



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

TÍTULO:

**“Consideraciones para el Empleo de Pruebas Reológicas en el
Control de Calidad de Mezclas Asfálticas”**

AUTOR:

Roberto Ronald Parrales Valarezo

**Trabajo de grado
Previo a la obtención del título de:
INGENIERO CIVIL**

TUTOR:

Ing. Rolando Vila Romaní, PhD.

**Guayaquil, Ecuador
2013**



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo fue realizado en su totalidad por **Roberto Ronald Parrales Valarezo**, como requerimiento parcial para la obtención del Título de **Ingeniero Civil**.

TUTOR

Ing. Rolando Vila Romaní, PhD.

REVISORES

Ing. Gustavo García Caputi

Mgs. Sonia Baño Pazmiño

DIRECTOR DE LA CARRERA

Ing. Mario Dueñas Rossi

Guayaquil, a los 26 días del mes de Julio del año 2013



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Yo, Roberto Ronald Parrales Valarezo

DECLARO QUE:

El Trabajo de Titulación “**Consideraciones para el Empleo de Pruebas Reológicas en el Control de Calidad de Mezclas Asfálticas**” previa a la obtención del Título de **Ingeniero Civil**, ha sido desarrollado en base a una investigación exhaustiva, respetando derechos intelectuales de terceros, conforme las citas que constan al pie de las páginas correspondientes, cuyas fuentes se incorporan en la bibliografía. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance científico del Trabajo de Titulación referido.

Guayaquil, a los 26 días del mes de Julio del año 2013

EL AUTOR:

Roberto Ronald Parrales Valarezo



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

AUTORIZACIÓN

Yo, **Roberto Ronald Parrales Valarezo**

Autorizo a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, la **publicación** en la biblioteca de la institución del Trabajo de Titulación: “**Consideraciones para el Empleo de Pruebas Reológicas en el Control de Calidad de Mezclas Asfálticas**”, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

Guayaquil, a los 26 días del mes de Julio del año 2013

EL AUTOR:

Roberto Ronald Parrales Valarezo

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios, A mis padres; Arq. Roberto Parrales Torres, y Sra. Jenny Valarezo León.

A personas muy especiales en mi vida que sin su apoyo, no hubiera sido posible dar este paso; C.P.A. Darwin Bazán, Lcda. Doris Valarezo, Sra. Martha Gonzales, Lcda. Arminda Yagual, quienes con su aporte de entusiasmo y fe, me dieron la fuerza para seguir.

Y de manera especial al Ing. Rolando Vila Romaní, por su apoyo, paciencia y confianza, depositadas en mí, durante todo este proceso.

Roberto Ronald Parrales Valarezo

DEDICATORIA

Te lo dedico, Abuela, Madre, Amiga, Siempre estás conmigo, Ana Natividad Torres Alay.

Y

A mis hermanos Daniel, Michael, Edwin y Anita, quienes son mi más grande orgullo.

Roberto Ronald Parrales Valarezo

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

Ing. Rolando Vila Romani, PhD.
PROFESOR GUÍA Ó TUTOR

Ing. Gustavo García Caputi
PROFESOR DELEGADO



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

CALIFICACIÓN

**Ing. Rolando Vila Romaní, PhD.
PROFESOR GUÍA Ó TUTOR**

ÍNDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN.....	1
OBJETIVO.....	3
CAPÍTULO 1 – PARTICULARIDADES DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS ESTUDIADAS.....	4
Introducción.....	4
Plantas seleccionadas.....	4
Composición de las mezclas a ensayar.....	5
Agregados minerales.....	5
Asfaltos.....	6
Elaboración y obtención de briquetas asfálticas.....	7
Método Marshall para fabricación de briquetas asfálticas.....	7
Equipo empleado en la elaboración de briquetas.....	8
Descripción del procedimiento, de fabricación de briquetas.....	13
Organización de las mezclas a ensayar.....	17
Descripción del etiquetado de las muestras a ensayar.....	18
Características geométricas y registro de las muestras.....	19
Registro de características geométricas de briquetas pertenecientes a la planta Duran.....	20
Registro de características geométricas de briquetas pertenecientes a la planta Chivería.....	21
Registro de características geométricas de briquetas pertenecientes a la planta KM26.....	22
Registro de características geométricas de briquetas pertenecientes a la planta Vía a la Costa.....	23
CAPÍTULO 2 – CONTROL DE CALIDAD DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS. ..	24

Generalidades.....	24
Control de calidad convencional de las mezclas asfálticas.....	24
Porcentaje de Asfalto.....	24
Granulometría en agregados extraídos.....	25
Densidad teórica máxima (Ensayo Rice).....	25
Gravedad específica “Bulk” o densidad.....	25
Porcentaje de Vacíos.....	28
Control de calidad con pruebas reológicas o de desempeño.....	28
Módulo de rigidez mediante deformación controlada.....	29
Módulo de rigidez mediante carga controlada.....	39
Ensayo de Fatiga.....	41
Deformación permanente (Creep dinámico).....	47
CAPÍTULO 3 – DESARROLLO EXPERIMENTAL Y RESULTADOS	
OBTENIDOS	55
Porcentaje de asfalto en muestras asfálticas.....	55
Prueba de extracción de asfalto de la planta Durán.....	55
Prueba de extracción de asfalto de la planta Chivería.....	56
Prueba de extracción de asfalto de la planta KM26.....	57
Prueba de extracción de asfalto de la planta Vía a la Costa.....	58
Granulometría en agregados extraídos.....	59
Granulometría en agregados extraídos de la planta Duran.....	59
Granulometría en agregados extraídos de la planta Chivería.....	60
Granulometría en agregados extraídos de la planta KM26.....	61
Granulometría en agregados extraídos de la planta Vía a la Costa.....	62
Densidad teórica máxima. Ensayo RICE.....	63
Ensayo RICE planta Durán.....	63

Ensayo RICE planta Chivería.....	63
Ensayo RICE planta KM26.	64
Ensayo RICE planta Vía a la Costa.....	64
Gravedad específica “Bulk” y Porcentaje de vacíos.....	64
Gravedad específica bulk y porcentaje de vacíos en la planta Duran.	65
Gravedad específica bulk y porcentaje de vacíos en la planta Chivería.	68
Gravedad específica bulk y porcentaje de vacíos en la planta KM26.....	71
Gravedad específica bulk y porcentaje de vacíos en la planta Vía a la Costa.	74
Organización de las muestras a ensayar mediante pruebas reológicas.	76
Módulo de Rigidez mediante deformación controlada.	77
Módulo de rigidez promedio, mediante deformación controlada, con una energía de compactación de 35 golpes.....	78
Módulo de rigidez promedio, mediante deformación controlada, con una energía de compactación de 50 golpes.....	79
Módulo de rigidez promedio, mediante deformación controlada, con una energía de compactación de 75 golpes.....	80
Ensayo de Módulo de Rigidez, mediante carga controlada y Fatiga.	81
Ensayo de Módulo de rigidez, mediante carga controlada y ensayo de fatiga de la planta Durán.....	81
Ensayo de Módulo de rigidez, mediante carga controlada y ensayo de fatiga de la planta Chivería.....	83
Ensayo de Módulo de rigidez, mediante carga controlada y ensayo de fatiga de la planta KM26.	85
Ensayo de Módulo de rigidez, mediante carga controlada y ensayo de fatiga de la planta Vía a la Costa.....	87
Ensayo de deformación permanente. (Creep Dinámico).....	89
CAPÍTULO 4 – ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	91
Porcentaje de asfalto en las muestras.	91

Granulometría en agregados extraídos.....	91
Densidad teórica máxima. Ensayo RICE.....	92
Gravedad específica “Bulk” o Densidad.....	92
Porcentaje de Vacíos.....	93
Módulo de rigidez mediante deformación controlada.....	94
Fatiga.....	95
Deformación permanente (Creep Dinámico).....	97
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	99
CONCLUSIONES.....	99
RECOMENDACIONES.....	101
BIBLIOGRAFÍA.....	103

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Dosificación de las mezclas asfálticas.	6
Tabla 2: Briquetas entregadas y fabricadas.	7
Tabla 3: Etiquetado de las mezclas a ensayar.	17
Tabla 4: características geométricas de briquetas de la planta Duran	20
Tabla 5: Características geométricas de briquetas de la planta Chivería.	21
Tabla 6: Características geométricas de briquetas de la planta KM26.	22
Tabla 7: Características geométricas de briquetas de la planta Vía a la Costa.	23
Tabla 8: Especificación granulométrica para tamaño máximo nominal de ½”(12.5mm).	25
Tabla 9: Prueba de extracción de asfalto de la planta Durán.	55
Tabla 10: Prueba de extracción de asfalto de la planta Chivería.	56
Tabla 11: Prueba de extracción de asfalto de la planta KM26.	57
Tabla 12: Prueba de extracción de asfalto de la planta Vía a la Costa.	58
Tabla 13: Granulometría en agregados extraídos de planta Durán.	59
Tabla 14: Granulometría en agregados extraídos de planta Chivería.	60
Tabla 15: Granulometría en agregados extraídos de planta KM26.	61
Tabla 16: Granulometría en agregados extraídos de planta Vía a la Costa.	62
Tabla 17: Resultados del ensayo RICE, de la planta Durán.	63
Tabla 18: Resultados del ensayo RICE, de la planta Chivería.	63
Tabla 19: Resultados del ensayo RICE, de la planta KM26.	64
Tabla 20: Resultados del ensayo RICE, de la planta Vía a la costa.	64
Tabla 21: Gravedad específica bulk y porcentaje de vacíos de la planta Durán.	65

Tabla 22: Gravedad específica bulk y porcentaje de vacíos de la planta Chivería.....	68
Tabla 23: Gravedad específica bulk y porcentaje de vacíos de la planta KM26.	71
Tabla 24: Gravedad específica "bulk" y porcentaje de vacíos de la planta Vía a la costa.	74
Tabla 25: Organización de las muestras, para pruebas reológicas.	76
Tabla 26: Módulos de rigidez, mediante deformación controlada, todas las plantas.....	77
Tabla 27: Módulo de rigidez, mediante deformación controlada, Compactación 35 golpes.....	78
Tabla 28: Modulo de rigidez, mediante deformación controlada, Compactación 50 golpes.....	79
Tabla 29: Modulo de rigidez, mediante deformación controlada, Compactación 75 golpes.....	80
Tabla 30: Módulo por carga controlada y fatiga, planta Durán.....	81
Tabla 31: Módulo por carga controlada y fatiga, planta Chivería.	83
Tabla 32: Módulo por carga controlada y fatiga, planta KM26.	85
Tabla 33: Módulo por carga controlada y fatiga, planta Vía a la costa.	87
Tabla 34: Resultados del ensayo Creep Dinámico.....	89
Tabla 35: Porcentaje de asfalto.	91
Tabla 36: Densidad teórica máxima, ensayo RICE.....	92
Tabla 37: Resultados de los ensayos de gravedad específica "Bulk".	93
Tabla 38: Porcentaje de vacíos, resultados generales.....	93
Tabla 39: Módulo de rigidez promedios, resultados generales.	94
Tabla 40: Porcentaje de deformación axial y porcentaje de vacíos.....	98

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Fig. 1 : Horno.....	8
Fig. 2: Termómetro blindado.....	9
Fig. 3: Balanzas.....	9
Fig. 4: Martillo de compactación.....	10
Fig. 5: Compactador.....	10
Fig. 6: Soporte de molde.....	11
Fig. 7: Moldes de compactación.....	11
Fig. 8: Extractor de muestra.....	12
Fig. 9: Espátulas y bandejas.....	12
Fig. 10: Extracción de muestras desde planta.....	13
Fig. 11: Extracción de muestra en planta Duran.....	13
Fig. 12: Molde siendo engrasado.....	14
Fig. 13: Compactadores manual y automático.....	15
Fig. 14: Enfriamiento de briquetas.....	15
Fig. 15: Extractor de muestras o briquetas.....	16
Fig. 16: Etiquetado de briquetas.....	17
Fig. 17: Briqueta 1-DU-50.....	18
Fig. 18: Calibrador vernier o pie de rey.....	19
Fig. 19: Peso de las muestras.....	26
Fig. 20: Peso sumergido.....	26
Fig. 21: Peso con superficie superficialmente seca.....	27
Fig. 22: Paso1. Selección de la aplicación Stiffness micron.....	30
Fig. 23: Paso 2. Pantalla de inicio y advertencias.....	30

Fig. 24: Paso 3. Dar la orden de No imprimir los resultados.	31
Fig. 25: Paso 4. Permitir guardar los datos.	31
Fig. 26: Paso 5. Guardar el archivo previo al trabajo.	32
Fig. 27: Paso 6. Continuar el ensayo.	32
Fig. 28: Paso 7. Guardar el nombre del operador.	33
Fig. 29: Paso 7. Una vez ingresado el operador, presionar el botón continuar..	33
Fig. 30: Paso 8. Guardar el nombre de la muestra o archivo a trabajar.	34
Fig. 31: Paso 9. Ingreso de parámetros al sistema.	34
Fig. 32: Paso 10. Poner la muestra bajo el transductor de cargas.	35
Fig. 33: Paso 11. Indicamos al programa, hacer contacto con la muestra.	35
Fig. 34: Paso 12. Posicionamiento de los sensores.	36
Fig. 35: Paso 13. Liberar la muestra de sus anclajes.	36
Fig. 36: Inicio del Ensayo en su primer instancia.	37
Fig. 37: Fin del primer proceso.	37
Fig. 38: Re-calibración de los sensores.	38
Fig. 39: Verificación de las temperaturas, e inicio del ensayo.	38
Fig. 40: Fin del ensayo, registro de los resultados.	39
Fig. 41: Selección de la aplicación Stiffness stress.	40
Fig. 42: Ingreso de carga para el ensayo.	41
Fig. 43: Selección de la aplicación Fatigue.	42
Fig. 44: Paso 1. Inicio del programa, solicitud de alejar la muestra.	43
Fig. 45: Paso 2. Continuar con la aplicación.	43
Fig. 46: Paso 3. Grabar el nombre del operador.	44
Fig. 47: Paso 4. Grabar el archivo y muestra.	44
Fig. 48: Paso 5. Ingreso de parámetros.	45

Fig. 49: Mensajes del sistema, seguir lo aconsejado y continuar.	45
Fig. 50: Contacto del actuador de fuerzas y la muestra.	46
Fig. 51: Inicio del ensayo.	46
Fig. 52: Fin del ensayo.	47
Fig. 53: Selección de la aplicación Dynamic creep.	48
Fig. 54: Paso 1. Seleccionar RLA Test, para guardar los datos del ensayo.	48
Fig. 55: Mensaje inicio del procedimiento.	49
Fig. 56: Paso 2. Guardar el archivo del ensayo.	49
Fig. 57: Paso 3. Guardar el nombre del operador.	50
Fig. 58: Paso 4. Guardar archivo del ensayo.	50
Fig. 59: Paso 5. Ingreso de parámetros.	51
Fig. 60: Mensajes del sistema.....	51
Fig. 61: Paso 6. Ajuste de los sensores.	52
Fig. 62: Correcto ajuste de los sensores a la muestra.	52
Fig. 63: Hacer contacto con la muestra.....	53
Fig. 64: Inicio del ensayo.	53
Fig. 65: Ensayo en proceso.	54
Fig. 66: Fin del ensayo.	54
Fig. 67: Gravedad específica o densidades, planta Durán.	65
Fig. 68: Gravedad específica promedio, planta Durán.	66
Fig. 69: Porcentaje de vacíos, planta Durán.	66
Fig. 70: Porcentaje de vacíos promedio, planta Durán.....	67
Fig. 71: Gravedad específica o densidades, Planta Chivería.	68
Fig. 72: Gravedad específica promedio, planta Chivería.....	69
Fig. 73: Porcentaje de vacíos, planta Chivería.....	69

Fig. 74: Porcentaje de vacíos promedio, planta Chivería.	70
Fig. 75: Gravedad específica o densidades, planta KM26.	71
Fig. 76: Gravedad específica promedio, planta KM26.....	72
Fig. 77: Porcentaje de vacíos, planta KM26.....	72
Fig. 78: Porcentaje de vacíos promedio, planta KM26.	73
Fig. 79: Gravedad específica o densidades, planta Vía a la Costa.	74
Fig. 80: Gravedad específica promedio, planta Vía a la Costa.....	75
Fig. 81: Porcentaje de vacíos, planta Vía a la Costa.....	75
Fig. 82; Porcentaje de vacíos promedio, planta Vía a la Costa.	76
Fig. 83: Módulo de rigidez promedio, mediante deformación controlada, compactación 35 golpes.	78
Fig. 84: Módulo de rigidez promedio, mediante deformación controlada, compactación 50 golpes.	79
Fig. 85: Módulo de rigidez promedio, mediante deformación controlada, compactación 75 golpes.	80
Fig. 86: Relación Carga vs repeticiones, Planta Durán.	81
Fig. 87: Relación Deformación vs repeticiones, planta Duran.	82
Fig. 88: Relación Carga vs repeticiones, Planta Chivería.....	83
Fig. 89: Relación Deformación vs repeticiones, planta Chivería.....	84
Fig. 90: Relación Carga vs repeticiones, Planta KM26.	85
Fig. 91: Relación Deformación vs repeticiones, planta KM26.	86
Fig. 92: Relación Carga vs repeticiones, Plata Vía a la costa.	87
Fig. 93: Relación Deformación vs repeticiones, planta Vía a la Costa.	88
Fig. 94: Relación Porcentaje de deformación axial y energía de compactación.	90
Fig. 95: Relación del Módulo de rigidez y el porcentaje de vacíos.	94
Fig. 96: Relación típica entre carga y repeticiones.....	96

Fig. 97: Relación típica entre deformación y repeticiones.96

Fig. 98: Gráfico de porcentajes de deformación axial y vacíos.98

RESUMEN

El trabajo presenta un estudio de las características reológicas en cuatro tipos de mezclas asfálticas, producidas en diferentes plantas con los agregados más representativos de la región costa, las cuales emplean diferentes energías de compactación (35, 50 y 75 golpes por cara), el objetivo del mismo es determinar a través de pruebas los parámetros reológicos correspondientes a: módulos de rigidez, compresión cíclica uniaxial sin confinamiento y fatiga bajo dispositivos de tracción indirecta, para generar recomendaciones que permitan mejorar los controles de calidad que se realizan actualmente.

En este estudio se realizaron los ensayos utilizados de manera habitual para el control de calidad en mezclas asfálticas convencionales, tales como: determinación del porcentaje de asfalto, granulometría en agregados extraídos, densidad teórica máxima, gravedad específica y porcentaje de vacíos; aplicando las normas ASTM y AASHTO que son requeridas para cada procedimiento. Los resultados obtenidos estuvieron dentro de las exigencias que establece el estándar de calidad del Ministerio de Transporte y Obras Públicas.

Los ensayos realizados para el control de calidad en mezclas asfálticas mediante pruebas reológicas o de desempeño fueron: módulo de rigidez, fatiga y deformación permanente o de creep dinámico; para lo cual se utilizó el equipo Nottingham Asphalt Tester, del laboratorio de carreteras de la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil. Los resultados obtenidos estuvieron dentro de los parámetros establecidos por las normas internacionales y fueron relacionados con los resultados en control de calidad convencionales. Llegando a conclusiones de considerable valor práctico, así como de algunas importantes consideraciones y recomendaciones para las futuras evaluaciones de este tipo ensayos.

Palabras Claves: Reología, Módulo, Rigidez, Fatiga, Deformación, Creep.

INTRODUCCIÓN

La mezcla asfáltica en caliente para pavimentos de carreteras está compuesta por una combinación de agregados minerales y un cemento asfáltico, ambos con calidades muy particulares, cuyas proporciones en la mezcla más la efectividad del proceso de compactación implicarán propiedades que pudiesen ser muy variables. Dentro de estas propiedades vale mencionar la resistencia al ahuellamiento (deformaciones plásticas) y a la fatiga (fisuras), consideradas en la mayor parte de los métodos de diseño de pavimentos.

En los últimos años ha tomado auge en el mundo el estudio y control de estas propiedades mediante las llamadas pruebas reológicas, basadas en un análisis dinámico del comportamiento tensión-deformación en especímenes de mezclas asfálticas. La forma del estudio tensión-deformación es variable, pudiéndose emplear pruebas a compresión, flexión, tracción y de corte.

En la UCSG existe un equipo Nottingham Asphalt Tester (NAT) modelo NU-10, que permite realizar varias de este tipo de pruebas reológicas. El NAT aplica las cargas mediante un sistema neumático con servo-control, midiéndose la fuerza aplicada por el transductor de la celda de carga. El equipo utiliza una computadora junto con un sistema digital de adquisición de datos y control de sistema que permite desarrollar las distintas pruebas y procesar la información a través de programas específicos. Con el mismo se pueden realizar diferentes tipos de pruebas: módulos de rigidez bajo deformación o carga controlada, compresión cíclica uniaxial sin confinamiento (creep dinámico) y pruebas de fatiga bajo dispositivo de tracción indirecta.

Para la realización de estas pruebas en general se consideran las metodologías dadas por el fabricante del equipo, que coinciden con los del Comité Europeo de Normalización (CEN 2000) respecto a la configuración de cargas y al sistema de medición y control; aunque para el caso de la prueba de compresión

cíclica uniaxial la CEN establece cierto confinamiento de la muestra, ya que el plato de carga tiene un diámetro menor que el de la muestra cilíndrica a ensayar.

No obstante a las ventajas de este tipo de equipo, hasta la presente fecha el control de calidad rutinario a las mezclas fabricadas en planta se basa, además del chequeo de componentes, en la comprobación de ciertos parámetros previstos en el diseño Marshall sobre briquetas compactadas con el 100% de la energía de compactación (usualmente 75 golpes/cara). Los parámetros volumétricos son densidades, porcentaje de vacíos con aire, de vacíos en el agregado mineral y de vacíos rellenos de asfalto, y los parámetros resistentes, especialmente relacionados con la deformación plástica, son la estabilidad Marshall y el flujo. Estos dos últimos parámetros son empíricos y de difícil interpretación desde un punto de vista tenso-deformacional. Vale aclarar que para el equipo NAT pueden emplearse briquetas tipo Marshall o núcleos convencionales de 10 cm de diámetro, algo beneficioso para este trabajo.

Pese a cumplirse usualmente con este tipo de control rutinario, es muy frecuente ver en el país pavimentos fisurados o deformados a los pocos años de su construcción o rehabilitación, lo que demuestra la insuficiencia de este sistema de control. Es decir, que existe la necesidad de considerar seriamente la aplicación a gran escala de las pruebas reológicas en el Ecuador, para lo cual tiene sustancial importancia el estudio teórico-práctico de los parámetros relacionados con estas, así como de las posibles exigencias a cumplirse en dichas pruebas, al menos de las que particularmente están a nuestro alcance con el empleo del NAT.

OBJETIVO

Determinar, a través de pruebas, los parámetros reológicos correspondientes a: módulos de rigidez, compresión cíclica uniaxial sin confinamiento y fatiga bajo dispositivos de tracción indirecta, para generar recomendaciones que permitan mejorar los controles de calidad que se realizan actualmente.

CAPÍTULO 1 – PARTICULARIDADES DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS ESTUDIADAS

Introducción

El estudio se realizará sobre cuatro tipos de mezclas asfálticas densas fabricadas en diferentes plantas de la región costa del Ecuador, empleando distintos agregados minerales. Para cada una de ellas se variará la energía de compactación a nivel de laboratorio, aplicando diferentes números de golpes por capa (75, 50 y 35 golpes). Se ha utilizado el mismo tipo de cemento asfáltico AC-20 procedente de la Refinería de Esmeraldas. Con estas muestras obtenidas se procederá a realizar pruebas reológicas para denotar las consideraciones, tomar sus resultados y poder establecer conclusiones.

Plantas seleccionadas.

Con el gentil aporte de varias empresas constructoras se pudo realizar la toma de muestras para la fabricación de las briquetas necesarias para este trabajo de grado. Denominándose las plantas de la siguiente manera, para su sencillo uso en gráficas y cálculos posteriores, de las cuales se mostrará posteriormente su consiguiente caracterización.

1. DURÁN
2. CHIVERÍA
3. KM26
4. VÍA A LA COSTA

Composición de las mezclas a ensayar.

El diseño de las mezclas de cada planta se realizó en su momento de acuerdo al método Marshall. En la confección de las briquetas se ha variado únicamente, como se indica en la introducción, la energía de compactación, siendo estas 35, 50 y 75 golpes, obteniéndose 5 muestras por cada tipo de energía de compactación.

A continuación se estudia la composición de las mezclas, donde la dosificación empleada ha sido informada por el personal de las plantas, para verificar lo acertado o no de estas dosificaciones se realizaron análisis experimentales que se mostraran posteriormente.

Agregados minerales.

Los agregados minerales en este trabajo están constituidos por rocas trituradas de las diferentes canteras de la ciudad de Guayaquil y arena de río. Todos los materiales han sido aprobados debidamente por el Ministerio de Transporte y Obras públicas del Ecuador. La dosificación en peso y granulometría responde a los criterios del organismo ya mencionado, del cual detallaremos sus especificaciones en el capítulo siguiente.

Asfaltos.

Se utilizará, en todas las muestras a ensayarse, el asfalto proveniente de la refinería del Ecuador clasificado como AC-20. La tabla 1, muestra la dosificación de las mezclas a utilizarse en este estudio.

Dosificación de las mezclas				
Planta	Tipo de Material	Procedencia	Tipo de Roca	Dosificación
Durán	Piedra 1/2 "	Cantera Durán	Andesita	15%
	Piedra 3/8"	Cantera Durán	Andesita	65%
	Arena	Río Chimbo	Arena de río	20%
	Asfalto	Refinería Esmeralda	-	7.0%
Chivería	Piedra 3/4"	Cantera Chivería	Basalto	20%
	Piedra 3/8"	Cantera Chivería	Basalto	60%
	Arena fina	Mina Limonal	Arena de río	20%
	Asfalto	Refinería Esmeralda	-	6.0%
KM26	Piedra 1/2 "	Cantera Km 26	Aluvial	25%
	Piedras 3/8"	Cantera Km 26	Aluvial	55%
	Arena	Río Bulu Bulu	Arena de río	20%
	Asfalto	Refinería Esmeralda	-	5.5%
Vía a la Costa	Piedra 1/2 "	Cantera Huaico	Caliza	40%
	Piedra 3/8"	Cantera Huaico	Caliza	40%
	Arena	Río Chimbo	Arena natural	20%
	Asfalto	Refinería Esmeralda	-	6.2%

Tabla 1: Dosificación de las mezclas asfálticas.

Elaboración y obtención de briquetas asfálticas.

Esta se desarrolló de dos maneras:

1. Las plantas entregan las briquetas ya elaboradas
2. Se toma la muestra en la planta y se elaboran las briquetas.

Las cuales detallamos a continuación, en la tabla 2:

Briquetas entregadas	Briquetas fabricadas
Chivería	Durán
KM26	Vía a la costa

Tabla 2: Briquetas entregadas y fabricadas.

Método Marshall para fabricación de briquetas asfálticas.

El método Marshall usa muestras cilíndricas de prueba, normalizadas, llamadas briquetas de 2 ½" de espesor con 4" de diámetro (64 x 102mm). Estos valores son los idealmente recomendados, ya en la práctica se dan variaciones que se ajustan empleando coeficientes de corrección o directamente en las fórmulas de cálculo.

Equipo empleado en la elaboración de briquetas.

Entre los equipos y herramientas más importantes para la elaboración de las briquetas se pueden mencionar los siguientes:

Horno.- Para calentar los materiales o mantener la temperatura óptima de la mezcla (aproximadamente 150 °C).



Fig. 1 : Horno.

Termómetro blindado.- De vidrio o dial con varilla, para lecturas entre 10 °C y 230 °C.



Fig. 2: Termómetro blindado.

Balanzas.- Si la capacidad es de 2 Kg, con aproximación a 0.1 gramo y si es de 5 Kg con una aproximación a 1 gramo.

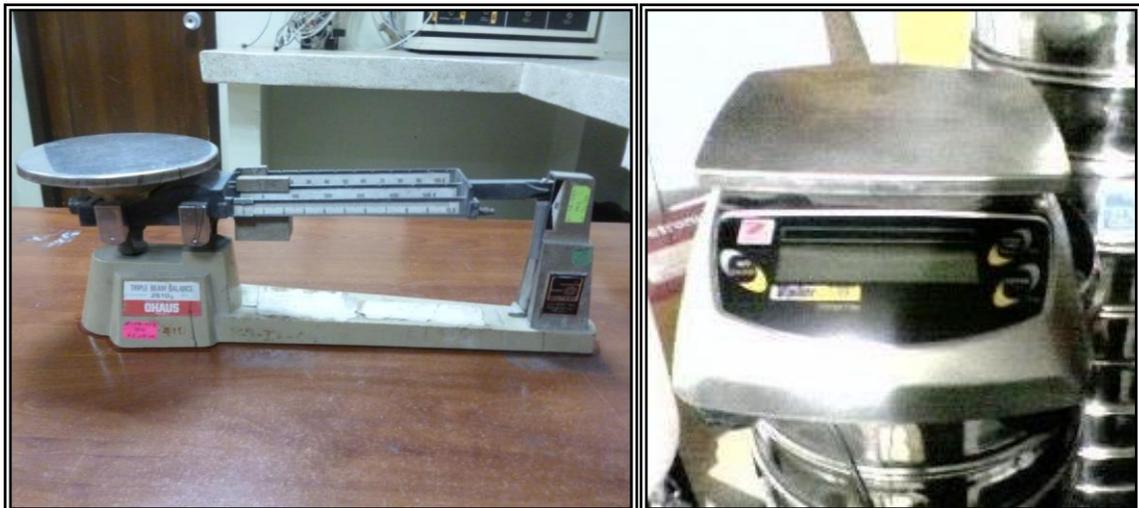


Fig. 3: Balanzas.

Compactador.- ya sea éste manual o electromecánico. Consta de un pedestal (soporte de madera sobre el cual descansa una placa de acero) más el martillo de compactación.

Martillo de compactación.- Conformado por un cilindro o mazo de acero 10 libras (4.5Kg) con una perforación central que permite su deslizamiento por una guía (varilla de acero). El mazo golpea una pieza circular que se coloca sobre el molde. La cara circular es de 3 7/8" (98.4mm) y la altura de caída es de 18" (cm) de altura.



Fig. 5: Compactador.



Fig. 4: Martillo de compactación.

Soporte del molde.- que consta de un dispositivo de tensión elástica, diseñado para acoplar el molde sobre el pedestal de compactación.



Fig. 6: Soporte de molde.

Molde de Compactación.- que consta de una base, molde encofrado y collar de extensión. EL molde tiene un diámetro inferior de 4”(101.6mm) y una altura aproximada de 3”(76mm). La base y el collar están diseñados para intercambiarse ya sea a uno u otro lado del molde.

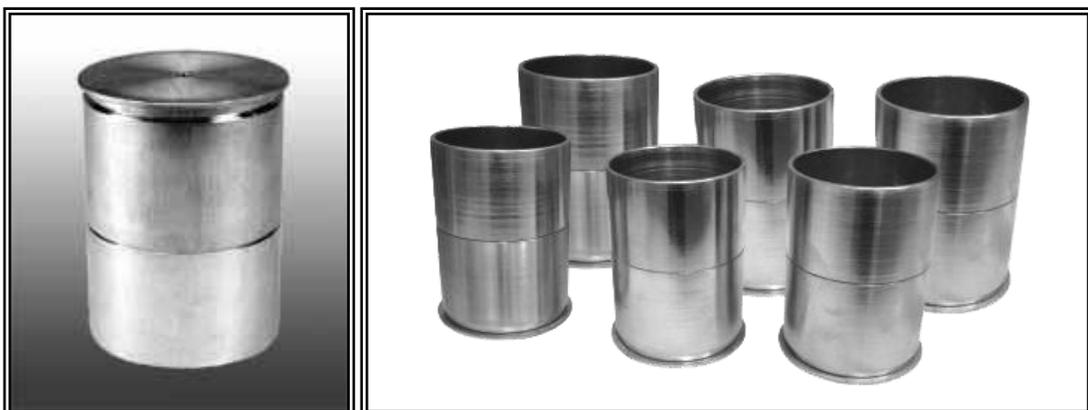


Fig. 7: Moldes de compactación.

Extractor de muestra.- o Prensa, sirve para extraer la muestra (briqueta) ya compactada. Para evitar darle golpes adicionales o maltratarla. Evitando así se altere la energía de compactación requerida.



Fig. 8: Extractor de muestra.

Herramientas menores.- como cucharas, espátulas, bandejas metálicas, mezclador.



Fig. 9: Espátulas y bandejas.

Descripción del procedimiento, de fabricación de briquetas.

