.1.1 Resultados Y Análisis

Para determinar los factores que afectan la variabilidad del estudio de R&R, se analizó la variación de las medidas debido a la interacción réplica a réplica (parte a parte), a la variación de cada una de las réplicas de acuerdo al tiempo en que fueron ejecutados los ensayos y por último a la interacción presentada en el tiempo de ejecución del ensayo para cada una de las réplicas.

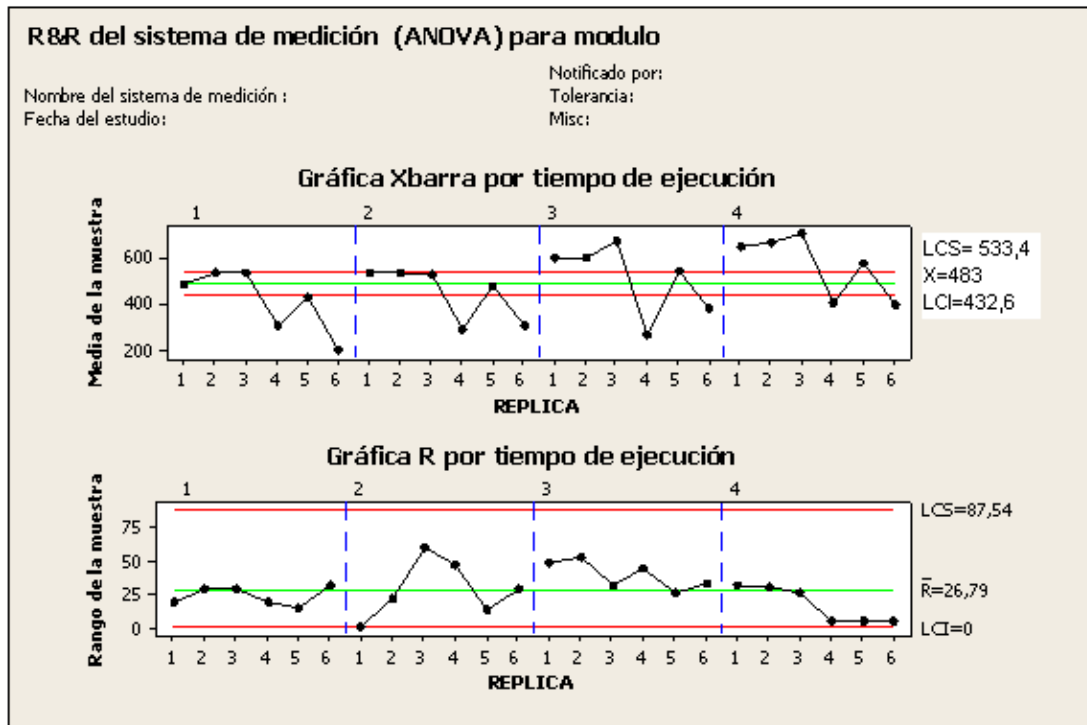
Para el ensayado realizado a la velocidad de deformación de 1 mm/min se obtienen los siguientes resultados:

- **COMPONENTES DE VARIACIÓN**

Analizando la variabilidad de los datos obtenidos para la velocidad de deformación de 1 mm/min, en la Gráfica 18, se puede observar el porcentaje de contribución a la variación de los datos por parte de cada uno de los elementos que influyen en la determinación de la R&R del sistema de medida. Los factores de influencia en el sistema de medición son: la repetibilidad, la reproducibilidad y la interacción entre las partes (réplicas).

Se determina que la interacción entre las partes afecta de manera considerable en un 86.32% la variación de los datos obtenidos en el ensayo. Mientras que el aporte al sistema de medición debido a la reproducibilidad es del 48.46% y de la repetibilidad es de 14.17%.

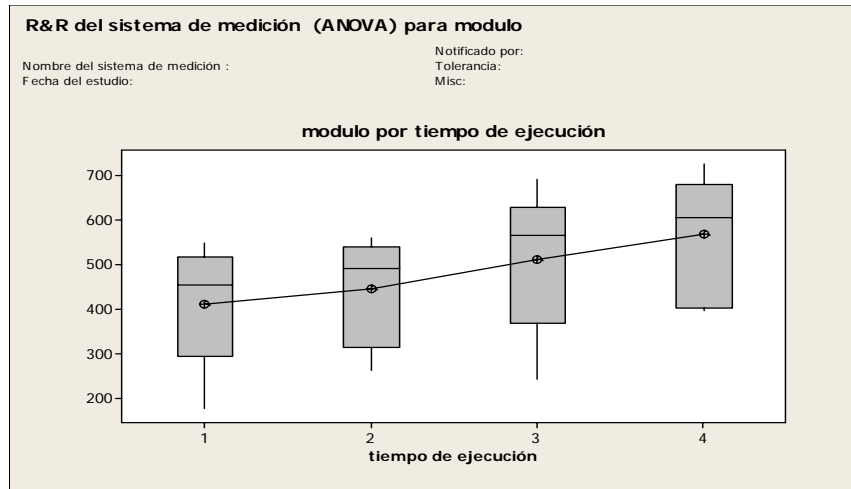
cada una de las réplicas. Esto indica que no hay valores fuera de lo común en las pruebas realizada.



Gráfica 19. Gráfica “Xbarra tiempo de ejecución” y “R por tiempo de ejecución”.

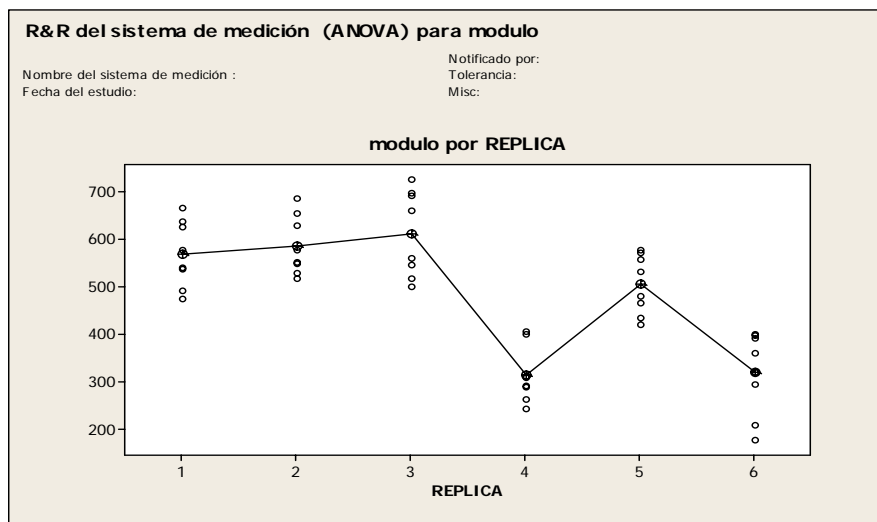
- **VARIACIÓN DE LA MEDIDA DEL MÓDULO POR RÉPLICAS Y DEBIDO AL TIEMPO DE EJECUCIÓN DEL ENSAYO**

Para los diferentes tiempos de ejecución del ensayo, se puede determinar que hay una tendencia en la cual se incrementó el valor del módulo de rigidez a medida que se ejecutó el ensayo en un tiempo diferente, ver Gráfica 20.



Gráfica 20. Gráfica Módulo Vs tiempo de ejecución.

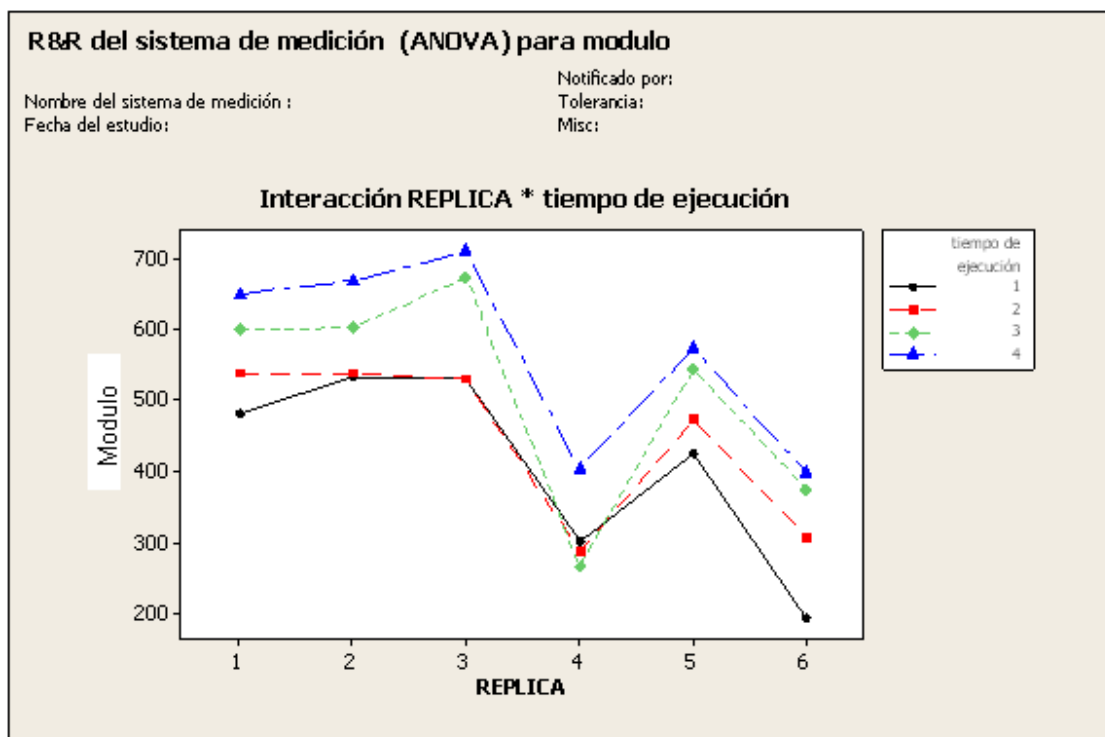
De acuerdo a la Gráfica 21, “Módulo Vs Réplica” se puede ver con más claridad la variación de los datos del módulo de rigidez, considerando que los 6 especímenes ensayados tienen las mismas características de diseño. Se observa que las condiciones de fabricación no permitieron obtener muestras similares lo cual ratifica que la interacción entre partes (réplicas) es la variable de mayor influencia en el sistema de medición y su porcentaje de influencia es de 86.32%.



Gráfica 21. Módulo Vs Réplica.

- **INTERACCIÓN ENTRE DISEÑOS**

La Gráfica 22, permite observar el comportamiento de los valores del módulo de rigidez de las 6 réplicas con respecto al tiempo de ejecución. Se aprecia una variación de la interacción parte a parte, además de la variación generada por la maduración de las probetas que se ve reflejada al realizar los ensayos en tiempos diferentes.



Gráfica 22. Gráfica Interacción Réplica Vs Tiempo de ejecución.

De acuerdo a los resultados obtenidos por el método ANOVA, en la tabla 19 se resumen los porcentajes de variación del estudio, producidos por cada uno de los factores que influyen en la evaluación del sistema de medición.

Cuando la probabilidad es menor a 0.05 indica que el factor analizado tiene influencia en el estudio de la R&R. De acuerdo a la Tabla 19-a los factores: réplica, tiempo de ejecución y la interacción entre la réplica y el tiempo de ejecución presentan $P < 0.05$, de acuerdo a lo anterior, son factores que influyen en el sistema de medición.

DISEÑO 15 VELOCIDAD 1 mm /min					
FUENTE	GL	SC	CM	F	P
Réplica	5	718373	143354	59,333	0
Tiempo de ejecución	3	172223	57408	23,7605	0,0003
Réplica * Tiempo de ejecución	15	36241	2416	5,0908	0
Repetibilidad	24	11391	475		
Total	47	936625			

Tabla 23. Resultados de análisis en demo MINITAB 16 de la velocidad 1mm/min.

De acuerdo a la Tabla 24, se identifican los porcentajes de contribución (% contribución) de cada uno de los factores en la variabilidad de los datos, la contribución debido a la interacción entre las partes es del (74.51%), la contribución de reproducibilidad (23.49%), contribución por el tiempo de ejecución (19.38%), contribución réplica por tiempo de ejecución (4.11%) y la contribución por la repetibilidad (2.01%).

El porcentaje de contribución del Estudio R&R del sistema de medición total es de 25.49%. Y el mayor porcentaje de influencia en el estudio está generado por la diferencia entre partes (réplicas) y la menor por la repetibilidad de la prueba.

DISEÑO 15 VELOCIDAD 1mm/min		
Fuente	Contribución por la varianza	% Contribución
R&R del sistema de medición total	6028	25,49
Repetibilidad	474,6	2,01
Reproducibilidad	5553,4	23,49
Tiempo de ejecución	4582,6	19,38
Réplica * Tiempo de ejecución	970,7	4,11
Parte a parte	17617,2	74,51
Variación total	23645,2	100

Tabla 24. Resultados de análisis en demo MINITAB 16 de la velocidad 1mm/min.

De acuerdo a la tabla 25 la menor desviación presentada en el estudio está dada por la repetibilidad.

DISEÑO 15 VELOCIDAD 1mm/min		
Fuente	Desviación del estudio	Var. del estudio (6*ED)
R&R del sistema de medición total	77,64	465,84
Repetibilidad	21,785	130,712
Reproducibilidad	74,521	447,126
Tiempo de ejecución	67,695	406,17
Réplica * Tiempo de ejecución	31,157	186,941
Parte a parte	132,73	796,38
Variación total	153,77	922,62

Tabla 25. Resultados de análisis en demo MINITAB 16 de la velocidad 1mm/min.

En los resultados presentados en la Tabla 26, se determina el porcentaje de variación del estudio (%Var estudio). Se obtiene un 50.49% de variación del estudio para al sistema de medición total. Por tal razón el sistema de medición no es aceptable y se debe mejorar, Se interpretan los resultados aplicando los criterios del ítem 12 del numeral 2.3.1.

DISEÑO 15 VELOCIDAD 1mm/min	
Fuente	%Variación del estudio
R&R del sistema de medición total	50,49
Repetibilidad	14,17
Reproducibilidad	48,46
Tiempo de ejecución	40,59
Réplica * tiempo de ejecución	44,02
Parte a parte	86,32
Variación total	100

Tabla 26. Resultados de análisis en demo MINITAB 16 de la velocidad 1mm/min.

Se realizó el estudio R&R utilizando el método de anova a las velocidades de deformación de 7 y 15 mm / min (ver tabla 27), se observa que la variabilidad del estudio está influenciada por el porcentaje de contribución de afectación al sistema debido a la interacción de las partes (parte a parte) en las tres velocidades de deformación planteadas y el de menor porcentaje de incidencia sobre la variabilidad del sistema de medición es la repetibilidad.

Se observa que los valores de porcentaje de variación del estudio (% Var estudio) ninguna velocidad cumple con la condición mencionada en el ítem 12 del numeral 2.3.1, por tal razón el sistema de medición no es aceptable y se debe mejorar las condiciones para su reproducibilidad.

- **Velocidad 1 mm/min**

DISEÑO 15 VELOCIDAD 1 mm /min					
FUENTE	GL	SC	CM	F	P
Réplica	5	718373	143354	59,333	0
Tiempo de ejecución	3	172223	57408	23,7605	0,0003
Réplica * Tiempo de ejecución	15	36241	2416	5,0908	0
Repetibilidad	24	11391	475		
Total	47	936625			

DISEÑO 15 VELOCIDAD 1mm/min		
Fuente	Contribución por la varianza	% Contribución
R&R del sistema de medición total	6028	25,49
Repetibilidad	474,6	2,01
Reproducibilidad	5553,4	23,49
Tiempo de ejecución	4582,6	19,38
Réplica * Tiempo de ejecución	970,7	4,11
Parte a parte	17617,2	74,51
Variación total	23645,2	100

DISEÑO 15 VELOCIDAD 1mm/min		
Fuente	Desviación del estudio	Var. del estudio (6*ED)
R&R del sistema de medición total	77,64	465,84
Repetibilidad	21,785	130,712
Reproducibilidad	74,521	447,126
Tiempo de ejecución	67,695	406,17
Réplica * Tiempo de ejecución	31,157	186,941
Parte a parte	132,73	796,38
Variación total	153,77	922,62

DISEÑO 15 VELOCIDAD 1mm/min	
Fuente	%Variación del estudio
R&R del sistema de medición total	50,49
Repetibilidad	14,17
Reproducibilidad	48,46
Tiempo de ejecución	40,59
Réplica * tiempo de ejecución	44,02
Parte a parte	86,32
Variación total	100

- Velocidad 7 mm/min

DISEÑO 15 Velocidad 7mm /min					
FUENTE	GL	SC	CM	F	P
Réplica	5	668249	133650	242,4	0
Tiempo de ejecución	3	95525	31842	57,751	0
Replica * tiempo de ejecución	15	8270	551	2,172	0,044
Repetibilidad	24	6092	254		
Total	47	778136			

DISEÑO 15 Velocidad 7mm /min		
Fuente	Contribución por la varianza	%Contribución
R&R del sistema de medición total	3010,1	15,32
Repetibilidad	253,9	1,29
Reproducibilidad	2756,3	14,03
Tiempo de ejecución	2607,5	13,27
Réplica * tiempo de ejecución	148,8	0,76
Parte a parte	16637,3	84,68
Variación total	19647,4	100

DISEÑO 15 Velocidad 7mm /min		
Fuente	Desviación del estudio	Var. del estudio (6*ED)
R&R del sistema de medición total	54,865	329,188
Repetibilidad	15,933	95,597
Reproducibilidad	52,5	315,001
Tiempo de ejecución	12,196	73,179
Réplica * tiempo de ejecución	12,196	73,179
Parte a parte	128,986	773,914
Variación total	140,169	841,016

DISEÑO 15 Velocidad 7mm /min	
Fuente	%Variación del estudio
R&R del sistema de medición total	39,14
Repetibilidad	11,37
Reproducibilidad	37,45
Tiempo de ejecución	36,43
Réplica * tiempo de ejecución	8,7
Parte a parte	92,02
Variación total	100

- **Velocidad 15 mm/min**

DISEÑO 15 Velocidad 15mm /min					
FUENTE	GL	SC	CM	F	P
Réplica	5	718373	143675	167,82	0
Tiempo de ejecución	3	133089	44363	51,818	0
Réplica * tiempo de ejecución	15	12842	856	4,139	0,001
Repetibilidad	24	4965	207		
Total	47	869268			

DISEÑO 15 Velocidad 15mm /min		
Fuente	Contribución por la varianza	%Contribución
R&R del sistema de medición total	4157	18,89
Repetibilidad	206,9	0,94
Reproducibilidad	3950,2	17,95
Tiempo de ejecución	3625,6	16,47
Réplica * tiempo de ejecución	324,6	1,47
Parte a parte	17852,3	81,11
Variación total	22009,4	100

DISEÑO 15 Velocidad 15mm /min		
Fuente	Desviación del estudio	Var. del estudio (6*ED)
R&R del sistema de medición total	64,475	386,851
Repetibilidad	14,382	86,295
Reproducibilidad	62,851	377,103
tiempo de ejecución	60,213	361,276
Replica * tiempo de ejecución	18,018	108,106
Parte a parte	133,613	801,675
Variación total	148,356	890,133

DISEÑO 15 Velocidad 15mm /min	
Fuente	%Variación del estudio
R&R del sistema de medición total	43,46
Repetibilidad	9,69
Reproducibilidad	42,36
Tiempo de ejecución	40,59
Replica * tiempo de ejecución	12,14
Parte a parte	90,06
Variación total	100

Tabla 27. Tablas de Resumen de análisis de Repetibilidad y Reproducibilidad a las diferentes velocidades.