Extracción de muestra desde planta.

Al ubicar la planta, se extrae la muestra directamente de la planta, controlando su temperatura.



Fig. 10: Extracción de muestras desde planta.



Fig. 11: Extracción de muestra en planta Duran.

Moldeo.

Se engrasa el molde de briqueta tipo Marshall, para evitar que la muestra se pegue y se rellena el mismo en capas hasta obtener la altura de compactación deseada. Colocar toda la mezcla preparada dentro del molde, emparejando la mezcla con la espátula, unas 15 veces alrededor del perímetro y 10 veces en la parte central.



Fig. 12: Molde siendo engrasado.

Compactación de los núcleos de prueba.

Inmediatamente, antes del proceso de compactación, la temperatura de la mezcla debe estar muy cercana a los límites de la temperatura de compactación establecida. Colocar nuevamente el collar de extensión, y ubicarlo en el pedestal de compactación. Se aplican 75 (35 ó 50) golpes con el martillo, según lo especificado para nuestro estudio. Se quitan la base y el collar se le da vuelta y se vuelve a armar el conjunto. Se aplica el mismo número de golpes a la cara opuesta de la muestra.

Después de la compactación, se quita la base del molde y se expone la muestra a la temperatura ambiente dentro del molde. Se saca la muestra del molde por medio de un extractor



Fig. 13: Compactadores manual y automático.

Enfriamiento.

Sin extraer del molde, colocamos en agua para enfriar la briqueta, manteniendo así sus dimensiones, e impidiendo su deformación.



Fig. 14: Enfriamiento de briquetas.

Extracción del molde.

Usando el extractor en laboratorio se realiza la extracción de la misma, realizarlo con golpes adicionales o por otros medios, cambiara la energía de compactación de la muestra.



Fig. 15: Extractor de muestras o briquetas.

Etiquetado.

Una vez extraída la muestra, se realiza la identificación y etiquetado de las mismas para su posterior análisis, esto evita la confusión y la mala interpretación de resultados por confusión.



Fig. 16: Etiquetado de briquetas.

Organización de las mezclas a ensayar.

Se muestra a continuación, las etiquetas y la organización, de las muestras o briquetas a utilizarse en el siguiente trabajo de investigación, las cuales serán aplicadas en la etapa de desarrollo experimental para la identificación de las mismas.

DU	1-DU-35	2-DU-35	3-DU-35	4-DU-35	5-DU-35	1-DU-35
	1-DU-50	2-DU-50	3-DU-50	4-DU-50	5-DU-50	1-DU-50
	1-DU-75	2-DU-75	3-DU-75	4-DU-75	5-DU-75	1-DU-75
CH	1-CH-35	2-CH-35	3-CH-35	4-CH-35	5-CH-35	1-CH-35
	1-CH-50	2-CH-50	3-CH-50	4-CH-50	5-CH-50	1-CH-50
	1-CH-75	2-CH-75	3-CH-75	4-CH-75	5-CH-75	1-CH-75
K26	1-K26-35	2-K26-35	3-K26-35	4-K26-35	5-K26-35	1-K26-35
	1-K26-50	2-K26-50	3-K26-50	4-K26-50	5-K26-50	1-K26-50
	1-K26-75	2-K26-75	3-K26-75	4-K26-75	5-K26-75	1-K26-75
AV	1-AV-35	2-AV-35	3-AV-35	4-AV-35	5-AV-35	1-AV-35
	1-AV-50	2-AV-50	3-AV-50	4-AV-50	5-AV-50	1-AV-50
	1-AV-75	2-AV-75	3-AV-75	4-AV-75	5-AV-75	1-AV-75

Tabla 3: Etiquetado de las mezclas a ensayar.

Descripción del etiquetado de las muestras a ensayar.

Utilizamos un color diferente para la identificación grafica de cada planta, también se describe, el significado de cada agrupación de caracteres en la misma.

Vemos en la Fig. 17, la Muestra No. 1, con una energía de compactación de 50 Golpes, proveniente de la planta Duran.

1	DU	50
Numeración	Planta	Energía de Compactación



Fig. 17: Briqueta 1-DU-50.

Características geométricas y registro de las muestras.

Cuando la muestra se encuentra fría y haya transcurrido las 16 horas mínimo, se realiza, la medición de sus dimensiones y registro. Lo cual consiste en la medición del espesor por 3 veces en diferentes posiciones con un calibrador vernier (pie de rey). Ver Figura 18. Y se obtiene el promedio de las mediciones realizadas.

Esto se realiza, por motivo de las irregularidades que las briquetas puedan presentar, la cual debe evitarse en lo posible con un correcto procedimiento de fabricación, especialmente en el proceso de compactación.



Fig. 18: Calibrador vernier o pie de rey.

Registro de características geométricas de briquetas pertenecientes a la planta Duran.

Luego de medir con el calibrador, registramos los datos a continuación en la Tabla. 4.

Planta	No. Muestra	Energía de Compactación (Golpes)	Muestra	Espesor e (mm)
Durán	1	35	1-35-DU	67
Durán	2	35	2-35-DU	64
Durán	3	35	3-35-DU	65
Durán	4	35	4-35-DU	67
Durán	5	35	5-35-DU	68
Durán	1	50	1-50-DU	63
Durán	2	50	2-50-DU	66
Durán	3	50	3-50-DU	61
Durán	4	50	4-50-DU	65
Durán	5	50	5-50-DU	65
Durán	1	75	1-75-DU	63
Durán	2	75	2-75-DU	61
Durán	3	75	3-75-DU	61
Durán	4	75	4-75-DU	63
Durán	5	75	5-75-DU	65

Tabla 4: características geométricas de briquetas de la planta Duran

Registro de características geométricas de briquetas pertenecientes a la planta Chivería.

Luego de medir con el calibrador, registramos los datos a continuación en la Tabla. 5.

Planta	No. Muestra	Energía de Compactación (Golpes)	Muestra	Espesor e (mm)
Chivería	1	35	1-35-CH	64
Chivería	2	35	2-35-CH	61
Chivería	3	35	3-35-CH	62
Chivería	4	35	4-35-CH	63
Chivería	5	35	5-35-CH	65
Chivería	1	50	1-50-CH	63
Chivería	2	50	2-50-CH	64
Chivería	3	50	3-50-CH	63
Chivería	4	50	4-50-CH	65
Chivería	5	50	5-50-CH	66
Chivería	1	75	1-75-CH	65
Chivería	2	75	2-75-CH	62
Chivería	3	75	3-75-CH	65
Chivería	4	75	4-75-CH	63
Chivería	5	75	5-75-CH	63

Tabla 5: Características geométricas de briquetas de la planta Chivería.

Registro de características geométricas de briquetas pertenecientes a la planta KM26.

Luego de medir con el calibrador, registramos los datos a continuación en la Tabla. 6.

Planta	No. Muestra	Energía de Compactación (Golpes)	Muestra	Espesor e (mm)
KM26	1	35	1-35-K26	63
KM26	2	35	2-35-K26	66
KM26	3	35	3-35-K26	64
KM26	4	35	4-35-K26	65
KM26	5	35	5-35-K26	64
KM26	1	50	1-50-K26	62
KM26	2	50	2-50-K26	62
KM26	3	50	3-50-K26	64
KM26	4	50	4-50-K26	63
KM26	5	50	5-50-K26	60
KM26	1	75	1-75-K26	63
KM26	2	75	2-75-K26	60
KM26	3	75	3-75-K26	61
KM26	4	75	4-75-K26	63
KM26	5	75	5-75-K26	64

Tabla 6: Características geométricas de briquetas de la planta KM26.

Registro de características geométricas de briquetas pertenecientes a la planta Vía a la Costa.

Luego de medir con el calibrador, registramos los datos a continuación en la Tabla. 7.

Planta	No. Muestra	Energía de Compactación (Golpes)	Muestra	Espesor e (mm)
Vía a la Costa	1	35	1-35-AV	66
Vía a la Costa	2	35	2-35-AV	67
Vía a la Costa	3	35	3-35-AV	63
Vía a la Costa	4	35	4-35-AV	61
Vía a la Costa	5	35	5-35-AV	68
Vía a la Costa	1	50	1-50-AV	56
Vía a la Costa	2	50	2-50-AV	65
Vía a la Costa	3	50	3-50-AV	63
Vía a la Costa	4	50	4-50-AV	66
Vía a la Costa	5	50	5-50-AV	58
Vía a la Costa	1	75	1-75-AV	56
Vía a la Costa	2	75	2-75-AV	59
Vía a la Costa	3	75	3-75-AV	61
Vía a la Costa	4	75	4-75-AV	56
Vía a la Costa	5	75	5-75-AV	54

Tabla 7: Características geométricas de briquetas de la planta Vía a la Costa.

CAPÍTULO 2 – CONTROL DE CALIDAD DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS.

Generalidades.

Se realizarán diferentes procedimientos experimentales y ensayos, siguiendo las normas ASTM y AASTHO necesarias e indicadas para cada procedimiento, según corresponda, sus particularidades y especificaciones. Se hará una breve explicación del ensayo a utilizarse y la norma aplicada a cada uno de ellos, las cuales se han seguido a cabalidad.

Control de calidad convencional de las mezclas asfálticas.

A todas las mezclas asfálticas se les realizaron las llamadas pruebas convencionales, tales como el porcentaje de asfalto, granulometría ensayo Rice, Gravedad específica bulk o densidad, las cuales describen su composición y las propiedades volumétricas de las mismas, que serán relacionadas con las propiedades dinámicas o reológicas.

Porcentaje de Asfalto.

Para la determinación cuantitativa del asfalto en las mezclas asfálticas, se utilizó el procedimiento de trabajo aplicando las normas ASTM D 2172 (1995), AASHTO T164, el cual realiza la separación del asfalto mediante la utilización de solventes químicos y filtros. Luego, con cálculos de pesos, en diferentes etapas del procedimiento se llega a la determinación del porcentaje requerido.

Granulometría en agregados extraídos.

La granulometría usual corresponde a la especificación: 1/2". MOP- 001 F-2002. TABLA 405-5.1., que es la más frecuentemente empleada para capas de rodadura en el Ecuador.

Los porcentajes pasados acumulados en dicha especificación se muestran en la tabla 8.

ABERTURA DE TAMICES		% PASADO ACUMULADO	ESPEC. 1/2" MOP 2002	
No.	mm		Mínimo	Máximo
3/4"	19.00		100	100
1/2"	12.70		90	100
# 4	4.75		44	74
# 8	2.36		28	58
# 50	0.30		5	21
# 200	0.10		2	10
FONDO	FONDO			

Tabla 8: Especificación granulométrica para tamaño máximo nominal de 1/2"(12.5mm).

Densidad teórica máxima (Ensayo Rice).

Para medir la densidad teórica máxima, se utiliza el ensayo RICE, utilizando las normas ASTM D 2041, y AASHTO T 209, Estas normas determinan la gravedad y densidad teórica máxima de las mezclas asfálticas no compactadas a una temperatura de 25°C.

Gravedad específica "Bulk" o densidad.

Se realizará la toma de densidades o gravedad específica Bulk, briquetas de asfaltos, considerando los procedimientos de las normas ASTM D 1188 y AASHTO T275.

Descripción del procedimiento de obtención de la gravedad específica “Bulk” o densidad de las briquetas.

Se toman los diferentes pesos de las muestras estos son; Peso seco, Peso sumergido en agua y peso superficialmente seco; para luego realizar los cálculos correspondientes. Para lo cual utilizaremos hojas electrónicas.

Se realiza el registro de los pesos secos, de las muestras. La Fig. 19, registra el procedimiento en mención.



Fig. 19: Peso de las muestras.

Luego sumergimos las briquetas o muestras y registramos su peso. Vemos en la Fig. 20, la técnica utilizada para obtener este peso.

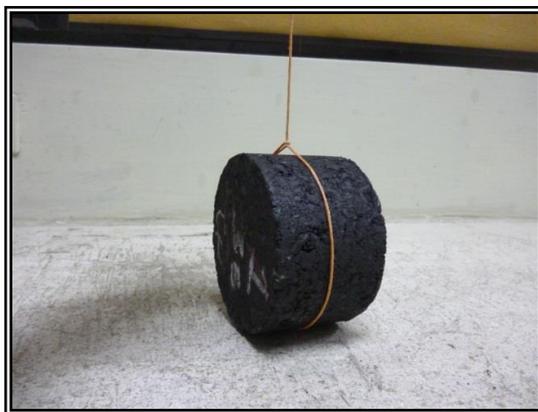


Fig. 20: Peso sumergido.

Se calcula el peso con la superficie superficialmente seca y luego realizamos el calculo del volumen y de la gravedad específica correspondiente.



Fig. 21: Peso con superficie superficialmente seca.

Se realizan los cálculos, mencionados, siguiendo las fórmulas mostradas a continuación.

Gravedad específica "Bulk" o Densidad.

$D = \frac{P_a}{Vol}$	<i>D = Densidad</i>
$Vol = P_{sss} - P_{ag}$	<i>Vol= Volumen</i>
$D = \frac{P_a}{(P_{sss} - P_{ag})}$	<i>Pa= Peso seco</i>
	<i>Psss= Peso superficialmente seco</i>
	<i>Pag= Peso sumergido en agua</i>

Porcentaje de Vacíos.

Éste mide el porcentaje de vacíos con aire que se encuentran en las mezclas bituminosas ya sean estas densas o abiertas. Se utilizará la norma ASTM D 3203 y AASHTO T 269, para el cálculo de las mismas.

Para obtener el porcentaje de vacío es necesario determinar previamente la gravedad específica bulk o densidad, ya descrita, al igual que la gravedad específica teórica máxima, y luego calcular según la fórmula siguiente:

$$\% \text{ de vacíos} = 100 \left[1 - \frac{\text{Gravedad específica bulk}}{\text{Gravedad específica teórica máxima}} \right]$$

Control de calidad con pruebas reológicas o de desempeño.

La reología es conocida como la ciencia del estudio de los fluidos de la materia, es decir relaciona el esfuerzo y deformación de un sólido, para unas condiciones dadas de presión y temperatura.

Uno de los objetivos de utilizar las pruebas reológicas o desempeño en el proceso de calidad de los pavimentos asfálticos es encontrar ecuaciones constitutivas para modelar el comportamiento de los materiales.

En el laboratorio de la UCSG contamos con el equipo Nottingham Asphalt Tester modelo NU-10, el cual aplica las cargas mediante un sistema neumático con servo-control, midiendo la fuerza aplicada por el transductor de la celda de carga. Este equipo utiliza una computadora, junto a un conjunto de programas que permiten desarrollar las distintas pruebas y procesar la información a través de ellos.

Se realizarán 3 tipos de pruebas dinámicas que se detallan a continuación:

- Módulo de rigidez, mediante deformación controlada.
- Módulo de rigidez por carga controlada más Fatiga.
- Deformación permanente (Creep dinámico).

Módulo de rigidez mediante deformación controlada.

Tanto este ensayo de módulo de rigidez como el ensayo de fatiga se realizaron empleando un cabezal de carga de tracción indirecta.

El módulo de rigidez se ensayó a una temperatura de 20°C, empleando un nivel de deformación controlada de 5 micrones y ondas sinusoidales con intervalo de tiempo entre el inicio del pulso de carga y el punto en el que la carga es máxima (tiempo de aplicación de carga) de 0,12 segundos.

Procedimiento para la determinación del Módulo de Rigidez, mediante deformación controlada utilizando el NAT.

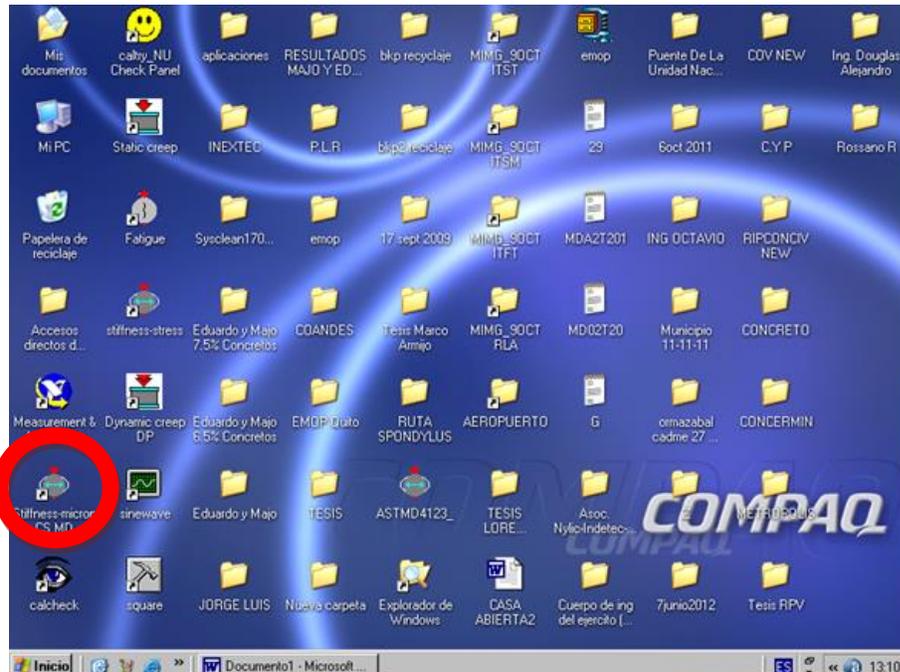


Fig. 22: Paso1. Selección de la aplicación Stiffness micron.

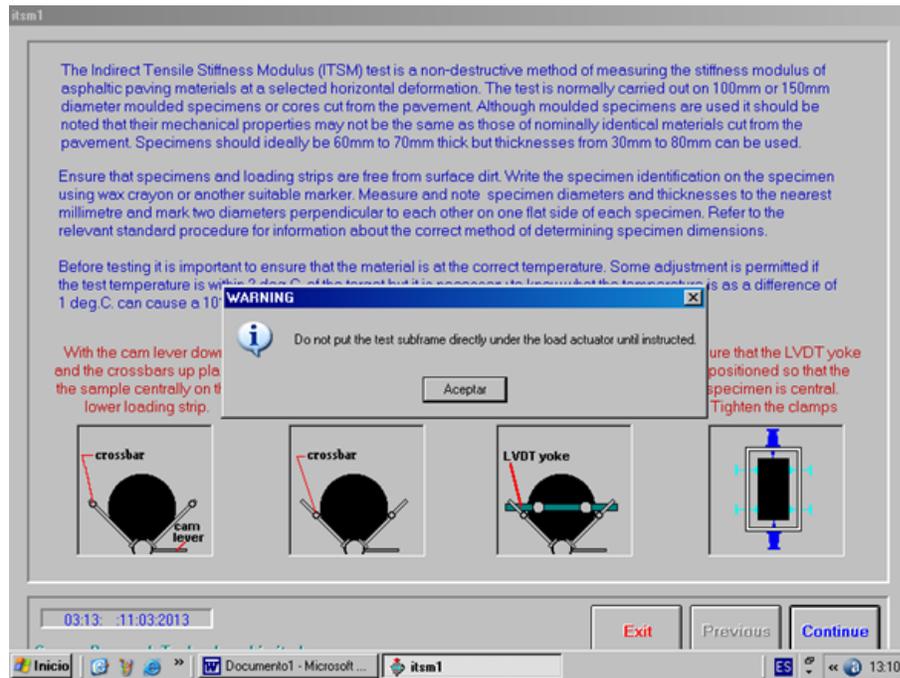


Fig. 23: Paso 2. Pantalla de inicio y advertencias.

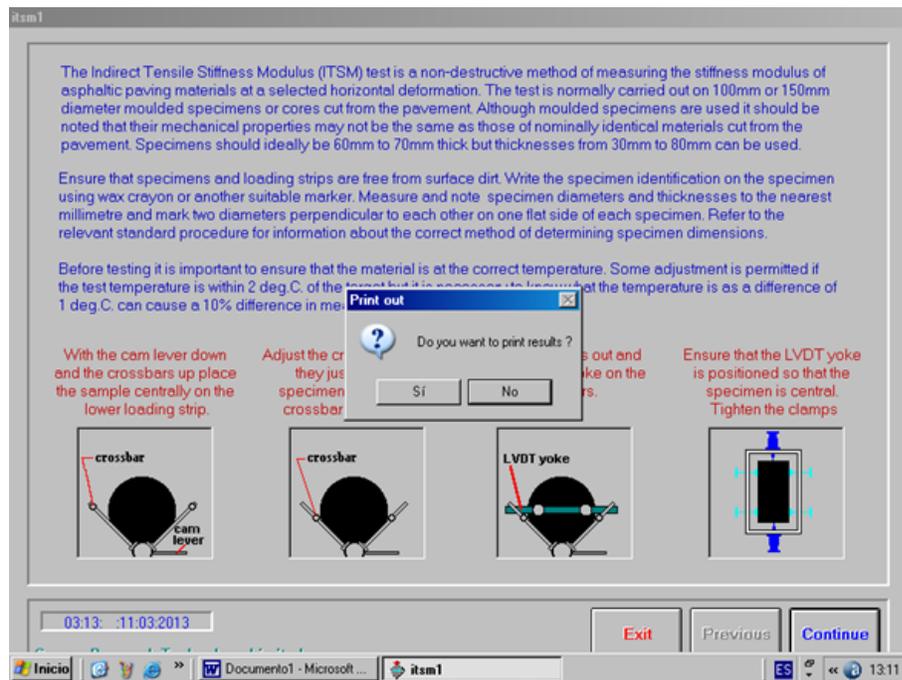


Fig. 24: Paso 3. Dar la orden de No imprimir los resultados.

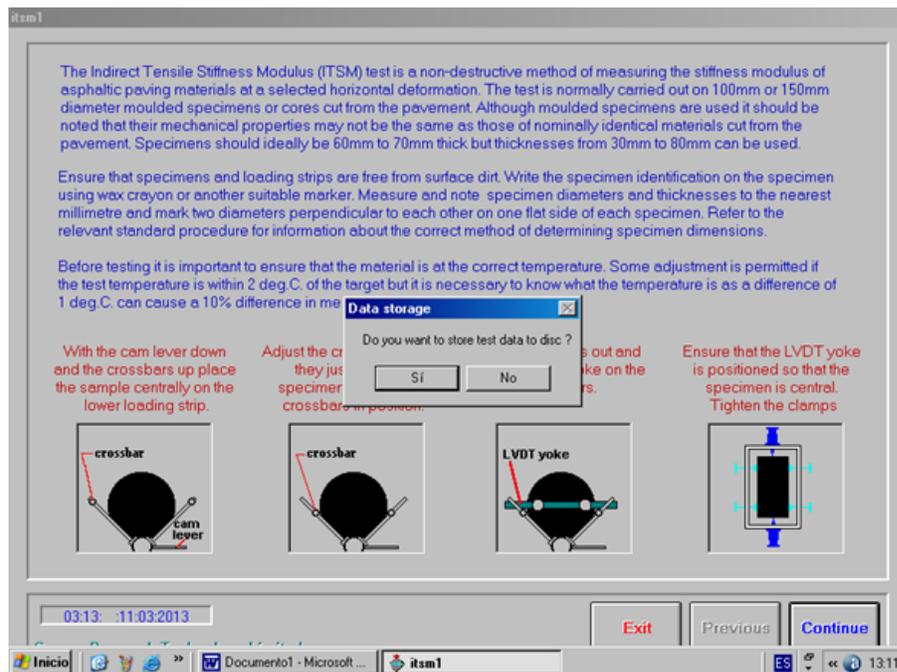


Fig. 25: Paso 4. Permitir guardar los datos.

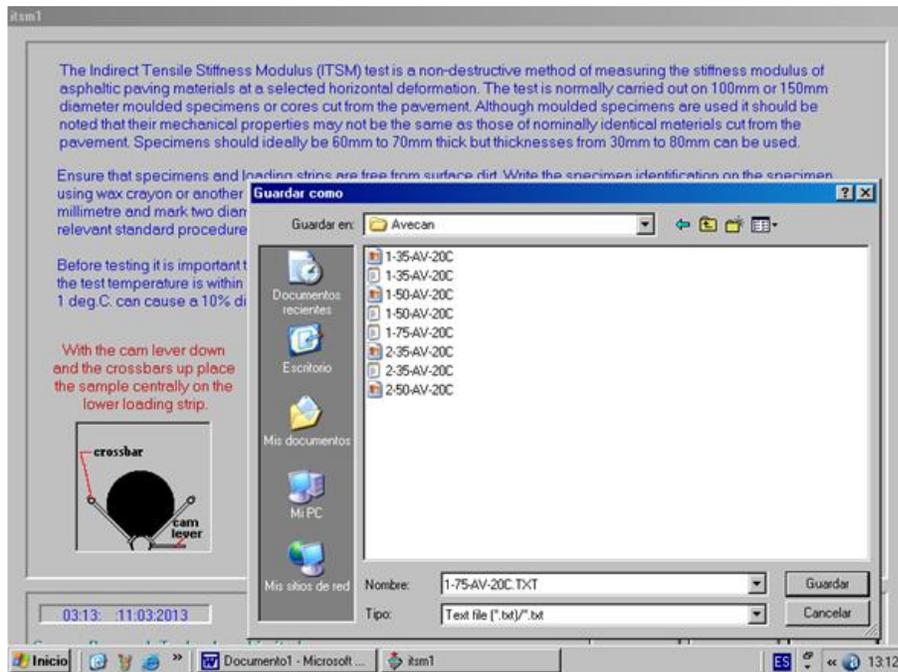


Fig. 26: Paso 5. Guardar el archivo previo al trabajo.

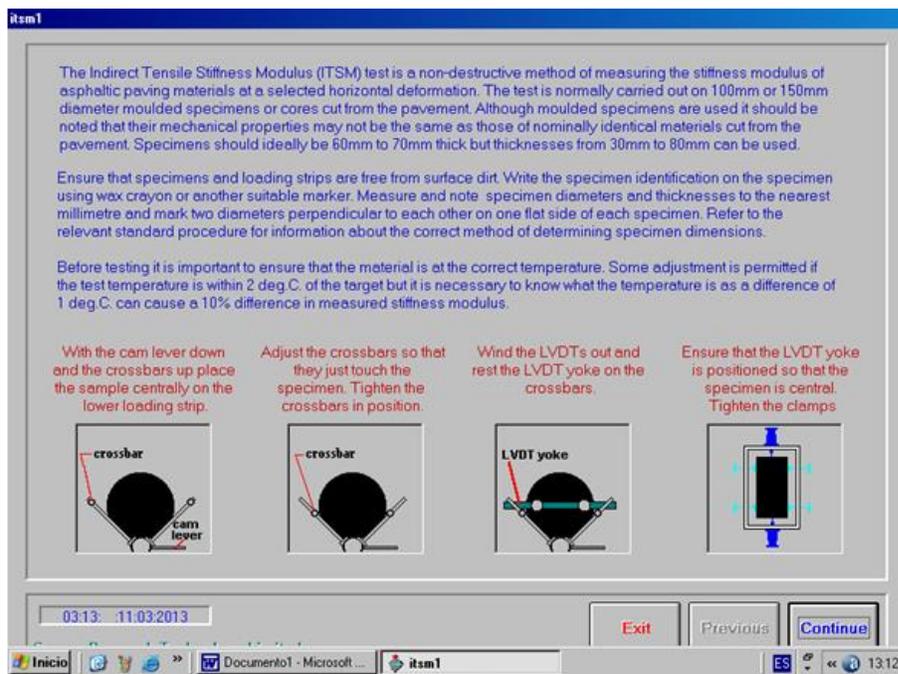


Fig. 27: Paso 6. Continuar el ensayo.

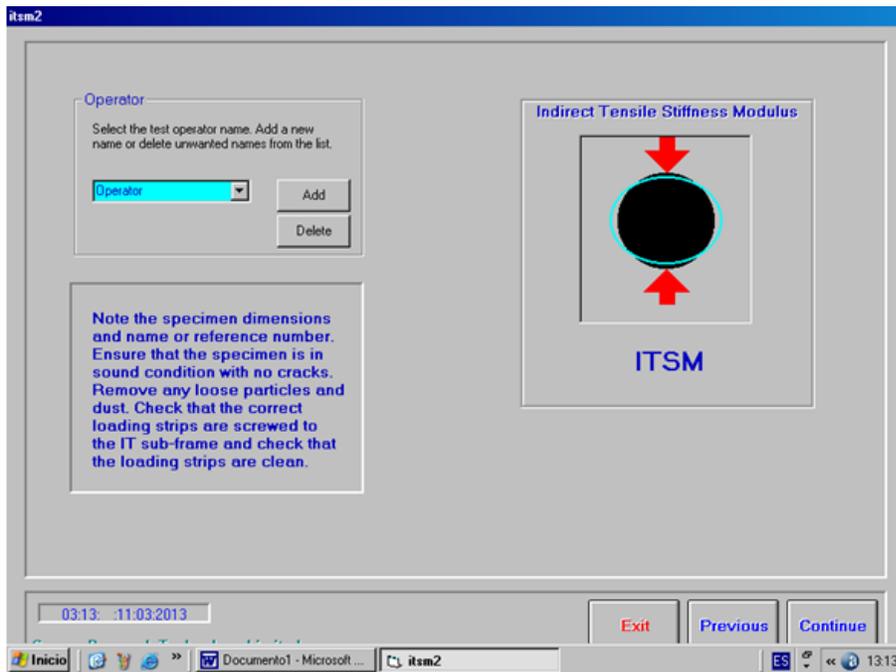


Fig. 28: Paso 7. Guardar el nombre del operador.

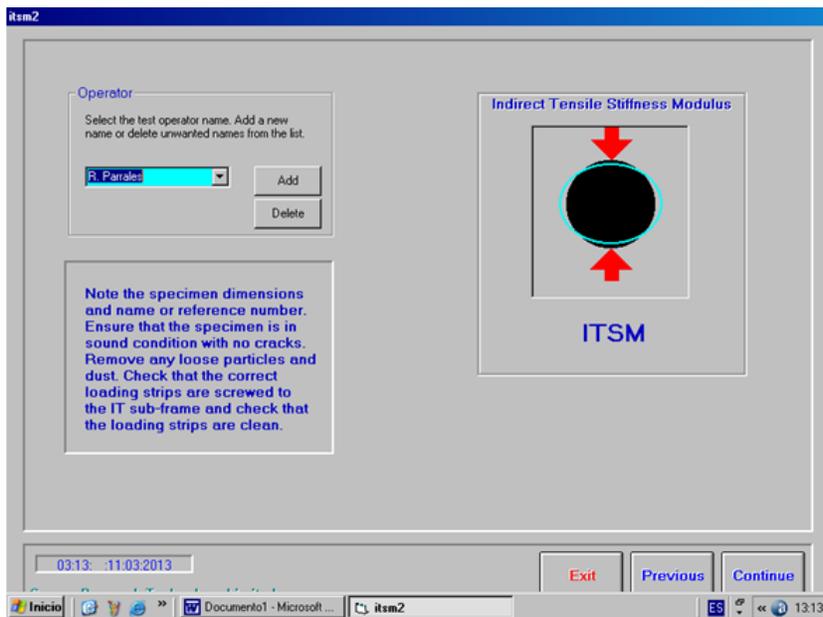


Fig. 29: Paso 7. Una vez ingresado el operador, presionar el botón continuar.

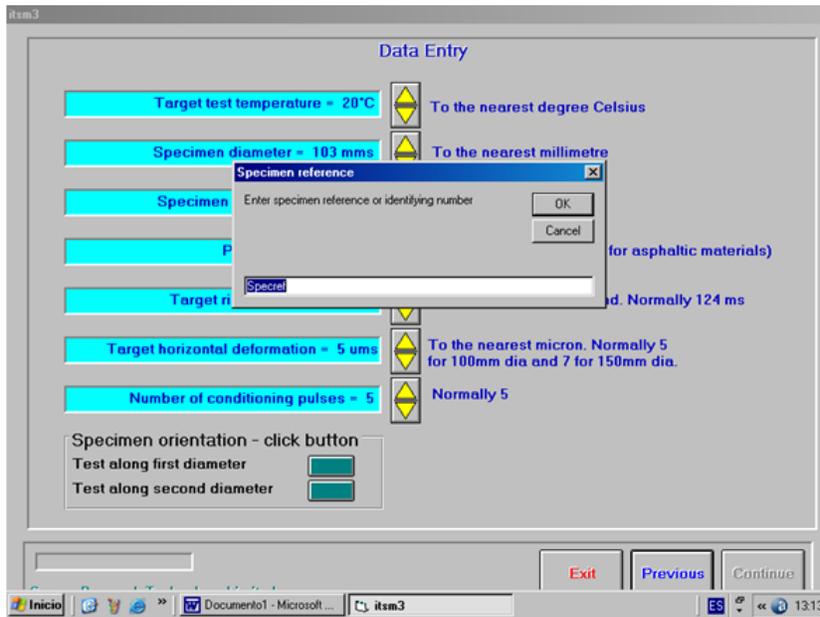


Fig. 30: Paso 8. Guardar el nombre de la muestra o archivo a trabajar.

En este paso, tendremos que seguir varias indicaciones luego de poner continuar, hay que seguir las recomendaciones dadas y luego. Poner aceptar.

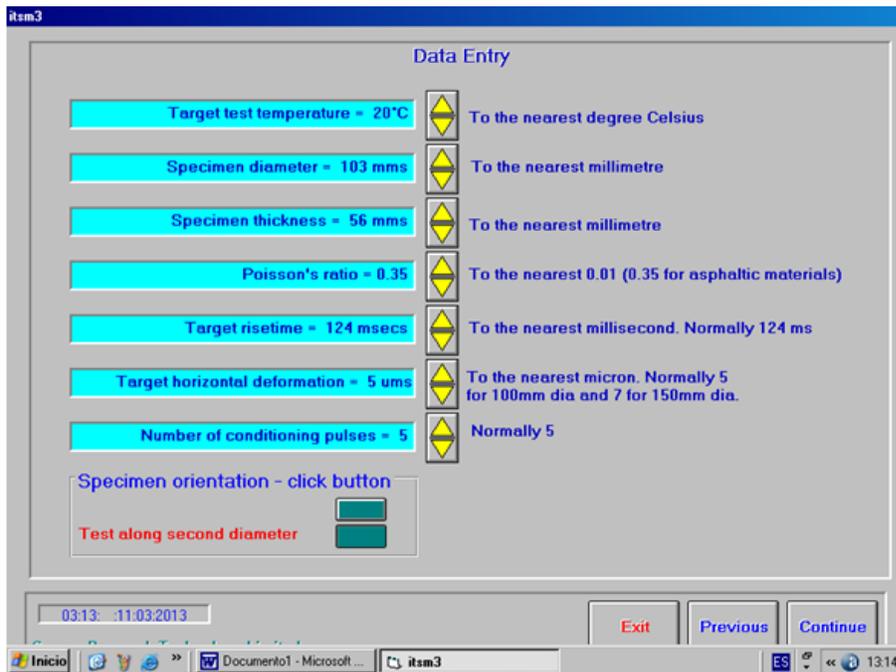


Fig. 31: Paso 9. Ingreso de parámetros al sistema.

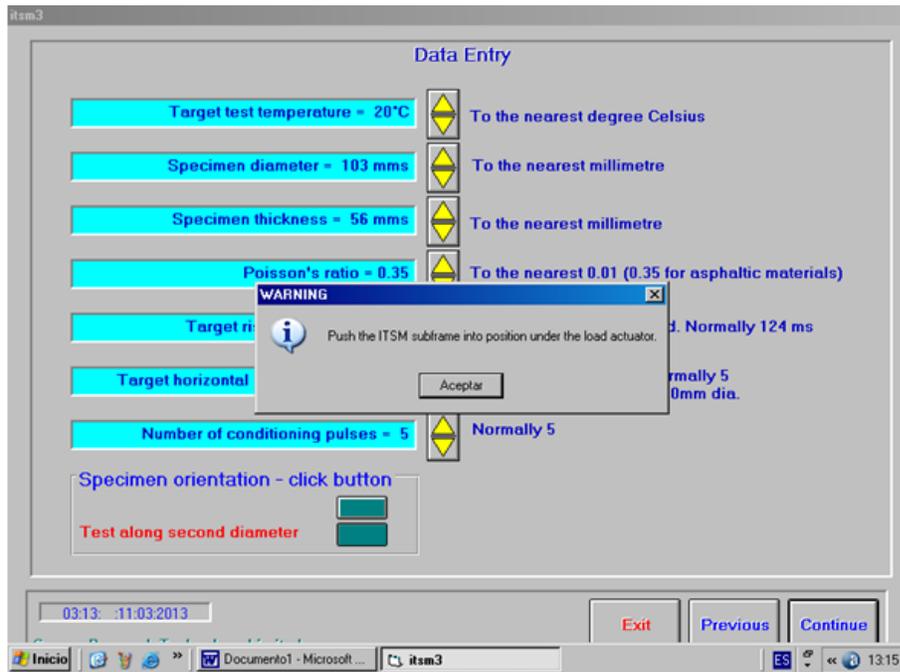


Fig. 32: Paso 10. Poner la muestra bajo el transductor de cargas.

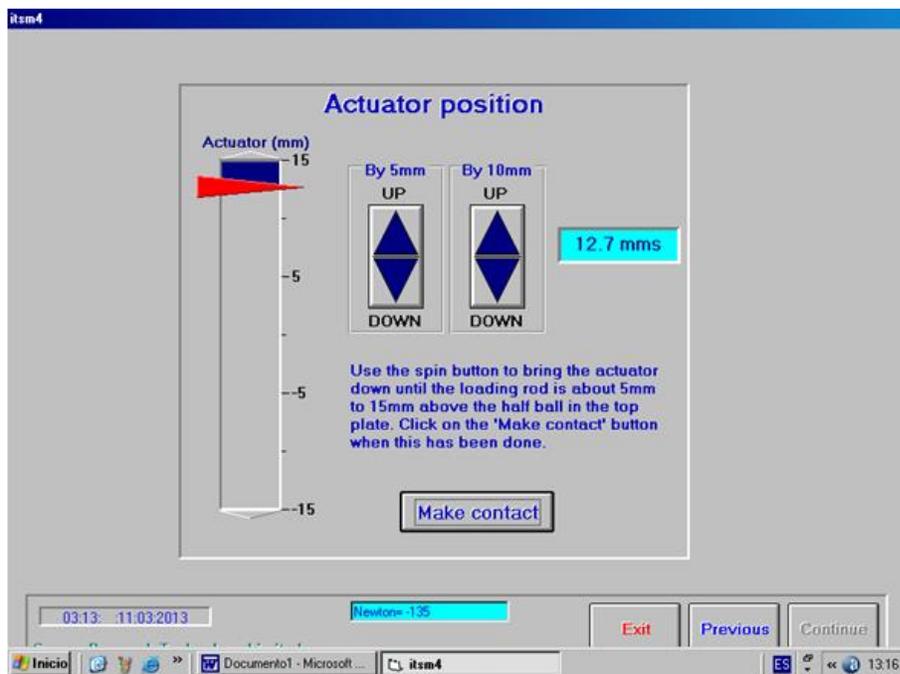


Fig. 33: Paso 11. Indicamos al programa, hacer contacto con la muestra.

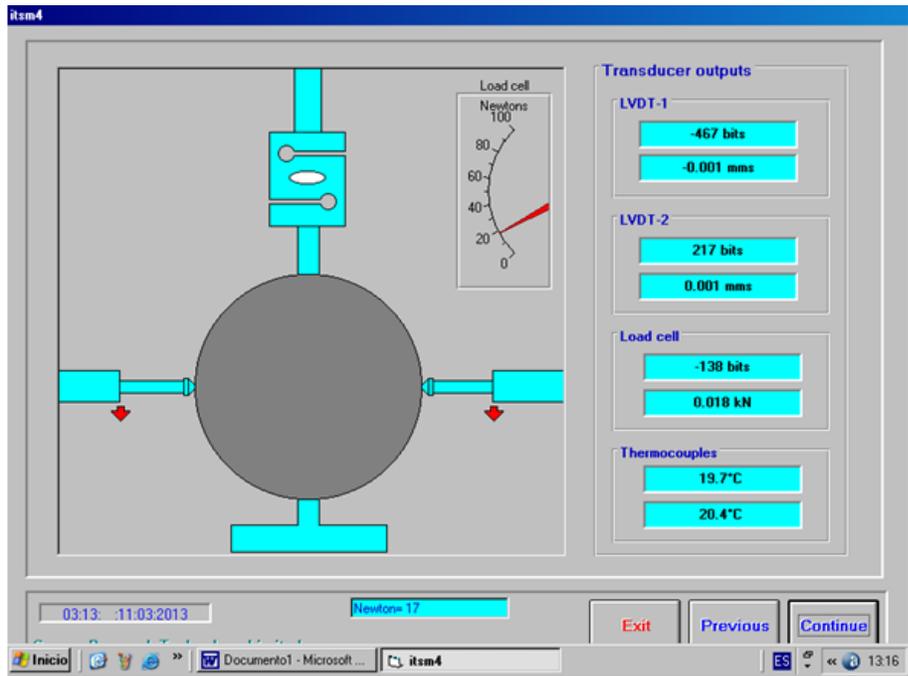


Fig. 34: Paso 12. Posicionamiento de los sensores.

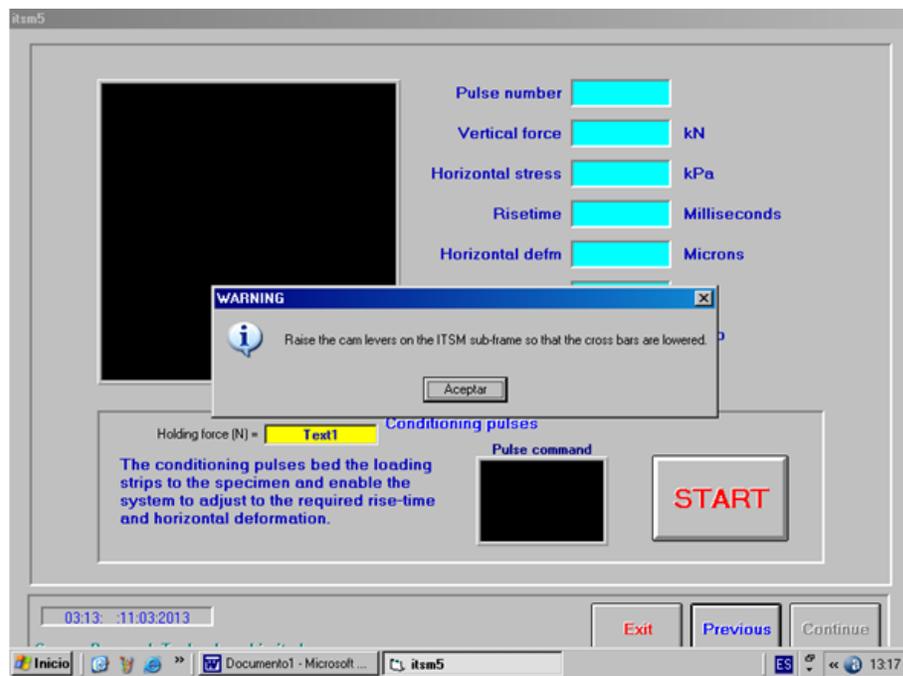


Fig. 35: Paso 13. Liberar la muestra de sus anclajes.

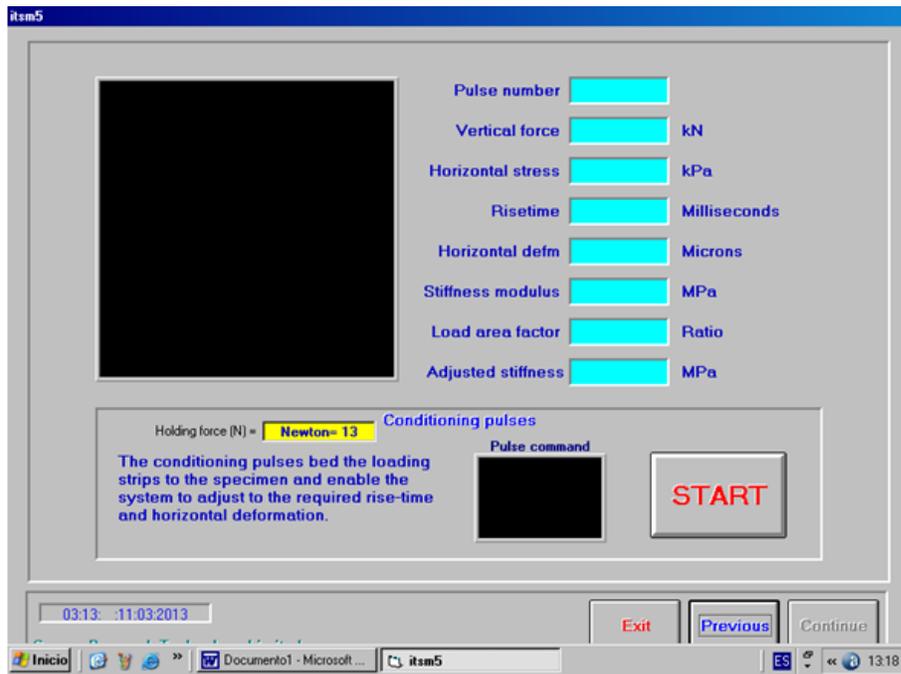


Fig. 36: Inicio del Ensayo en su primer instancia.

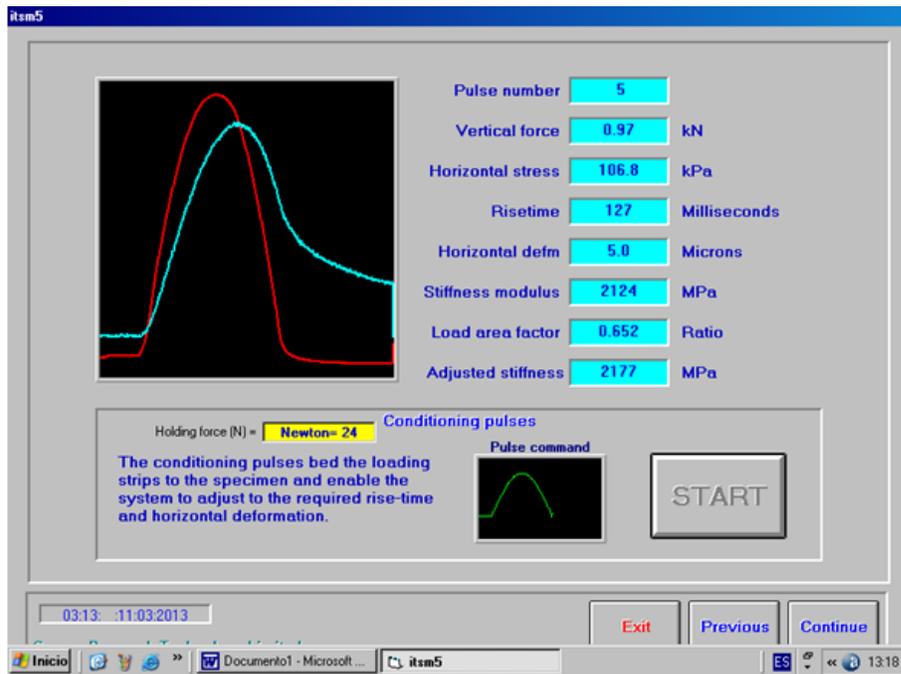


Fig. 37: Fin del primer proceso.

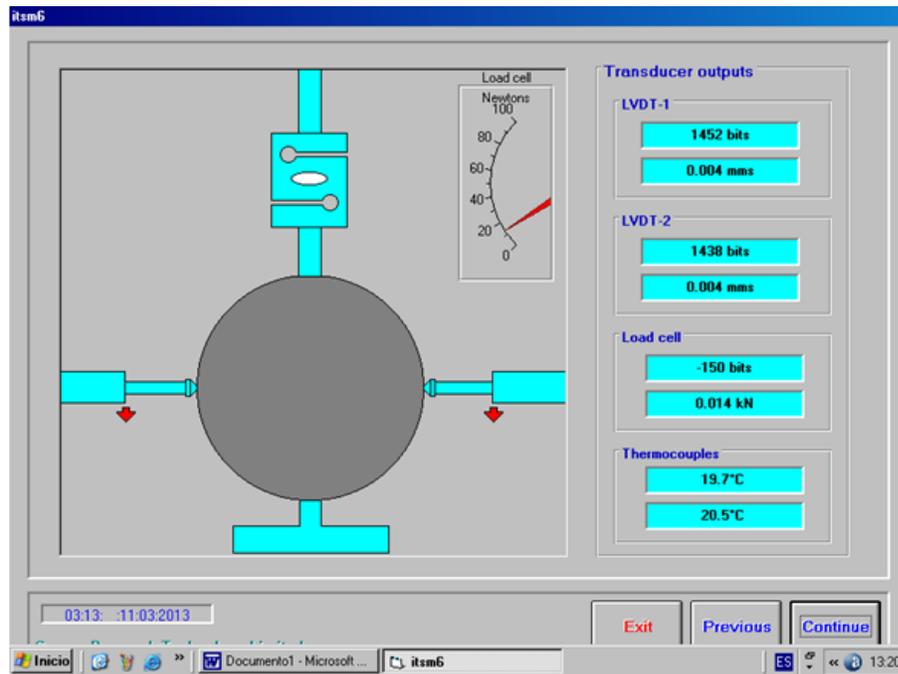


Fig. 38: Re-calibración de los sensores.

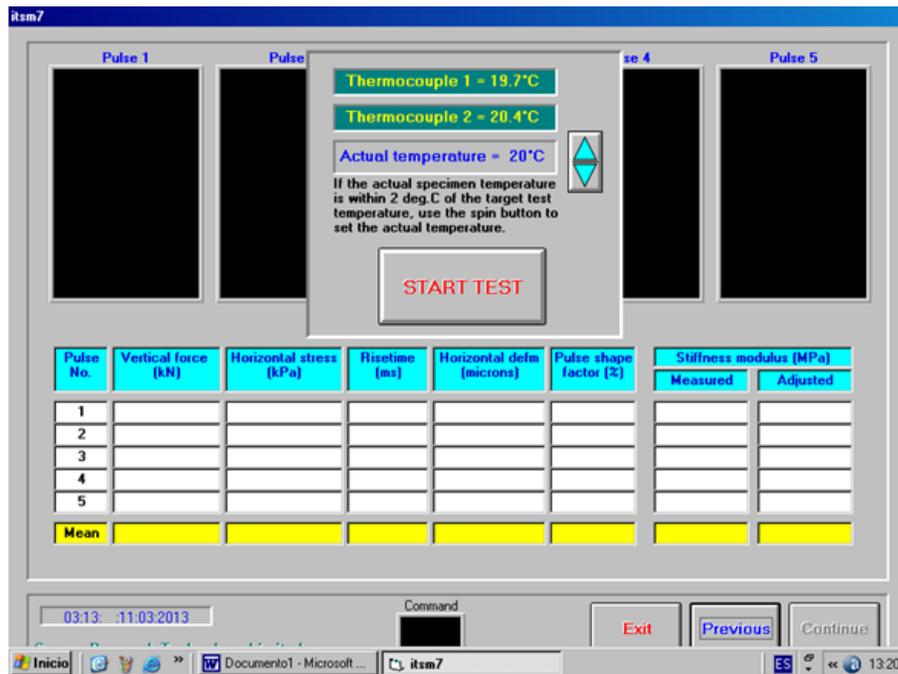


Fig. 39: Verificación de las temperaturas, e inicio del ensayo.

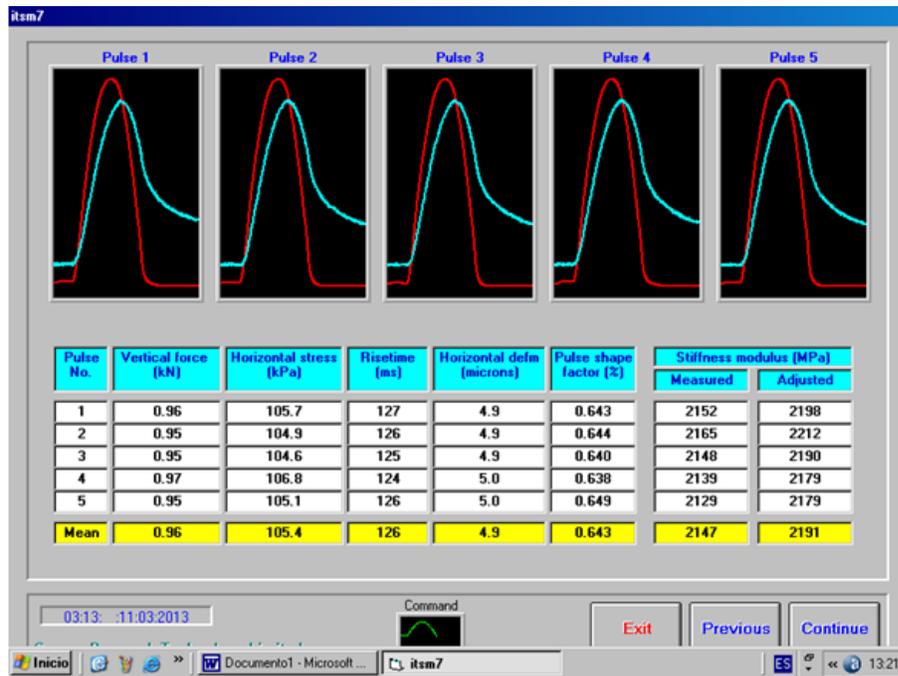


Fig. 40: Fin del ensayo, registro de los resultados.

Módulo de rigidez mediante carga controlada.

Es importante como necesario realizar el ensayo y la determinación del módulo de rigidez mediante el método de carga controlada, para realizar el ensayo de fatiga, y están estrictamente ligados, ya que un dato necesario para el análisis de los datos es este módulo, mediante la determinación de la rigidez, evaluada en la misma carga con la cual evaluaremos la muestra en el ensayo de fatiga.

Procedimiento para la determinación del Módulo de Rigidez, mediante carga controlada utilizando el NAT.

El procedimiento es exactamente el mismo que el realizado en el ensayo de determinación del módulo de rigidez por deformación controlada, con la diferencia de que en este ensayo hay que determinar la carga a la cual se realizará el ensayo.

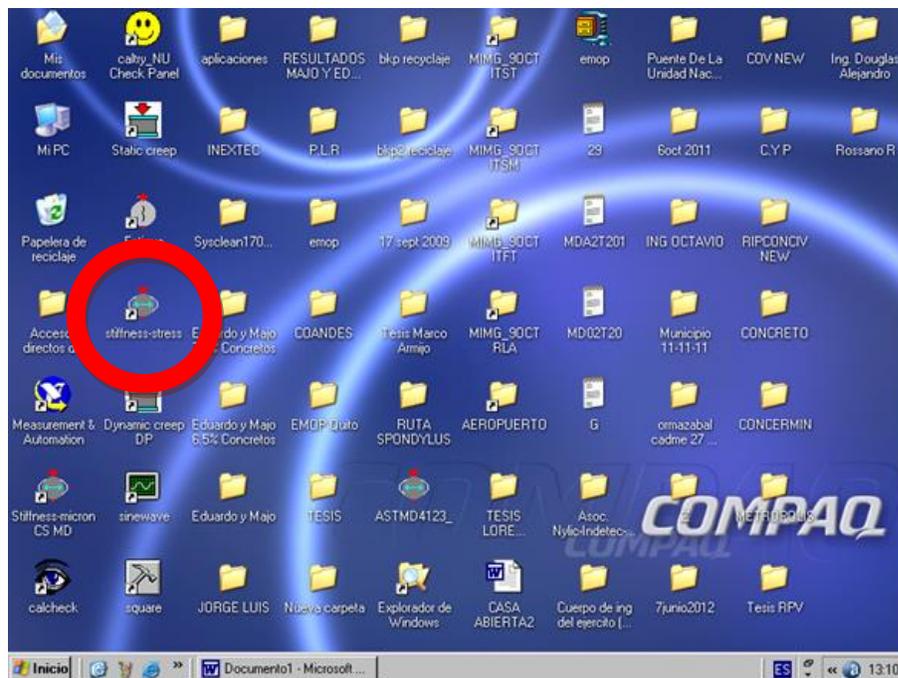


Fig. 41: Selección de la aplicación Stiffness stress.

La diferencia, del procedimiento está en el cuadro de entrada de datos como lo indica la fig. 42, en donde se nos indica el lugar para ingresar el valor de la carga correspondiente a este ensayo.

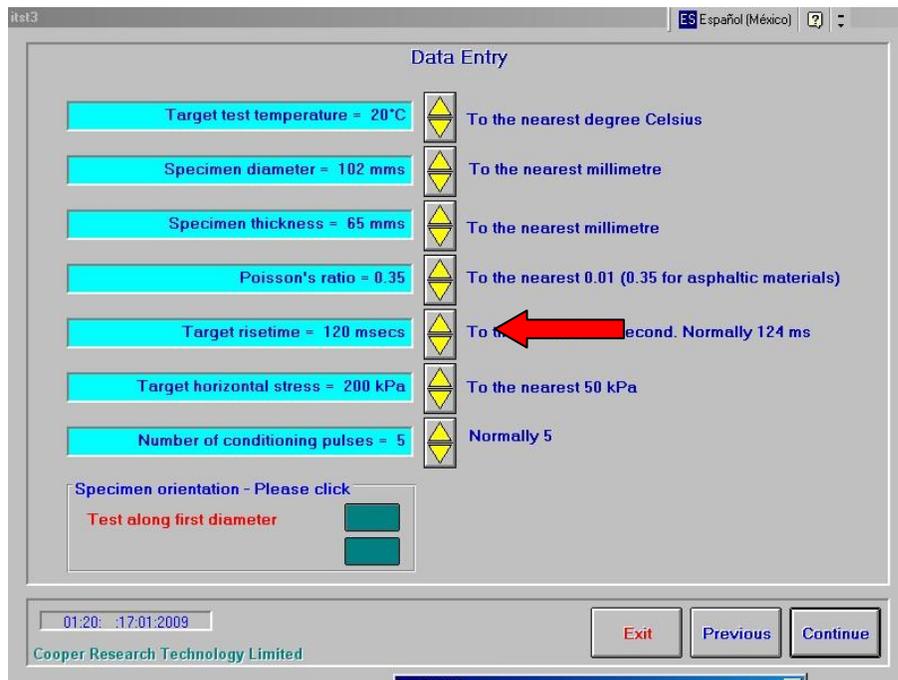


Fig. 42: Ingreso de carga para el ensayo.

Ensayo de Fatiga.

El ensayo de fatiga se realiza empleando tensiones controladas en general entre 100 y 500 KPa, determinándose el número de pulsos requeridos para alcanzar una deformación vertical máxima de 5 mm. Condición en la cual la muestra se considera fallada. Estos pulsos también poseen un tiempo de aplicación de carga de 0,12 segundos. La temperatura para este ensayo fue de 20°C.

El desarrollo de la prueba de fatiga comienza con la determinación del módulo de rigidez (S_m) bajo la carga (σ), tal como lo expresamos anteriormente. Considerando también el coeficiente de Poisson (μ), con el valor de 0,35., de

esta manera la deformación por tracción inicial (ϵ) podrá determinarse por la expresión:

$$\epsilon = \frac{\sigma \text{ (kPa)} \cdot (1 + 3 \mu)}{S_m \text{ (kPa)}}$$

Los valores de ϵ se presentan en: $\frac{mm}{mm} \times 10^{-6}$

Procedimiento del Ensayo de Fatiga, utilizando el NAT.

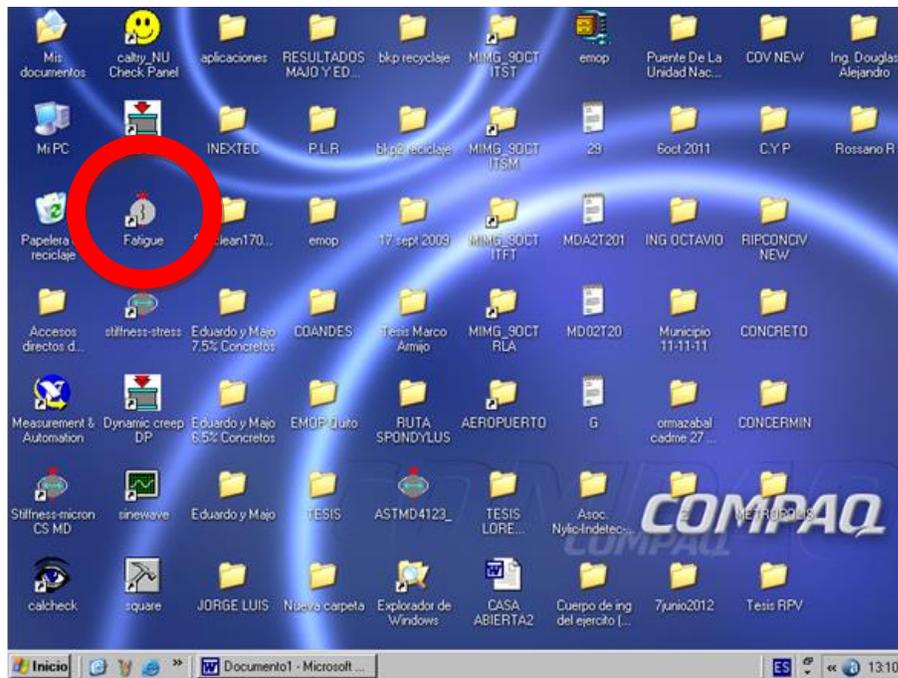


Fig. 43: Selección de la aplicación Fatigue.

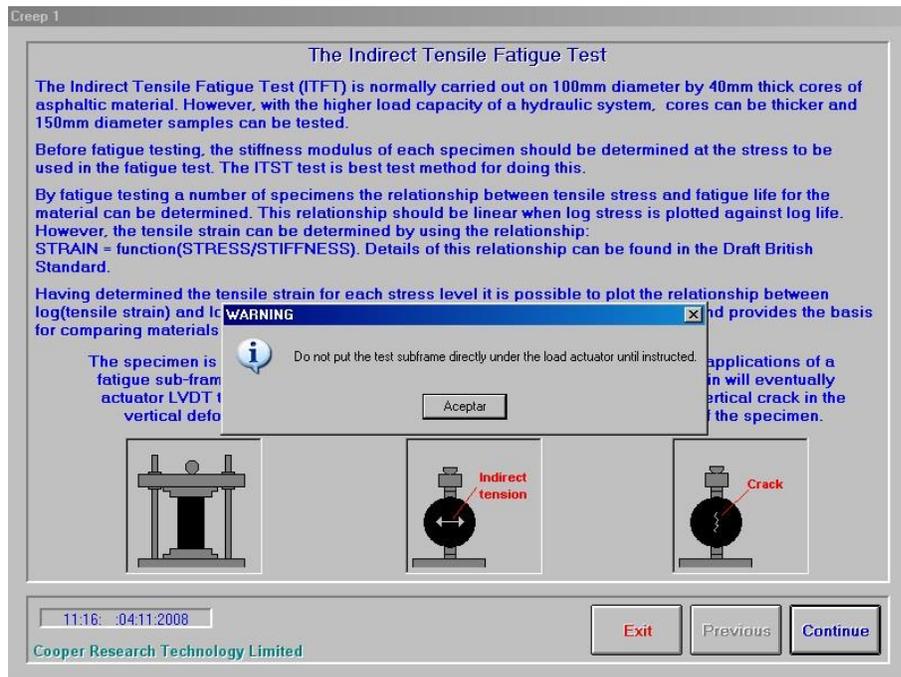


Fig. 44: Paso 1. Inicio del programa, solicitud de alejar la muestra.

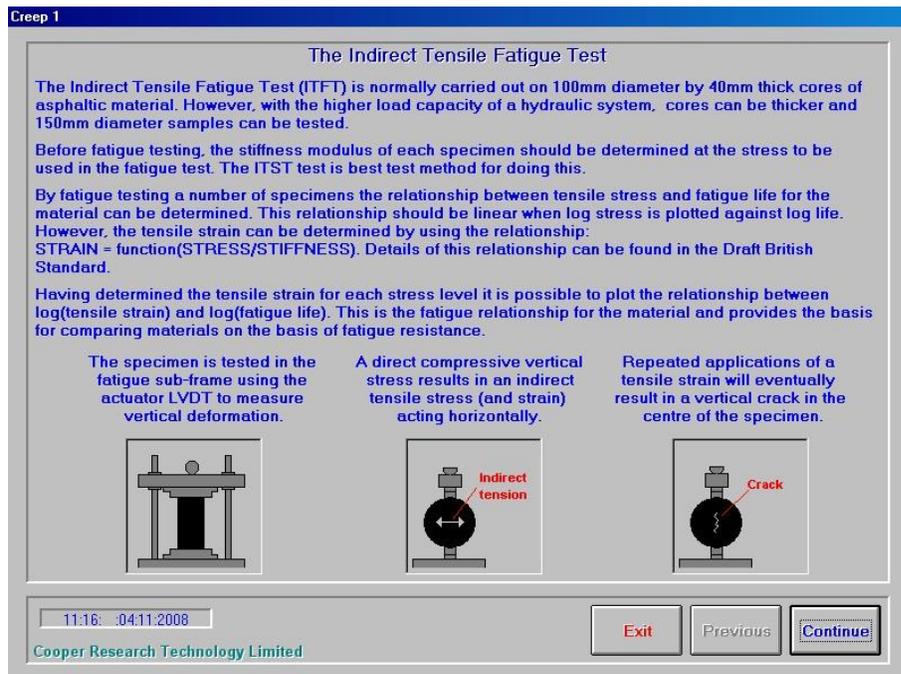


Fig. 45: Paso 2. Continuar con la aplicación.