En los anexos C se encuentran los análisis de repetibilidad y reproducibilidad de las velocidades de deformación de 7 y 15 mm/min.

5.2 ESTUDIO R&R POR MÉTODOS DE PROMEDIOS Y RANGO

Este es el segundo análisis estadístico realizado al diseño 15 en iguales condiciones al anterior análisis.

Velocidad 1 mm / min			Velocidad 1 mm / min		
Replica	Tiempo de ejecución	Modulo (MPa)	Replica	Tiempo de ejecución	Modulo (MPa)
1	1	472	4	1	291
1	1	491	4	1	309
1	2	537	4	2	264
1	2	538	4	2	311
1	3	575	4	3	244
1	3	623	4	3	288
1	4	634	4	4	400
1	4	665	4	4	405
2	1	517	5	1	418
2	1	546	5	1	433
2	2	527	5	2	466
2	2	549	5	2	479
2	3	576	5	3	530
2	3	628	5	3	555
2	4	653	5	4	570
2	4	683	5	4	575
3	1	517	6	1	179
3	1	545	6	1	210
3	2	499	6	2	293
3	2	558	6	2	321
3	3	657	6	3	359
3	3	688	6	3	391
3	4	696	6	4	400
3	4	722	6	4	396

Tabla 28. Tabla datos de análisis para estudio de métodos de rangos para la velocidad 1mm/min.

Otra manera de determinar la Repetibilidad y Reproducibilidad (R&R) es por el método de promedios y rangos siguiendo la metodología descrita en el marco teórico. Se programó una hoja de cálculo en Microsoft Excel, y a continuación se resumen los resultados para el diseño 15 a una velocidad de deformación de 1 mm/min.

DISEÑO 15 VEL 1 mm /min TEMPERATURA 19 GRADOS			
Tiempo de ejecución A			
Replica	1er. INT.	2do. INT.	RANGO
1	472	491	19
2	517	546	29
3	517	545	28
4	291	309	18
5	418	433	15
6	179	210	31
TOTALES	2394	2534	140

A1 =	2394	R. PROM. A =	21,8
A2 =	2534		
SUMA A =	4928		
X PROM. A =	410,666667		

DISEÑO 15 VEL 1 mm /min TEMPERATURA 19 GRADOS			
Tiempo de ejecución B			
Replica	1er. INT.	2do. INT.	RANGO
1	537	538	1
2	527	549	22
3	499	558	59
4	264	311	47
5	466	479	13
6	293	321	28
TOTALES	2586	2756	170

B1 =	2586	R. PROM. B =	28,4
B2 =	2756		
SUMA B =	5342		
X PROM. B =	445,166667		

Tabla 29-a. Análisis de módulos por método de rangos a la velocidad de 1mm/min.

DISEÑO 15 VEL 1 mm /min TEMPERATURA 19 GRADOS			
Tiempo de ejecución C			
Replica	1er. INT.	2do. INT.	RANGO
1	575	623	48
2	576	628	52
3	657	688	31
4	244	288	44
5	530	555	25
6	359	391	32
TOTALES	2941	3173	232

C1 =	2941	R. PROM. C =	38,66
C2 =	3173		
SUMA C =	6114		
X PROM. C =	509,5		

DISEÑO 15 VEL 1 mm /min TEMPERATURA 19 GRADOS				
Tiempo de ejecución D				
Replica	1er. INT.	2do. INT.	RANGO	Xp.
1	634	665	31	566,875
2	653	683	30	584,875
3	696	722	26	610,25
4	400	405	5	314
5	570	575	5	503,25
6	400	396	4	318,625
TOTALES	3353	3446	101	
D1 =	3353	R. PROM. D =	16,83333333	
D2 =	3446			
SUMA D =	6799			
X PROM. D =	566,583333		Rp =	296,25

Tabla 29-b. Análisis de módulos por método de rangos a la velocidad de 1mm/min.

La tabla 24 consolida los resultados finales de los parámetros que se determinan en el estudio de R&R para cada una de las velocidades de deformación.

- **Velocidad de deformación 1mm/min**

Velocidad 1 mm / min		
ANALISIS DE LA UNIDAD DE MEDICIÓN		
Repetibilidad - Variación al tiempo de ejecución	V:E	23,418
Reproducibilidad y variación de la replica	V:O	52,611
Repetibilidad y reproducibilidad R&R	R&R	57,588
Variación parte a parte	V:P	110,857
Variación Total	V:T	124,922

Velocidad 1 mm / min		
% VARIACION DE LA UNIDAD DE MEDICIÓN		
% De variación en el tiempo de ejecución	%V:E	18,75
% De variación de la replica	%V:O	42,12
% De repetibilidad y reproducibilidad	%R&R	46,1
%De Variación parte a parte	%V:P	88,74

- **Velocidad de deformación 7mm/min**

Velocidad 7 mm / min		
ANALISIS DE LA UNIDAD DE MEDICIÓN		
Repetibilidad - Variación al tiempo de ejecución	V:E	15,966
Reproducibilidad y variación de la replica	V:O	38,35
Repetibilidad y reproducibilidad R&R	R&R	41,541
Variación parte a parte	V:P	108,752
Variación Total	V:T	116,416

Velocidad 7 mm / min		
% VARIACION DE LA UNIDAD DE MEDICIÓN		
% De variación en el tiempo de ejecución	%V:E	13,71
% De variación de la replica	%V:O	32,94
% De repetibilidad y reproducibilidad R&R	%R&R	35,68
%De Variación parte a parte	%V:P	93,42

- **Velocidad de deformación 15 mm/min**

Velocidad 15 mm / min		
ANALISIS DE LA UNIDAD DE MEDICIÓN		
Repetibilidad - Variación al tiempo de ejecución	V:E	14,718
Reproducibilidad y variación de la replica	V:O	40,36
Repetibilidad y reproducibilidad R&R	R&R	42,96
Variación parte a parte	V:P	122,7388
Variación Total	V:T	130,039

Velocidad 15 mm / min		
% VARIACION DE LA UNIDAD DE MEDICIÓN		
% De variación en el tiempo de ejecución	%V:E	11,32
% De variación de la replica	%V:O	31,04
% De repetibilidad y reproducibilidad R&R	%R&R	33,04
%De Variación parte a parte	%V:P	94,39

Tabla 30. Resumen de análisis estadístico de Promedios y Rangos.

De acuerdo al análisis por el método estadístico de promedios y rangos realizado al diseño 15, el comportamiento de los datos obtenidos para las diferentes réplicas (parte a parte) generan la mayor variación en el sistema de medición ratificando que las condiciones de fabricación y la variación generada por la maduración de las probetas no proporcionan las condiciones de reproducibilidad del sistema de medida, sin embargo para cada réplica (individualmente) se garantiza poca variación de los datos debido a la repetibilidad.

De acuerdo a la columna porcentaje de variación de las unidades de medición en Tabla 24, para la velocidad de deformación de 1 mm/min, se enuncian en el orden de importancia los valores según la influencia en el variabilidad de los datos: variación debido al tiempo de ejecución (18.75%), variación de la réplica (42.12%), variación de repetibilidad y reproducibilidad R&R (46.10%), variación de parte a parte (87.40%), De manera que el mayor porcentaje de influencia en el estudio

está dado por la diferencia entre partes (réplicas) y la menor por la variación al tiempo de ejecución del ensayo.

El porcentaje de variación de las unidades de medición %R&R es mayor al 30%. Por lo tanto, al revisar los criterios enunciados en el método de promedios y rangos ítem 12 del numeral 2.3.1, se tiene que el sistema de medición no es el más apropiado debido a las condiciones de reproducibilidad proporcionadas durante la prueba.

En los anexos C se encuentran los análisis de repetibilidad y reproducibilidad de las velocidades de deformación de 7 y 15 mm/ min.

6. CONCLUSIONES

- En el análisis de repetibilidad y reproducibilidad fue notorio que el porcentaje de menor influencia se presentó en la repetibilidad del sistema de medición. Sin embargo, el porcentaje del sistema de medición %R&R por encima del 30%, indica que existen variaciones significativas debido a las diferencias obtenidas entre réplicas y a la reproducibilidad del sistema de medición.
- Se determinó que el parámetro de mayor influencia en el análisis de la repetibilidad y reproducibilidad está dado por las condiciones de fabricación de las réplicas. Además de la influencia del tiempo de maduración de las réplicas, el cual genera un incremento del módulo de rigidez.
- Los resultados obtenidos en el análisis de sensibilidad de la mezcla asfáltica son coherentes con la relación que existe entre la temperatura y la velocidad de carga ya que a altas temperaturas y bajas velocidades de carga los módulos son menores que los valores obtenidos abajas temperaturas y altas velocidades de carga.
- Los módulos de rigidez de las mezclas densas en caliente (MDC-2) presentaron mayores valores que las mezclas abiertas en caliente (M1) en función de las diferentes temperaturas y velocidades.

- La metodología utilizada para obtener los datos de módulo monotónico utilizando el marco de carga manual, no proporcionó un proceso confiable para caracterizar el comportamiento de la mezcla asfáltica debido a que es difícil mantener la velocidad de deformación constante aplicada manualmente.
- Al realizar la metodología del ensayo propuesta para determinar la rigidez de la mezcla utilizando equipos de laboratorio y operarios diferentes, no se logró obtener una reproducibilidad en el proceso del ensayo.

7. RECOMENDACIONES

- Para la ejecución de los ensayos y el análisis de la reproducibilidad es recomendable utilizar un equipo diferente al de la Universidad Industrial de Santander – UIS, con la finalidad de lograr comparar la reproducibilidad de la prueba utilizando equipos diferentes debido a que en este estudio se determinó la reproducibilidad ejecutando el ensayo en diferentes tiempos.
- Obtener nuevos equipos para controlar la temperatura en la MTS-810, pues es recomendable que las probetas no presenten variaciones de temperatura durante la ejecución del ensayo para evitar errores en la medida del valor de rigidez.

8. BIBLIOGRAFÍA

[1]. MONICA I, GROSSO, Como medir la incertidumbre de medir, Argentina, pp. 113-122, Universidad del Centro Educativo Latino Americano.

[2].Llamosa, Luis ,Estudio de Repetibilidad y Reproducibilidad Utilizando El Método De Promedios Y Rangos Para El Aseguramiento De La Calidad De Los Resultados De Calibración De acuerdo con la norma Técnica, Pereira, pp. 455-460, Universidad Tecnológica de Pereira, 2007.

[3].Botero, Marcela, método anova utilizado para realizar el estudio de repetibilidad y reproducibilidad dentro del control de calidad de un sistema de medición, Pereira, Artículo, Universidad Tecnológica De Pereira, 2007.

[4].Naira, Dávila, Caracterización De LA Rigidez De La Mezcla Asfáltica Usando Diferentes Tipos De Asfaltos, Bucaramanga, tesis de grado, Universidad Industrial de Santander, 2010.

[5].Contreras, Camacho, Influencia De La Temperatura En La Variación Del Módulo Dinámico De Las Mezclas Asfálticas Colombianas, Bucaramanga, tesis de grado, Universidad Industrial de Santander, 2010.

[6]. Pineda, Barajas, Comportamiento Del Módulo De La Mezcla Asfáltica Para Diferentes Fuentes De Agregados, Bucaramanga, tesis de grado, Universidad Industrial de Santander, 2010.

[7]. CHAVEZ, Sergio, Relación entre mecánicas de concretos asfálticos bajo carga estática y dinámica, Bucaramanga, tesis de grado, Universidad Industrial de Santander, 2008.

9. ANEXOS

Anexo A: Módulo de Rigidez con el Marco de Carga de Operación
Manual

Probeta	Temperatura	Velocidad	Módulo promedio (Mpa)
1_1111_R1	7	50,8	71,352
1_1111_R1	7	15,2	87,268
1_1111_R1	7	1,27	69,576
1_1111_R2	7	50,8	284,502
1_1111_R2	7	15,2	284,502
1_1111_R2	7	1,27	284,502
1_1111_R3	7	50,8	97,835
1_1111_R3	7	15,2	115,698
1_1111_R3	7	1,27	119,747
6_1212_R1	7	50,8	284,502
6_1212_R1	7	15,2	284,502
6_1212_R1	7	1,27	284,502
6_1212_R2	7	50,8	79,281
6_1212_R2	7	15,2	94,707
6_1212_R2	7	1,27	81,605
6_1212_R3	7	50,8	284,502
6_1212_R3	7	15,2	284,502
6_1212_R3	7	1,27	284,502
8_1222_R1	7	50,8	284,502
8_1222_R1	7	15,2	284,502
8_1222_R1	7	1,27	284,502
8_1222_R2	7	50,8	284,502
8_1222_R2	7	15,2	284,502
8_1222_R2	7	1,27	284,502
8_1222_R3	7	50,8	63,917
8_1222_R3	7	15,2	65,537
8_1222_R3	7	1,27	57,723
9_2111_R1	7	50,8	80,078
9_2111_R1	7	15,2	75,39
9_2111_R1	7	1,27	95,71
9_2111_R2	7	50,8	284,502
9_2111_R2	7	15,2	284,502
9_2111_R2	7	1,27	284,502
9_2111_R3	7	50,8	72,218
9_2111_R3	7	15,2	92,939
9_2111_R3	7	1,27	86,602

Probeta	Temperatura	Velocidad	Módulo promedio (Mpa)
1_1111_R1	24	50,8	72,849
1_1111_R1	24	15,2	77,233
1_1111_R1	24	1,27	82,905
1_1111_R2	24	50,8	284,502
1_1111_R2	24	15,2	284,502
1_1111_R2	24	1,27	284,502
1_1111_R3	24	50,8	79,939
1_1111_R3	24	15,2	74,084
1_1111_R3	24	1,27	77,761
6_1212_R1	24	50,8	284,502
6_1212_R1	24	15,2	284,502
6_1212_R1	24	1,27	284,502
6_1212_R2	24	50,8	90,758
6_1212_R2	24	15,2	82,08
6_1212_R2	24	1,27	93,925
6_1212_R3	24	50,8	284,502
6_1212_R3	24	15,2	284,502
6_1212_R3	24	1,27	284,502
8_1222_R1	24	50,8	284,502
8_1222_R1	24	15,2	284,502
8_1222_R1	24	1,27	284,502
8_1222_R2	24	50,8	284,502
8_1222_R2	24	15,2	284,502
8_1222_R2	24	1,27	284,502
8_1222_R3	24	50,8	86,814
8_1222_R3	24	15,2	82,36
8_1222_R3	24	1,27	69,233
9_2111_R1	24	50,8	100,271
9_2111_R1	24	15,2	95,348
9_2111_R1	24	1,27	83,658
9_2111_R2	24	50,8	284,502
9_2111_R2	24	15,2	284,502
9_2111_R2	24	1,27	284,502
9_2111_R3	24	50,8	92,138
9_2111_R3	24	15,2	86,313
9_2111_R3	24	1,27	77,305

Probeta	Temperatura	Velocidad	Módulo promedio (Mpa)
1_1111_R1	35	50,8	86,253
1_1111_R1	35	15,2	96,398
1_1111_R1	35	1,27	88,996
1_1111_R2	35	50,8	92,012
1_1111_R2	35	15,2	96,641
1_1111_R2	35	1,27	85,686
1_1111_R3	35	50,8	64,103
1_1111_R3	35	15,2	70,469
1_1111_R3	35	1,27	88,326
6_1212_R1	35	50,8	59,25
6_1212_R1	35	15,2	61,058
6_1212_R1	35	1,27	6,021
6_1212_R2	35	50,8	70,024
6_1212_R2	35	15,2	59,963
6_1212_R2	35	1,27	74,015
6_1212_R3	35	50,8	68,056
6_1212_R3	35	15,2	55,627
6_1212_R3	35	1,27	76,249
8_1222_R1	35	50,8	86,662
8_1222_R1	35	15,2	98,219
8_1222_R1	35	1,27	107,175
8_1222_R2	35	50,8	92,012
8_1222_R2	35	15,2	96,641
8_1222_R2	35	1,27	85,686
8_1222_R3	35	50,8	50,742
8_1222_R3	35	15,2	38,841
8_1222_R3	35	1,27	46,006
9_2111_R1	35	50,8	70,968
9_2111_R1	35	15,2	76,962
9_2111_R1	35	1,27	72,855
9_2111_R2	35	50,8	92,012
9_2111_R2	35	15,2	96,641
9_2111_R2	35	1,27	85,686
9_2111_R3	35	50,8	92,995
9_2111_R3	35	15,2	129,428
9_2111_R3	35	1,27	72,196