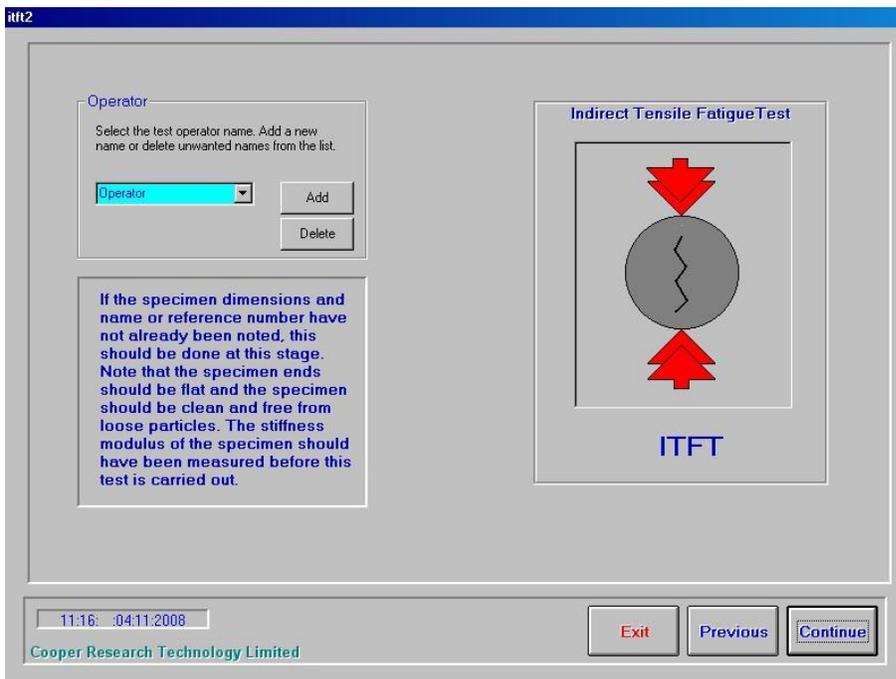


Fig. 46: Paso 3. Grabar el nombre del operador.

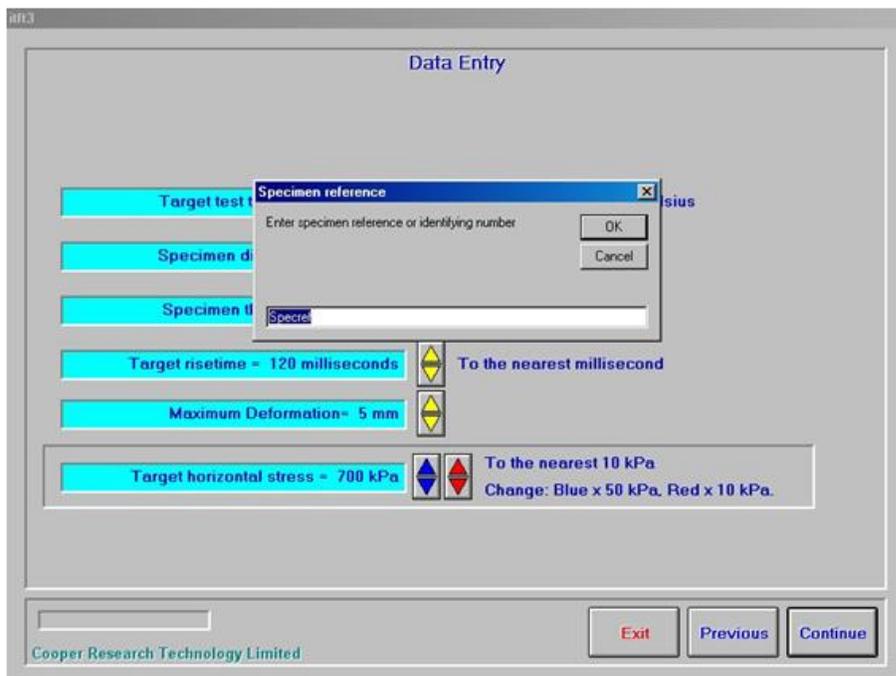


Fig. 47: Paso 4. Grabar el archivo y muestra.

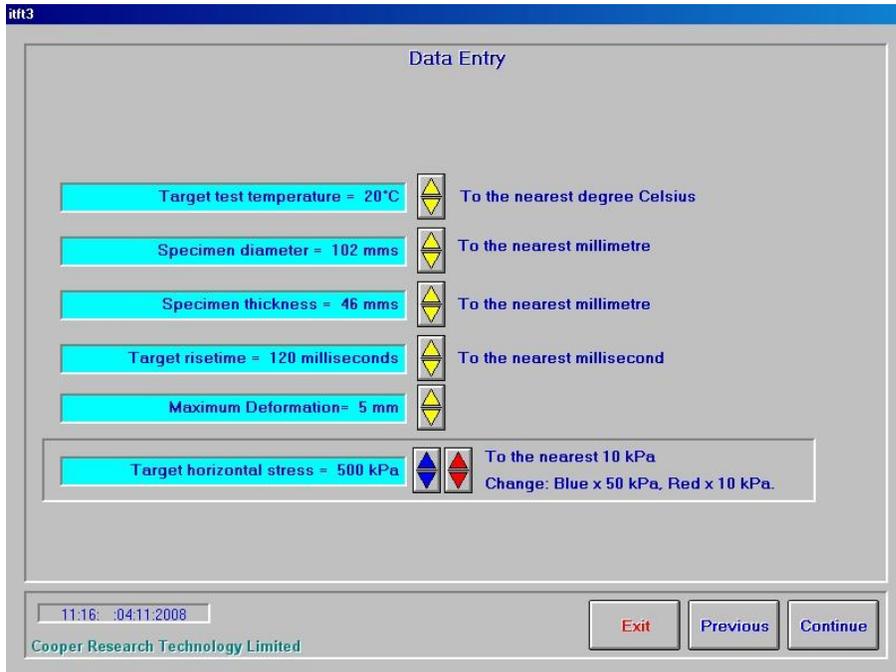


Fig. 48: Paso 5. Ingreso de parámetros.

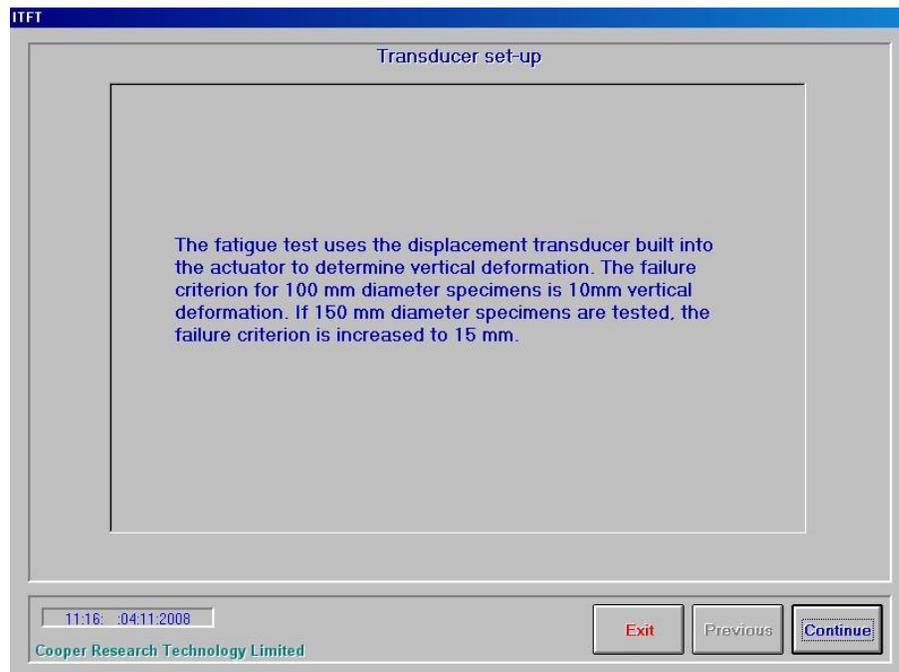


Fig. 49: Mensajes del sistema, seguir lo aconsejado y continuar.

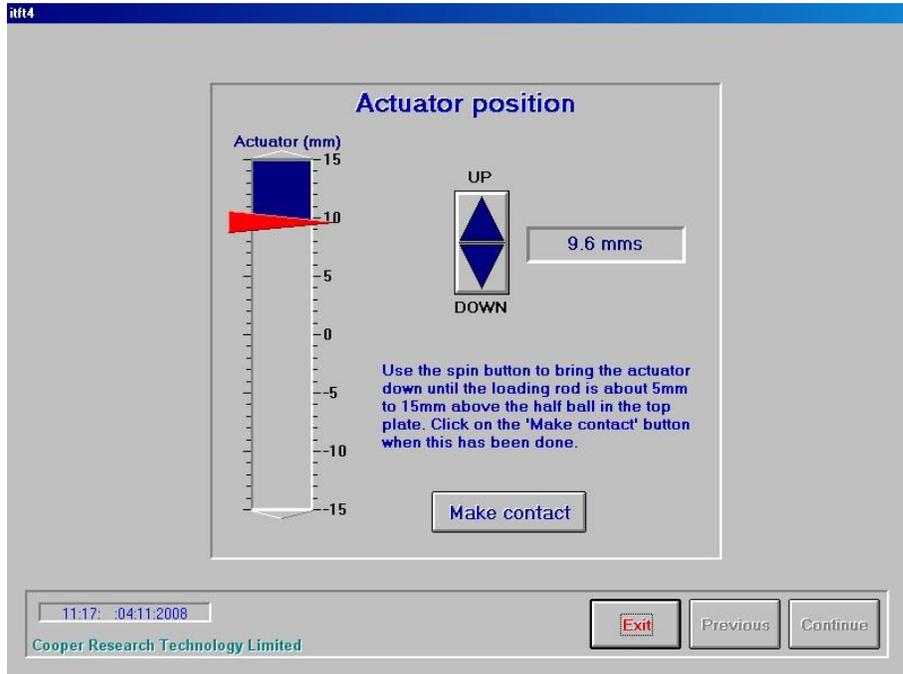


Fig. 50: Contacto del actuador de fuerzas y la muestra.

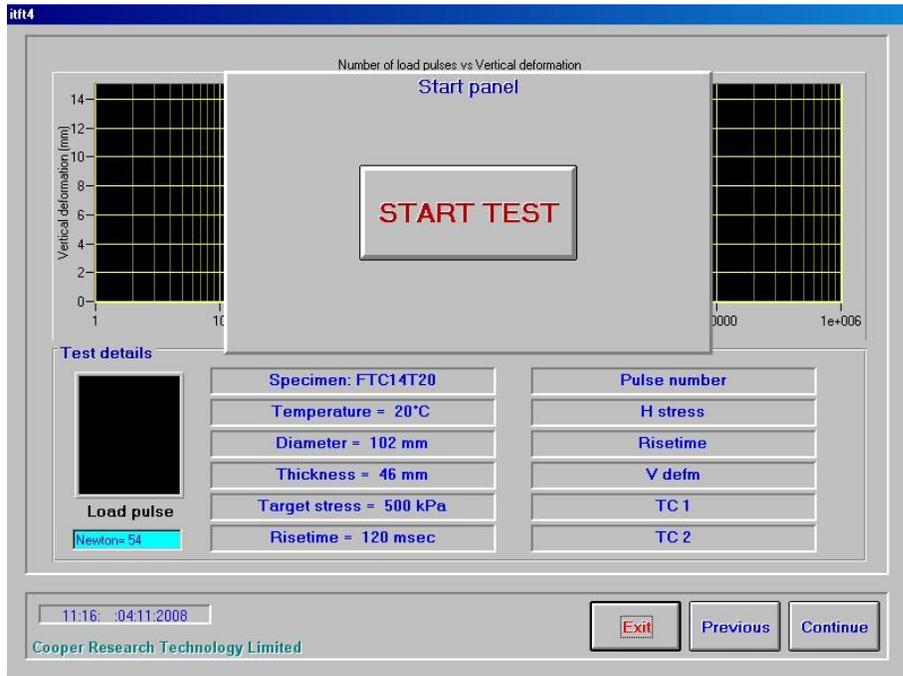


Fig. 51: Inicio del ensayo.

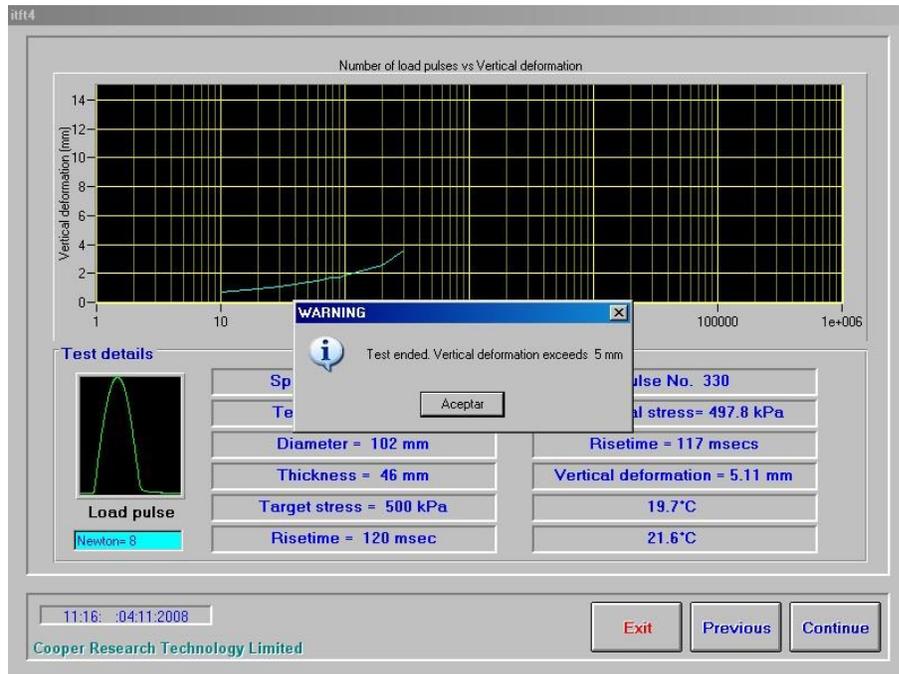


Fig. 52: Fin del ensayo.

Deformación permanente (Creep dinámico).

La prueba de deformación permanente o de carga axial repetida, conocida como creep dinámico, se efectuó para estimar el comportamiento ante las deformaciones plásticas. Un ciclo de carga consiste en la aplicación de una tensión durante 1 segundo seguido por 1 segundo de descanso, es decir, se emplearon ondas cuadráticas. El ensayo se realizó a una temperatura de 40 °C, midiendo las deformaciones provocadas por 3600 repeticiones de cargas de 100 kPa. Según los criterios manejados en el laboratorio, bajo estas condiciones, una mezcla con un buen comportamiento a la deformación no deberá superar el valor de 1%.

Procedimiento del ensayo de deformación permanente (Creep Dinámico), utilizando el NAT.

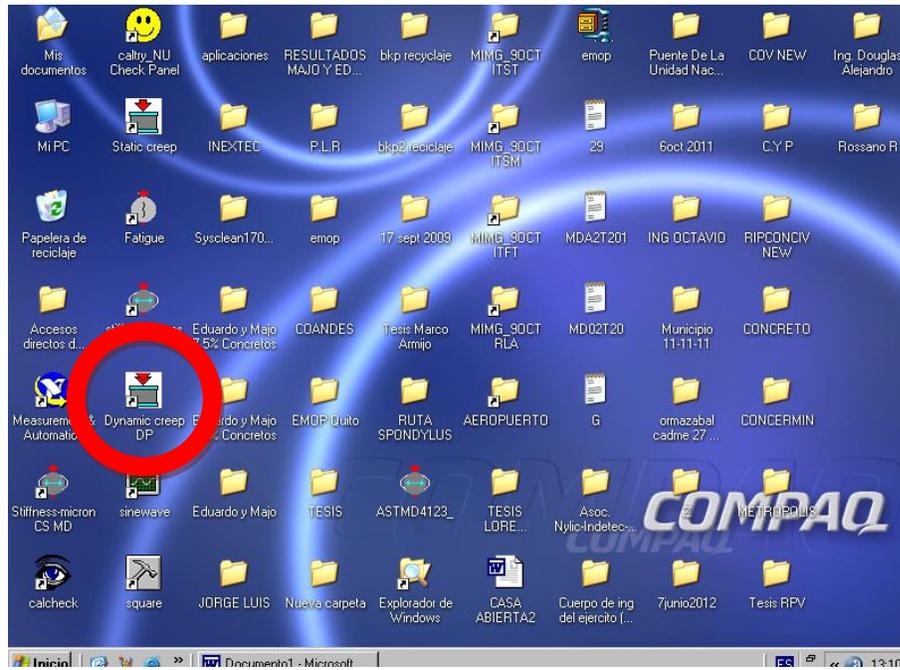


Fig. 53: Selección de la aplicación Dynamic creep.

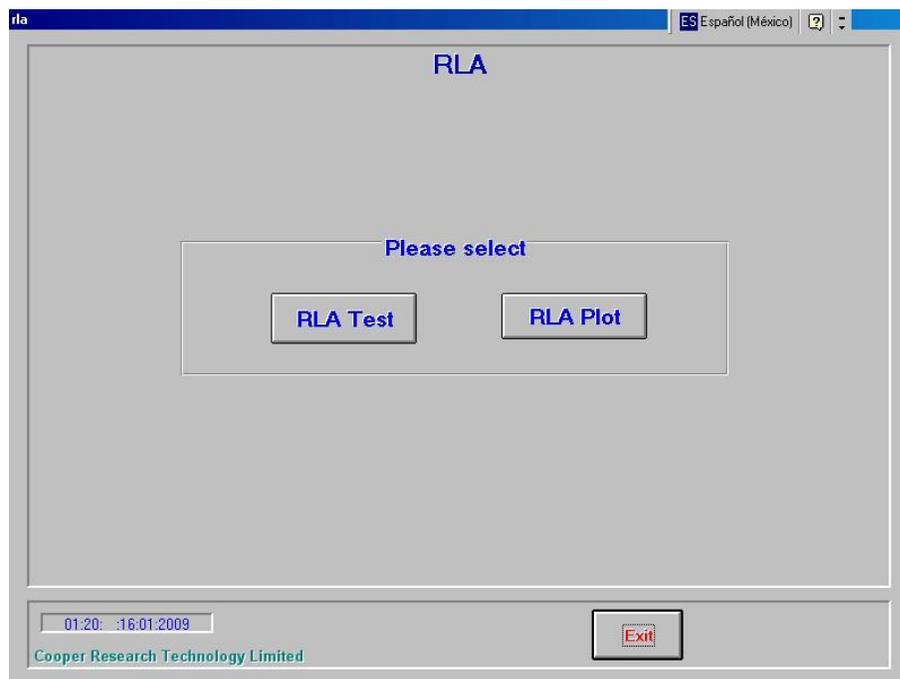


Fig. 54: Paso 1. Seleccionar RLA Test, para guardar los datos del ensayo.

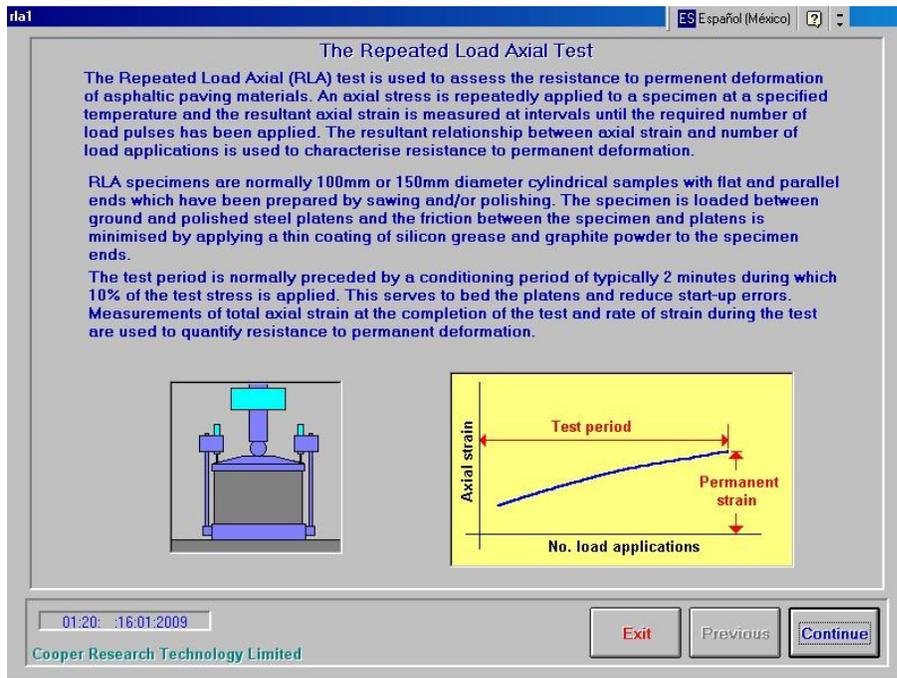


Fig. 55: Mensaje inicio del procedimiento.

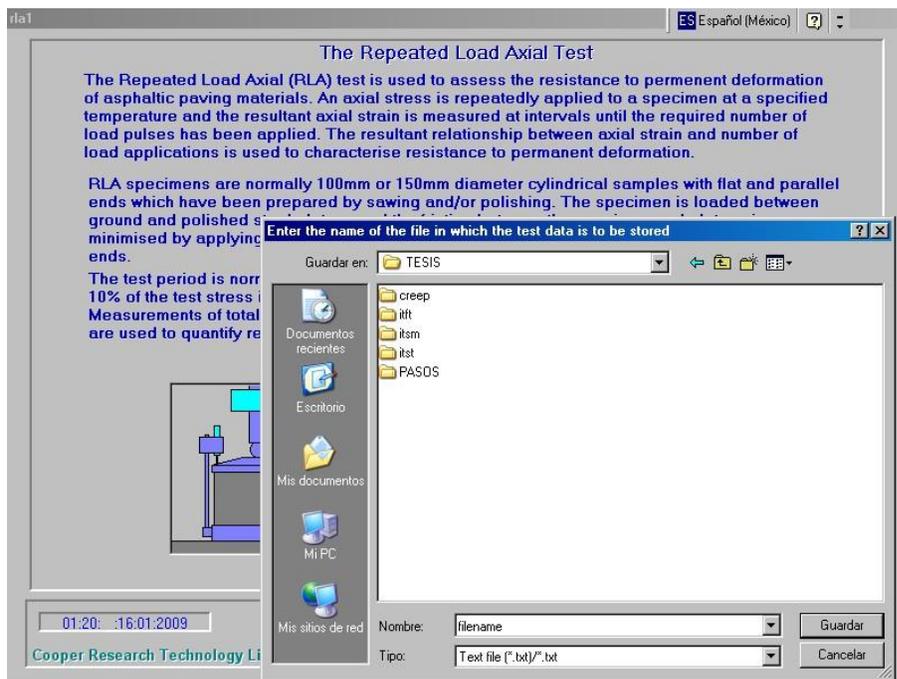


Fig. 56: Paso 2. Guardar el archivo del ensayo.

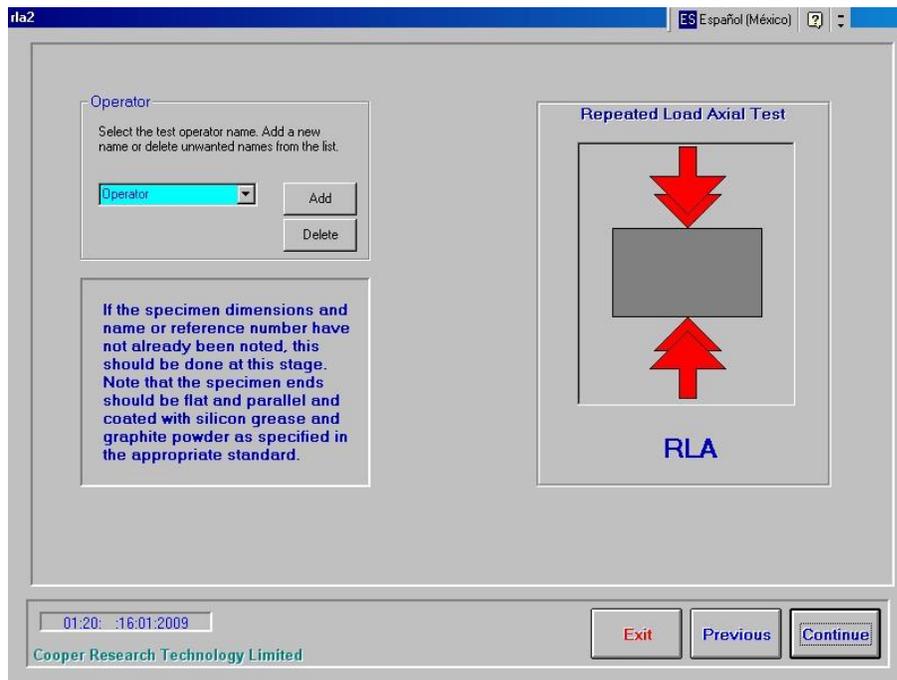


Fig. 57: Paso 3. Guardar el nombre del operador.

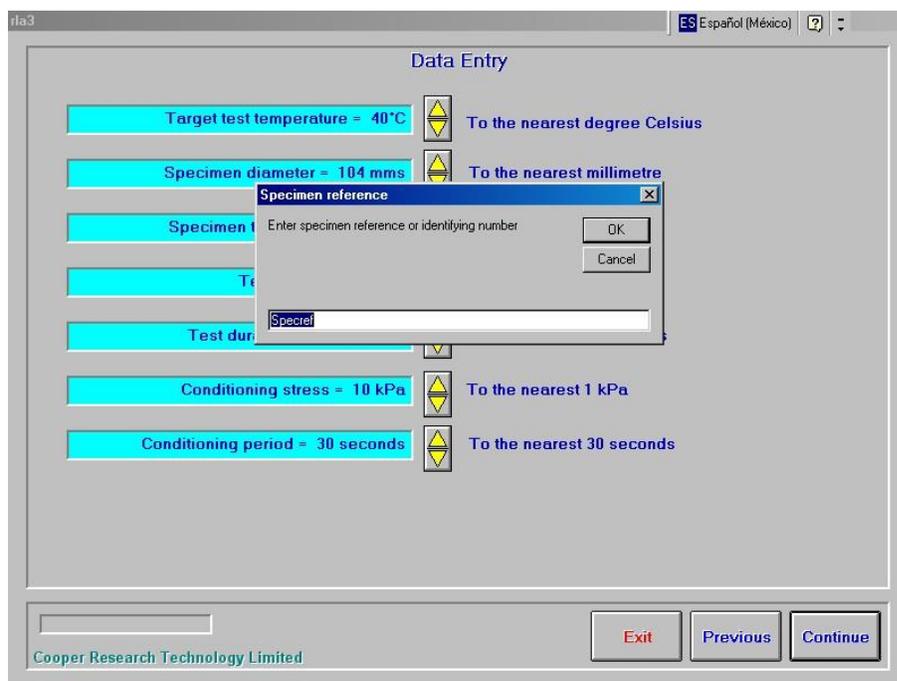


Fig. 58: Paso 4. Guardar archivo del ensayo.

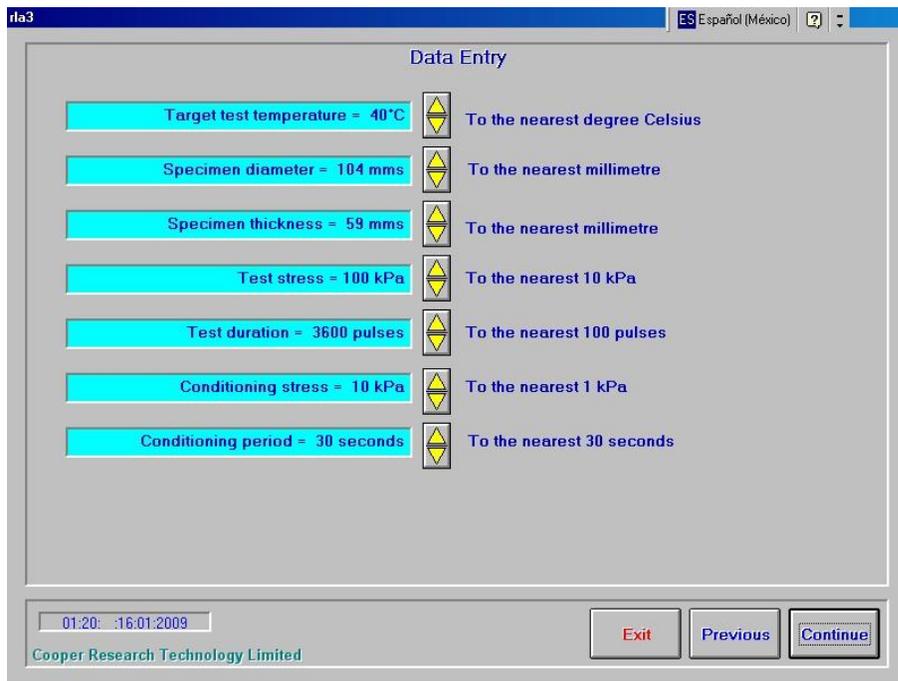


Fig. 59: Paso 5. Ingreso de parámetros.

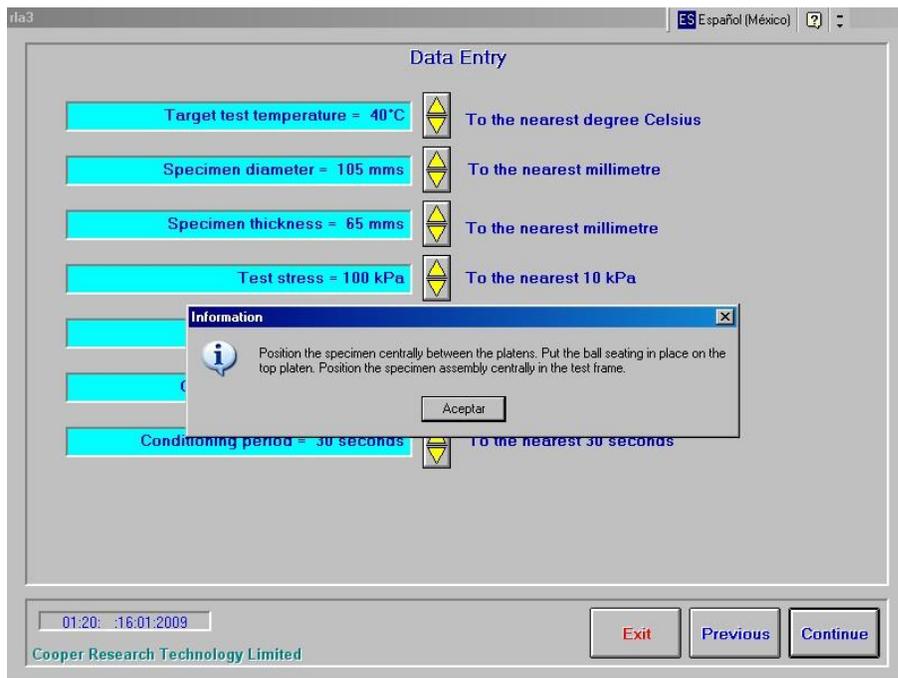


Fig. 60: Mensajes del sistema.

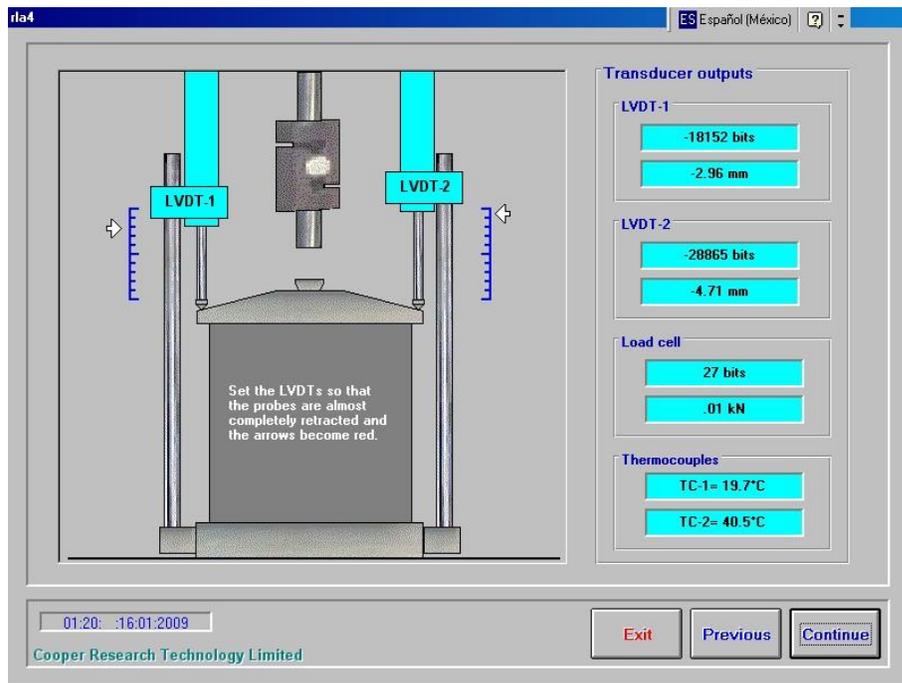


Fig. 61: Paso 6. Ajuste de los sensores.

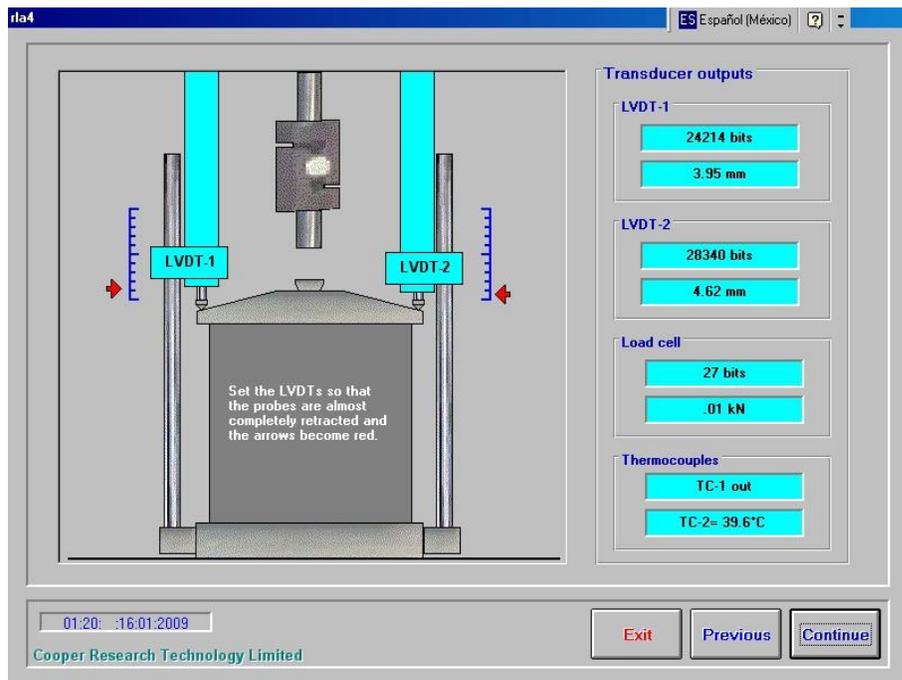


Fig. 62: Correcto ajuste de los sensores a la muestra.

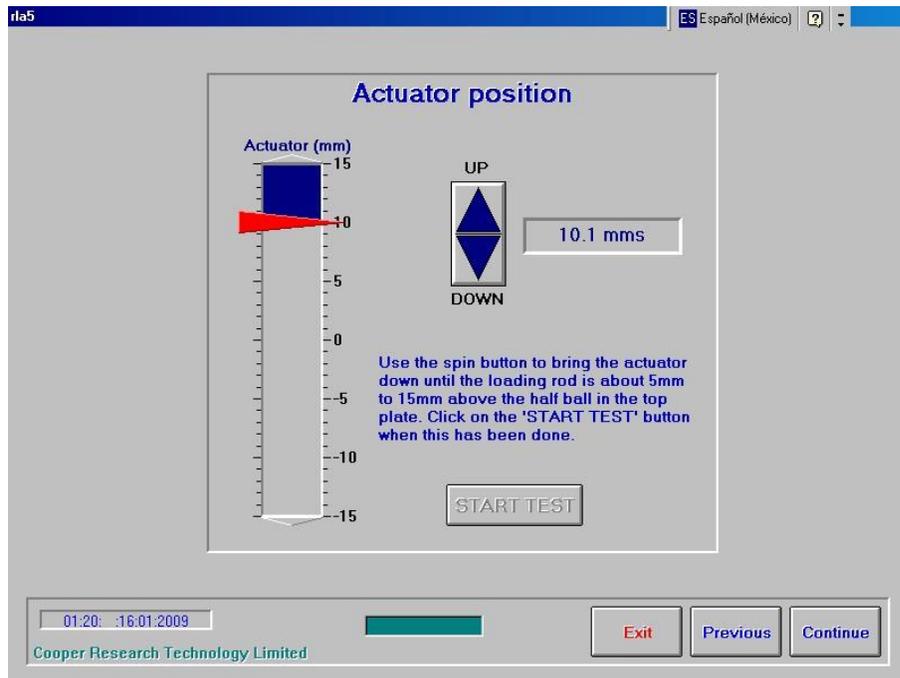


Fig. 63: Hacer contacto con la muestra.

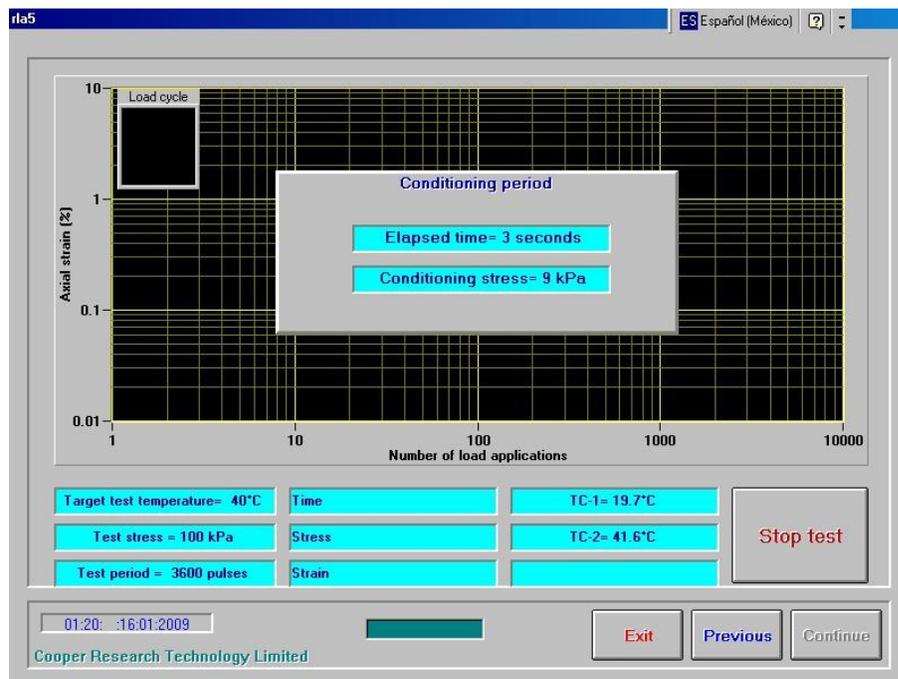


Fig. 64: Inicio del ensayo.

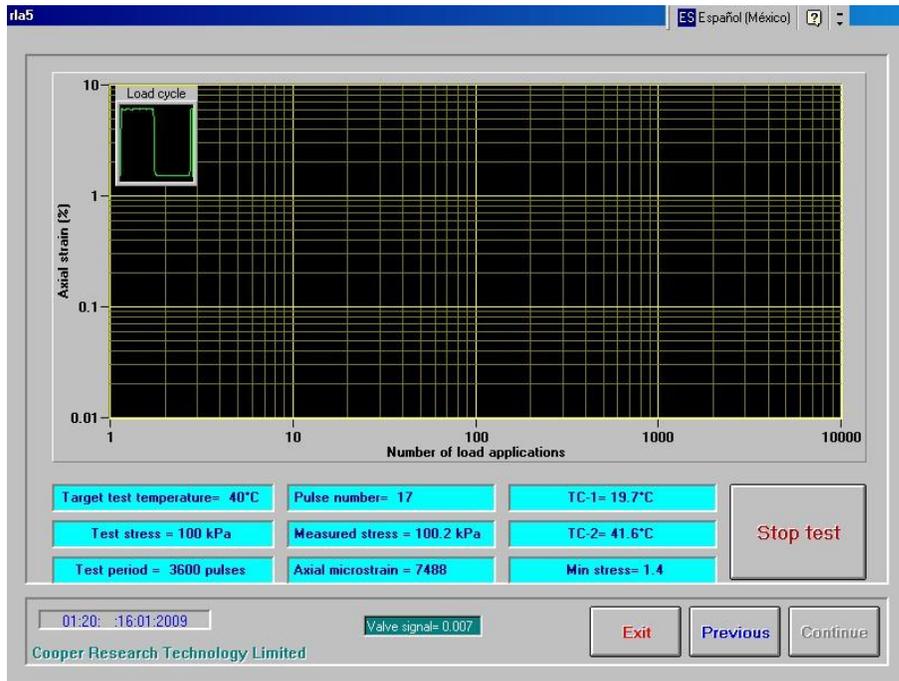


Fig. 65: Ensayo en proceso.

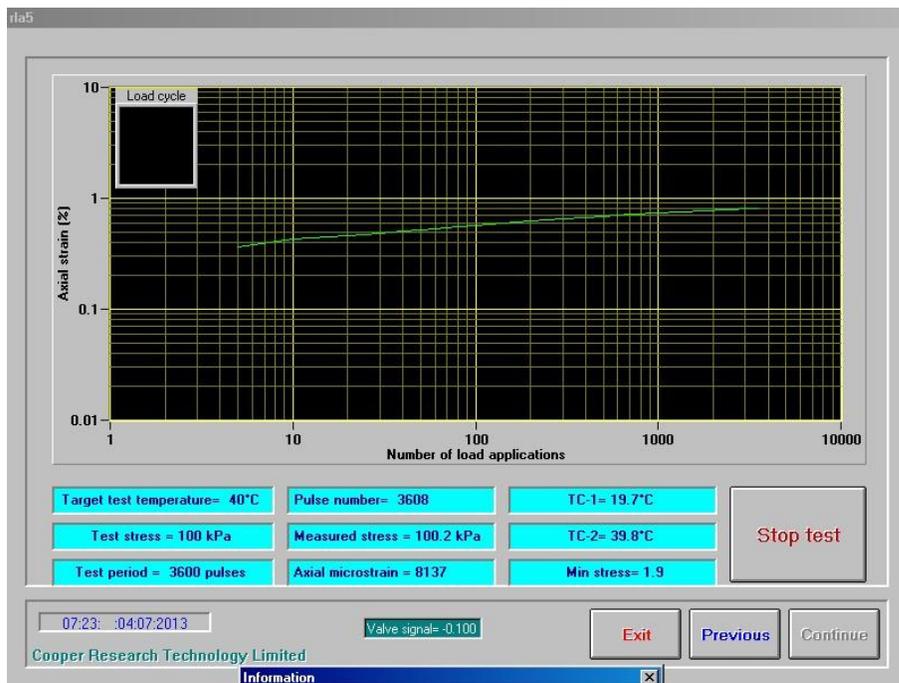


Fig. 66: Fin del ensayo.

CAPÍTULO 3 – DESARROLLO EXPERIMENTAL Y RESULTADOS OBTENIDOS

Porcentaje de asfalto en muestras asfálticas.

Los resultados obtenidos, medidos en el laboratorio para cada planta, se muestran en las tablas que se presentan a continuación:

Prueba de extracción de asfalto de la planta Durán.

El resultado de la prueba de extracción de asfalto de la planta Durán se muestra en la tabla 9.

PLANTA: DURÁN	
PRUEBA DE EXTRACCIÓN DE ASFALTO.	
W1. PESO DE LA MUESTRA DE MEZCLA ASFÁLTICA (gr):	1000.00
F1. PESO DEL FILTRO ANTES DE LA EXTRACCIÓN (gr):	9.30
W2. CONTENIDO DE HUMEDAD (gr):	0.00
W3A. PESO DE AGREG. LAVADOS EN CENTRÍFUGA (gr):	925.20
F2. PESO DEL FILTRO DESPUÉS DE LA EXTRACCIÓN (gr):	10.60
W3B = F2 - F1	1.30
W3. PESO AGREG. INCLUYENDO FILTRO (gr) (W3A+W3B):	926.50
W4. PESO DE MATERIAL MINERAL EN EXTRACTO (gr):	3.50
% DE ASFALTO = $\frac{[(W1-W2) - (W3+W4)]}{(W1-W2)} * 100$	7.00

Tabla 9: Prueba de extracción de asfalto de la planta Durán.

Prueba de extracción de asfalto de la planta Chivería.

El resultado de la prueba de extracción de asfalto de la planta Chivería se muestra en la tabla 10.

PLANTA: CHIVERÍA	
PRUEBA DE EXTRACCIÓN DE ASFALTO.	
W1. PESO DE LA MUESTRA DE MEZCLA ASFÁLTICA (gr):	1000.00
F1. PESO DEL FILTRO ANTES DE LA EXTRACCIÓN (gr):	8.10
W2. CONTENIDO DE HUMEDAD (gr):	0.00
W3A. PESO DE AGREG. LAVADOS EN CENTRÍFUGA (gr):	934.00
F2. PESO DEL FILTRO DESPUÉS DE LA EXTRACCIÓN (gr):	9.50
W3B = F2 - F1	1.40
W3. PESO AGREG. INCLUYENDO FILTRO (gr) (W3A+W3B):	935.40
W4. PESO DE MATERIAL MINERAL EN EXTRACTO (gr):	3.50
% DE ASFALTO = $\{[(W1-W2) - (W3+W4)] / (W1-W2)\} * 100$	6.11

Tabla 10: Prueba de extracción de asfalto de la planta Chivería.

Prueba de extracción de asfalto de la planta KM26.

El resultado de la prueba de extracción de asfalto de la planta KM26 se muestra en la tabla 11.

PLANTA: KM 26	
PRUEBA DE EXTRACCIÓN DE ASFALTO.	
W1. PESO DE LA MUESTRA DE MEZCLA ASFÁLTICA (gr):	998.80
F1. PESO DEL FILTRO ANTES DE LA EXTRACCIÓN (gr):	12.89
W2. CONTENIDO DE HUMEDAD (gr):	0.00
W3A. PESO DE AGREG. LAVADOS EN CENTRÍFUGA (gr):	939.83
F2. PESO DEL FILTRO DESPUÉS DE LA EXTRACCIÓN (gr):	13.75
W3B = F2 - F1	0.86
W3. PESO AGREG. INCLUYENDO FILTRO (gr) (W3A+W3B):	940.69
W4. PESO DE MATERIAL MINERAL EN EXTRACTO (gr):	3.00
% DE ASFALTO = $\{[(W1-W2) - (W3+W4)] / (W1-W2)\} * 100$	5.52

Tabla 11: Prueba de extracción de asfalto de la planta KM26.

Prueba de extracción de asfalto de la planta Vía a la Costa.

El resultado de la prueba de extracción de asfalto de la planta Vía a la Costa se muestra en la tabla 12.

PLANTA: VÍA A LA COSTA	
PRUEBA DE EXTRACCIÓN DE ASFALTO.	
W1. PESO DE LA MUESTRA DE MEZCLA ASFÁLTICA (gr):	1000.00
F1. PESO DEL FILTRO ANTES DE LA EXTRACCIÓN (gr):	8.60
W2. CONTENIDO DE HUMEDAD (gr):	0.00
W3A. PESO DE AGREG. LAVADOS EN CENTRÍFUGA (gr):	931.00
F2. PESO DEL FILTRO DESPUÉS DE LA EXTRACCIÓN (gr):	10.40
W3B = F2 - F1	1.80
W3. PESO AGREG. INCLUYENDO FILTRO (gr) (W3A+W3B):	932.80
W4. PESO DE MATERIAL MINERAL EN EXTRACTO (gr):	3.50
% DE ASFALTO = $\frac{[(W1-W2) - (W3+W4)]}{(W1-W2)} * 100$	6.37

Tabla 12: Prueba de extracción de asfalto de la planta Vía a la Costa.

Granulometría en agregados extraídos.

Los resultados obtenidos se muestran en las tablas mostradas a continuación.

Granulometría en agregados extraídos de la planta Duran.

Los resultados obtenidos resultado del ensayo de granulometría en agregados extraídos de la planta Durán, se observan en la tabla 13.

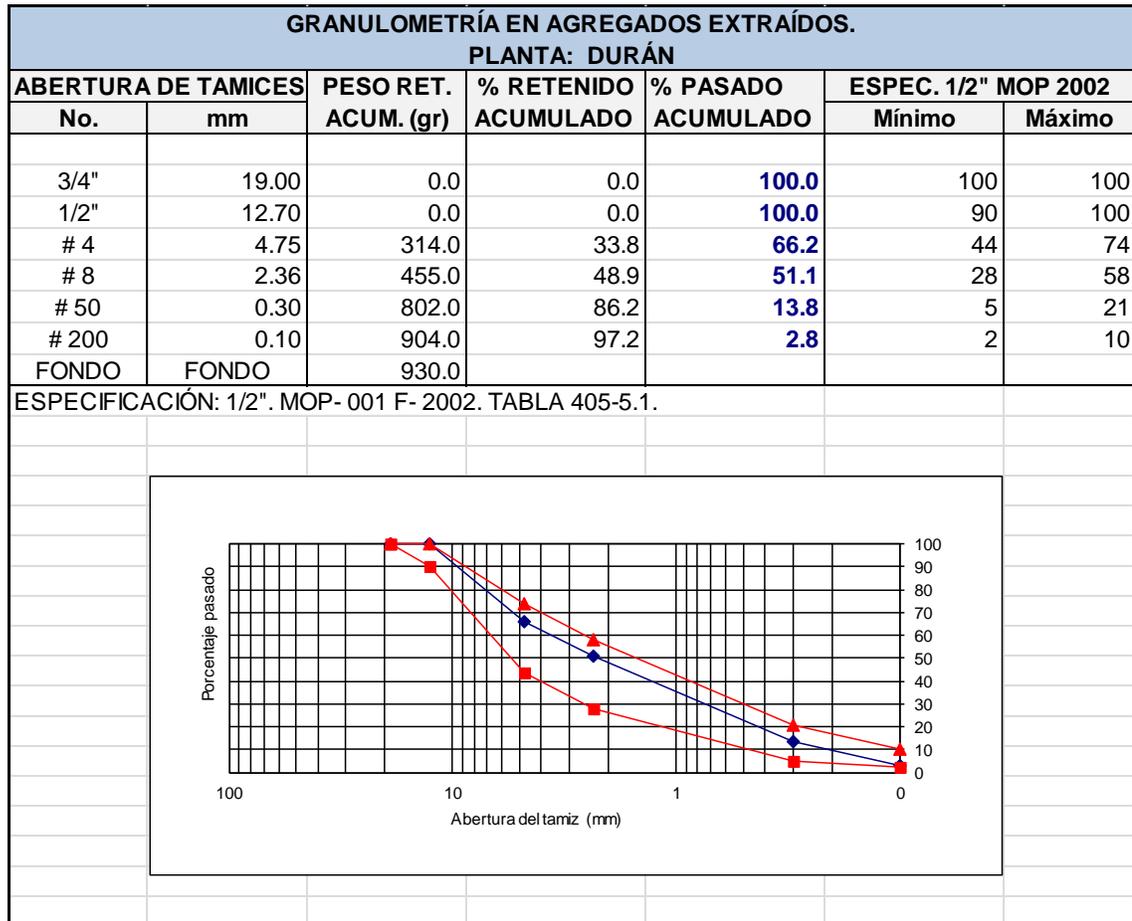


Tabla 13: Granulometría en agregados extraídos de planta Durán.

Granulometría en agregados extraídos de la planta Chivería.

Los resultados obtenidos resultado del ensayo de granulometría en agregados extraídos de la planta Chivería, se observan en la tabla 14.

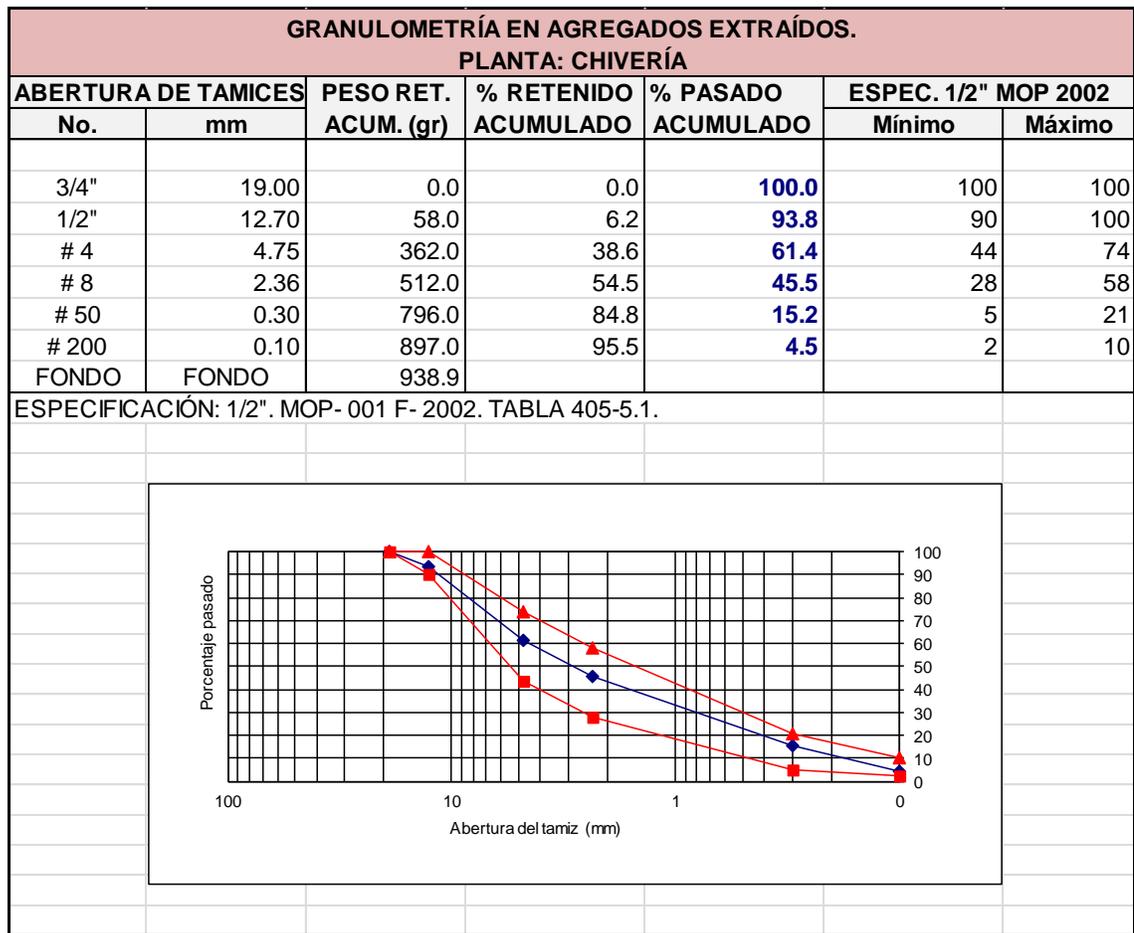


Tabla 14: Granulometría en agregados extraídos de planta Chivería.

Granulometría en agregados extraídos de la planta KM26.

Los resultados obtenidos resultado del ensayo de granulometría en agregados extraídos de la planta KM26, se observan en la tabla 15.

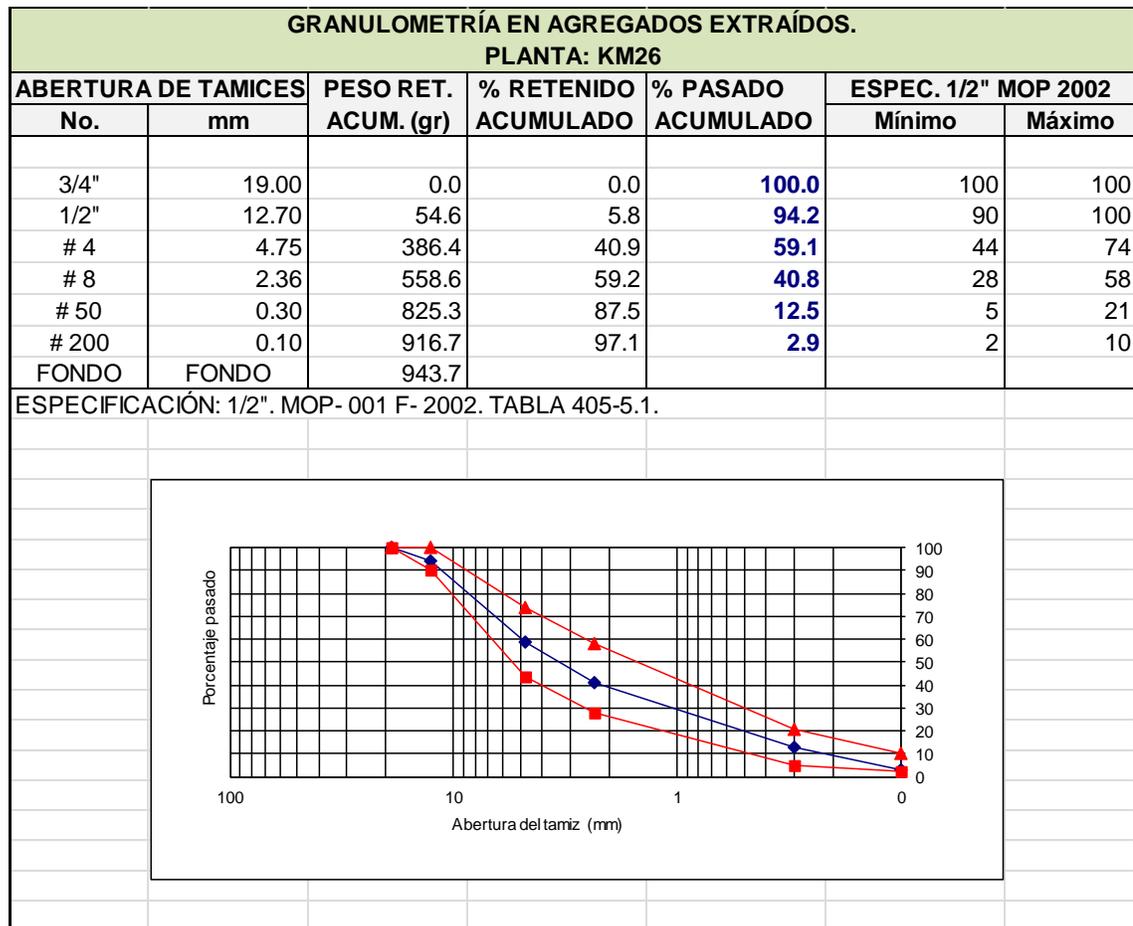


Tabla 15: Granulometría en agregados extraídos de planta KM26.

Granulometría en agregados extraídos de la planta Vía a la Costa.

Los resultados obtenidos resultado del ensayo de granulometría en agregados extraídos de la planta Vía a la Costa, se observan en la tabla 16.

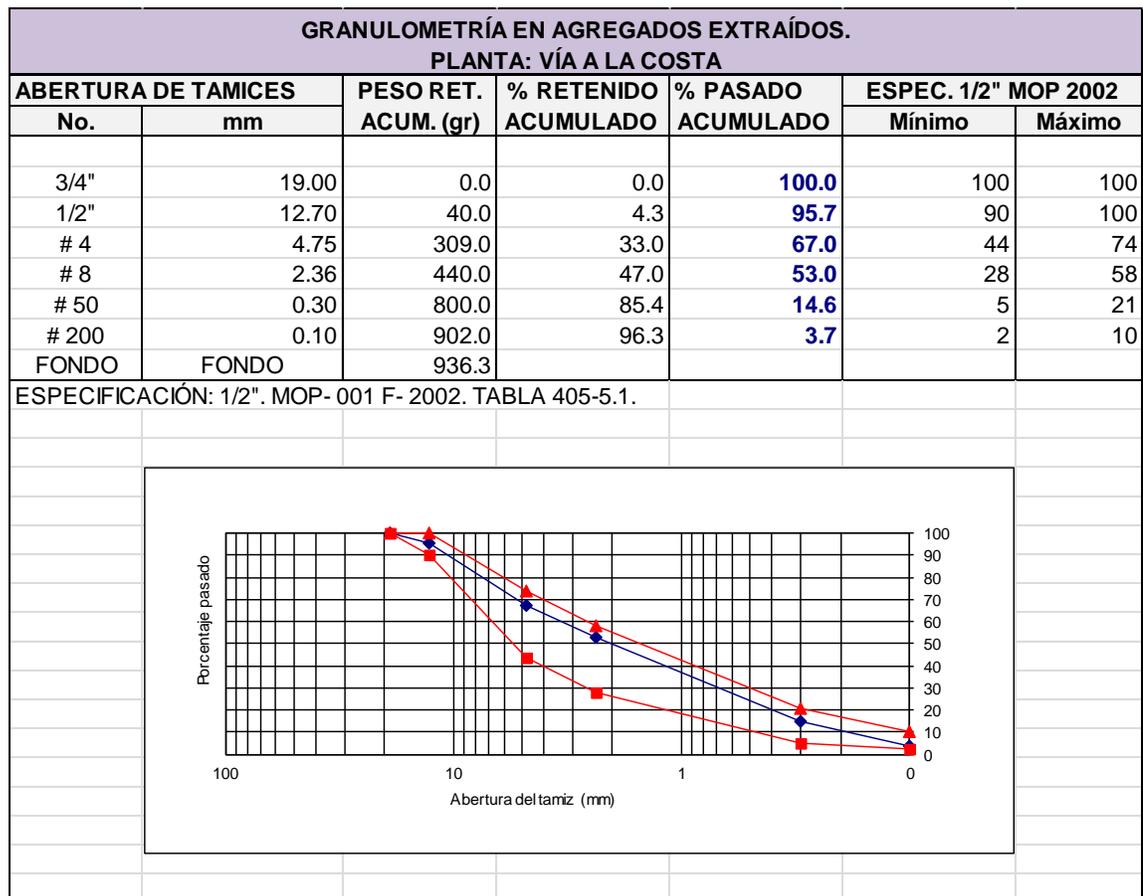


Tabla 16: Granulometría en agregados extraídos de planta Vía a la Costa.

Densidad teórica máxima. Ensayo RICE.

Los resultados obtenidos del ensayo RICE realizado a las plantas de Durán, Chivería, KM26 y Vía a la costa, se muestran en las tablas 17, 18, 19 y 20, respectivamente.

Ensayo RICE planta Durán.

ENSAYO RICE. PLANTA: DURÁN				
A: PESO DEL FRASCO + AGUA			3094.0 gr	
B: PESO DEL FRASCO + AGUA + MATERIAL			3643.0 gr	
C: PESO DE LA MEZCLA SUELTA			1000.0 gr	
$RICE = C / [A - (B - C)] =$		2.217		

Tabla 17: Resultados del ensayo RICE, de la planta Durán.

Ensayo RICE planta Chivería.

ENSAYO RICE PLANTA: CHIVERÍA.				
A: PESO DEL FRASCO + AGUA			3094.0 gr	
B: PESO DEL FRASCO + AGUA + MATERIAL			3700.5 gr	
C: PESO DE LA MEZCLA SUELTA			1000.0 gr	
$RICE = C / [A - (B - C)] =$		2.541		

Tabla 18: Resultados del ensayo RICE, de la planta Chivería.

Ensayo RICE planta KM26.

ENSAYO RICE. PLANTA: KM26				
A: PESO DEL FRASCO + AGUA			7191.0 gr	
B: PESO DEL FRASCO + AGUA + MATERIAL			8097.0 gr	
C: PESO DE LA MEZCLA SUELTA			1503.0 gr	
RICE = C / [A - (B - C)] =	2.518			

Tabla 19: Resultados del ensayo RICE, de la planta KM26.

Ensayo RICE planta Vía a la Costa.

ENSAYO RICE. PLANTA: VÍA A LA COSTA				
A: PESO DEL FRASCO + AGUA			3098.0 gr	
B: PESO DEL FRASCO + AGUA + MATERIAL			3654.0 gr	
C: PESO DE LA MEZCLA SUELTA			1000.0 gr	
RICE = C / [A - (B - C)] =	2.252			

Tabla 20: Resultados del ensayo RICE, de la planta Vía a la costa.

Gravedad específica “Bulk” y Porcentaje de vacíos.

Los resultados obtenidos se muestran en las Tablas y figuras a continuación mostrados.