Probeta	Temperatura	Velocidad	Módulo promedio
10_2112_R1	7	50,8	77,24
10_2112_R1	7	15,2	66,548
10_2112_R1	7	1,27	69,696
10_2112_R2	7	50,8	51,432
10_2112_R2	7	15,2	60,476
10_2112_R2	7	1,27	65,099
10_2112_R3	7	50,8	84,568
14_2212_R1	7	50,8	72,458
14_2212_R1	7	15,2	80,779
14_2212_R1	7	1,27	88,968
14_2212_R2	7	50,8	80,379
14_2212_R2	7	15,2	95,445
14_2212_R2	7	1,27	109,468
14_2212_R3	7	50,8	60,561
14_2212_R3	7	15,2	114,825
14_2212_R3	7	1,27	99,178
16_2222_R1	7	50,8	88,41
16_2222_R1	7	15,2	95,154
16_2222_R1	7	1,27	112,334
16_2222_R2	7	50,8	70,133
16_2222_R2	7	15,2	69,249
16_2222_R2	7	1,27	91,113
16_2222_R3	7	50,8	284,502
16_2222_R3	7	15,2	284,502
16_2222_R3	7	1,27	284,502
17_3111_R1	7	50,8	42,361
17_3111_R1	7	15,2	43,612
17_3111_R1	7	1,27	43,543
17_3111_R2	7	50,8	68,709
17_3111_R2	7	15,2	70,357
17_3111_R2	7	1,27	106,367
17_3111_R3	7	50,8	76,406
17_3111_R3	7	15,2	76,833
17_3111_R3	7	1,27	93,113

Probeta	Temperatura	Velocidad	Módulo promedio
10_2112_R1	24	50,8	127,676
10_2112_R1	24	15,2	96,054
10_2112_R1	24	1,27	97,708
10_2112_R2	24	50,8	83,107
10_2112_R2	24	15,2	85,378
10_2112_R2	24	1,27	62,552
10_2112_R3	24	50,8	62,371
14_2212_R1	24	50,8	60,998
14_2212_R1	24	15,2	55,107
14_2212_R1	24	1,27	57,852
14_2212_R2	24	50,8	78,856
14_2212_R2	24	15,2	85,456
14_2212_R2	24	1,27	84,322
14_2212_R3	24	50,8	80,181
14_2212_R3	24	15,2	78,552
14_2212_R3	24	1,27	89,187
16_2222_R1	24	50,8	62,785
16_2222_R1	24	15,2	69,401
16_2222_R1	24	1,27	55,417
16_2222_R2	24	50,8	53,514
16_2222_R2	24	15,2	65,953
16_2222_R2	24	1,27	59,86
16_2222_R3	24	50,8	284,502
16_2222_R3	24	15,2	284,502
16_2222_R3	24	1,27	284,502
17_3111_R1	24	50,8	79,675
17_3111_R1	24	15,2	62,841
17_3111_R1	24	1,27	51,953
17_3111_R2	24	50,8	83,385
17_3111_R2	24	15,2	51,52
17_3111_R2	24	1,27	56,961
17_3111_R3	24	50,8	129,641
17_3111_R3	24	15,2	101,094
17_3111_R3	24	1,27	81,664

Probeta	Temperatura	Velocidad	Módulo promedio
10_2112_R1	35	50,8	44,71
10_2112_R1	35	15,2	64,808
10_2112_R1	35	1,27	54,47
10_2112_R2	35	50,8	93,756
10_2112_R2	35	15,2	67,085
10_2112_R2	35	1,27	81,918
10_2112_R3	35	50,8	70,747
14_2212_R1	35	50,8	71,976
14_2212_R1	35	15,2	46,428
14_2212_R1	35	1,27	64,051
14_2212_R2	35	50,8	73,372
14_2212_R2	35	15,2	66,862
14_2212_R2	35	1,27	77,044
14_2212_R3	35	50,8	138,628
14_2212_R3	35	15,2	111,885
14_2212_R3	35	1,27	90,235
16_2222_R1	35	50,8	99,329
16_2222_R1	35	15,2	60,992
16_2222_R1	35	1,27	71,365
16_2222_R2	35	50,8	59,134
16_2222_R2	35	15,2	53,153
16_2222_R2	35	1,27	53,342
16_2222_R3	35	50,8	172,683
16_2222_R3	35	15,2	127,813
16_2222_R3	35	1,27	147,647
17_3111_R1	35	50,8	55,28
17_3111_R1	35	15,2	48,295
17_3111_R1	35	1,27	61,38
17_3111_R2	35	50,8	44,88
17_3111_R2	35	15,2	57,299
17_3111_R2	35	1,27	49,903
17_3111_R3	35	50,8	64,255
17_3111_R3	35	15,2	78,311
17_3111_R3	35	1,27	61,072

Probeta	Temperatura	Velocidad	Módulo promedio
18_3112_R1	7	50,8	284,502
18_3112_R1	7	15,2	284,502
18_3112_R1	7	1,27	284,502
18_3112_R2	7	50,8	40,724
18_3112_R2	7	15,2	54,365
18_3112_R2	7	1,27	44,94
18_3112_R3	7	50,8	57,376
18_3112_R3	7	15,2	82,547
18_3112_R3	7	1,27	107,936
19_3121_R1	7	50,8	85,515
19_3121_R1	7	15,2	58,364
19_3121_R1	7	1,27	78,994
19_3121_R2	7	50,8	70,387
19_3121_R2	7	15,2	62,682
19_3121_R2	7	1,27	72,905
19_3121_R3	7	50,8	70,37
21_3211_R1	7	50,8	86,662
21_3211_R1	7	15,2	98,219
21_3211_R1	7	1,27	107,175
21_3211_R2	7	50,8	92,012
21_3211_R2	7	15,2	96,641
21_3211_R2	7	1,27	85,686
21_3211_R3	7	50,8	172,683
21_3211_R3	7	15,2	127,813
21_3211_R3	7	1,27	147,647
22_3212_R1	7	50,8	87,31
22_3212_R1	7	15,2	91,41
22_3212_R1	7	1,27	85,686
22_3212_R2	7	50,8	87,065
22_3212_R2	7	15,2	98,629
22_3212_R2	7	1,27	89,5
22_3212_R3	7	50,8	144,131
22_3212_R3	7	15,2	127,813
22_3212_R3	7	1,27	150,007

Probeta	Temperatura	Velocidad	Módulo promedio
18_3112_R1	24	50,8	284,502
18_3112_R1	24	15,2	284,502
18_3112_R1	24	1,27	284,502
18_3112_R2	24	50,8	95,2
18_3112_R2	24	15,2	88,713
18_3112_R2	24	1,27	65,669
18_3112_R3	24	50,8	69,697
18_3112_R3	24	15,2	71,184
18_3112_R3	24	1,27	52,962
19_3121_R1	24	50,8	102,629
19_3121_R1	24	15,2	69,853
19_3121_R1	24	1,27	61,743
19_3121_R2	24	50,8	68,823
19_3121_R2	24	15,2	71,571
19_3121_R2	24	1,27	70,958
19_3121_R3	24	50,8	91,043
21_3211_R1	24	50,8	154,274
21_3211_R1	24	15,2	106,953
21_3211_R1	24	1,27	98,882
21_3211_R2	24	50,8	218,775
21_3211_R2	24	15,2	147,341
21_3211_R2	24	1,27	159,838
21_3211_R3	24	50,8	205,828
21_3211_R3	24	15,2	109,516
21_3211_R3	24	1,27	104,411
22_3212_R1	24	50,8	129,291
22_3212_R1	24	15,2	106,619
22_3212_R1	24	1,27	85,982
22_3212_R2	24	50,8	88,464
22_3212_R2	24	15,2	75,825
22_3212_R2	24	1,27	65,668
22_3212_R3	24	50,8	146,401
22_3212_R3	24	15,2	150,697
22_3212_R3	24	1,27	95,404

Probeta	Temperatura	Velocidad	Módulo promedio
18_3112_R1	35	50,8	86,662
18_3112_R1	35	15,2	98,219
18_3112_R1	35	1,27	107,175
18_3112_R2	35	50,8	69,249
18_3112_R2	35	15,2	47,509
18_3112_R2	35	1,27	55,444
18_3112_R3	35	50,8	50,565
18_3112_R3	35	15,2	57,878
18_3112_R3	35	1,27	63,029
19_3121_R1	35	50,8	87,699
19_3121_R1	35	15,2	62,26
19_3121_R1	35	1,27	54,816
19_3121_R2	35	50,8	46,077
19_3121_R2	35	15,2	64,41
19_3121_R2	35	1,27	50,545
19_3121_R3	35	50,8	72,955
21_3211_R1	35	50,8	72,803
21_3211_R1	35	15,2	62,19
21_3211_R1	35	1,27	52,912
21_3211_R2	35	50,8	48,432
21_3211_R2	35	15,2	53,032
21_3211_R2	35	1,27	61,211
21_3211_R3	35	50,8	74,141
21_3211_R3	35	15,2	54,892
21_3211_R3	35	1,27	59,402
22_3212_R1	35	50,8	96,641
22_3212_R1	35	15,2	72,913
22_3212_R1	35	1,27	53,832
22_3212_R2	35	50,8	50,127
22_3212_R2	35	15,2	68,379
22_3212_R2	35	1,27	55,55
22_3212_R3	35	50,8	103,279
22_3212_R3	35	15,2	58,976
22_3212_R3	35	1,27	58,479

Anexo B: Módulo de Rigidez con el Marco de Carga de la MTS-810

TABLA 7. MEZCLA DENSA EN CALIENTE (MDC-2)

Código	Temperatura	VELOCIDAD (Modulo (MPa)	
1_1111_R1	7	1	681,9934017
1_1111_R1	7	7	776,7415917
1_1111_R1	7	15	917,5436067
1_1111_R1	19	1	429,264455
1_1111_R1	19	7	601,33556
1_1111_R1	19	15	698,9705033
1_1111_R1	35	1	292,8757417
1_1111_R1	35	7	433,1663433
1_1111_R1	35	15	511,21416
1_1111_R2	7	1	579,8055633
1_1111_R2	7	7	670,3989267
1_1111_R2	7	15	765,0277533
1_1111_R2	19	1	337,2264867
1_1111_R2	19	7	526,36978
1_1111_R2	19	15	621,93008
1_1111_R2	35	1	250,2175033
1_1111_R2	35	7	356,9470467
1_1111_R2	35	15	443,9371767
1_1111_R3	7	1	784,18124
1_1111_R3	7	7	883,0842567
1_1111_R3	7	15	1070,05946
1_1111_R3	19	1	521,3024233
1_1111_R3	19	7	676,30134
1_1111_R3	19	15	776,0109267
1_1111_R3	35	1	335,53398
1_1111_R3	35	7	509,38564
1_1111_R3	35	15	578,4911433

TABLA 8. MEZCLA ABIERTA EN CALIENTE (M1)

Código	Temperatura	VELOCIDAD (Modulo (MPa)	
3_1121_R1	7	1	251,7369548
3_1121_R1	7	7	573,1874846
3_1121_R1	7	15	805,6832507
3_1121_R1	19	1	212,0246852
3_1121_R1	19	7	363,3873835
3_1121_R1	19	15	462,120631
3_1121_R1	35	1	109,1833176
3_1121_R1	35	7	180,0673505
3_1121_R1	35	15	210,3417091
3_1121_R2	7	1	503,2467111
3_1121_R2	7	7	852,287506
3_1121_R2	7	15	929,5685431
3_1121_R2	19	1	240,063769
3_1121_R2	19	7	423,0830141
3_1121_R2	19	15	511,0313389
3_1121_R2	35	1	133,9648854
3_1121_R2	35	7	215,6025828
3_1121_R2	35	15	252,0738648
3_1121_R3	7	1	827,7884674
3_1121_R3	7	7	931,2796001
3_1121_R3	7	15	952,4699859
3_1121_R3	19	1	291,1524863
3_1121_R3	19	7	437,5210549
3_1121_R3	19	15	530,3026175
3_1121_R3	35	1	167,6287937
3_1121_R3	35	7	235,3952863
3_1121_R3	35	15	279,4950307

TABLA 7. MEZCLA DENSA EN CALIENTE (MDC-2)

Código	Temperatura	VELOCIDAD (Modulo (MPa)	
1_1111_R3	35	15	578,4911433
2_1112_R1	7	1	692,5283149
2_1112_R1	7	7	786,9514874
2_1112_R1	7	15	822,9531277
2_1112_R1	19	1	439,3847611
2_1112_R1	19	7	540,1609062
2_1112_R1	19	15	589,1320457
2_1112_R1	35	1	312,1365045
2_1112_R1	35	7	407,6711791
2_1112_R1	35	15	438,5462338
2_1112_R2	7	1	576,0594754
2_1112_R2	7	7	665,7569562
2_1112_R2	7	15	755,2232722
2_1112_R2	19	1	351,1075543
2_1112_R2	19	7	472,2151666
2_1112_R2	19	15	503,085151
2_1112_R2	35	1	251,6071321
2_1112_R2	35	7	342,5978884
2_1112_R2	35	15	385,0504864
2_1112_R3	7	1	484,2970028
2_1112_R3	7	7	524,1760458
2_1112_R3	7	15	546,7332078
2_1112_R3	19	1	353,5227589
2_1112_R3	19	7	364,6185576
2_1112_R3	19	15	381,0507989
2_1112_R3	35	1	284,0435084
2_1112_R3	35	7	321,4490939

TABLA 8. MEZCLA ABIERTA EN CALIENTE (M1)

Código	Temperatura	VELOCIDAD (Modulo (MPa)	
3_1121_R3	35	15	279,4950307
4_1122_R1	7	1	410,6464971
4_1122_R1	7	7	569,1057383
4_1122_R1	7	15	652,5170559
4_1122_R1	19	1	226,2968707
4_1122_R1	19	7	335,5728907
4_1122_R1	19	15	409,7089803
4_1122_R1	35	1	128,131651
4_1122_R1	35	7	185,3361487
4_1122_R1	35	15	212,2425349
4_1122_R2	7	1	750,3287645
4_1122_R2	7	7	490,8851932
4_1122_R2	7	15	695,8426377
4_1122_R2	19	1	262,5062913
4_1122_R2	19	7	405,3058816
4_1122_R2	19	15	503,2386612
4_1122_R2	35	1	152,5942799
4_1122_R2	35	7	219,5883771
4_1122_R2	35	15	259,7411732
4_1122_R3	7	1	633,2964321
4_1122_R3	7	7	796,1151116
4_1122_R3	7	15	888,4828312
4_1122_R3	19	1	263,5264776
4_1122_R3	19	7	379,2228241
4_1122_R3	19	15	426,7478907
4_1122_R3	35	1	136,8947142
4_1122_R3	35	7	200,0946921

TABLA 7. MEZCLA DENSA EN CALIENTE (MDC-2)

Código	Temperatura	VELOCIDAD (Modulo (MPa)	
2_1112_R3	35	15	347,1132512	
5_1211_R1	7	1	719,5078383	
5_1211_R1	7	7	935,4308867	
5_1211_R1	7	15	987,6618383	
5_1211_R1	19	1	381,7297783	
5_1211_R1	19	7	603,28276	
5_1211_R1	19	15	697,14551	
5_1211_R1	35	1	206,95435	
5_1211_R1	35	7	325,0623117	
5_1211_R1	35	15	433,547245	
5_1211_R2	7	1	799,3506033	
5_1211_R2	7	7	967,1282733	
5_1211_R2	7	15	978,61947	
5_1211_R2	19	1	414,99489	
5_1211_R2	19	7	618,7033	
5_1211_R2	19	15	714,38953	
5_1211_R2	35	1	227,84175	
5_1211_R2	35	7	344,70638	
5_1211_R2	35	15	458,0742267	
5_1211_R3	7	1	639,6650733	
5_1211_R3	7	7	903,7335	
5_1211_R3	7	15	996,7042067	
5_1211_R3	19	1	348,4646667	
5_1211_R3	19	7	587,86222	
5_1211_R3	19	15	679,90149	
5_1211_R3	35	1	186,06695	
5_1211_R3	35	7	305,4182433	

TABLA 8. MEZCLA ABIERTA EN CALIENTE (M1)

Código	Temperatura	VELOCIDAD (Modulo (MPa)	
4_1122_R3	35	15	231,4810924	
7_1221_R1	7	1	465,4178269	
7_1221_R1	7	7	651,3659986	
7_1221_R1	7	15	741,0278185	
7_1221_R1	19	1	204,4195089	
7_1221_R1	19	7	349,5415121	
7_1221_R1	19	15	433,6932831	
7_1221_R1	35	1	105,8580641	
7_1221_R1	35	7	141,4661603	
7_1221_R1	35	15	180,6411473	
7_1221_R2	7	1	451,091692	
7_1221_R2	7	7	598,7217157	
7_1221_R2	7	15	667,1897352	
7_1221_R2	19	1	170,6231451	
7_1221_R2	19	7	278,9539384	
7_1221_R2	19	15	365,2139716	
7_1221_R2	35	1	93,35983647	
7_1221_R2	35	7	142,9851914	
7_1221_R2	35	15	171,7290852	
7_1221_R3	7	1	454,3200958	
7_1221_R3	7	7	622,5421106	
7_1221_R3	7	15	689,5269273	
7_1221_R3	19	1	160,365972	
7_1221_R3	19	7	330,090479	
7_1221_R3	19	15	415,97512	
7_1221_R3	35	1	90,40636157	
7_1221_R3	35	7	139,8300627	

TABLA 7. MEZCLA DENSA EN CALIENTE (MDC-2)

Código	Temperatura	VELOCIDAD (Modulo (MPa)	
5_1211_R3	35	15	409,0202633	
6_1212_R1	7	1	903,3231433	
6_1212_R1	7	7	1065,560238	
6_1212_R1	7	15	1066,902417	
6_1212_R1	19	1	416,4464366	
6_1212_R1	19	7	663,079591	
6_1212_R1	19	15	688,9246714	
6_1212_R1	35	1	252,4393542	
6_1212_R1	35	7	370,3449367	
6_1212_R1	35	15	426,7135576	
6_1212_R2	7	1	861,9920922	
6_1212_R2	7	7	1081,274468	
6_1212_R2	7	15	1151,313725	
6_1212_R2	19	1	574,4519789	
6_1212_R2	19	7	817,1755743	
6_1212_R2	19	15	904,0376583	
6_1212_R2	35	1	279,4945212	
6_1212_R2	35	7	362,5624029	
6_1212_R2	35	15	443,7047327	
6_1212_R3	7	1	882,6576178	
6_1212_R3	7	7	1073,417353	
6_1212_R3	7	15	1109,108071	
6_1212_R3	19	1	495,4492078	
6_1212_R3	19	7	740,1275826	
6_1212_R3	19	15	796,4811648	
6_1212_R3	35	1	265,9669377	
6_1212_R3	35	7	366,4536698	

TABLA 8. MEZCLA ABIERTA EN CALIENTE (M1)