Gravedad específica bulk y porcentaje de vacíos en la planta Duran.

PARÁMETROS VOLUMÉTRICOS: DENSIDAD Y % DE VACÍOS									
PLANTA: DURÁN									
Energía de Compactación	BRIQUETAS	Pesos			Volumen (cm ³)	Densidad Gravedad Esp. Bulk	Vacíos Vacíos en mezcla (%)	Promedios	
		Peso muestra en aire (gr)	Peso muestra en agua (gr)	Peso muestra s.s.s. aire (gr)				Gravedad Esp. Bulk	Vacíos en mezcla (%)
35	1-35-DU	1145.7	591.5	1146.1	554.6	2.066	6.83	2.058	7.20
	2-35-DU	1078.9	555.2	1079.5	524.3	2.058	7.19		
	3-35-DU	1101.6	567.9	1102.6	534.7	2.060	7.08		
	4-35-DU	1143.3	589.0	1144.9	555.9	2.057	7.24		
	5-35-DU	1162.2	595.9	1163.3	567.4	2.048	7.62		
50	1-50-DU	1098.9	578.7	1101.1	522.4	2.104	5.13	2.101	5.24
	2-50-DU	1135.8	599.0	1136.5	537.5	2.113	4.70		
	3-50-DU	1071.3	560.5	1072.0	511.5	2.094	5.54		
	4-50-DU	1120.4	585.8	1121.3	535.5	2.092	5.64		
	5-50-DU	1123.6	590.6	1125.2	534.6	2.102	5.21		
75	1-75-DU	1131.2	602.8	1131.5	528.7	2.140	3.50	2.140	3.50
	2-75-DU	1080.0	574.3	1080.5	506.2	2.134	3.78		
	3-75-DU	1107.0	590.3	1107.6	517.3	2.140	3.49		
	4-75-DU	1125.5	601.2	1126.4	525.2	2.143	3.35		
	5-75-DU	1173.0	625.7	1173.1	547.4	2.143	3.36		

Tabla 21: Gravedad específica bulk y porcentaje de vacíos de la planta Durán.

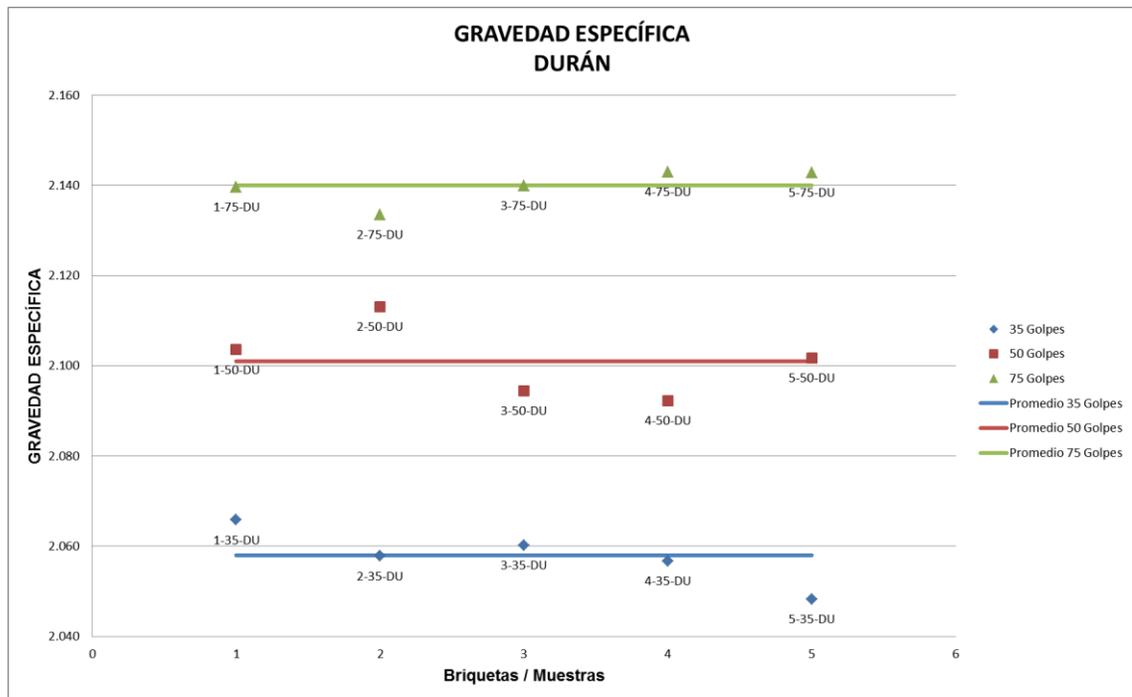


Fig. 67: Gravedad específica o densidades, planta Durán.

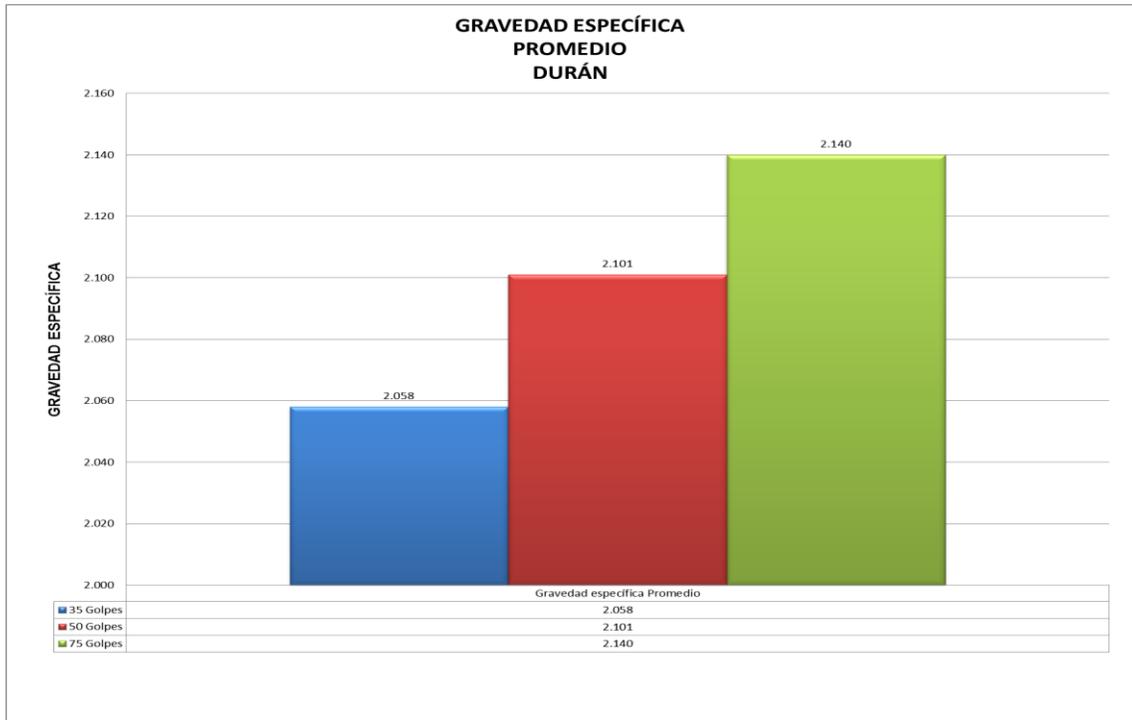


Fig. 68: Gravedad específica promedio, planta Durán.

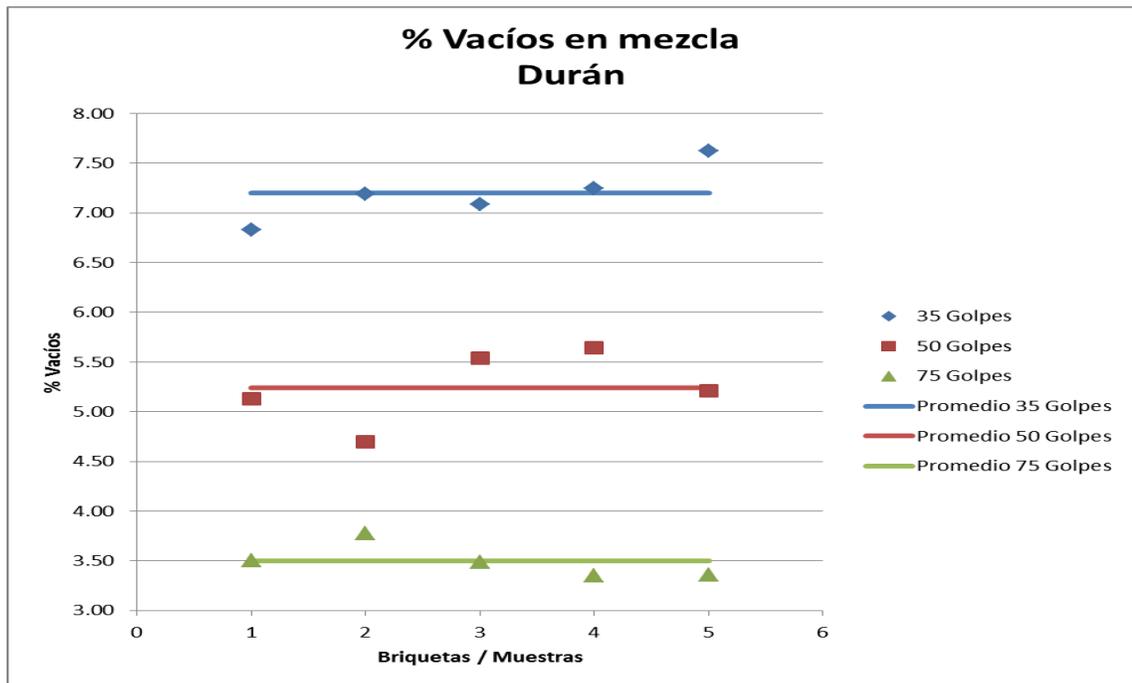


Fig. 69: Porcentaje de vacíos, planta Durán.

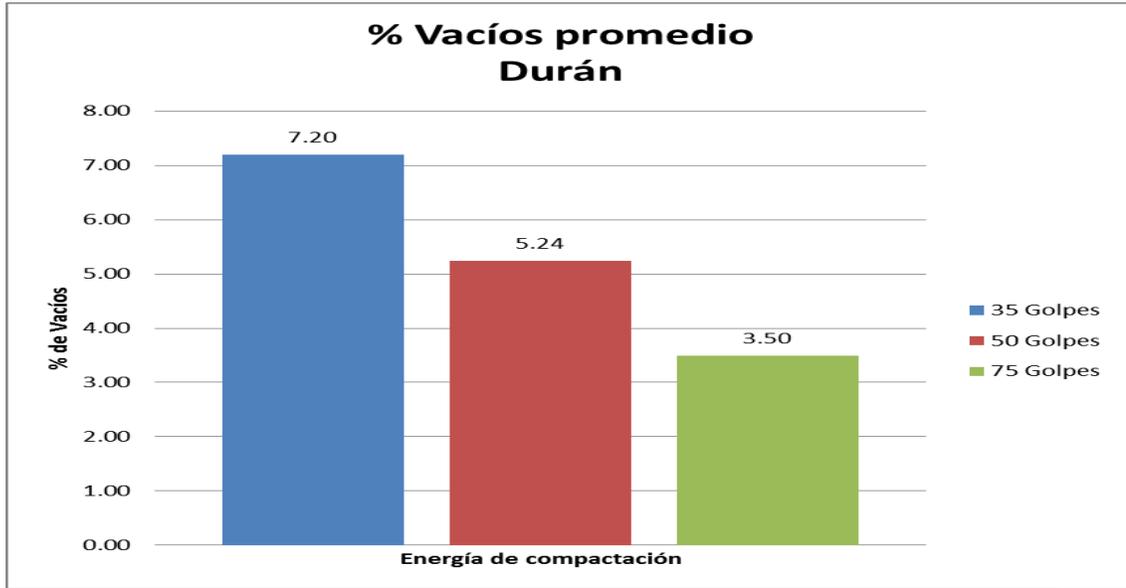


Fig. 70: Porcentaje de vacíos promedio, planta Durán.

Gravedad específica bulk y porcentaje de vacíos en la planta Chivería.

PARÁMETROS VOLUMÉTRICOS: DENSIDAD Y % DE VACÍOS									
PLANTA: CHIVERÍA									
Energía de Compactación	BRIQUETAS	Pesos			Volumen (cm³)	Densidad Gravedad Esp. Bulk	Vacíos en mezcla (%)	Promedios	
		Peso muestra en aire (gr)	Peso muestra en agua (gr)	Peso muestra s.s. aire (gr)				Gravedad Esp. Bulk	Vacíos en mezcla (%)
35	1-35-CH	1240.8	720.8	1242.0	521.2	2.381	6.32	2.378	6.44
	2-35-CH	1167.6	674.7	1168.0	493.3	2.367	6.86		
	3-35-CH	1216.6	707.8	1217.1	509.3	2.389	6.00		
	4-35-CH	1210.3	701.3	1211.0	509.7	2.375	6.56		
	5-35-CH	1264.1	734.3	1266.1	531.8	2.377	6.46		
50	1-50-CH	1259.0	745.0	1265.0	520.0	2.421	4.73	2.410	5.15
	2-50-CH	1252.0	734.0	1253.0	519.0	2.412	5.07		
	3-50-CH	1247.0	729.0	1247.0	518.0	2.407	5.27		
	4-50-CH	1252.0	732.0	1253.0	521.0	2.403	5.44		
	5-50-CH	1291.0	755.0	1291.0	536.0	2.409	5.22		
75	1-75-CH	1289.0	760.0	1289.0	529.0	2.437	4.12	2.431	4.34
	2-75-CH	1237.0	729.0	1238.0	509.0	2.430	4.37		
	3-75-CH	1277.0	751.0	1277.0	526.0	2.428	4.47		
	4-75-CH	1258.0	742.0	1259.0	517.0	2.433	4.25		
	5-75-CH	1245.0	733.0	1246.0	513.0	2.427	4.50		

Tabla 22: Gravedad específica bulk y porcentaje de vacíos de la planta Chivería.

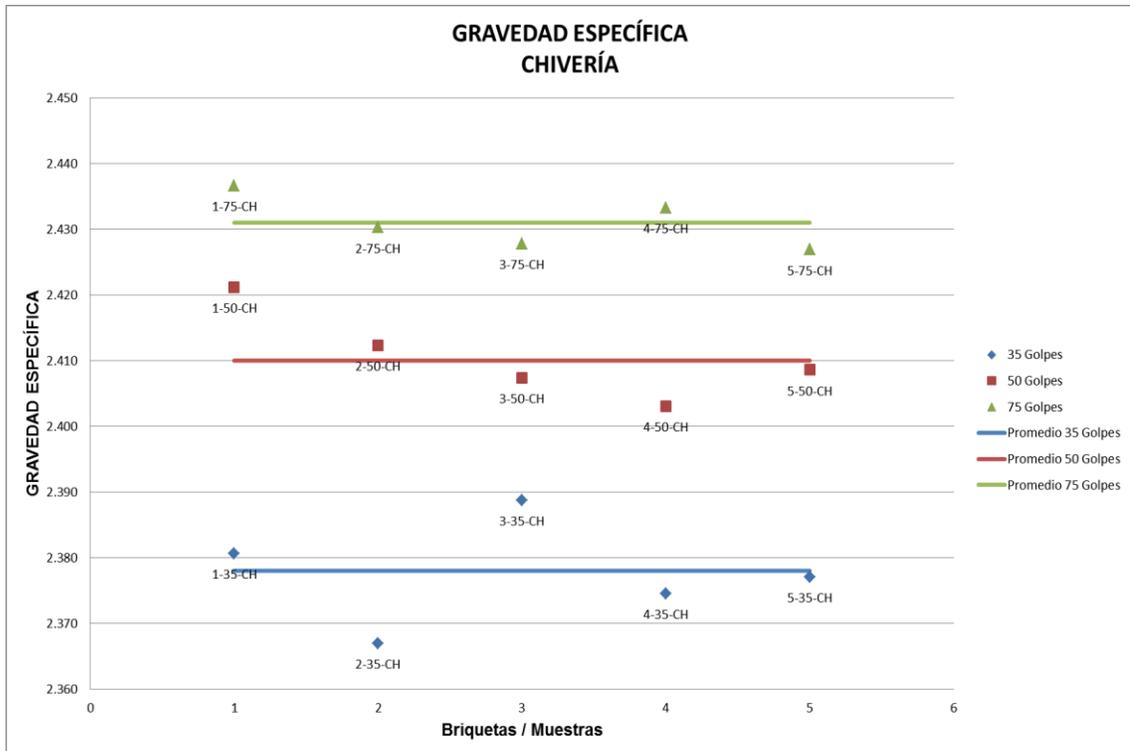


Fig. 71: Gravedad específica o densidades, Planta Chivería.

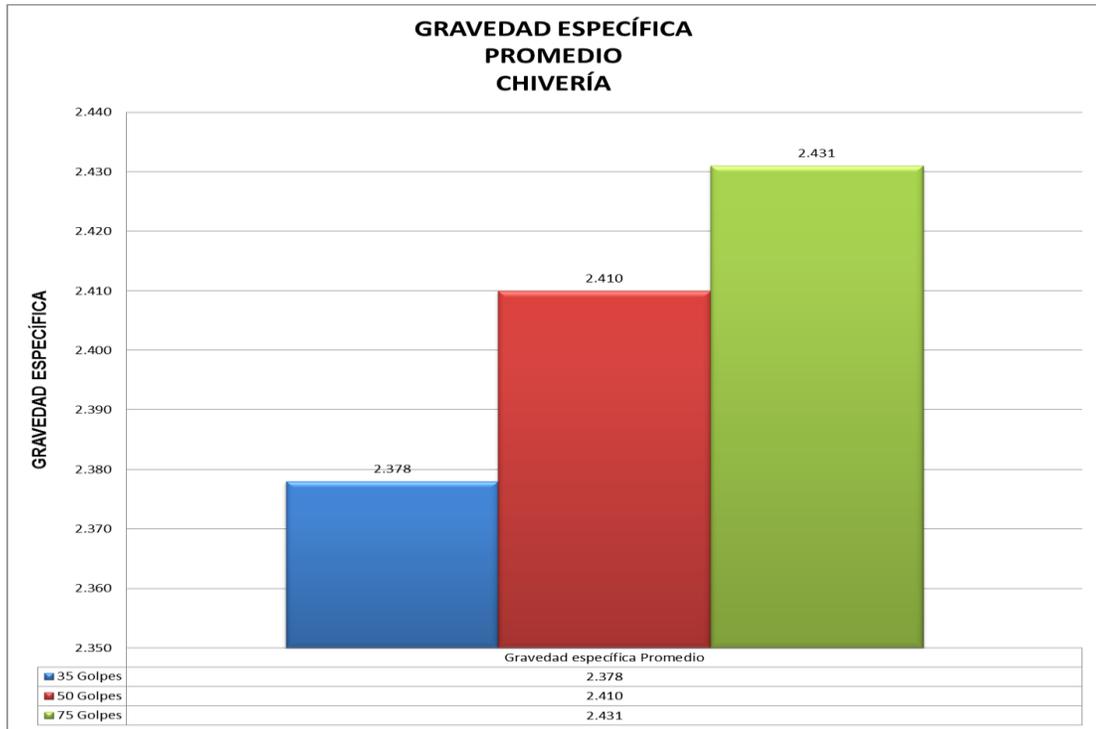


Fig. 72: Gravedad específica promedio, planta Chivería.

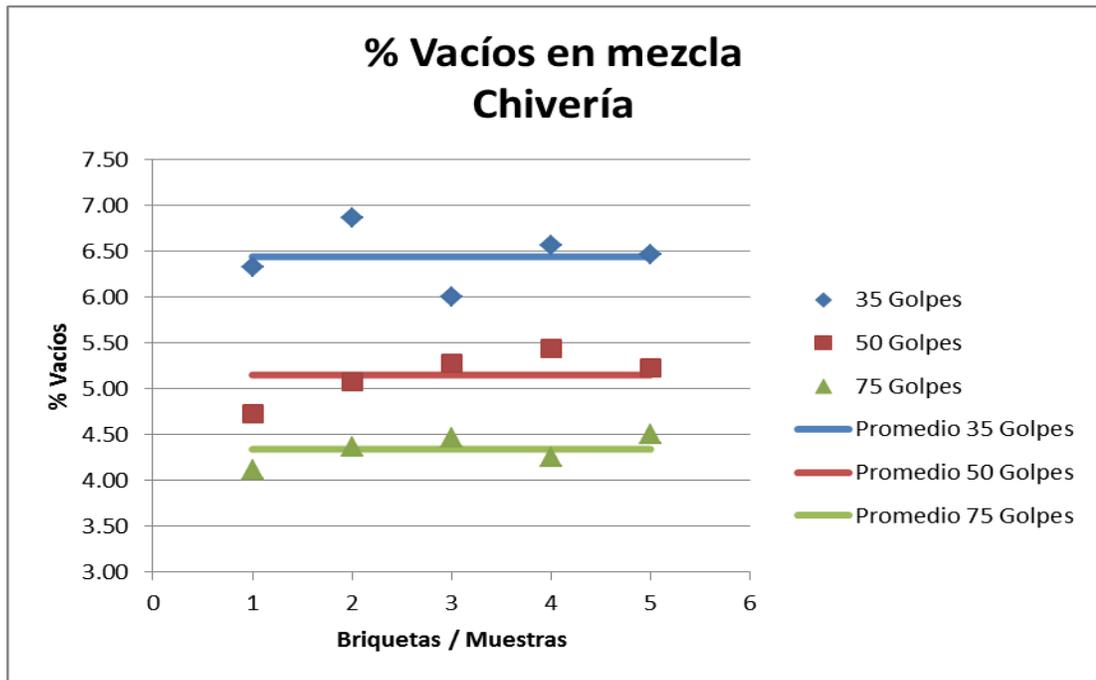


Fig. 73: Porcentaje de vacíos, planta Chivería.

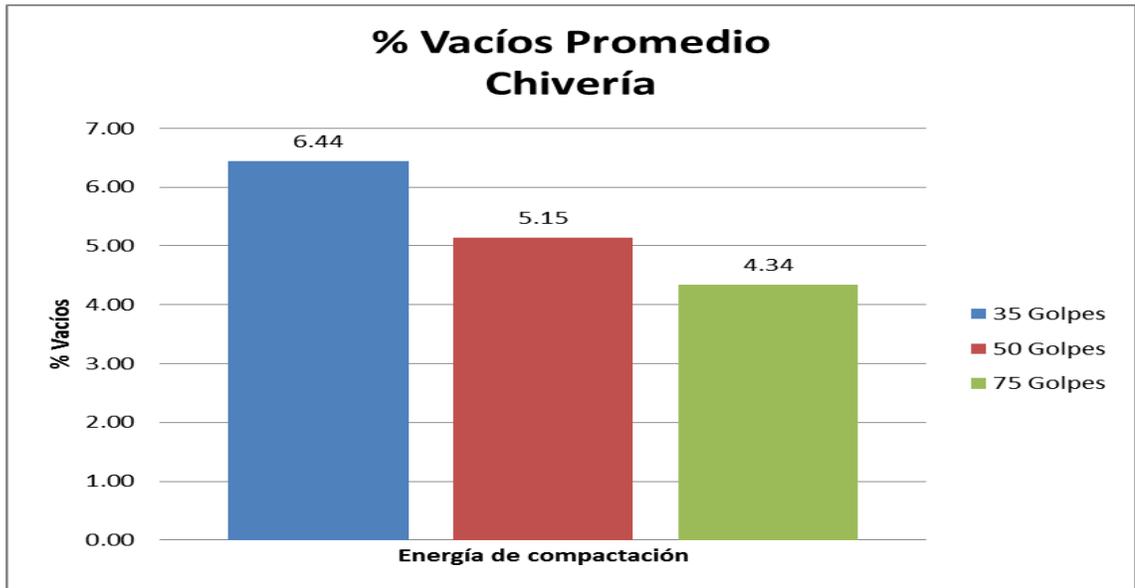


Fig. 74: Porcentaje de vacíos promedio, planta Chivería.

Gravedad específica bulk y porcentaje de vacíos en la planta KM26.

PARÁMETROS VOLUMÉTRICOS: DENSIDAD Y % DE VACÍOS									
PLANTA: KM26									
Energía de Compactac	BRIQUETAS	Pesos			Volumen (cm³)	Densidad Gravedad Esp. Bulk	Vacíos en mezcla (%)	Promedios	
		Peso muestra en aire (gr)	Peso muestra en agua (gr)	Peso muestra s.s. aire (gr)				Gravedad Esp. Bulk	Vacíos en mezcla (%)
35	1-35-K26	1178.0	684.0	1182.0	498.0	2.365	6.04	2.364	6.09
	2-35-K26	1243.0	720.0	1247.0	527.0	2.359	6.31		
	3-35-K26	1198.0	697.0	1202.0	505.0	2.372	5.77		
	4-35-K26	1216.0	705.0	1220.0	515.0	2.361	6.21		
	5-35-K26	1208.0	701.0	1212.0	511.0	2.364	6.10		
50	1-50-K26	1189.0	694.0	1191.0	497.0	2.392	4.97	2.384	5.31
	2-50-K26	1199.0	696.0	1200.0	504.0	2.379	5.51		
	3-50-K26	1232.0	719.0	1234.0	515.0	2.392	4.98		
	4-50-K26	1186.0	685.0	1184.0	499.0	2.377	5.59		
	5-50-K26	1149.0	665.0	1148.0	483.0	2.379	5.51		
75	1-75-K26	1229.0	721.0	1230.0	509.0	2.415	4.09	2.410	4.28
	2-75-K26	1181.0	692.0	1182.0	490.0	2.410	4.27		
	3-75-K26	1201.0	704.0	1202.0	498.0	2.412	4.21		
	4-75-K26	1206.0	706.0	1207.0	501.0	2.407	4.39		
	5-75-K26	1251.0	731.0	1251.0	520.0	2.406	4.44		

Tabla 23: Gravedad específica bulk y porcentaje de vacíos de la planta KM26.

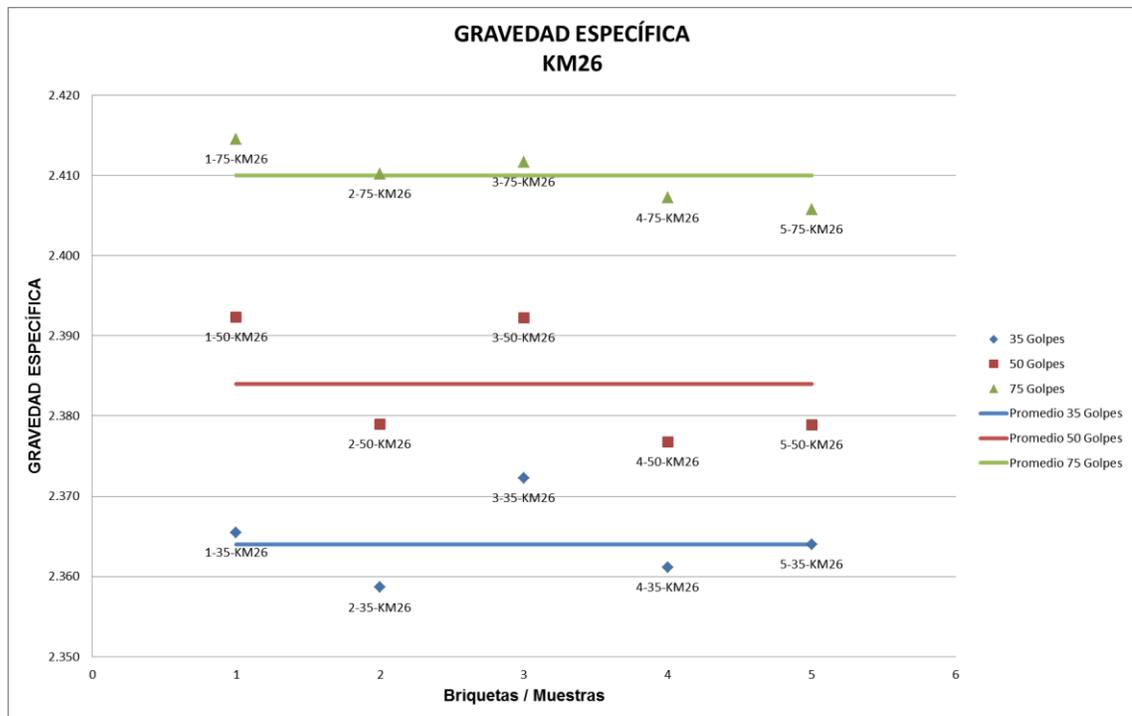


Fig. 75: Gravedad específica o densidades, planta KM26.

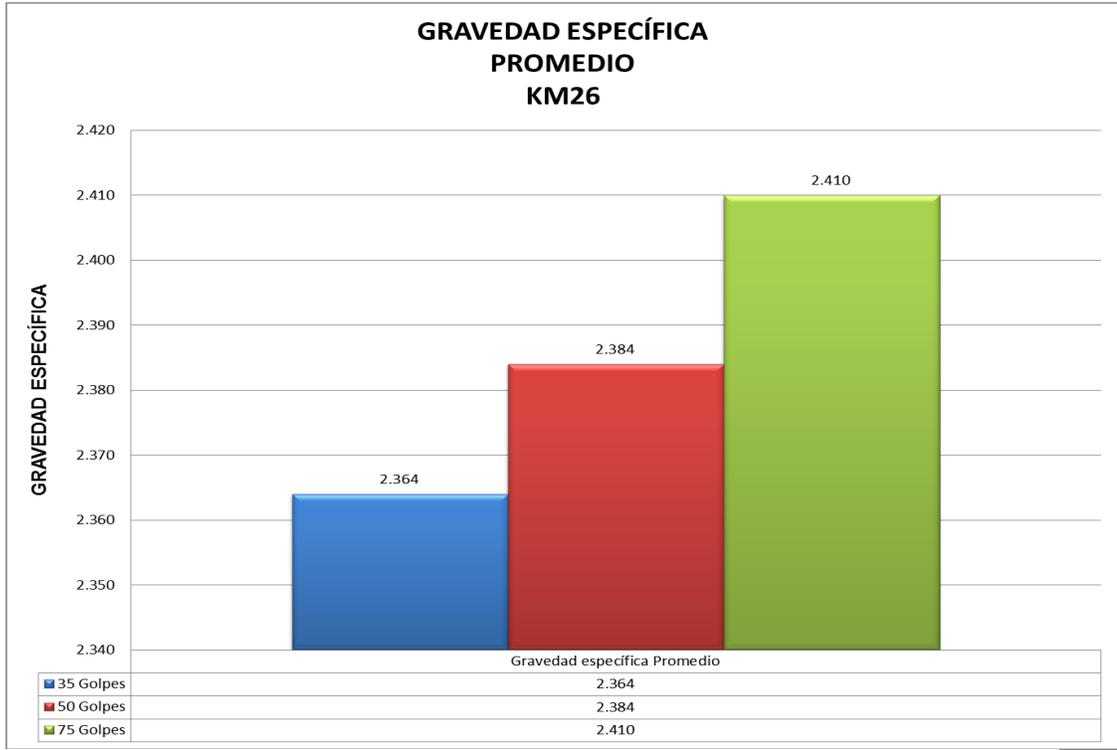


Fig. 76: Gravedad específica promedio, planta KM26.

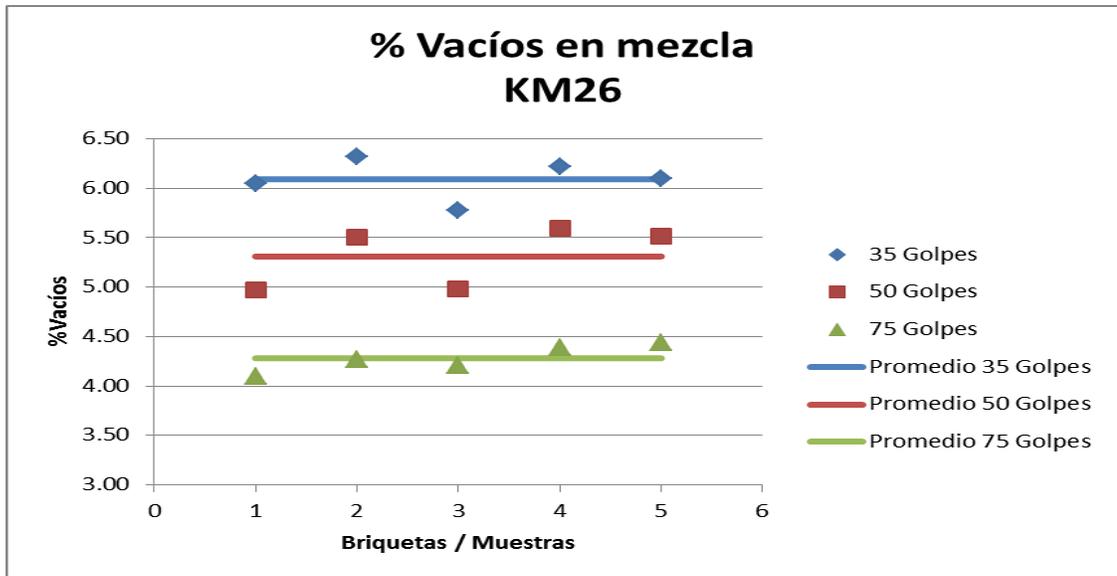


Fig. 77: Porcentaje de vacíos, planta KM26.

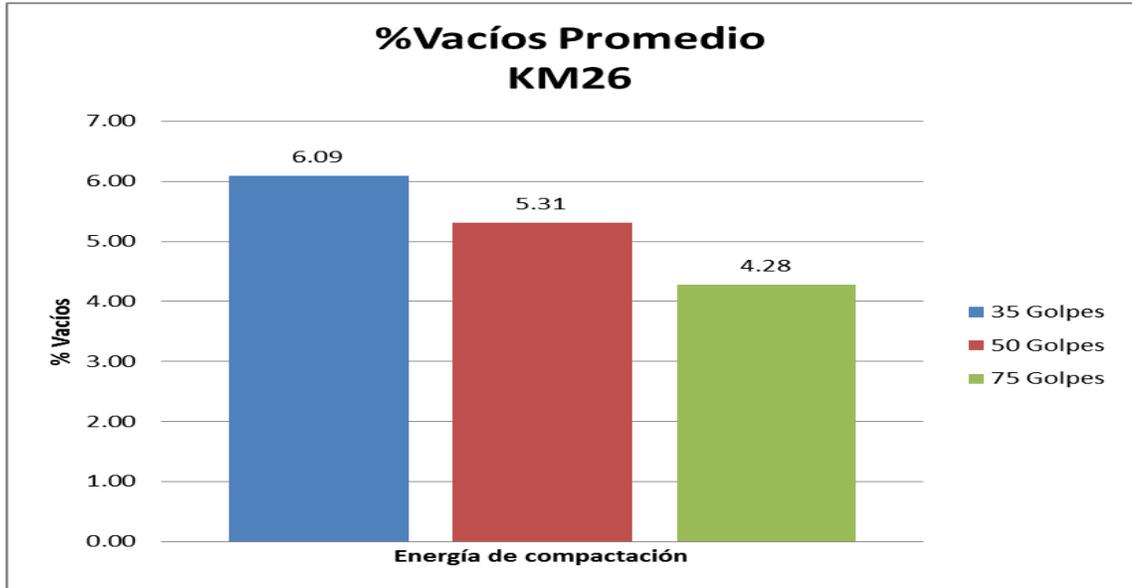


Fig. 78: Porcentaje de vacíos promedio, planta KM26.

Gravedad específica bulk y porcentaje de vacíos en la planta Vía a la Costa.

PARÁMETROS VOLUMÉTRICOS: DENSIDAD Y % DE VACÍOS									
PLANTA: VÍA A LA COSTA									
Energía de Compactac	BRIQUETAS	Pesos			Volumen (cm³)	Densidad Gravedad Esp. Bulk	Vacíos Vacíos en mezcla (%)	Promedios	
		Peso muestra en aire (gr)	Peso muestra en agua (gr)	Peso muestra s.s. aire (gr)				Gravedad Esp. Bulk	Vacíos en mezcla (%)
35	1-35-AV	1086.5	554.8	1091.4	536.6	2.025	10.10	2.050	8.98
	2-35-AV	1128.3	584.8	1130.8	546.0	2.066	8.25		
	3-35-AV	1056.4	545.3	1059.5	514.2	2.054	8.78		
	4-35-AV	1019.8	529.8	1022.1	492.3	2.072	8.03		
	5-35-AV	1132.3	578.6	1135.7	557.1	2.032	9.76		
50	1-50-AV	963.5	511.1	965.0	453.9	2.123	5.75	2.107	6.44
	2-50-AV	1103.8	578.5	1106.0	527.5	2.093	7.09		
	3-50-AV	1075.8	566.6	1077.5	510.9	2.106	6.51		
	4-50-AV	1121.1	589.1	1123.0	533.9	2.100	6.77		
	5-50-AV	983.8	520.7	985.9	465.2	2.115	6.10		
75	1-75-AV	964.6	515.4	965.8	450.4	2.142	4.91	2.143	4.84
	2-75-AV	1025.1	548.9	1026.1	477.2	2.148	4.62		
	3-75-AV	1067.1	567.9	1068.4	500.5	2.132	5.34		
	4-75-AV	981.2	525.8	982.6	456.8	2.148	4.63		
	5-75-AV	943.4	505.3	944.9	439.6	2.146	4.72		

Tabla 24: Gravedad específica "bulk" y porcentaje de vacíos de la planta Vía a la costa.

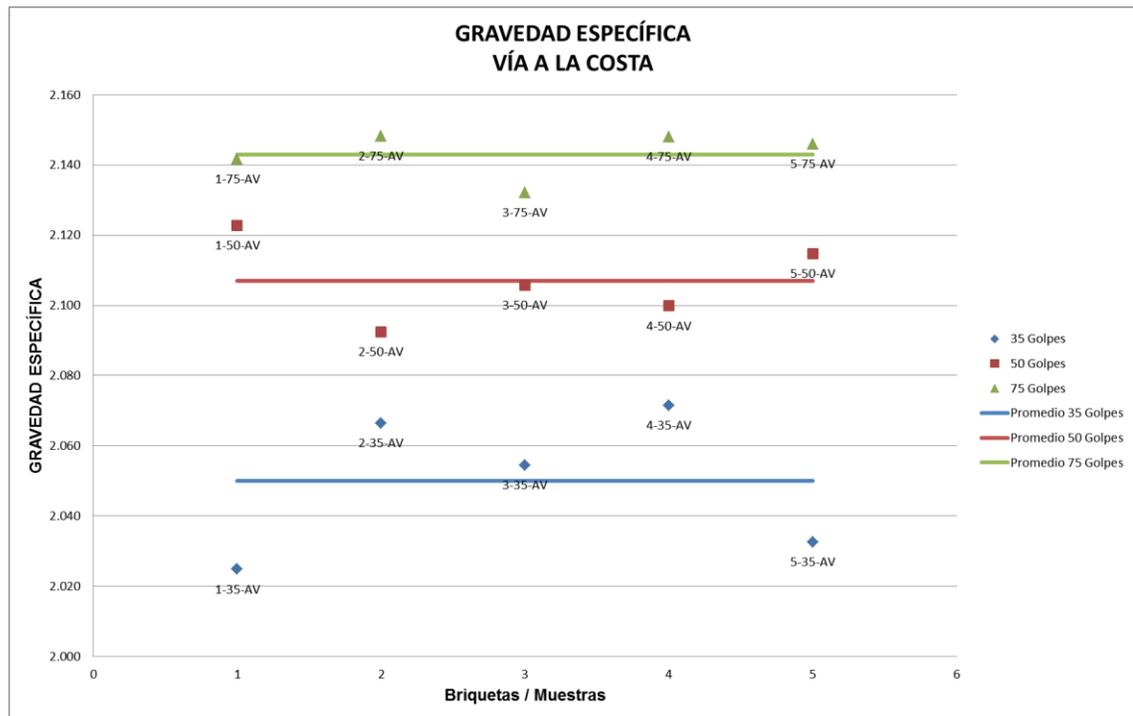


Fig. 79: Gravedad específica o densidades, planta Vía a la Costa.

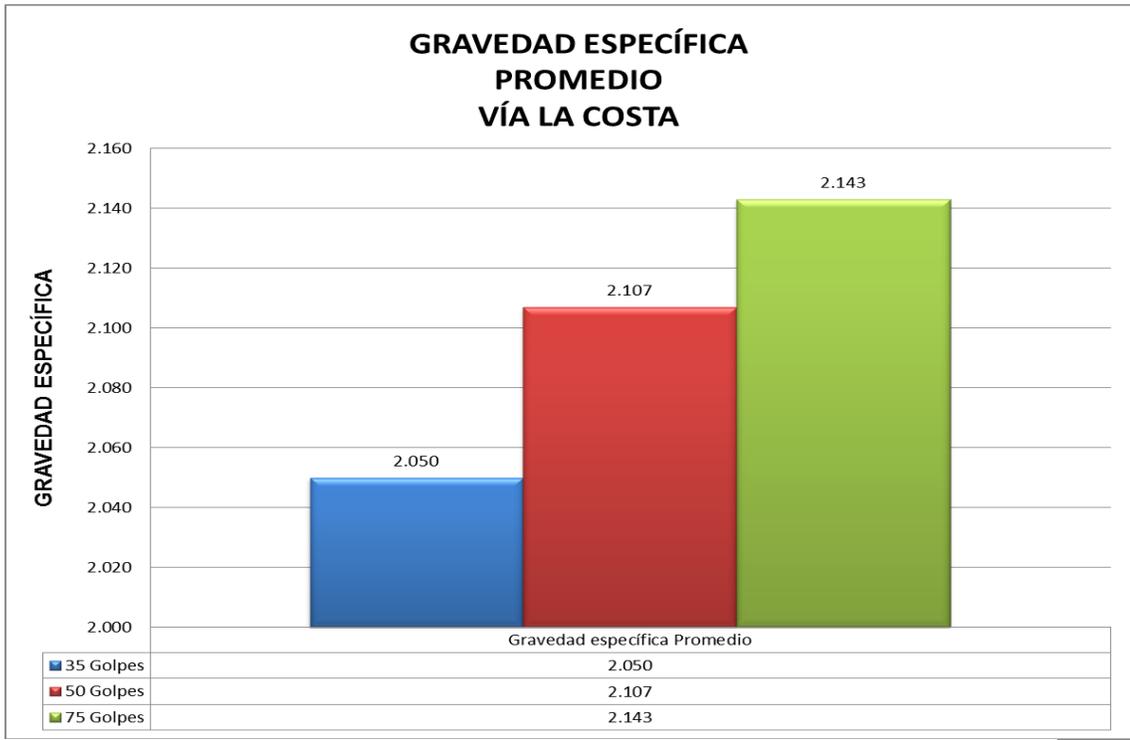


Fig. 80: Gravedad específica promedio, planta Vía a la Costa.

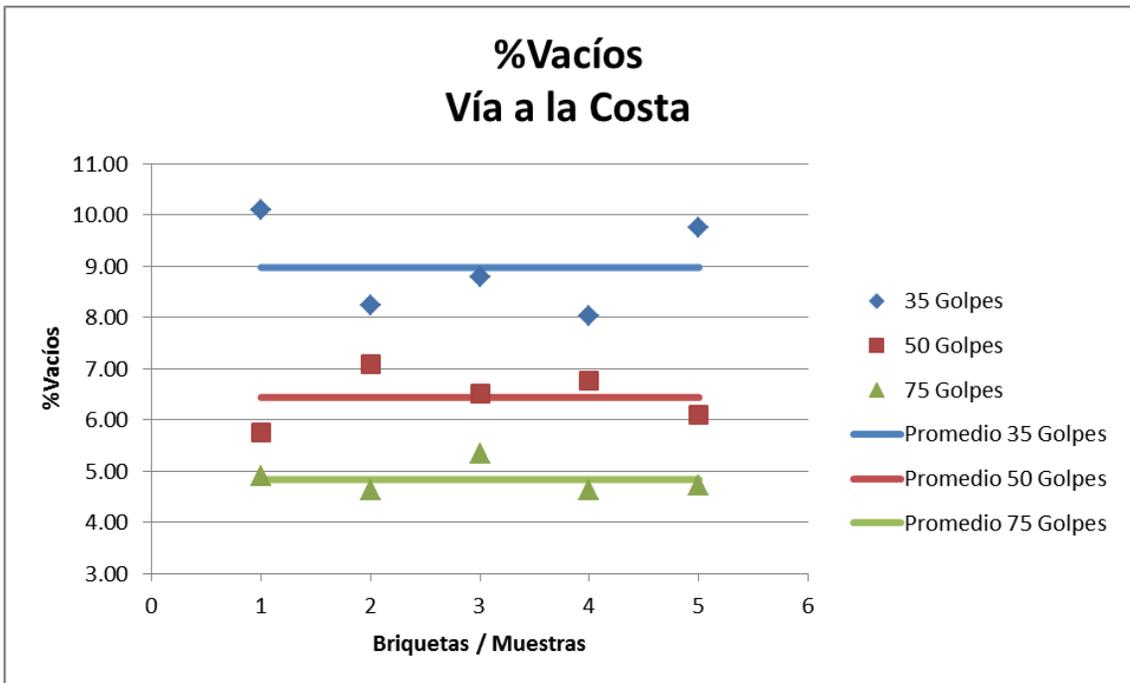


Fig. 81: Porcentaje de vacíos, planta Vía a la Costa.

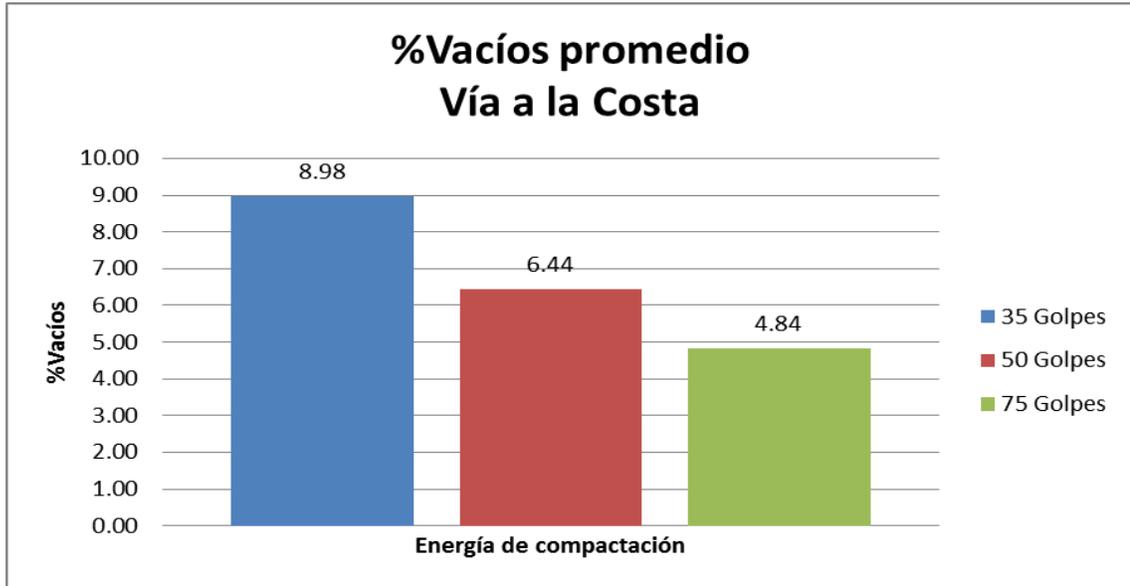


Fig. 82; Porcentaje de vacíos promedio, planta Vía a la Costa.

Organización de las muestras a ensayar mediante pruebas reológicas.

Se muestra en la tabla 25, el detalle de las pruebas a las que será sometida cada muestra o briqueta en el proceso experimental de las pruebas reológicas.

Planta	Módulo Rigidez (STIFFNESS - MICRON)		Fatiga (FATIGUE)			Creep Dinámico (DYNAMIC CREEP)
	1	2	3	4	5	1
DU	1-DU-35	2-DU-35	3-DU-35	4-DU-35	5-DU-35	1-DU-35
	1-DU-50	2-DU-50	3-DU-50	4-DU-50	5-DU-50	1-DU-50
	1-DU-75	2-DU-75	3-DU-75	4-DU-75	5-DU-75	1-DU-75
CH	1-CH-35	2-CH-35	3-CH-35	4-CH-35	5-CH-35	1-CH-35
	1-CH-50	2-CH-50	3-CH-50	4-CH-50	5-CH-50	1-CH-50
	1-CH-75	2-CH-75	3-CH-75	4-CH-75	5-CH-75	1-CH-75
K26	1-K26-35	2-K26-35	3-K26-35	4-K26-35	5-K26-35	1-K26-35
	1-K26-50	2-K26-50	3-K26-50	4-K26-50	5-K26-50	1-K26-50
	1-K26-75	2-K26-75	3-K26-75	4-K26-75	5-K26-75	1-K26-75
AV	1-AV-35	2-AV-35	3-AV-35	4-AV-35	5-AV-35	1-AV-35
	1-AV-50	2-AV-50	3-AV-50	4-AV-50	5-AV-50	1-AV-50
	1-AV-75	2-AV-75	3-AV-75	4-AV-75	5-AV-75	1-AV-75

Tabla 25: Organización de las muestras, para pruebas reológicas.

Módulo de Rigidez mediante deformación controlada.

Los resultados obtenidos para todas las muestras ensayadas se muestran en la tabla 26.

Planta	No. Muestra	Energía de compactación Golpes	Briqueta	Módulo Rigidez (Mpa)
Durán	1	35	1-35-DU	1713
Durán	2	35	2-35-DU	1183
Durán	1	50	1-50-DU	2546
Durán	2	50	2-50-DU	2187
Durán	1	75	1-75-DU	4222
Durán	2	75	2-75-DU	2841
Chivería	1	35	1-35-CH	2911
Chivería	2	35	2-35-CH	3058
Chivería	1	50	1-50-CH	3259
Chivería	2	50	2-50-CH	3054
Chivería	1	75	1-75-CH	3313
Chivería	2	75	2-75-CH	3515
KM26	1	35	1-35-K26	2551
KM26	2	35	2-35-K26	2122
KM26	1	50	1-50-K26	2951
KM26	2	50	2-50-K26	2811
KM26	1	75	1-75-K26	3021
KM26	2	75	2-75-K26	3177
Vía a la Costa	1	35	1-35-AV	1179
Vía a la Costa	2	35	2-35-AV	1265
Vía a la Costa	1	50	1-50-AV	1865
Vía a la Costa	2	50	2-50-AV	1872
Vía a la Costa	1	75	1-75-AV	2191
Vía a la Costa	2	75	2-75-AV	2212

Tabla 26: Módulos de rigidez, mediante deformación controlada, todas las plantas.

Módulo de rigidez promedio, mediante deformación controlada, con una energía de compactación de 35 golpes.

Los resultados promedios de las pruebas realizadas a las 4 plantas, se muestran a continuación en la tabla 27, y en la figura 83.

Planta	M1-35 (Mpa)	M2-35 (Mpa)	Promedio 35 (Mpa)
Durán	1713	1183	1448
Chivería	2911	3058	2985
KM26	2551	2122	2337
Vía a la costa	1179	1265	1222

Tabla 27: Módulo de rigidez, mediante deformación controlada, Compactación 35 golpes.

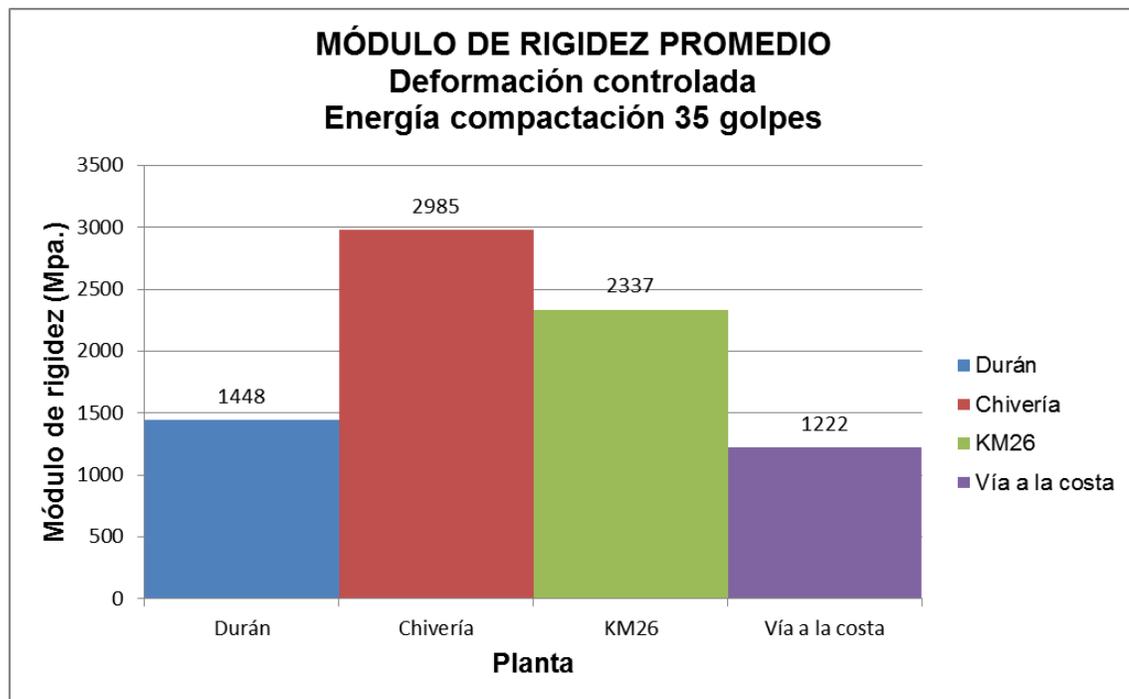


Fig. 83: Módulo de rigidez promedio, mediante deformación controlada, compactación 35 golpes.

Módulo de rigidez promedio, mediante deformación controlada, con una energía de compactación de 50 golpes.

Los resultados promedios de las pruebas realizadas a las 4 plantas, se muestran a continuación en la tabla 28, y en la figura 84.

Planta	M1-50 (Mpa)	M2-50 (Mpa)	Promedio 50 (Mpa)
Durán	2546	2187	2367
Chivería	3259	3054	3157
KM26	2951	2811	2881
Vía a la costa	1865	1872	1869

Tabla 28: Modulo de rigidez, mediante deformación controlada, Compactación 50 golpes.

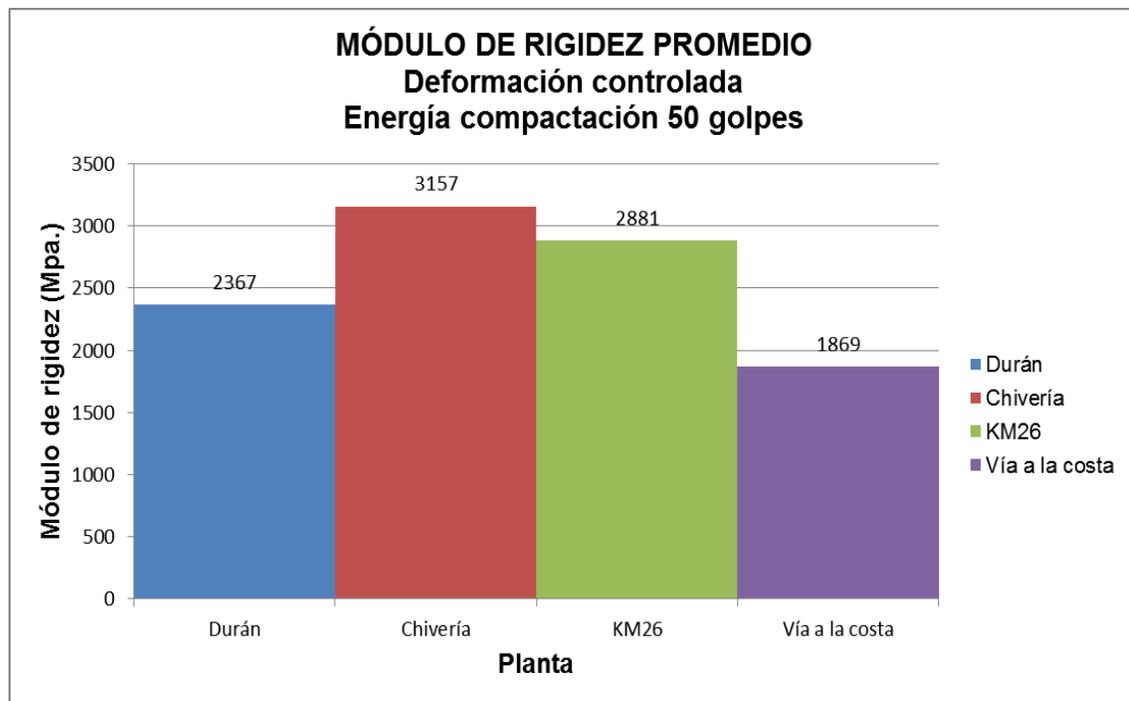


Fig. 84: Módulo de rigidez promedio, mediante deformación controlada, compactación 50 golpes.

Módulo de rigidez promedio, mediante deformación controlada, con una energía de compactación de 75 golpes.

Los resultados promedios de las pruebas realizadas a las 4 plantas, se muestra a continuación en la tabla 29, y en la figura 85.

Planta	M1-75 (Mpa)	M2-75 (Mpa)	Promedio 75 (Mpa)
Durán	4222	2841	3532
Chivería	3313	3515	3414
KM26	3021	3177	3099
Vía a la costa	2191	2212	2202

Tabla 29: Modulo de rigidez, mediante deformación controlada, Compactación 75 golpes.

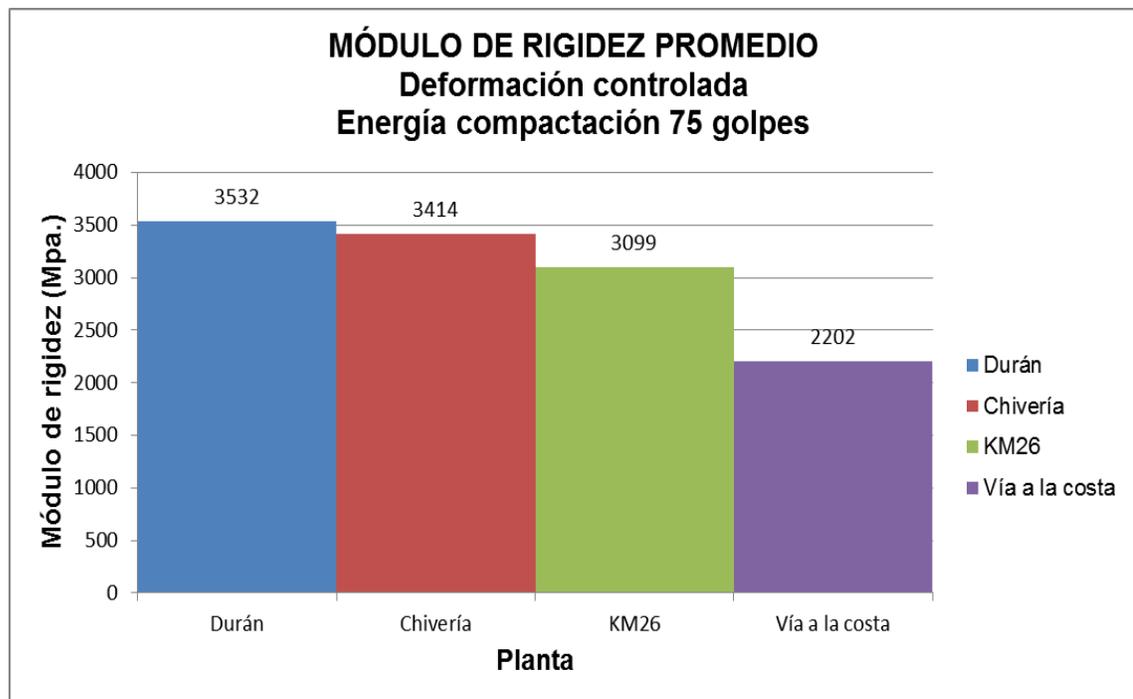


Fig. 85: Módulo de rigidez promedio, mediante deformación controlada, compactación 75 golpes.

Ensayo de Módulo de Rigidez, mediante carga controlada y Fatiga.

Ensayo de Módulo de rigidez, mediante carga controlada y ensayo de fatiga de la planta Durán.

Los resultados de las pruebas se muestran en la tabla 30 y se grafican en las figuras 86 y 87. Donde ε se encuentra calculado en $\frac{mm}{mm} \times 10^{-6}$.

MÓDULO POR CARGA CONTROLADA Y FATIGA PLANTA: DURÁN						
Energía de Compactación No. Golpes	MUESTRA No.	CARGA (Kpa) σ	MÓDULO (Mpa) M	No. REPETICIONES N	DEFORMACIÓN CALCULADA ε	TEMPERATURA (°c) T
35 Golpes	2	100	1590	8541	129	20°
	5	200	1781	1408	230	20°
	1	300	949	471	648	20°
50 Golpes	2	100	2532	17524	81	20°
	5	200	1773	1709	231	20°
	4	300	1653	583	372	20°
75 Golpes	4	200	3537	8004	116	20°
	5	300	3510	1978	175	20°
	3	400	3071	708	267	20°

Tabla 30: Módulo por carga controlada y fatiga, planta Durán.

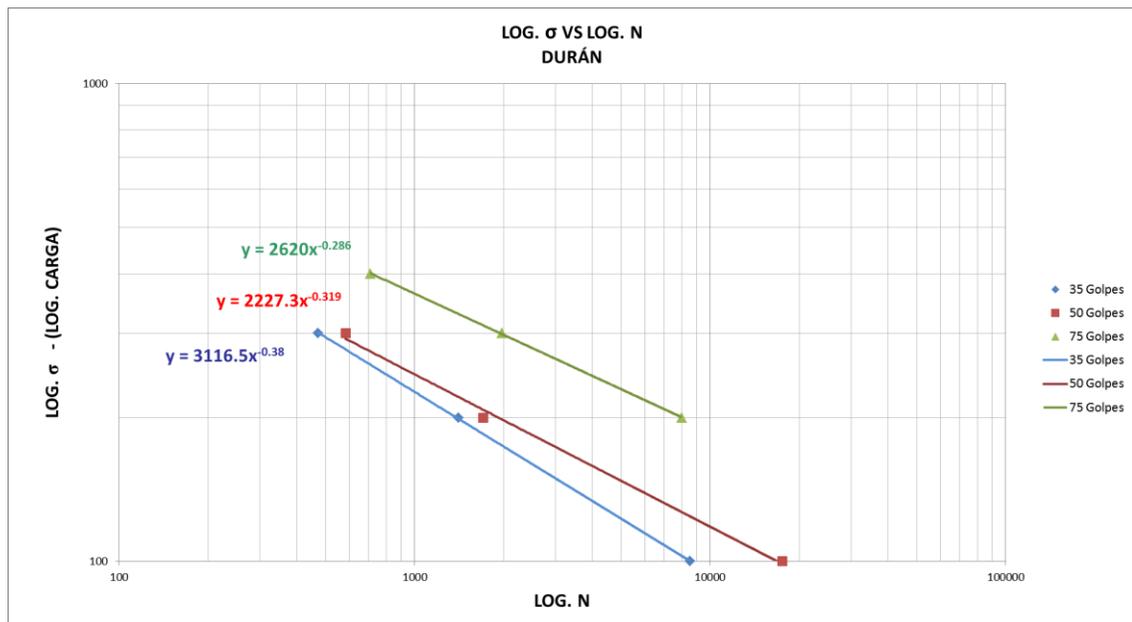


Fig. 86: Relación Carga vs repeticiones, Planta Durán.

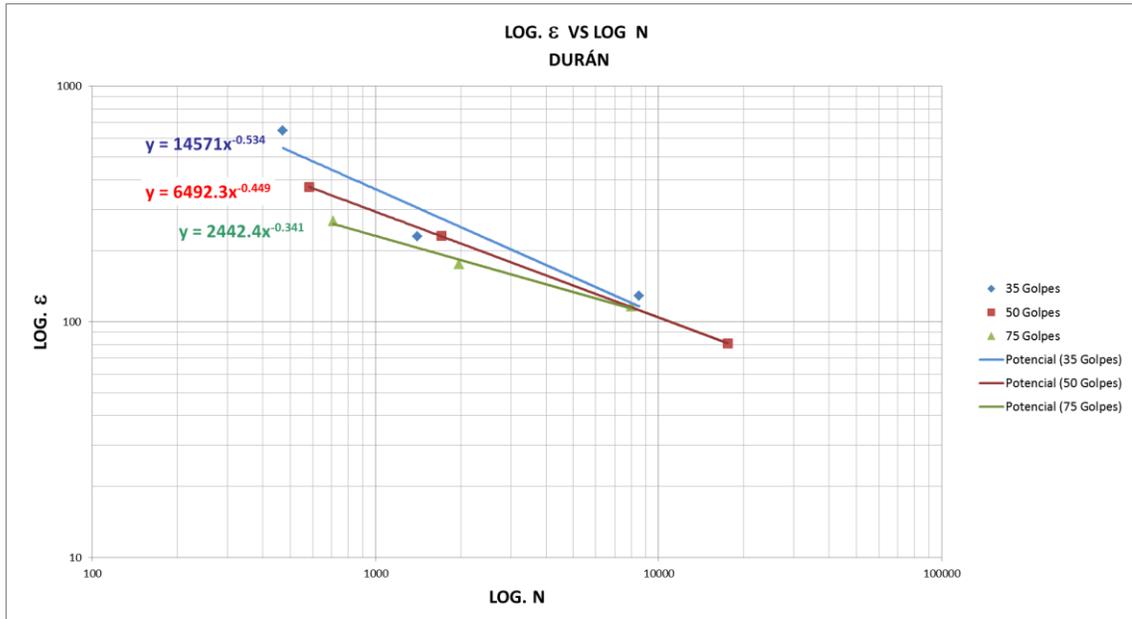


Fig. 87: Relación Deformación vs repeticiones, planta Duran.