Código	Temperatura	VELOCIDAD (Modulo (MPa)	
7_1221_R3	35	15	165,6963677	
8_1222_R1	7	1	634,7192619	
8_1222_R1	7	7	892,5814509	
8_1222_R1	7	15	924,07882	
8_1222_R1	19	1	241,5690615	
8_1222_R1	19	7	463,7608134	
8_1222_R1	19	15	544,1739956	
8_1222_R1	35	1	119,2704939	
8_1222_R1	35	7	193,4206033	
8_1222_R1	35	15	233,9379104	
8_1222_R2	7	1	750,9663157	
8_1222_R2	7	7	927,9806187	
8_1222_R2	7	15	994,5075359	
8_1222_R2	19	1	288,1602242	
8_1222_R2	19	7	521,5125224	
8_1222_R2	19	15	604,832196	
8_1222_R2	35	1	138,1488487	
8_1222_R2	35	7	217,524345	
8_1222_R2	35	15	263,1326353	
8_1222_R3	7	1	867,2133695	
8_1222_R3	7	7	963,3797865	
8_1222_R3	7	15	1064,936252	
8_1222_R3	19	1	334,7513869	
8_1222_R3	19	7	579,2642315	
8_1222_R3	19	15	665,4903963	
8_1222_R3	35	1	157,0272035	
8_1222_R3	35	7	241,6280866	

TABLA 7. MEZCLA DENSA EN CALIENTE (MDC-2)

Código	Temperatura	VELOCIDAD (Modulo (MPa)	
6_1212_R3	35	15	435,2091451
9_2111_R1	7	1	897,8351299
9_2111_R1	7	7	999,6999306
9_2111_R1	7	15	1028,371426
9_2111_R1	19	1	635,1566657
9_2111_R1	19	7	825,387279
9_2111_R1	19	15	877,6630302
9_2111_R1	35	1	294,738727
9_2111_R1	35	7	462,2692596
9_2111_R1	35	15	492,6991706
9_2111_R2	7	1	935,993536
9_2111_R2	7	7	1023,78007
9_2111_R2	7	15	1043,069554
9_2111_R2	19	1	649,7856791
9_2111_R2	19	7	776,9821553
9_2111_R2	19	15	857,2846747
9_2111_R2	35	1	344,8185011
9_2111_R2	35	7	485,9455871
9_2111_R2	35	15	487,8842847
9_2111_R3	7	1	970,0880266
9_2111_R3	7	7	1083,033508
9_2111_R3	7	15	1089,973659
9_2111_R3	19	1	622,5271486
9_2111_R3	19	7	796,6204904
9_2111_R3	19	15	844,22392
9_2111_R3	35	1	265,3802733

TABLA 8. MEZCLA ABIERTA EN CALIENTE (M1)

Código	Temperatura	VELOCIDAD (Modulo (MPa)	
8_1222_R3	35	15	292,3273603
11_2121_R1	7	1	783,427654
11_2121_R1	7	7	896,638504
11_2121_R1	7	15	1038,144965
11_2121_R1	19	1	609,2019322
11_2121_R1	19	7	611,2516856
11_2121_R1	19	15	721,6098886
11_2121_R1	35	1	275,3677581
11_2121_R1	35	7	417,2494596
11_2121_R1	35	15	457,032996
11_2121_R2	7	1	722,72824
11_2121_R2	7	7	777,4138115
11_2121_R2	7	15	859,1915435
11_2121_R2	19	1	477,3852019
11_2121_R2	19	7	560,8528477
11_2121_R2	19	15	601,7993731
11_2121_R2	35	1	222,0344356
11_2121_R2	35	7	288,0536384
11_2121_R2	35	15	300,0367593
11_2121_R3	7	1	966,8220103
11_2121_R3	7	7	817,6185267
11_2121_R3	7	15	636,5847003
11_2121_R3	19	1	542,0877979
11_2121_R3	19	7	534,5694007
11_2121_R3	19	15	652,3897093
11_2121_R3	35	1	223,2570372

TABLA 7. MEZCLA DENSA EN CALIENTE (MDC-2)

Código	Temperatura	VELOCIDAD (Modulo (MPa)	
9_2111_R3	35	7	404,4246284
9_2111_R3	35	15	447,9522807
10_2112_R1	7	1	738,6786854
10_2112_R1	7	7	799,7361134
10_2112_R1	7	15	859,581091
10_2112_R1	19	1	544,6145309
10_2112_R1	19	7	644,7323628
10_2112_R1	19	15	727,7354181
10_2112_R1	35	1	304,5627684
10_2112_R1	35	7	403,6171848
10_2112_R1	35	15	449,8242053
10_2112_R2	7	1	810,3398527
10_2112_R2	7	7	831,1404684
10_2112_R2	7	15	883,7638692
10_2112_R2	19	1	581,0280379
10_2112_R2	19	7	706,8351228
10_2112_R2	19	15	807,9819779
10_2112_R2	35	1	311,1747594
10_2112_R2	35	7	412,9561958
10_2112_R2	35	15	477,397485
10_2112_R3	7	1	819,1152161
10_2112_R3	7	7	838,3397868
10_2112_R3	7	15	901,326007
10_2112_R3	19	1	494,3766835
10_2112_R3	19	7	598,8360827
10_2112_R3	19	15	637,1344968
10_2112_R3	35	1	270,0766687

TABLA 8. MEZCLA ABIERTA EN CALIENTE (M1)

Código	Temperatura	VELOCIDAD (Modulo (MPa)	
11_2121_R3	35	7	275,9384014
11_2121_R3	35	15	378,4892443
12_2122_R1	7	1	752,5529522
12_2122_R1	7	7	886,3770622
12_2122_R1	7	15	976,3354884
12_2122_R1	19	1	468,5612466
12_2122_R1	19	7	664,6880817
12_2122_R1	19	15	670,3152773
12_2122_R1	35	1	233,4556844
12_2122_R1	35	7	320,4217168
12_2122_R1	35	15	388,2025987
12_2122_R2	7	1	735,8821627
12_2122_R2	7	7	875,6032223
12_2122_R2	7	15	976,3354884
12_2122_R2	19	1	475,6720095
12_2122_R2	19	7	622,9292249
12_2122_R2	19	15	730,586071
12_2122_R2	35	1	194,5565187
12_2122_R2	35	7	248,4556763
12_2122_R2	35	15	313,8828033
12_2122_R3	7	1	584,8100952
12_2122_R3	7	7	861,2193937
12_2122_R3	7	15	919,3877675
12_2122_R3	19	1	468,9949518
12_2122_R3	19	7	662,2750118
12_2122_R3	19	15	691,9635329
12_2122_R3	35	1	179,7880252

TABLA 7. MEZCLA DENSA EN CALIENTE (MDC-2)

Código	Temperatura	VELOCIDAD (Modulo (MPa)	
10_2112_R3	35	15	439,100891
13_2211_R1	7	1	963,6006229
13_2211_R1	7	7	1072,919537
13_2211_R1	7	15	1118,085971
13_2211_R1	19	1	417,366541
13_2211_R1	19	7	635,3747336
13_2211_R1	19	15	730,5059066
13_2211_R1	35	1	227,484556
13_2211_R1	35	7	359,7861712
13_2211_R1	35	15	431,8160453
13_2211_R2	7	1	852,1049335
13_2211_R2	7	7	1022,472924
13_2211_R2	7	15	1110,002945
13_2211_R2	19	1	419,9080836
13_2211_R2	19	7	619,2402667
13_2211_R2	19	15	678,9695684
13_2211_R2	35	1	287,9547039
13_2211_R2	35	7	429,0004174
13_2211_R2	35	15	509,1231404
13_2211_R3	7	1	423,9952974
13_2211_R3	7	7	849,9089511
13_2211_R3	7	15	1022,328356
13_2211_R3	19	1	457,4790753
13_2211_R3	19	7	599,1737694
13_2211_R3	19	15	651,9512241
13_2211_R3	35	1	302,0431384
13_2211_R3	35	7	396,5901802

TABLA 8. MEZCLA ABIERTA EN CALIENTE (M1)

Código	Temperatura	VELOCIDAD (Modulo (MPa)	
12_2122_R3	35	15	367,1243651
15_2221_R1	7	1	429,9305278
15_2221_R1	7	7	784,4313565
15_2221_R1	7	15	963,7025799
15_2221_R1	19	1	327,9114758
15_2221_R1	19	7	471,4457418
15_2221_R1	19	15	623,4575255
15_2221_R1	35	1	134,042305
15_2221_R1	35	7	206,8118581
15_2221_R1	35	15	246,0736488
15_2221_R2	7	1	702,6647509
15_2221_R2	7	7	924,0379794
15_2221_R2	7	15	1026,511514
15_2221_R2	19	1	315,6781225
15_2221_R2	19	7	477,2521664
15_2221_R2	19	15	613,9202553
15_2221_R2	35	1	132,4100473
15_2221_R2	35	7	209,685557
15_2221_R2	35	15	271,537297
15_2221_R3	7	1	735,2226021
15_2221_R3	7	7	787,2046376
15_2221_R3	7	15	1170,137931
15_2221_R3	19	1	352,3242811
15_2221_R3	19	7	553,5679733
15_2221_R3	19	15	676,1395521
15_2221_R3	35	1	126,1943392
15_2221_R3	35	7	209,7647454

TABLA 7. MEZCLA DENSA EN CALIENTE (MDC-2)

Código	Temperatura	VELOCIDAD (Modulo (MPa)	
13_2211_R3	35	15	405,0685593
14_2212_R1	7	1	977,5766667
14_2212_R1	7	7	1008,4
14_2212_R1	7	15	1192,43
14_2212_R1	19	1	530,8033333
14_2212_R1	19	7	813,97
14_2212_R1	19	15	883,35
14_2212_R1	35	1	266,7433333
14_2212_R1	35	7	379,2566667
14_2212_R1	35	15	433,9033333
14_2212_R2	7	1	1044,76
14_2212_R2	7	7	1144,686667
14_2212_R2	7	15	1213,04
14_2212_R2	19	1	561,36
14_2212_R2	19	7	668,3533333
14_2212_R2	19	15	764,32
14_2212_R2	35	1	263,7333333
14_2212_R2	35	7	397,9266667
14_2212_R2	35	15	451,1466667
14_2212_R3	7	1	962,8433333
14_2212_R3	7	7	1000,793333
14_2212_R3	7	15	1192,566667
14_2212_R3	19	1	605,1133333
14_2212_R3	19	7	754,69
14_2212_R3	19	15	877,0166667
14_2212_R3	35	1	273,55
14_2212_R3	35	7	437,8233333

TABLA 8. MEZCLA ABIERTA EN CALIENTE (M1)

Código	Temperatura	VELOCIDAD (Modulo (MPa)	
15_2221_R3	35	15	235,3104196
16_2222_R1	7	1	1038,76
16_2222_R1	7	7	1172,71
16_2222_R1	7	15	1161,676667
16_2222_R1	19	1	516,53
16_2222_R1	19	7	750,65
16_2222_R1	19	15	868,97
16_2222_R1	35	1	260,52
16_2222_R1	35	7	365,3433333
16_2222_R1	35	15	427,6766667
16_2222_R2	7	1	998,11
16_2222_R2	7	7	1112,556667
16_2222_R2	7	15	1080,57
16_2222_R2	19	1	543,82
16_2222_R2	19	7	771,9466667
16_2222_R2	19	15	858,7333333
16_2222_R2	35	1	282,0666667
16_2222_R2	35	7	360,0666667
16_2222_R2	35	15	420,2533333
16_2222_R3	7	1	869,5766667
16_2222_R3	7	7	1003,78
16_2222_R3	7	15	984,77
16_2222_R3	19	1	504,9833333
16_2222_R3	19	7	705,1433333
16_2222_R3	19	15	791,3766667
16_2222_R3	35	1	240,8166667
16_2222_R3	35	7	344,62

TABLA 7. MEZCLA DENSA EN CALIENTE (MDC-2)

Código	Temperatura	VELOCIDAD (Modulo (MPa)	
14_2212_R3	35	15	484,2366667
17_3111_R1	7	1	925,4833333
17_3111_R1	7	7	1090,8833333
17_3111_R1	7	15	1187
17_3111_R1	19	1	561,7233333
17_3111_R1	19	7	813,8233333
17_3111_R1	19	15	922,62
17_3111_R1	35	1	259,8886667
17_3111_R1	35	7	391,2133333
17_3111_R1	35	15	441,6733333
17_3111_R2	7	1	859,0966667
17_3111_R2	7	7	1110,8433333
17_3111_R2	7	15	1228,37
17_3111_R2	19	1	559,5566667
17_3111_R2	19	7	786,1733333
17_3111_R2	19	15	915,42
17_3111_R2	35	1	227,08
17_3111_R2	35	7	359,7133333
17_3111_R2	35	15	419,7033333
17_3111_R3	7	1	784,5733333
17_3111_R3	7	7	993,1233333
17_3111_R3	7	15	1026,416667
17_3111_R3	19	1	519,1433333
17_3111_R3	19	7	731,1433333
17_3111_R3	19	15	820,0033333
17_3111_R3	35	1	233,6133333
17_3111_R3	35	7	373,09

TABLA 8. MEZCLA ABIERTA EN CALIENTE (M1)

Código	Temperatura	VELOCIDAD (Modulo (MPa)	
16_2222_R3	35	15	393,7033333
19_3121_R1	7	1	619,5166667
19_3121_R1	7	7	842,06
19_3121_R1	7	15	936,0433333
19_3121_R1	19	1	477,65173
19_3121_R1	19	7	592,4133333
19_3121_R1	19	15	668,8
19_3121_R1	35	1	258,5
19_3121_R1	35	7	358,0066667
19_3121_R1	35	15	418,4266667
19_3121_R2	7	1	861,7166667
19_3121_R2	7	7	1044,816667
19_3121_R2	7	15	1140,496667
19_3121_R2	19	1	534,8533333
19_3121_R2	19	7	648,5666667
19_3121_R2	19	15	780,9666667
19_3121_R2	35	1	271,35
19_3121_R2	35	7	394,74
19_3121_R2	35	15	457,8633333
19_3121_R3	7	1	742,0833333
19_3121_R3	7	7	954,3166667
19_3121_R3	7	15	1070,39
19_3121_R3	19	1	451,43
19_3121_R3	19	7	585,42
19_3121_R3	19	15	671,9166667
19_3121_R3	35	1	235,6833333
19_3121_R3	35	7	357,8666667

TABLA 7. MEZCLA DENSA EN CALIENTE (MDC-2)

Código	Temperatura	VELOCIDAD (Modulo (MPa)	
17_3111_R3	35	15	421,8933333	
18_3112_R1	7	1	729,4090767	
18_3112_R1	7	7	926,3353933	
18_3112_R1	7	15	1054,604037	
18_3112_R1	19	1	297,2632667	
18_3112_R1	19	7	538,08006	
18_3112_R1	19	15	593,5123633	
18_3112_R1	35	1	160,61759	
18_3112_R1	35	7	250,7104533	
18_3112_R1	35	15	332,9545567	
18_3112_R2	7	1	918,8649633	
18_3112_R2	7	7	1024,982097	
18_3112_R2	7	15	1381,927347	
18_3112_R2	19	1	359,2418867	
18_3112_R2	19	7	716,3547533	
18_3112_R2	19	15	774,9477667	
18_3112_R2	35	1	172,9515	
18_3112_R2	35	7	297,03071	
18_3112_R2	35	15	321,1908867	
18_3112_R3	7	1	956,2173467	
18_3112_R3	7	7	1094,585637	
18_3112_R3	7	15	1153,91053	
18_3112_R3	19	1	444,2711733	
18_3112_R3	19	7	642,6038133	
18_3112_R3	19	15	809,11543	
18_3112_R3	35	1	204,3179767	
18_3112_R3	35	7	284,1907267	

TABLA 8. MEZCLA ABIERTA EN CALIENTE (M1)

Código	Temperatura	VELOCIDAD (Modulo (MPa)	
19_3121_R3	35	15	428,8566667	
20_3122_R1	7	1	617,9570462	
20_3122_R1	7	7	861,9951359	
20_3122_R1	7	15	986,8280273	
20_3122_R1	19	1	284,8611455	
20_3122_R1	19	7	349,9631835	
20_3122_R1	19	15	560,0590849	
20_3122_R1	35	1	120,0592367	
20_3122_R1	35	7	220,7756124	
20_3122_R1	35	15	270,331624	
20_3122_R2	7	1	586,4138462	
20_3122_R2	7	7	945,961138	
20_3122_R2	7	15	964,939487	
20_3122_R2	19	1	350,7770185	
20_3122_R2	19	7	503,7470345	
20_3122_R2	19	15	618,9316604	
20_3122_R2	35	1	125,8185074	
20_3122_R2	35	7	221,0873042	
20_3122_R2	35	15	257,21593	
20_3122_R3	7	1	460,9540135	
20_3122_R3	7	7	746,4640212	
20_3122_R3	7	15	981,2198834	
20_3122_R3	19	1	368,0550073	
20_3122_R3	19	7	568,3283443	
20_3122_R3	19	15	635,4109334	
20_3122_R3	35	1	138,8384216	
20_3122_R3	35	7	205,658349	

TABLA 7. MEZCLA DENSA EN CALIENTE (MDC-2)

Código	Temperatura	VELOCIDAD (Modulo (MPa)	
18_3112_R3	35	15	361,3185667
21_3211_R1	7	1	860,0033333
21_3211_R1	7	7	933,2666667
21_3211_R1	7	15	1098,5833333
21_3211_R1	19	1	482,4266667
21_3211_R1	19	7	672,3033333
21_3211_R1	19	15	812,88
21_3211_R1	35	1	172,28
21_3211_R1	35	7	268,54
21_3211_R1	35	15	319,58
21_3211_R2	7	1	986,7966667
21_3211_R2	7	7	994,24
21_3211_R2	7	15	1141,676667
21_3211_R2	19	1	548,7166667
21_3211_R2	19	7	761,7033333
21_3211_R2	19	15	823,4
21_3211_R2	35	1	192,65
21_3211_R2	35	7	322,4833333
21_3211_R2	35	15	377,5366667
21_3211_R3	7	1	1028,333333
21_3211_R3	7	7	1119,41
21_3211_R3	7	15	1157,24
21_3211_R3	19	1	536,0833333
21_3211_R3	19	7	791,6366667
21_3211_R3	19	15	835,0066667
21_3211_R3	35	1	203,7966667
21_3211_R3	35	7	317,8166667

TABLA 8. MEZCLA ABIERTA EN CALIENTE (M1)

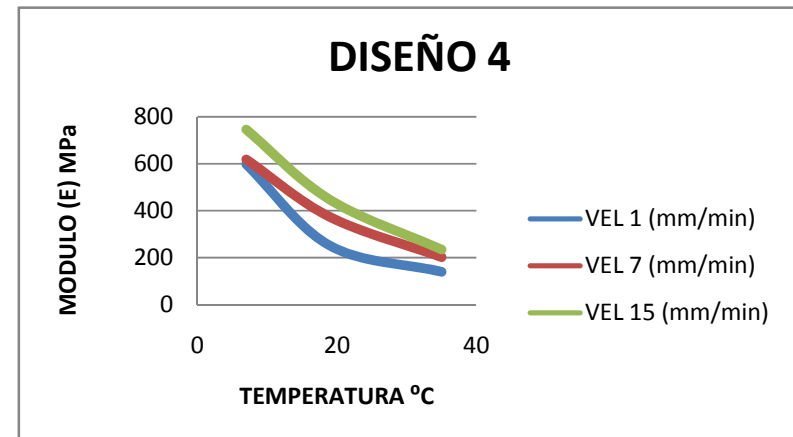
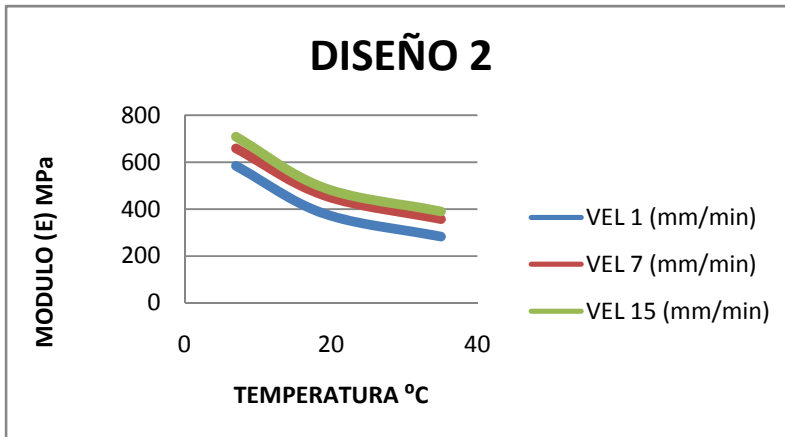
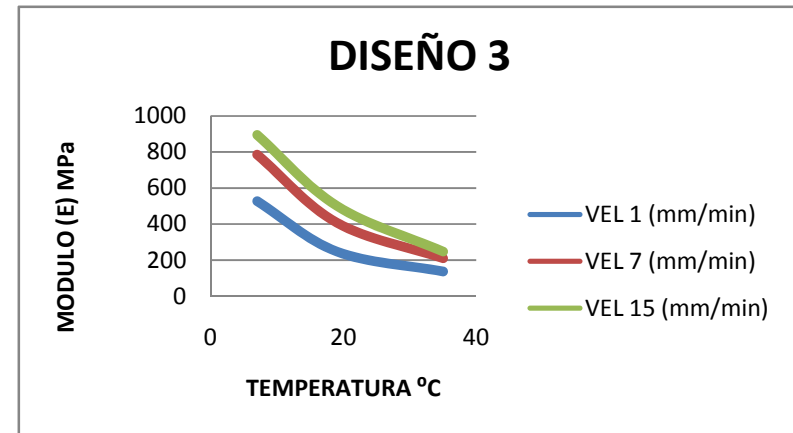
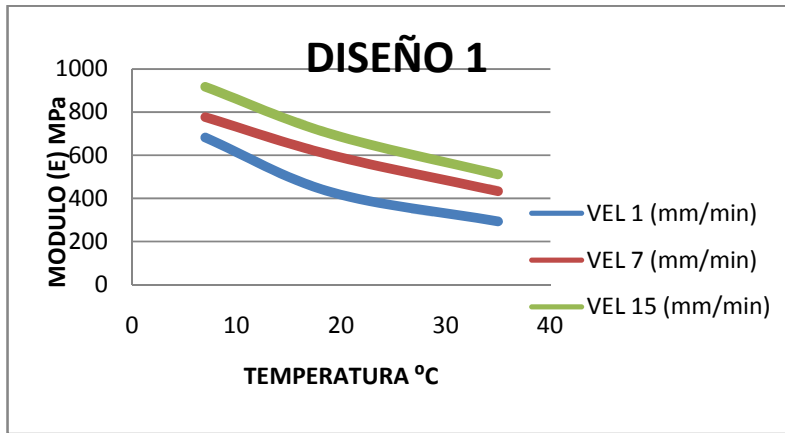
Código	Temperatura	VELOCIDAD (Modulo (MPa)	
20_3122_R3	35	15	257,681761
23-3221_R1	7	1	750,33058
23-3221_R1	7	7	875,7000533
23-3221_R1	7	15	910,4549033
23-3221_R1	19	1	322,7977767
23-3221_R1	19	7	455,9230533
23-3221_R1	19	15	548,3883233
23-3221_R1	35	1	162,72795
23-3221_R1	35	7	249,8226267
23-3221_R1	35	15	298,3981467
23-3221_R2	7	1	422,8484033
23-3221_R2	7	7	777,7273267
23-3221_R2	7	15	868,9053833
23-3221_R2	19	1	248,12529
23-3221_R2	19	7	414,4739
23-3221_R2	19	15	551,7235767
23-3221_R2	35	1	125,1919233
23-3221_R2	35	7	177,75276
23-3221_R2	35	15	239,25735
23-3221_R3	7	1	777,4091367
23-3221_R3	7	7	929,6199
23-3221_R3	7	15	963,8857367
23-3221_R3	19	1	248,5078467
23-3221_R3	19	7	412,4578633
23-3221_R3	19	15	529,3907667
23-3221_R3	35	1	123,5691433
23-3221_R3	35	7	205,4410433

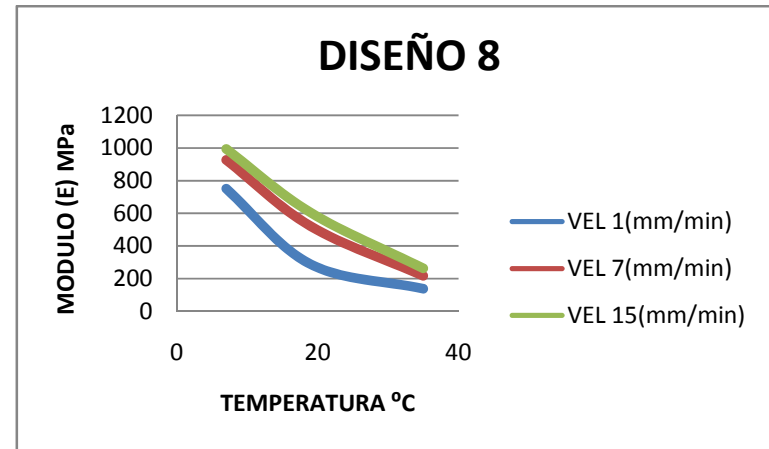
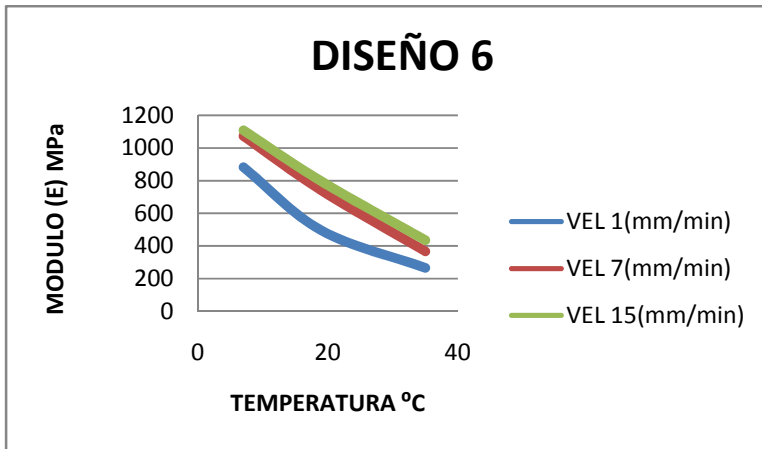
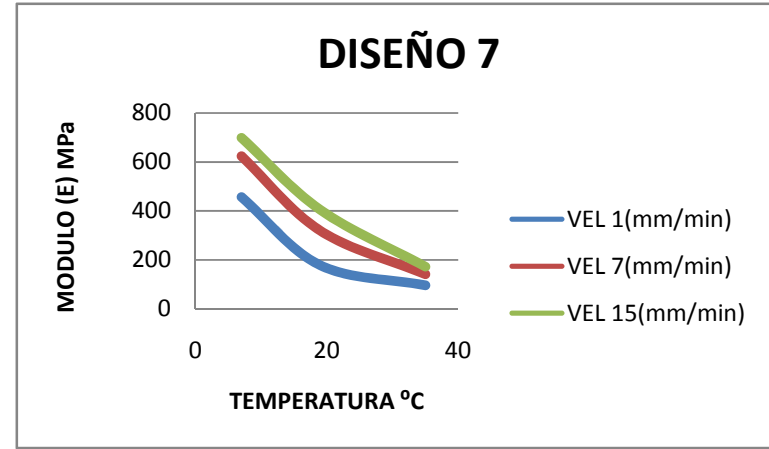
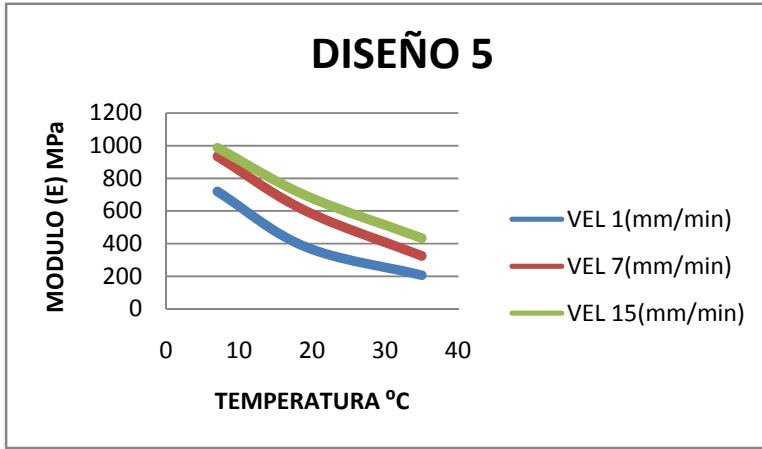
TABLA 7. MEZCLA DENSA EN CALIENTE (MDC-2)

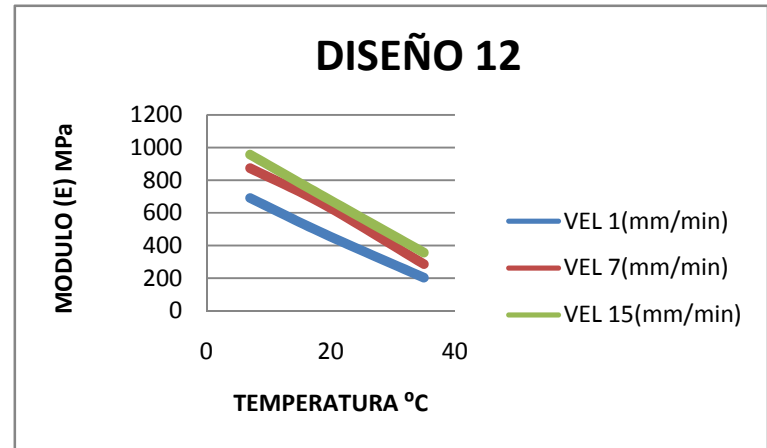
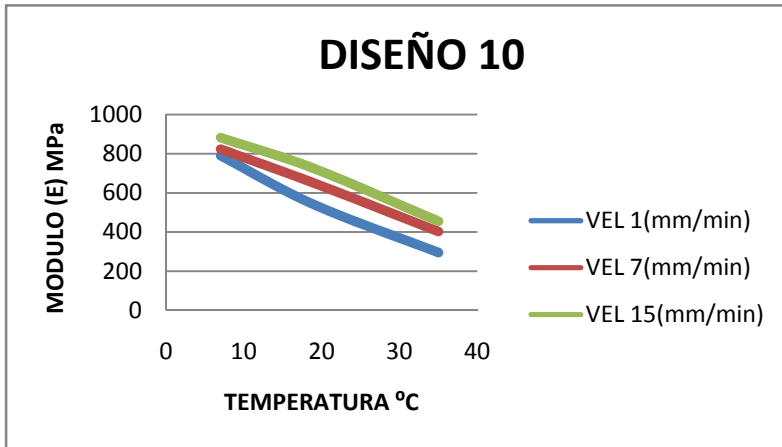
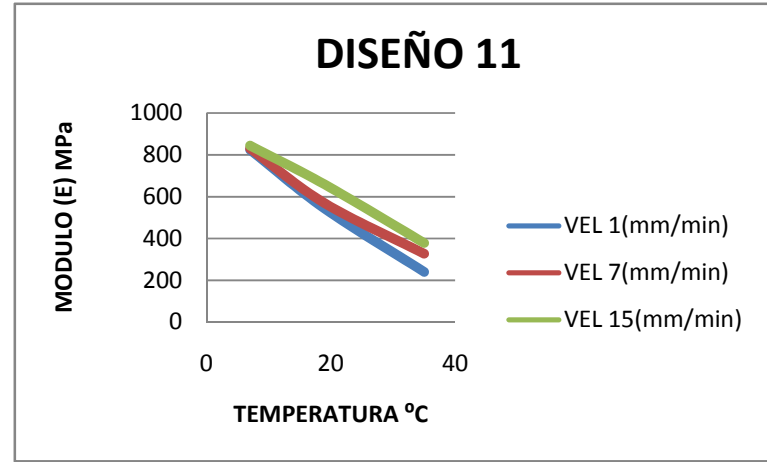
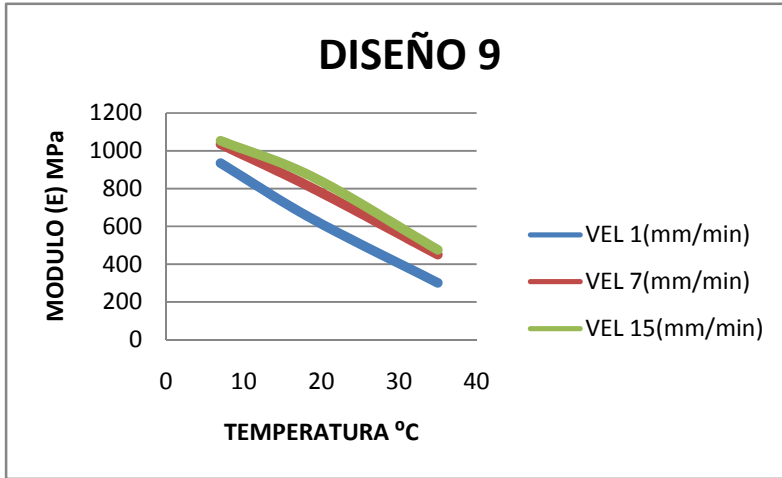
Código	Temperatura	VELOCIDAD (Modulo (MPa)	
21_3211_R3	35	7	317,8166667
21_3211_R3	35	15	382,8233333
22_3212_R1	7	1	583,9037933
22_3212_R1	7	7	681,5763233
22_3212_R1	7	15	788,5148667
22_3212_R1	19	1	257,15735
22_3212_R1	19	7	404,6901767
22_3212_R1	19	15	464,1281633
22_3212_R1	35	1	145,7431267
22_3212_R1	35	7	251,9467467
22_3212_R1	35	15	303,71564
22_3212_R2	7	1	486,1777067
22_3212_R2	7	7	907,0684433
22_3212_R2	7	15	945,8907333
22_3212_R2	19	1	305,4053433
22_3212_R2	19	7	488,8667033
22_3212_R2	19	15	644,6355667
22_3212_R2	35	1	147,2502467
22_3212_R2	35	7	232,8501867
22_3212_R2	35	15	303,71564
22_3212_R3	7	1	725,0703167
22_3212_R3	7	7	1004,60893
22_3212_R3	7	15	1105,051533
22_3212_R3	19	1	279,4909133
22_3212_R3	19	7	467,4438767
22_3212_R3	19	15	571,5835833
22_3212_R3	35	1	145,16036

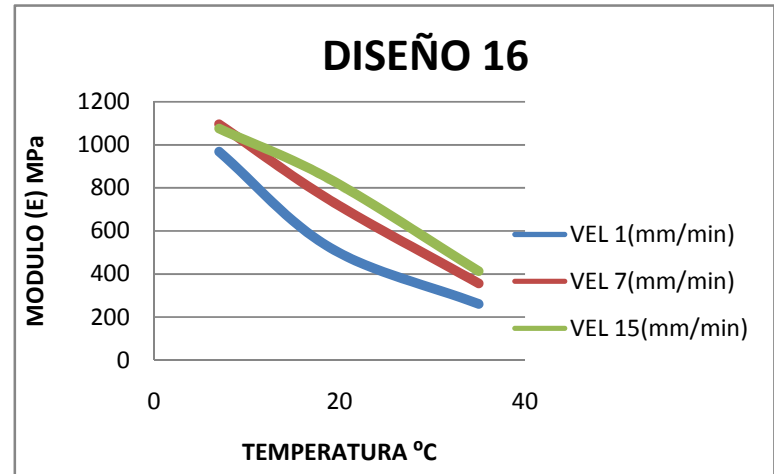
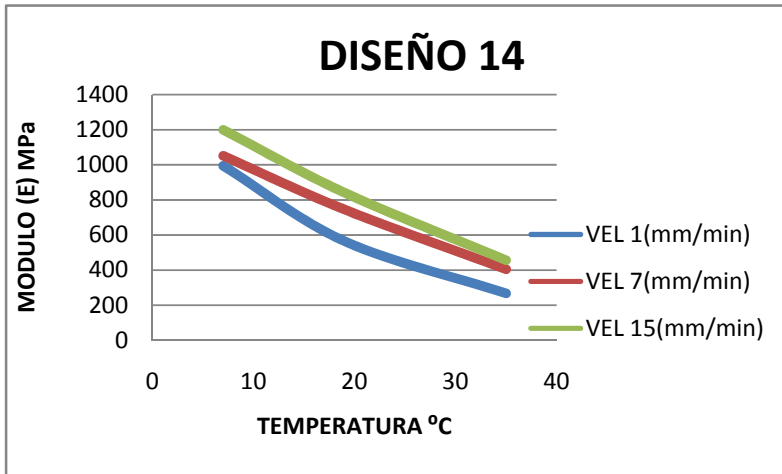
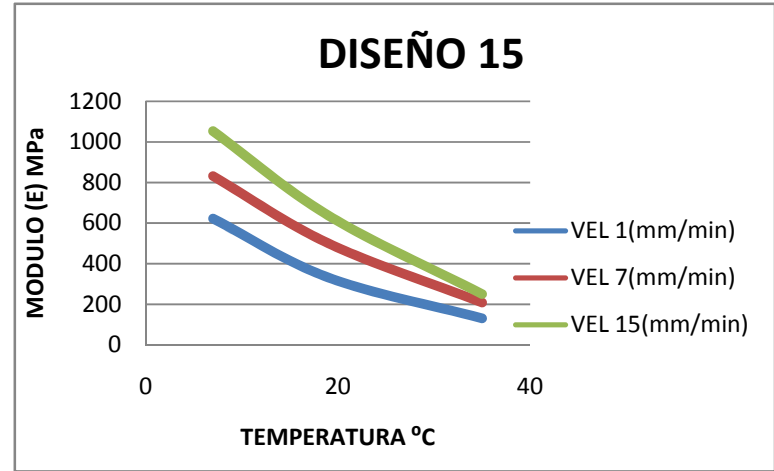
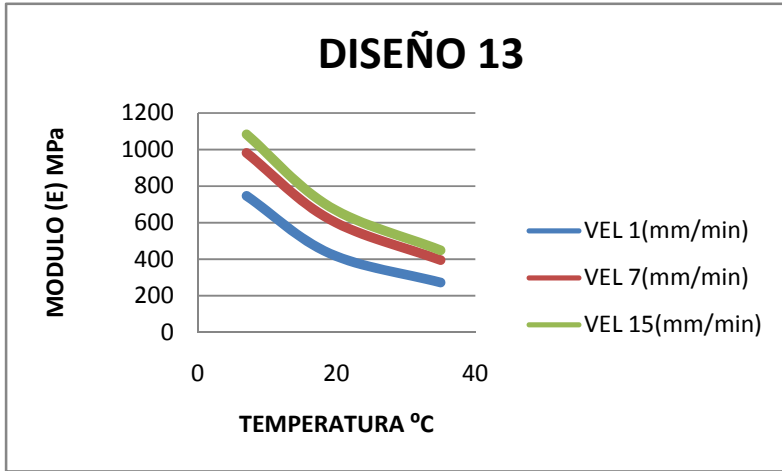
TABLA 8. MEZCLA ABIERTA EN CALIENTE (M1)

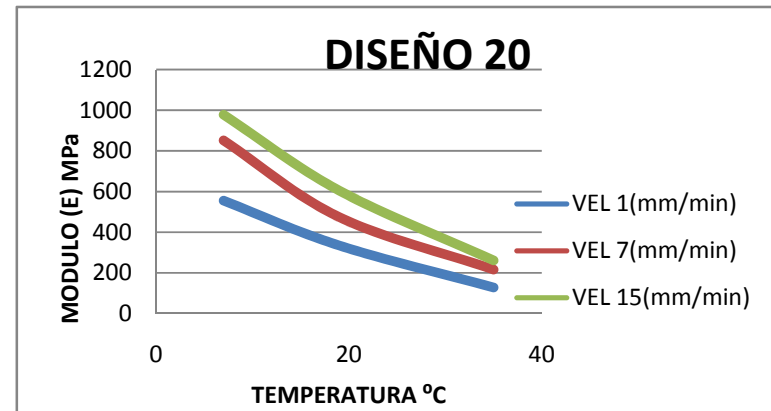
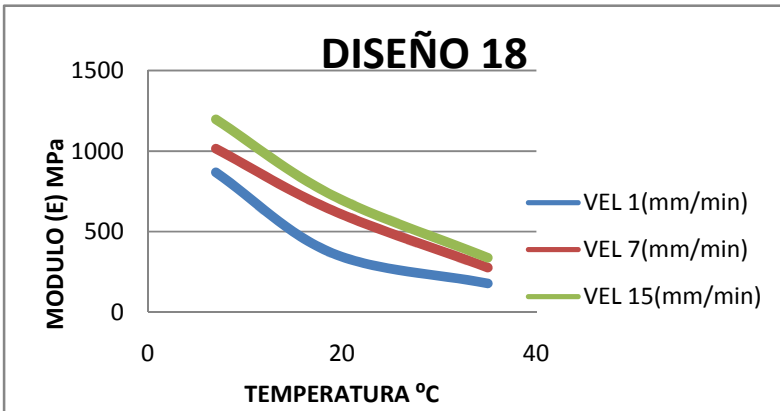
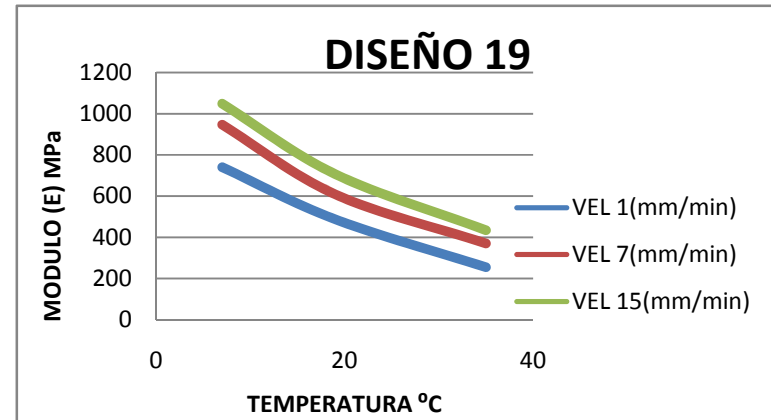
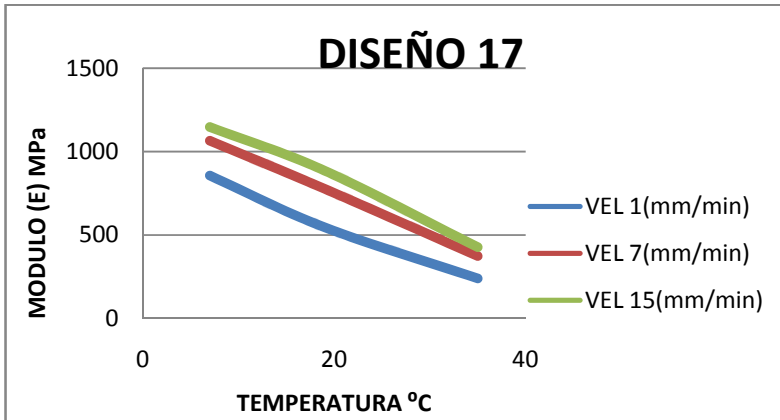
Código	Temperatura	VELOCIDAD (Modulo (MPa)	
23-3221_R3	35	7	205,4410433
23-3221_R3	35	15	240,9182167
24_3222_R1	7	1	573,7466667
24_3222_R1	7	7	867,97
24_3222_R1	7	15	898,58
24_3222_R1	19	1	347,0733333
24_3222_R1	19	7	551,8933333
24_3222_R1	19	15	657,5733333
24_3222_R1	35	1	125,4266667
24_3222_R1	35	7	209,969274
24_3222_R1	35	15	255,9066667
24_3222_R2	7	1	812,9466667
24_3222_R2	7	7	990,9533333
24_3222_R2	7	15	1053
24_3222_R2	19	1	418,3666667
24_3222_R2	19	7	639,6933333
24_3222_R2	19	15	768,64
24_3222_R2	35	1	178,0666667
24_3222_R2	35	7	284,4133333
24_3222_R2	35	15	344,3266667
24_3222_R3	7	1	562,56
24_3222_R3	7	7	901,0366667
24_3222_R3	7	15	959,3133333
24_3222_R3	19	1	393,73
24_3222_R3	19	7	621,3966667
24_3222_R3	19	15	735,6533333
24_3222_R3	35	1	166

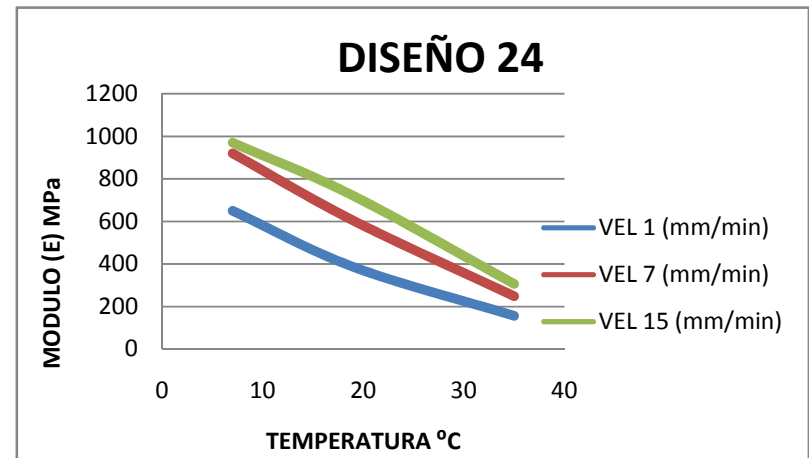
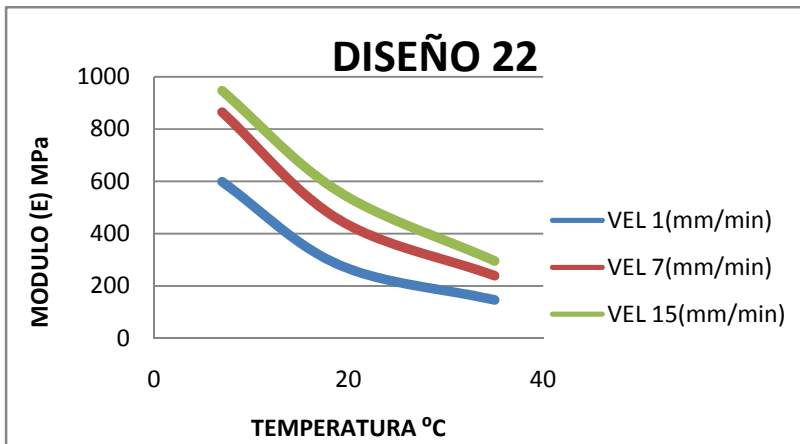
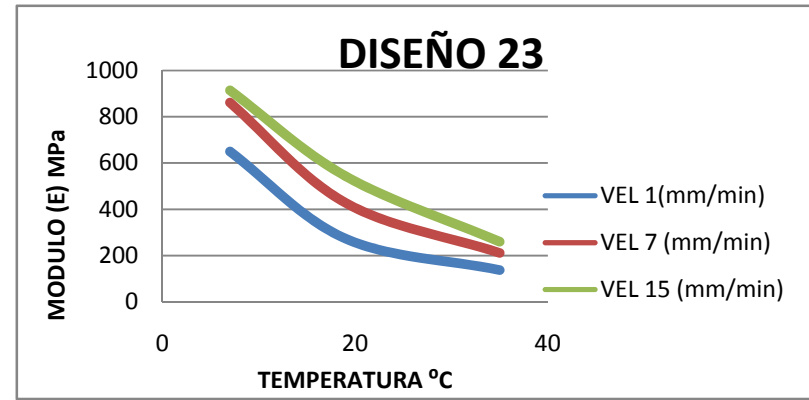
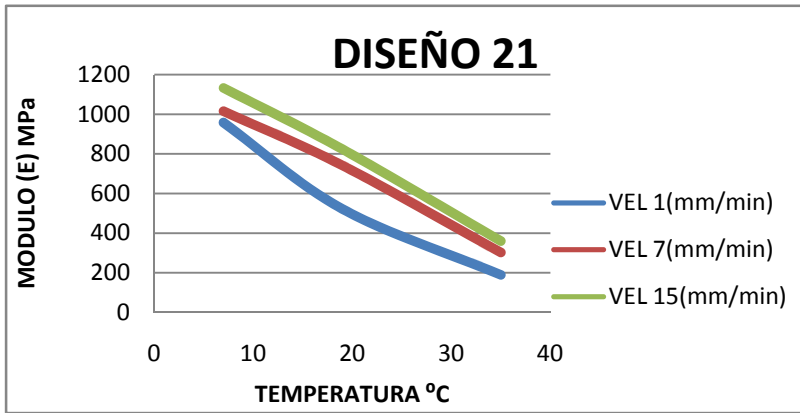








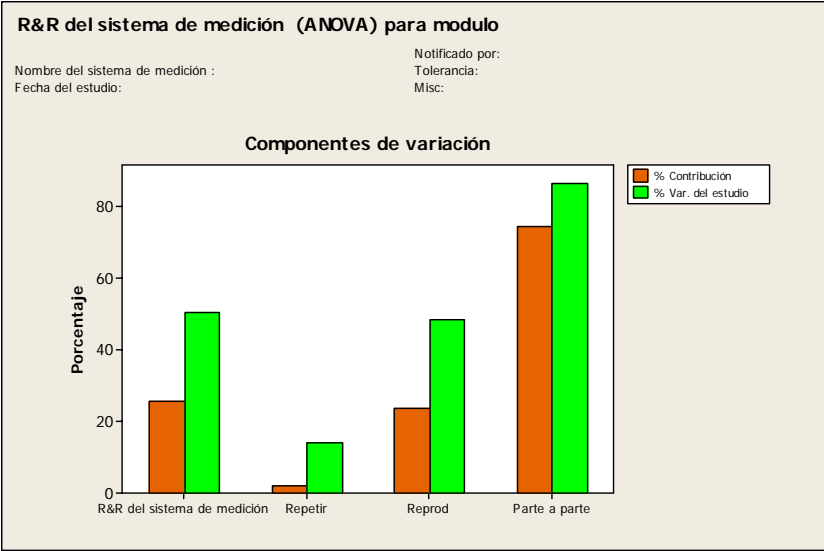




ANEXO C: ESTUDIO DE REPETIBILIDAD Y REPRODUCIBILIDAD (R&R)

ANÁLISIS DE DATOS DE REPETIBILIDAD Y REPRODUCIBILIDAD UTILIZANDO EL MÉTODO ESTADÍSTICO DE ANOVA

- Velocidad 1 mm / min

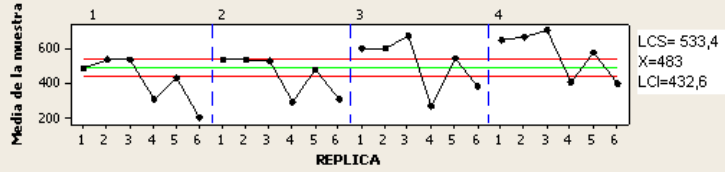


R&R del sistema de medición (ANOVA) para modulo

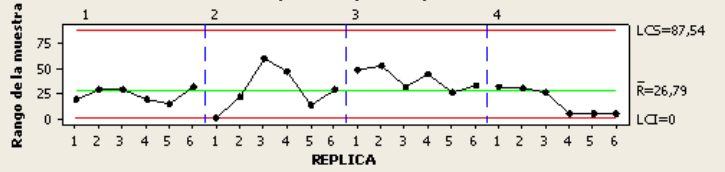
Nombre del sistema de medición :
 Fecha del estudio:

Notificado por:
 Tolerancia:
 Misc:

Gráfica Xbarra por tiempo de ejecución



Gráfica R por tiempo de ejecución

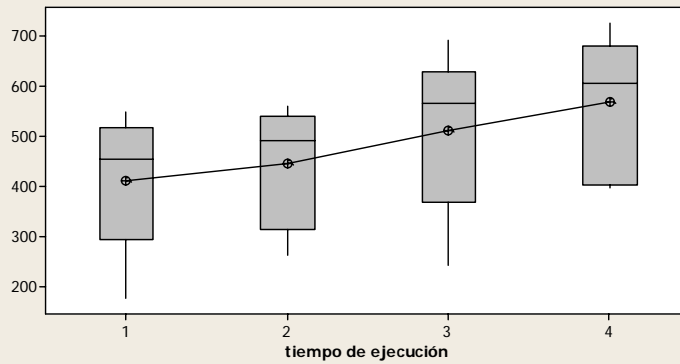


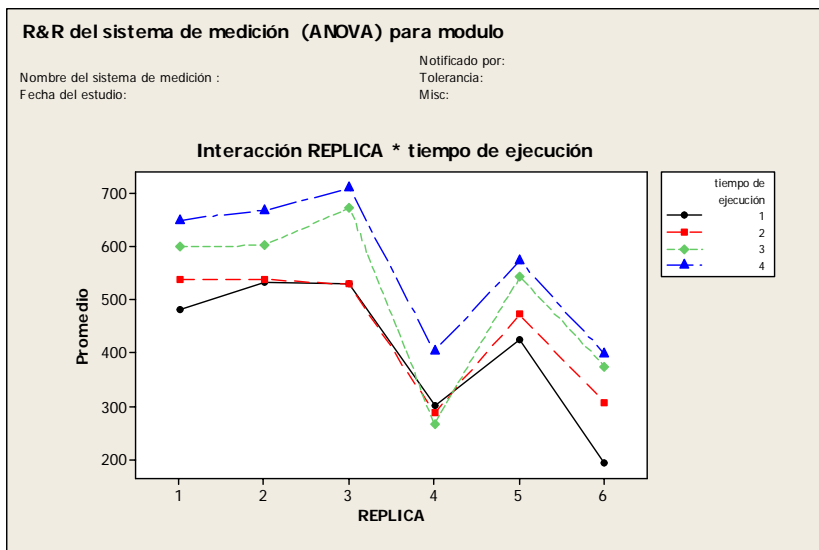
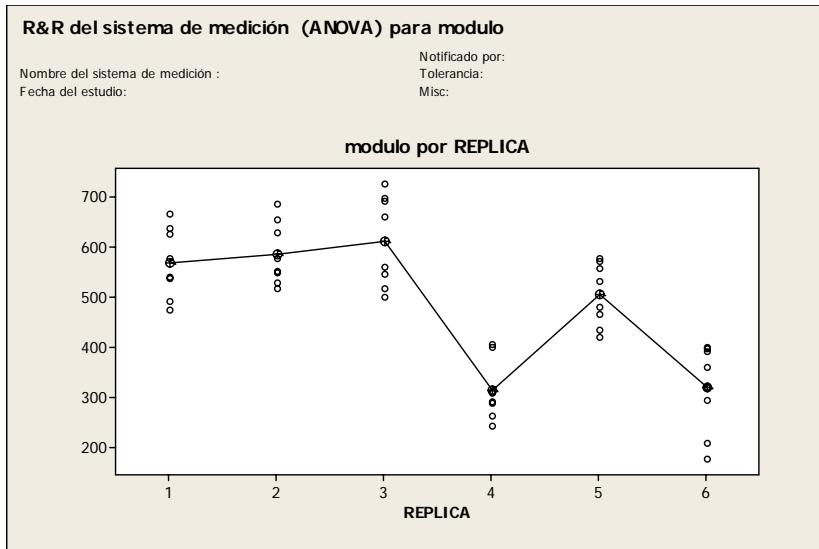
R&R del sistema de medición (ANOVA) para modulo

Nombre del sistema de medición :
 Fecha del estudio:

Notificado por:
 Tolerancia:
 Misc:

modulo por tiempo de ejecución





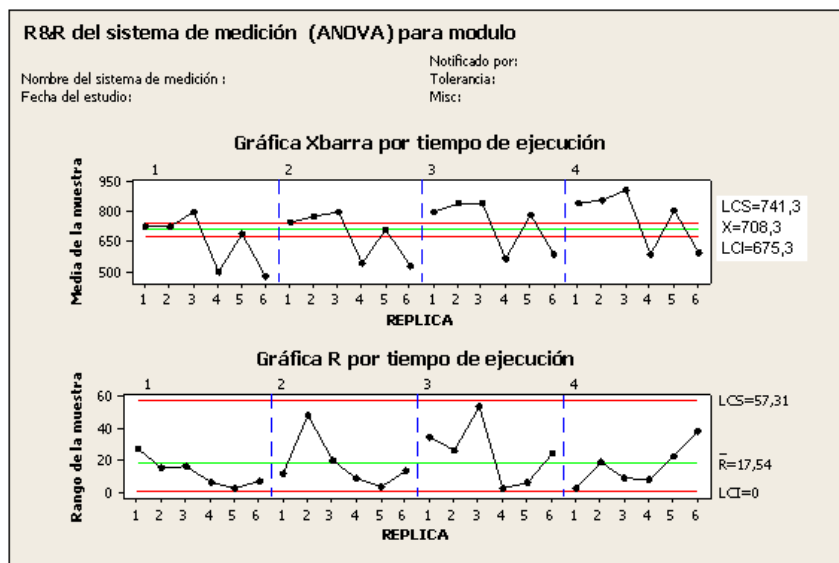
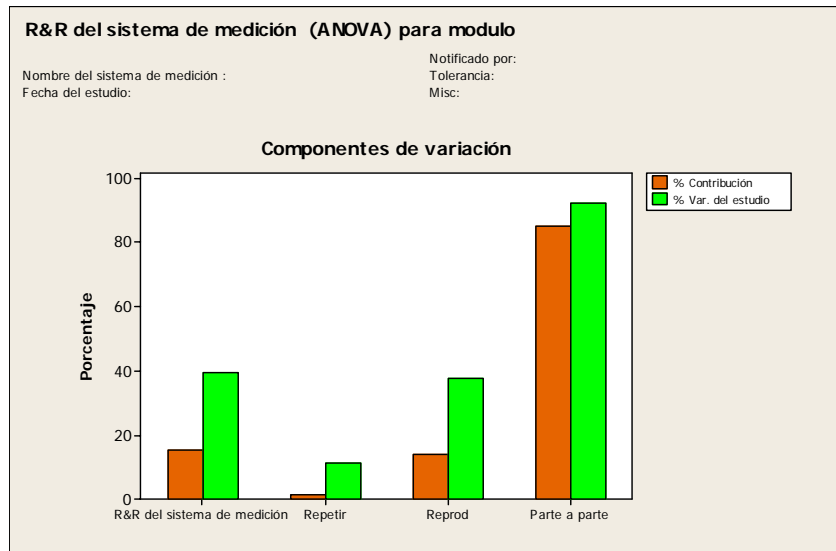
DISEÑO 15 VELOCIDAD 1 mm/min					
FUENTE	GL	SC	CM	F	P
Réplica	5	718373	143354	59,333	0
Tiempo de ejecución	3	172223	57408	23,7605	0,0003
Réplica * Tiempo de ejecución	15	36241	2416	5,0908	0
Repetibilidad	24	11391	475		
Total	47	936625			

DISEÑO 15 VELOCIDAD 1mm/min		
Fuente	Contribución por la varianza	% CONTRIBUCIÓN POR VARIANZA
R&R del sistema de medición total	6028	25,49
Repetibilidad	474,6	2,01
Reproducibilidad	5553,4	23,49
Tiempo de ejecución	4582,6	19,38
Réplica * Tiempo de ejecución	970,7	4,11
Parte a parte	17617,2	74,51
Variación total	23645,2	100

DISEÑO 15 VELOCIDAD 1mm/min		
Fuente	DESVIACIÓN	VAR. DEL ESTUDIO (6*ED)
R&R del sistema de medición total	77,64	465,84
Repetibilidad	21,785	130,712
Reproducibilidad	74,521	447,126
Tiempo de ejecución	67,695	406,17
Réplica * Tiempo de ejecución	31,157	186,941
Parte a parte	132,73	796,38
Variación total	153,77	922,62

DISEÑO 15 VELOCIDAD 1mm/min	
Fuente	%Varianza del estudio
R&R del sistema de medición total	50,49
Repetibilidad	14,17
Reproducibilidad	48,46
Tiempo de ejecución	40,59
Réplica * tiempo de ejecución	44,02
Parte a parte	86,32
Variación total	100

- Velocidad 7 mm/min

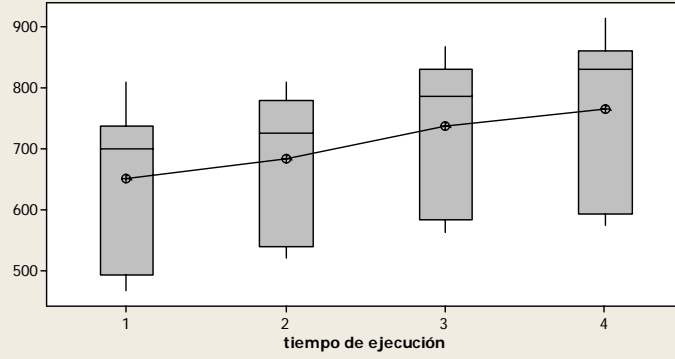


R&R del sistema de medición (ANOVA) para modulo

Nombre del sistema de medición :
Fecha del estudio:

Notificado por:
Tolerancia:
Misc:

modulo por tiempo de ejecución

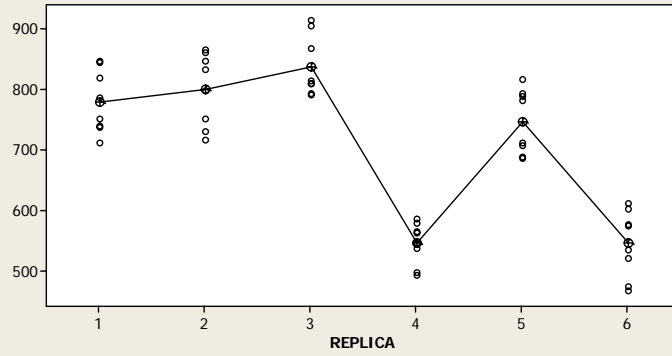


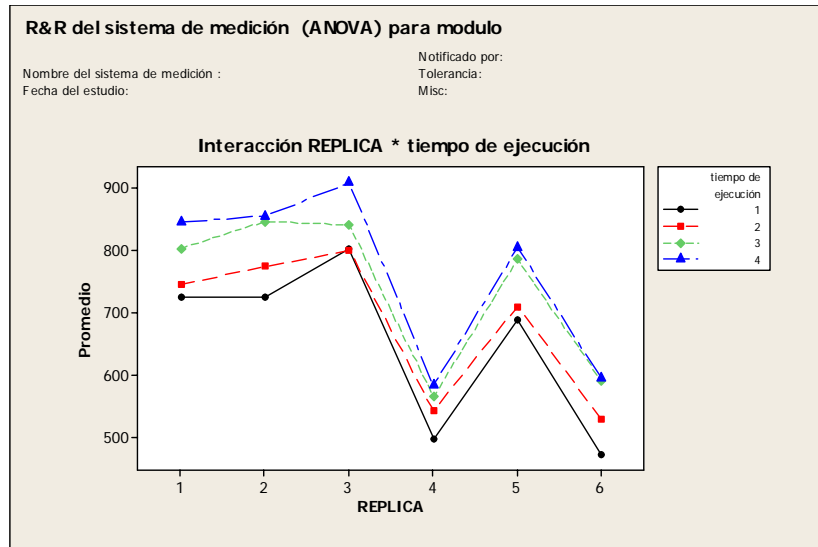
R&R del sistema de medición (ANOVA) para modulo

Nombre del sistema de medición :
Fecha del estudio:

Notificado por:
Tolerancia:
Misc:

modulo por REPLICA





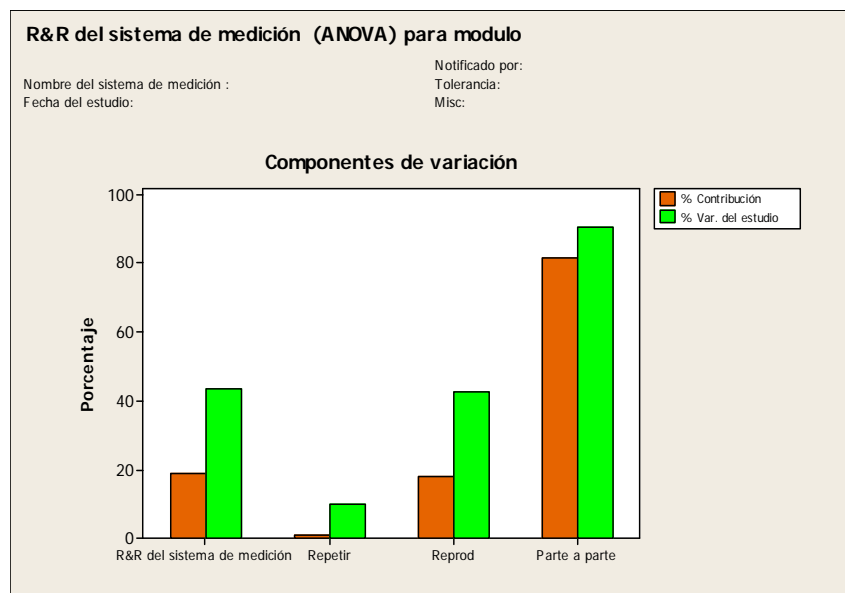
DISEÑO 15 Velocidad 7 mm/min					
FUENTE	GL	SC	CM	F	P
Réplica	5	668249	133650	242,4	0
Tiempo de ejecución	3	95525	31842	57,751	0
Replica * tiempo de ejecución	15	8270	551	2,172	0,04
Repetibilidad	24	6092	254		
Total	47	778136			

DISEÑO 15 Velocidad 7mm/min		
Fuente	Contribución Por La Varianza	% Contribución De La Varianza
R&R del sistema de medición total	3010,1	15,32
Repetibilidad	253,9	1,29
Reproducibilidad	2756,3	14,03
Tiempo de ejecución	2607,5	13,27
Réplica * tiempo de ejecución	148,8	0,76
Parte a parte	16637,3	84,68
Variación total	19647,4	100

DISEÑO 15 Velocidad 7mm/min		
Fuente	Desviación	Variación del estudio (6*ED)
R&R del sistema de medición total	54,865	329,188
Repetibilidad	15,933	95,597
Reproducibilidad	52,5	315,001
Tiempo de ejecución	12,196	73,179
Réplica * tiempo de ejecución	12,196	73,179
Parte a parte	128,986	773,914
Variación total	140,169	841,016

DISEÑO 15 Velocidad 7mm/min	
Fuente	%Varianza Del Estudio
R&R del sistema de medición total	39,14
Repetibilidad	11,37
Reproducibilidad	37,45
Tiempo de ejecución	36,43
Réplica * tiempo de ejecución	8,7
Parte a parte	92,02
Variación total	100

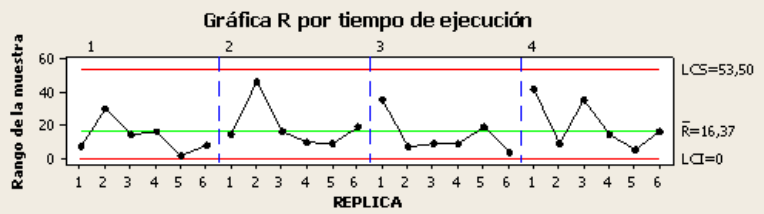
- Velocidad 15 mm/min



R&R del sistema de medición (ANOVA) para modulo

Nombre del sistema de medición :
 Fecha del estudio:

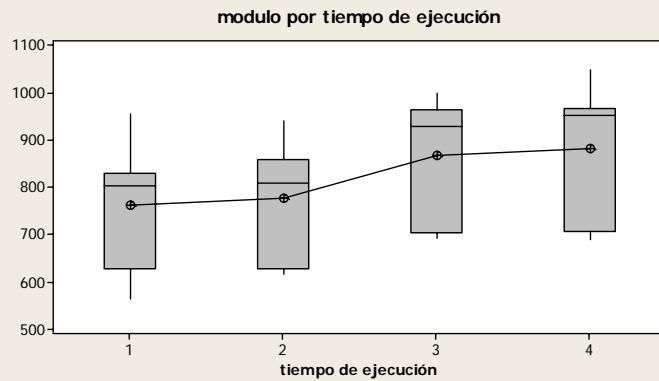
Notificado por:
 Tolerancia:
 Misc:

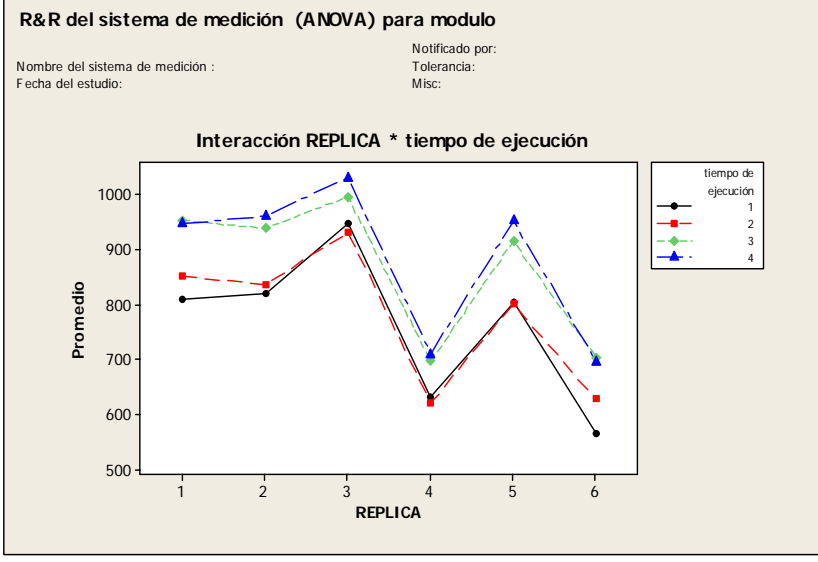
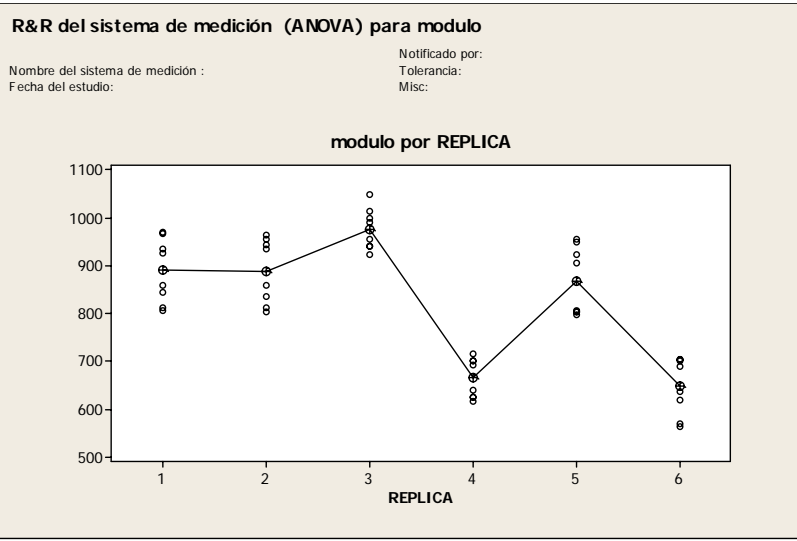


R&R del sistema de medición (ANOVA) para modulo

Nombre del sistema de medición :
 Fecha del estudio:

Notificado por:
 Tolerancia:
 Misc:





DISEÑO 15 Velocidad 15 mm/min					
Fuente	GL	SC	CM	F	P
Réplica	5	718373	143675	167,82	0
Tiempo de ejecución	3	133089	44363	51,818	0
Réplica * tiempo de ejecución	15	12842	856	4,139	0,001
Repetibilidad	24	4965	207		
Total	47	869268			

DISEÑO 15 Velocidad 15 mm/min		
Fuente	Contribución Por La Varianza	% Contribución Por La Varianza
R&R del sistema de medición total	4157	18,89
Repetibilidad	206,9	0,94
Reproducibilidad	3950,2	17,95
Tiempo de ejecución	3625,6	16,47
Réplica * tiempo de ejecución	324,6	1,47
Parte a parte	17852,3	81,11
Variación total	22009,4	100

DISEÑO 15 Velocidad 15 mm/min		
Fuente	Desviación	Variación del estudio (6*ED)
R&R del sistema de medición total	64,475	386,851
Repetibilidad	14,382	86,295
Reproducibilidad	62,851	377,103
Tiempo de ejecución	60,213	361,276
Replica * tiempo de ejecución	18,018	108,106
Parte a parte	133,613	801,675
Variación total	148,356	890,133

DISEÑO 15 Velocidad 15 mm/min	
FUENTE	%Var. del estudio
R&R del sistema de medición total	43,46
Repetibilidad	9,69
Reproducibilidad	42,36
Tiempo de ejecución	40,59
Réplica * tiempo de ejecución	12,14
Parte a parte	90,06
Variación total	100

ANALISIS DE DATOS DE REPETIBILIDAD Y REPRODUCIBILIDA UTILIZANDO EL METODO ESTADISTICO DE PROMEDIOS Y RANGOS

- Velocidad 1 mm/ min

DISEÑO 15 VEL 1 mm /min TEMPERATURA 19 GRADOS			
Tiempo de ejecución A			
Replica	1er. INT.	2do. INT.	RANGO
1	472	491	19
2	517	546	29
3	517	545	28
4	291	309	18
5	418	433	15
6	179	210	31
TOTALES	2394	2534	140

A1 =	2394	R. PROM. A =	21,8
A2 =	2534		
SUMA A =	4928		
X PROM. A =	410,666667		

DISEÑO 15 VEL 1 mm /min TEMPERATURA 19 GRADOS			
Tiempo de ejecución B			
Replica	1er. INT.	2do. INT.	RANGO
1	537	538	1
2	527	549	22
3	499	558	59
4	264	311	47
5	466	479	13
6	293	321	28
TOTALES	2586	2756	170

B1 =	2586	R. PROM. B =	28,4
B2 =	2756		
SUMA B =	5342		
X PROM. B =	445,166667		

DISEÑO 15 VEL 1 mm /min TEMPERATURA 19 GRADOS			
Tiempo de ejecución C			
Replica	1er. INT.	2do. INT.	RANGO
1	575	623	48
2	576	628	52
3	657	688	31
4	244	288	44
5	530	555	25
6	359	391	32
TOTALES	2941	3173	232

C1 =	2941	R. PROM. C =	38,66
C2 =	3173		
SUMA C =	6114		
X PROM. C =	509,5		

Replica	1er. INT.	2do. INT.	RANGO
1	634	665	31
2	653	683	30
3	696	722	26
4	400	405	5
5	570	575	5
6	400	396	4
TOTALES	3353	3446	101
D1 =	3353	R. PROM. D =	16,83333333
D2 =	3446		
SUMA D =	6799		
X PROM. D =	566,583333		Rp =

- Velocidad 7 mm /min

DISEÑO 15 VEL 7 mm /min TEMPERATURA 19 GRADOS			
Tiempo de ejecución A			
Replica	1er. INT.	2do. INT.	RANGO
1	710	737	27
2	730	715	15
3	792	808	16
4	499	493	6
5	688	686	2
6	469	476	7
TOTALES	3888	3915	73

A1 =	3888	R. PROM. A =	13,2
A2 =	3915		
SUMA A =	7803		
X PROM. A =	650,25		

DISEÑO 15 VEL 7 mm /min TEMPERATURA 19 GRADOS			
Tiempo de ejecución B			
Replica	1er. INT.	2do. INT.	RANGO
1	738	749	11
2	749	797	48
3	789	809	20
4	537	546	9
5	710	707	3
6	521	534	13
TOTALES	4044	4142	104

B1 =	4349	R. PROM. B =	18,2
B2 =	4495		
SUMA B =	8186		
X PROM. B =	682,1667		

DISEÑO 15 VEL 7 mm /min TEMPERATURA 19 GRADOS			
Tiempo de ejecución C			
Replica	1er. INT.	2do. INT.	RANGO
1	784	818	34
2	832	858	26
3	812	866	54
4	563	565	2
5	781	787	6
6	577	601	24
TOTALES	4349	4495	146

C1 =	2941	R. PROM. C =	24,33333
C2 =	3173		
SUMA C =	8844		
X PROM. C =	737		

Replica	1er. INT.	2do. INT.	RANGO
1	845	843	2
2	844	863	19
3	911	902	9
4	579	587	8
5	792	814	22
6	574	612	38
TOTALES	4545	4621	98
D1 =	4545	R. PROM. D =	16,33333
D2 =	4621		
SUMA D =	9166		
X PROM. D =	763,8333		

Rp =

- Velocidad 15 mm /min

DISEÑO 15 VEL 15 mm /min TEMPERATURA 19 GRADOS			
Tiempo de ejecución A			
Replica	1er. INT.	2do. INT.	RANGO
1	805	812	7
2	804	834	30
3	941	955	14
4	624	640	16
5	804	803	1
6	562	570	8
TOTALES	4540	4614	76

A1 =	4540	R. PROM. A =	13,6
A2 =	4614		
SUMA A =	9154		
X PROM. A =	762,8333		

DISEÑO 15 VEL 15 mm /min TEMPERATURA 19 GRADOS			
Tiempo de ejecución B			
Replica	1er. INT.	2do. INT.	RANGO
1	844	858	14
2	813	859	46
3	939	923	16
4	616	626	10
5	796	805	9
6	618	637	19
TOTALES	4626	4708	114

B1 =	4626	R. PROM. B =	19
B2 =	4708		
SUMA B =	9334		
X PROM. B =	777,8333		

DISEÑO 15 VEL 15 mm /min TEMPERATURA 19 GRADOS			
Tiempo de ejecución C			
Replica	1er. INT.	2do. INT.	RANGO
1	935	970	35
2	935	942	7
3	991	1000	9
4	692	701	9
5	924	905	19
6	705	702	3
TOTALES	5182	5220	82

C1 =	5182	R. PROM. C =	13,66667
C2 =	5220		
SUMA C =	10402		
X PROM. C =	866,8333		

Replica	1er. INT.	2do. INT.	RANGO
1	925	967	42
2	956	965	9
3	1048	1013	35
4	716	702	14
5	949	954	5
6	704	688	16
TOTALES	5298	5289	121
D1 =	5298	R. PROM. D =	20,16667
D2 =	5289		
SUMA D =	10587		
X PROM. D =	882,25		Rp =

ANEXO D: DATOS DETERMINADOS EN LAS PRUEBAS DE CORASFALTOS

DATOS DE ENTRADA		
Deformímetro análogo		
Temperatura	19	°C
Geometría Probeta		Altura (mm)
Código Probeta	15_1 R1	130
	15_2 R2	130
	15_3 R3	130
Altura Probeta	130	mm
Área Probeta	0,00811	m ²

SERIE 1			"Diseño 15-Rèplica1"		
1		7		15	
Esfuerzo	Deformación unitaria	Esfuerzo	Deformación unitaria	Esfuerzo	Deformación unitaria
(kPa)	(mm/mm)	(kPa)	(mm/mm)	(kPa)	(mm/mm)
5,55	0,000154	22,70	0,000231	16,77	0,000231
8,39	0,000308	46,62	0,000538	43,66	0,000462
13,07	0,000462	55,01	0,000692	81,53	0,000692
15,79	0,000615	65,13	0,000769	107,56	0,000923
20,11	0,000769	Módulo (Mpa)	75,629	Módulo (Mpa)	134,426
Módulo (Mpa)	23,73				

SERIE 2			"Diseño 15-Rèplica1"		
1		7		15	
Esfuerzo	Deformación unitaria	Esfuerzo	Deformación unitaria	Esfuerzo	Deformación unitaria
(kPa)	(mm/mm)	(kPa)	(mm/mm)	(kPa)	(mm/mm)
1,97	0,000154	29,36	0,000231	41,94	0,000462
2,96	0,000308	29,85	0,000308	74,50	0,000769
4,81	0,000462	52,55	0,000462	Módulo (Mpa)	105,830
6,41	0,000615	69,81	0,000615		
7,65	0,000769	90,78	0,000769		
Módulo (Mpa)	9,62	Módulo (Mpa)	119,108		

SERIE 3				"Diseño 15-Rèplica1"	
1		7		15	
Esfuerzo	Deformación	Esfuerzo	Deformación	Esfuerzo	Deformación
(kPa)	unitaria (mm/mm)	(kPa)	unitaria (mm/mm)	(kPa)	unitaria (mm/mm)
6,54	0,000154	21,59	0,000154	46,01	0,000308
12,46	0,000308	47,98	0,000385	72,40	0,000538
16,16	0,000462	63,65	0,000538	100,53	0,000692
22,33	0,000615	93,74	0,000769	100,65	0,000769
32,32	0,000769	Módulo (Mpa)	116,347	Módulo (Mpa)	127,019
Módulo (Mpa)	39,93				

SERIE 4				"Diseño 15-Rèplica1"	
1		7		15	
Esfuerzo	Deformación	Esfuerzo	Deformación	Esfuerzo	Deformación
(kPa)	unitaria (mm/mm)	(kPa)	unitaria (mm/mm)	(kPa)	unitaria (mm/mm)
8,02	0,000154	28,37	0,000231	72,53	0,000308
14,43	0,000308	43,79	0,000385	126,68	0,000538
19,86	0,000462	61,18	0,000538	166,89	0,000769
26,03	0,000615	81,53	0,000692	Módulo (Mpa)	204,445
33,67	0,000769	98,92	0,000846		
Módulo (Mpa)	40,89	Módulo (Mpa)	116,253		

SERIE 5				"Diseño 15-Rèplica1"	
1		7		15	
Esfuerzo	Deformación	Esfuerzo	Deformación	Esfuerzo	Deformación
(kPa)	unitaria (mm/mm)	(kPa)	unitaria (mm/mm)	(kPa)	unitaria (mm/mm)
7,15	0,000154	49,09	0,000308	38,24	0,000231
15,05	0,000308	57,73	0,000462	64,14	0,000385
25,90	0,000462	78,08	0,000538	113,60	0,000692
39,72	0,000615	88,44	0,000692	150,36	0,000846
55,26	0,000769	109,53	0,000769	Módulo (Mpa)	177,907
Módulo (Mpa)	78,57	Módulo (Mpa)	127,660		

SERIE 1				"Diseño 15-Rèplica2"	
1		7		15	
Esfuerzo	Deformación	Esfuerzo	Deformación	Esfuerzo	Deformación
(kPa)	unitaria (mm/mm)	(kPa)	unitaria (mm/mm)	(kPa)	unitaria (mm/mm)
7,15	0,000154	16,40	0,000385	63,65	0,000308
9,62	0,000308	17,15	0,000538	85,60	0,000462
11,59	0,000462	26,64	0,000769	119,40	0,000692
12,33	0,000615	Módulo (Mpa)	27,77	150,36	0,000846
16,65	0,000769			Módulo (Mpa)	158,77
Módulo (Mpa)	14,11				

SERIE 2				"Diseño 15-Rèplica2"	
1		7		15	
Esfuerzo	Deformación	Esfuerzo	Deformación	Esfuerzo	Deformación
(kPa)	unitaria (mm/mm)	(kPa)	unitaria (mm/mm)	(kPa)	unitaria (mm/mm)
5,67	0,000154	16,90	0,000154	52,30	0,000308
7,03	0,000308	37,00	0,000462	91,89	0,000538
10,85	0,000462	43,79	0,000615	121,00	0,000769
11,72	0,000615	59,33	0,000846	Módulo (Mpa)	148,86
13,57	0,000769	Módulo (Mpa)	60,47		
Módulo (Mpa)	13,31				

SERIE 3				"Diseño 15-Rèplica2"	
1		7		15	
Esfuerzo	Deformación	Esfuerzo	Deformación	Esfuerzo	Deformación
(kPa)	unitaria (mm/mm)	(kPa)	unitaria (mm/mm)	(kPa)	unitaria (mm/mm)
3,21	0,000077	13,07	0,000154	57,85	0,000231
7,89	0,000231	30,59	0,000385	125,94	0,000462
12,46	0,000462	38,24	0,000538	194,64	0,000769
14,55	0,000615	51,31	0,000692	Módulo (Mpa)	252,38
18,01	0,000769	62,54	0,000846		
Módulo (Mpa)	20,50	Módulo (Mpa)	70,69		

SERIE 4				"Diseño 15-Rèplica2"	
1		7		15	
Esfuerzo	Deformación	Esfuerzo	Deformación	Esfuerzo	Deformación
(kPa)	unitaria (mm/mm)	(kPa)	unitaria (mm/mm)	(kPa)	unitaria (mm/mm)
5,80	0,000154	18,01	0,000154	56,00	0,000385
7,15	0,000308	35,03	0,000308	90,78	0,000615
11,59	0,000462	50,08	0,000462	131,73	0,000923
12,95	0,000615	73,14	0,000692	Módulo (Mpa)	140,24
16,40	0,000769	84,49	0,000769		
Módulo (Mpa)	17,56	Módulo (Mpa)	105,38		

SERIE 5				"Diseño 15-Rèplica2"	
1		7		15	
Esfuerzo	Deformación	Esfuerzo	Deformación	Esfuerzo	Deformación
(kPa)	unitaria (mm/mm)	(kPa)	unitaria (mm/mm)	(kPa)	unitaria (mm/mm)
2,22	0,000154	30,71	0,000308	93,62	0,000385
3,95	0,000308	59,45	0,000538	133,09	0,000692
5,18	0,000462	69,81	0,000692	166,02	0,000923
6,17	0,000615	78,94	0,000846	Módulo (Mpa)	134,13
7,15	0,000769	Módulo (Mpa)	89,45		
Módulo (Mpa)	7,86				

SERIE 1				"Diseño 15-Rèplica3"	
1		7		15	
Esfuerzo	Deformación	Esfuerzo	Deformación	Esfuerzo	Deformación
(kPa)	unitaria (mm/mm)	(kPa)	unitaria (mm/mm)	(kPa)	unitaria (mm/mm)
5,55	0,000154	19,74	0,000308	51,81	0,000385
8,39	0,000308	30,10	0,000538	105,71	0,000692
13,07	0,000462	39,84	0,000692	135,31	0,000923
15,79	0,000615	45,76	0,000769	Módulo (Mpa)	156,17
20,11	0,000769	Módulo (Mpa)	55,74		
Módulo (Mpa)	23,73				

SERIE 2				"Diseño 15-Rèplica3"	
1		7		15	
Esfuerzo	Deformación	Esfuerzo	Deformación	Esfuerzo	Deformación
(kPa)	unitaria (mm/mm)	(kPa)	unitaria (mm/mm)	(kPa)	unitaria (mm/mm)
5,43	0,000154	23,81	0,000308	65,37	0,000308
8,39	0,000308	66,48	0,000538	93,62	0,000538
12,46	0,000462	89,55	0,000692	130,13	0,000692
15,91	0,000538	110,64	0,000846	173,18	0,000923
21,22	0,000769	Módulo (Mpa)	161,53	Módulo (Mpa)	178,84
Módulo (Mpa)	26,48				

SERIE 3				"Diseño 15-Rèplica3"	
1		7		15	
Esfuerzo	Deformación	Esfuerzo	Deformación	Esfuerzo	Deformación
(kPa)	unitaria (mm/mm)	(kPa)	unitaria (mm/mm)	(kPa)	unitaria (mm/mm)
6,91	0,000154	27,38	0,000231	38,11	0,000385
12,46	0,000308	45,51	0,000385	87,08	0,000692
18,13	0,000462	65,13	0,000538	114,09	0,000846
24,67	0,000615	85,48	0,000692	Módulo (Mpa)	163,84
31,58	0,000769	92,14	0,000769		
Módulo (Mpa)	40,01	Módulo (Mpa)	122,84		

SERIE 4				"Diseño 15-Rèplica3"	
1		7		15	
Esfuerzo	Deformación	Esfuerzo	Deformación	Esfuerzo	Deformación
(kPa)	unitaria (mm/mm)	(kPa)	unitaria (mm/mm)	(kPa)	unitaria (mm/mm)
8,39	0,000154	16,53	0,000231	73,39	0,000308
12,95	0,000308	46,75	0,000462	122,98	0,000538
17,89	0,000462	72,77	0,000615	183,66	0,000769
22,70	0,000615	96,58	0,000769	Módulo (Mpa)	238,92
26,40	0,000769	Módulo (Mpa)	149,59		
Módulo (Mpa)	29,74				

SERIE 5				"Diseño 15-Rèplica3"	
1		7		15	
Esfuerzo (kPa)	Deformación unitaria (mm/mm)	Esfuerzo (kPa)	Deformación unitaria (mm/mm)	Esfuerzo (kPa)	Deformación unitaria (mm/mm)
15,54	0,000231	49,95	0,000308	74,25	0,000385
26,15	0,000308	63,89	0,000462	116,93	0,000615
43,79	0,000462	95,10	0,000692	164,30	0,000923
60,32	0,000615	105,95	0,000769	Módulo (Mpa)	166,50
75,12	0,000769	Módulo (Mpa)	123,19		
Módulo (Mpa)	110,18				

Repetición	Probeta	Temperatura (°C)	Velocidad (mm/min)	Módulo (Mpa)
1	15_1 R1	19	1	23,73
	15_1 R1	19	7	75,63
	15_1 R1	19	15	134,43
2	15_1 R1	19	1	9,62
	15_1 R1	19	7	119,11
	15_1 R1	19	15	105,83
3	15_1 R1	19	1	39,93
	15_1 R1	19	7	116,35
	15_1 R1	19	15	127,02
4	15_1 R1	19	1	40,89
	15_1 R1	19	7	116,25
	15_1 R1	19	15	204,44
5	15_1 R1	19	1	78,57
	15_1 R1	19	7	127,66
	15_1 R1	19	15	177,91

Repetición	Probeta	Temperatura(°C)	Velocidad(mm/min)	Módulo (MPa)
1	15_2 R2	19	1	14,111
	15_2 R2	19	7	27,766
	15_2 R2	19	15	158,773
2	15_2 R2	19	1	13,309
	15_2 R2	19	7	60,473
	15_2 R2	19	15	148,857
3	15_2 R2	19	1	20,496
	15_2 R2	19	7	70,692
	15_2 R2	19	15	252,376
4	15_2 R2	19	1	17,558
	15_2 R2	19	7	105,379
	15_2 R2	19	15	140,240
5	15_2 R2	19	1	7,857
	15_2 R2	19	7	89,451
	15_2 R2	19	15	134,130

Repetición	Probeta	Temperatura(°C)	Velocidad(mm/min)	Módulo (MPa)
1	15_3 R3	19	1	23,732
	15_3 R3	19	7	55,740
	15_3 R3	19	15	156,167
2	15_3 R3	19	1	26,484
	15_3 R3	19	7	161,533
	15_3 R3	19	15	178,836
3	15_3 R3	19	1	40,007
	15_3 R3	19	7	122,843
	15_3 R3	19	15	163,842
4	15_3 R3	19	1	29,745
	15_3 R3	19	7	149,589
	15_3 R3	19	15	238,920
5	15_3 R3	19	1	110,181
	15_3 R3	19	7	123,187
	15_3 R3	19	15	166,503