Ensayo de Módulo de rigidez, mediante carga controlada y ensayo de fatiga de la planta Chivería.

Los resultados de las pruebas se muestran en la tabla 31 y se grafican en las figuras 88 y 89. Donde ϵ se encuentra calculado en $\frac{mm}{mm} \times 10^{-6}$.

MÓDULO POR CARGA CONTROLADA Y FATIGA PLANTA: CHIVERÍA						
Energía de Compactación No. Golpes	MUESTRA No.	CARGA (Kpa) σ	MÓDULO (Mpa) M	No. REPETICIONES N	DEFORMACIÓN CALCULADA ϵ	TEMPERATURA (°c) T
35	4	400	1781	1178	460	20°
	3	300	2629	7112	234	20°
	5	200	3259	27852	126	20°
50	5	400	2009	1492	408	20°
	3	300	3005	6312	205	20°
	4	200	3310	28727	124	20°
75	5	500	2733	990	375	20°
	3	400	2329	2782	352	20°
	4	300	4630	12796	133	20°

Tabla 31: Módulo por carga controlada y fatiga, planta Chivería.

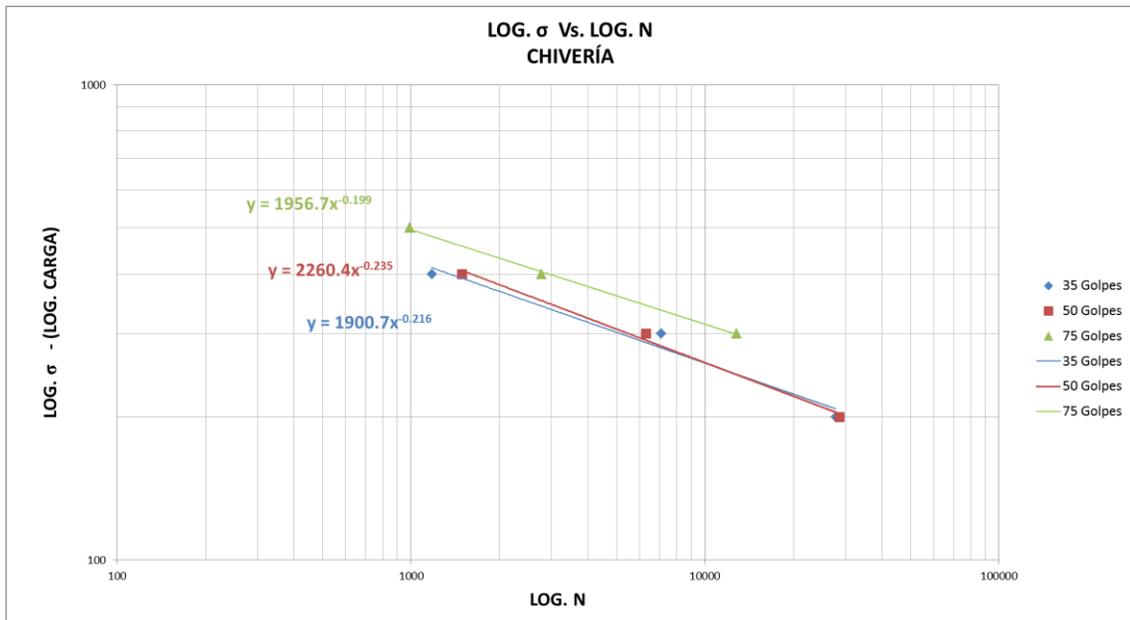


Fig. 88: Relación Carga vs repeticiones, Planta Chivería.

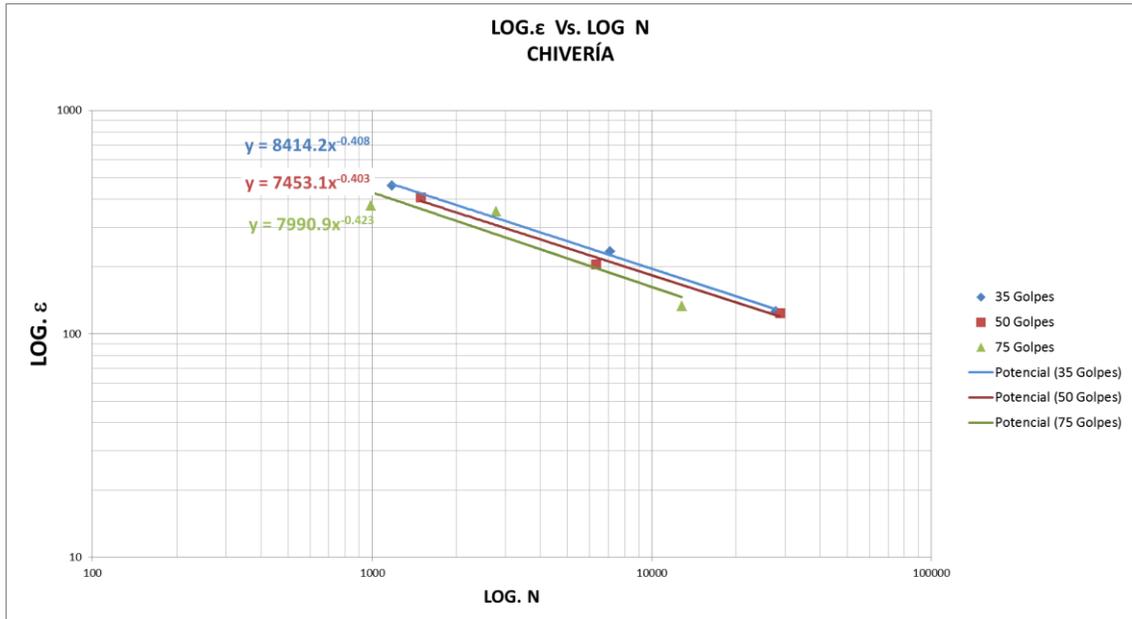


Fig. 89: Relación Deformación vs repeticiones, planta Chivería.

Ensayo de Módulo de rigidez, mediante carga controlada y ensayo de fatiga de la planta KM26.

Los resultados de las pruebas se muestran en la tabla 32 y se grafican en las figuras 90 y 91. Donde ϵ se encuentra calculado en $\frac{mm}{mm} \times 10^{-6}$.

MÓDULO POR CARGA CONTROLADA Y FATIGA PLANTA: KM26						
Energía de Compactación No. Golpes	MUESTRA No.	CARGA (Kpa) σ	MÓDULO (Mpa) M	No. REPETICIONES N	DEFORMACIÓN CALCULADA e	TEMPERATURA (°c) T
35	5	500	1194	115	858	20°
	3	300	1910	1904	322	20°
	1	200	1924	7494	213	20°
50	5	500	1361	145	753	20°
	3	300	2078	3416	296	20°
	2	200	2342	15826	175	20°
75	5	500	1975	366	519	20°
	3	300	2776	4390	222	20°
	2	200	2877	32944	143	20°

Tabla 32: Módulo por carga controlada y fatiga, planta KM26.

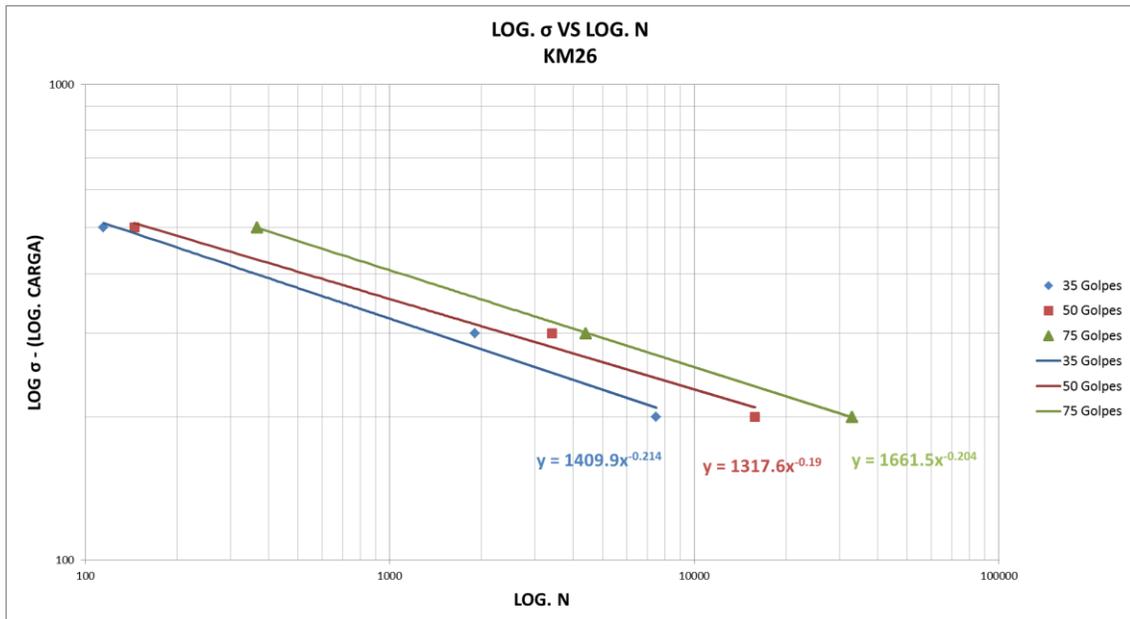


Fig. 90: Relación Carga vs repeticiones, Planta KM26.

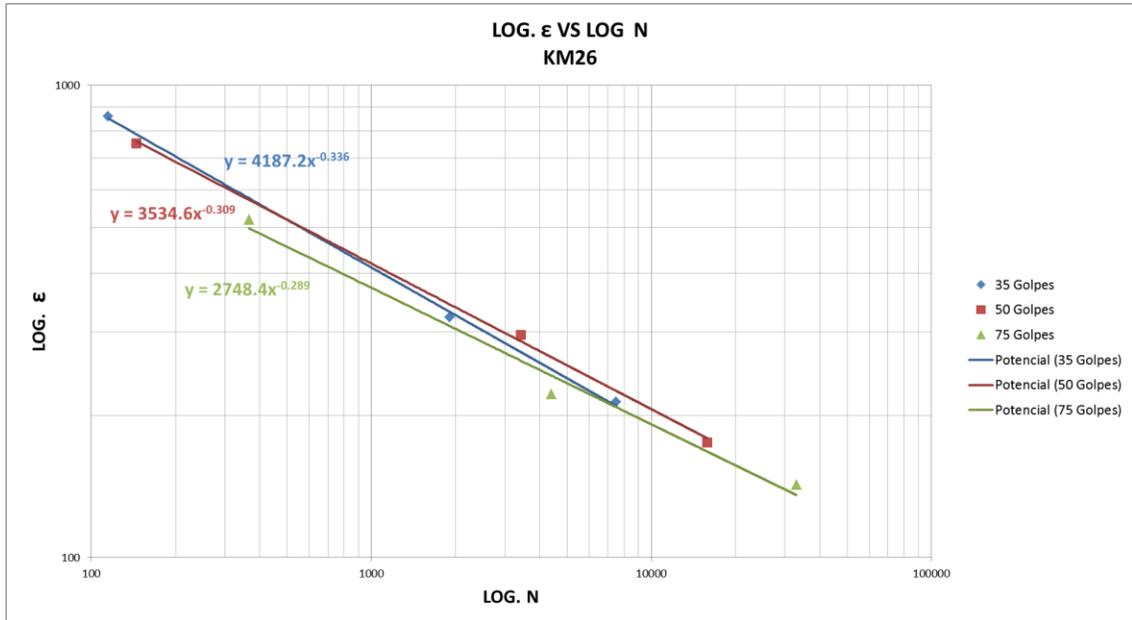


Fig. 91: Relación Deformación vs repeticiones, planta KM26.

Ensayo de Módulo de rigidez, mediante carga controlada y ensayo de fatiga de la planta Vía a la Costa.

Los resultados de las pruebas se muestran en la tabla 33 y se grafican en las figuras 92 y 93. Donde ϵ se encuentra calculado en $\frac{mm}{mm} \times 10^{-6}$.

MÓDULO POR CARGA CONTROLADA Y FATIGA PLANTA: VÍA A LA COSTA						
Energía de Compactación No. Golpes	MUESTRA No.	CARGA (Kpa) σ	MÓDULO (Mpa) M	No. REPETICIONES N	DEFORMACIÓN CALCULADA ϵ	TEMPERATURA (°c) T
35	3	300	1008	936	610	20°
	4	200	1770	5872	232	20°
	5	100	2189	38530	94	20°
50	3	300	1793	1691	343	20°
	4	200	1897	8207	216	20°
	5	100	2494	45216	82	20°
75	4	400	2095	944	391	20°
	3	300	2117	2685	291	20°
	5	200	3982	24640	103	20°

Tabla 33: Módulo por carga controlada y fatiga, planta Vía a la costa.

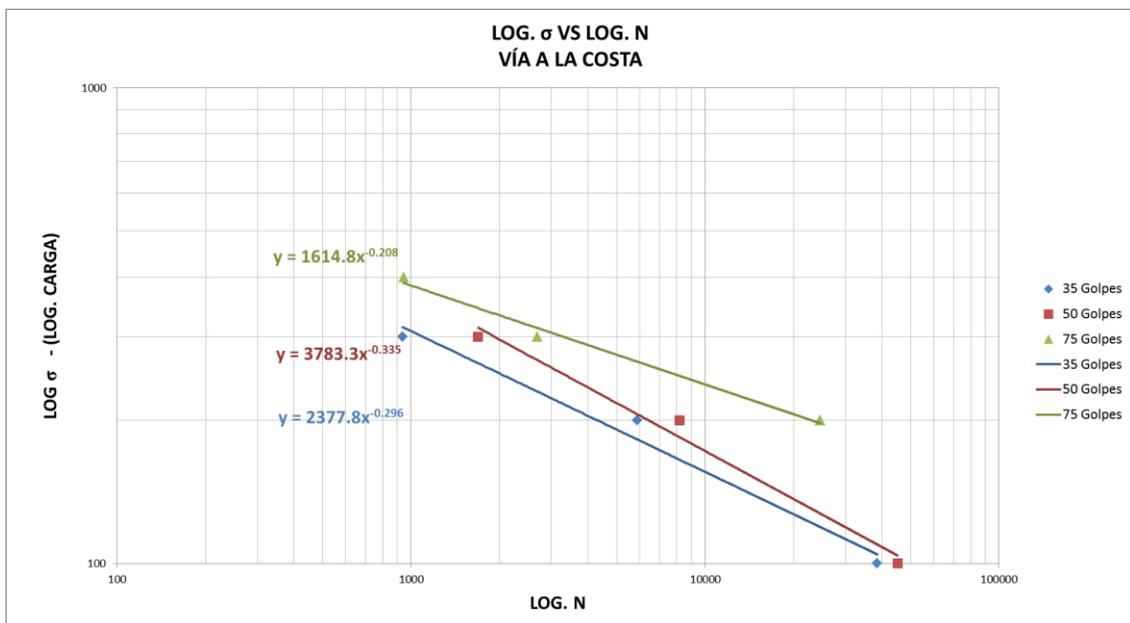


Fig. 92: Relación Carga vs repeticiones, Plata Vía a la costa.

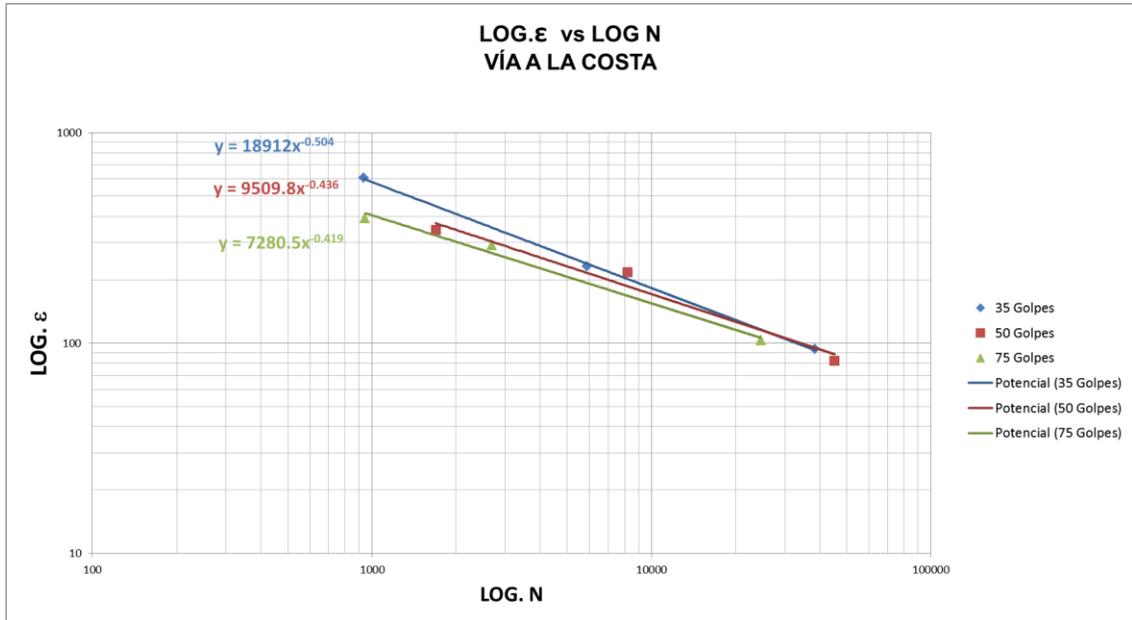


Fig. 93: Relación Deformación vs repeticiones, planta Vía a la Costa.

Ensayo de deformación permanente. (Creep Dinámico).

Los resultados de los ensayos realizados a las 4 plantas con las briquetas o muestras seleccionadas se muestran en la Tabla 34, y se grafican en la figura 94.

Ensayo Creep Dinámico				
Porcentaje de deformación axial.				
Planta	Energía	35	50	75
	Durán		1.94	1.66
Chivería		1.30	1.09	1.00
KM26		1.57	1.52	0.97
Vía a la Costa		1.09	0.82	0.81
*Todos los valores representan Porcentaje de deformación axial.				

Tabla 34: Resultados del ensayo Creep Dinámico.

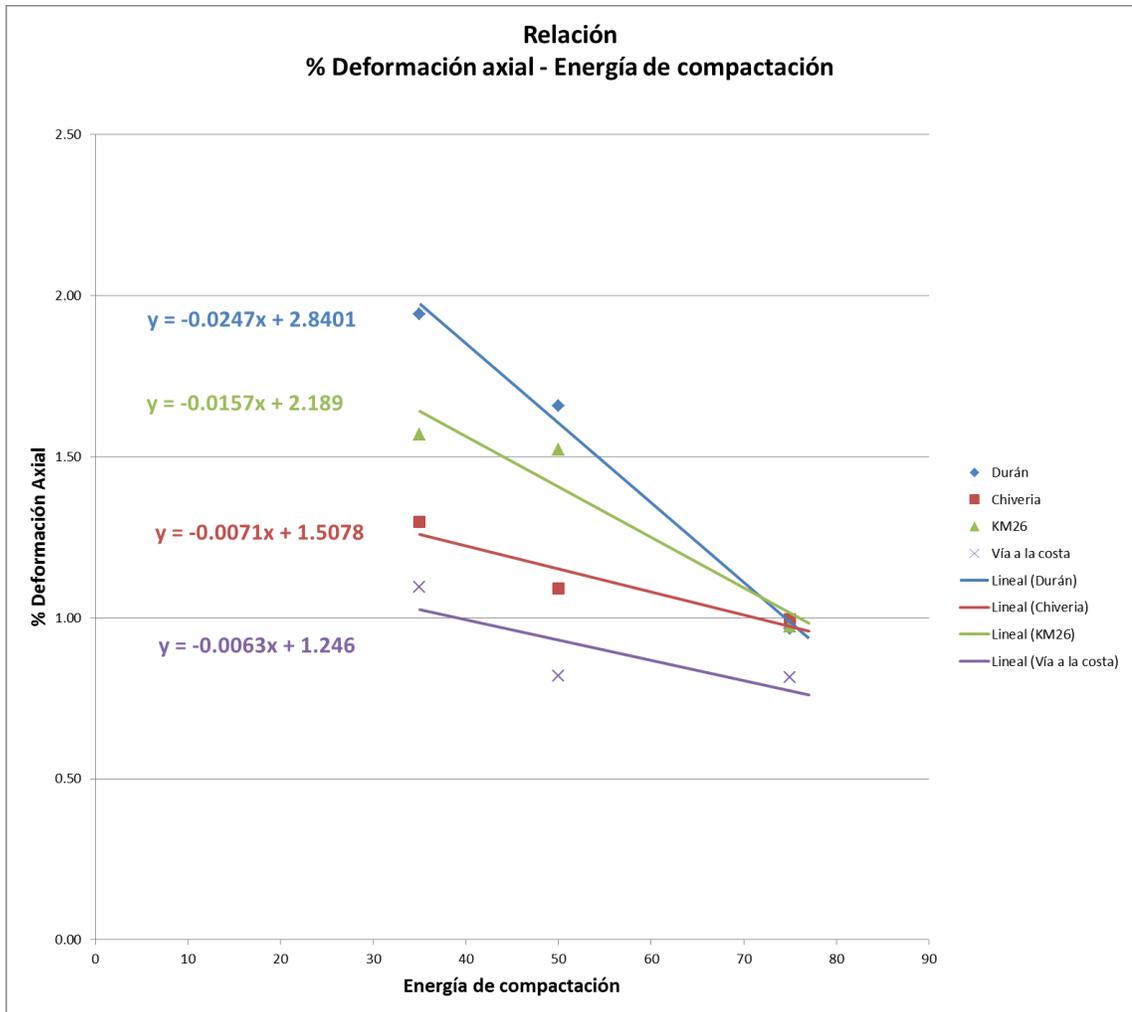


Fig. 94: Relación Porcentaje de deformación axial y energía de compactación.

CAPÍTULO 4 – ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Porcentaje de asfalto en las muestras.

El resultado de este porcentaje fue muy aproximado al suministrado por las plantas óptimo de diseño.

Porcentaje de Asfalto		
Planta	% Asfalto Óptimo	% Asfalto experimental
Durán	7.0%	7.0%
Chivería	6.0%	6.1%
KM26	5.5%	5.5%
Vía a la Costa	6.2%	6.4%

Tabla 35: Porcentaje de asfalto.

La diferencia entre los porcentajes óptimos y calculados no es mayor al 0.3%, por lo que se consideran adecuados.

Granulometría en agregados extraídos.

En general, las curvas granulométricas cumplen con los requerimientos de diseño del MTOP.

Densidad teórica máxima. Ensayo RICE.

Experimentalmente se tiene los siguientes valores, los cuales se encuentran dentro del rango de 2.2 a 2.6, siendo Durán la planta que tiene un número menor y Chivería un número mayor.

La densidad teórica máxima, en este caso determinada mediante el ensayo RICE, tiene una relación directa con el porcentaje de vacíos de la mezcla y es muy sensible en su determinación y calculo.

Densidad teórica máxima	
Planta	Ensayo RICE
Durán	2.217
Chivería	2.541
KM26	2.518
Vía a la Costa	2.252

Tabla 36: Densidad teórica máxima, ensayo RICE.

Gravedad específica “Bulk” o Densidad.

La gravedad específica o densidad de las muestras aumenta a medida que aumenta la energía de compactación.

Ordenando de mayor a menor los resultados de las densidades, a una energía de compactación de 75 golpes tendríamos: Durán. Vía a la costa, KM26 y Chivería, respectivamente.

Gravedad específica "Bulk" o Densidad			
Planta	Energía de Compactación		
	35	50	75
Durán	2.058	2.101	2.140
Chivería	2.378	2.410	2.431
KM26	2.364	2.384	2.410
Vía a la Costa	2.050	2.107	2.143

Tabla 37: Resultados de los ensayos de gravedad específica "Bulk".

Porcentaje de Vacíos.

El porcentaje de vacíos de las muestras disminuye a medida que aumenta la energía de compactación.

Ordenando de menor a mayor, los resultados de los porcentaje de vacíos, a una energía de compactación de 75 golpes tendríamos: Durán, KM26 y Chivería y Vía a la costa respectivamente

Porcentaje de vacíos			
Planta	Energía de Compactación		
	35	50	75
Durán	7.20%	5.24%	3.50%
Chivería	6.44%	5.15%	4.34%
KM26	6.09%	5.31%	4.28%
Vía a la Costa	8.98%	6.44%	4.84%

Tabla 38: Porcentaje de vacíos, resultados generales.

Módulo de rigidez mediante deformación controlada.

Los resultados muestran que el módulo de rigidez aumenta, a medida que aumenta la energía de compactación y disminuye el porcentaje de vacíos. Este efecto, que ocurre en cada planta. Se puede apreciar en la tabla 39 y graficado en la figura 95.

Relación							
Módulo rigidez promedio y porcentaje de vacíos							
Energía de compactación		35		50		75	
Planta.	Porcentajes	Modulo Rigidez Promedio (MPa)	% Vacíos	Modulo Rigidez Promedio (MPa)	% Vacíos	Modulo Rigidez Promedio (MPa)	% Vacíos
Durán		1448	7.20	2367	5.24	3532	3.50
Chivería		2985	6.44	3157	5.15	3414	4.34
KM26		2337	6.09	2881	5.31	3099	4.28
Vía a la Costa		1222	8.98	1869	6.44	2202	4.84

Tabla 39: Módulo de rigidez promedios, resultados generales.

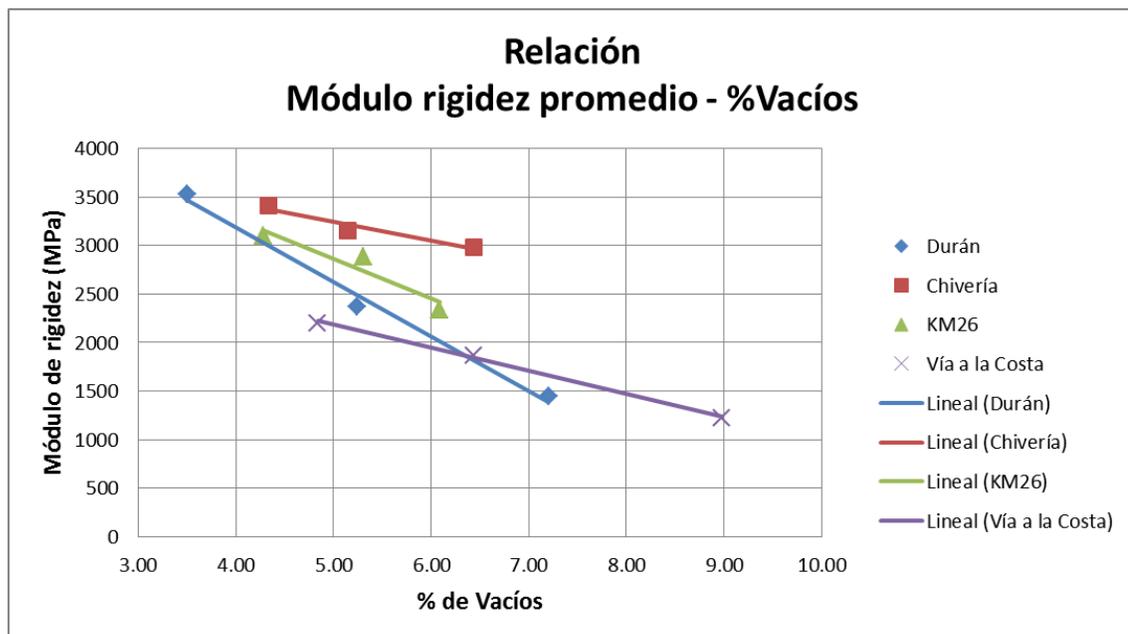


Fig. 95: Relación del Módulo de rigidez y el porcentaje de vacíos.

De acuerdo a la práctica internacional, una buena mezcla asfáltica debidamente compactada debe originar módulos de rigidez, bajo las condiciones de ensayo empleadas, superiores a 3000 MPa. Entre 3000 y 2000 MPa el comportamiento puede ser variable. Por debajo de 2000 MPa la capacidad estructural es inadecuada.

Como se observa en la tabla 39, las plantas Durán, Chivería y KM26 dan resultados satisfactorios para una buena compactación (75 golpes), no así la planta de Vía a la Costa, cuyo promedio de 2202 MPa, nos alerta de un comportamiento variable.

Para 50 golpes de compactación, con vacíos que pudieran ser aceptados en obra, la planta Chivería arroja un módulo aceptable (mayor a 3000MPa).

Fatiga.

Se puede observar en el desarrollo experimental que en todos los ensayos realizados a las diferentes plantas, aquellas mezclas con una mayor rigidez bajo una carga aplicada, tienen un mayor número de repeticiones para llegar al estado de fatiga y deformarse, como el criterio de este ensayo, mayor a 5mm. En esencia, los módulos determinados bajo las menores cargas aplicadas (100 o 200 KPa), ofrecen los módulos mayores, a los cuales les corresponderán las menores deformaciones por tracción (de acuerdo a la ecuación mostrada en la Página 40) y las mayores repeticiones para el fallo, es decir, la mejor respuesta a la fatiga.

Se puede observar en los gráficos de fatiga de todas las muestras, que las mezclas con mayor rigidez a deformación controlada (75 golpes), corresponden a las rectas de ajustes que se encuentran más desplazadas hacia la parte superior. En la relación realizada con la carga de ensayo, como lo indica la figura 96.

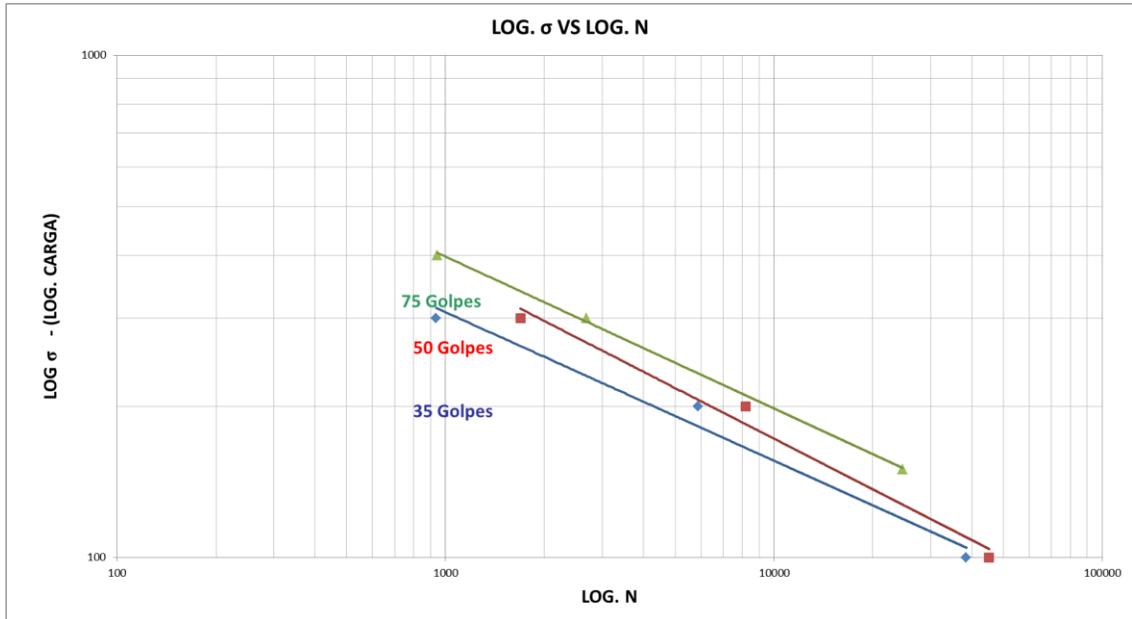


Fig. 96: Relación típica entre carga y repeticiones.

Analizando la relación de la deformación y el número de repeticiones para llegar al fallo, tenemos un resultado inverso a la relación anterior, mostrado en la figura 97.

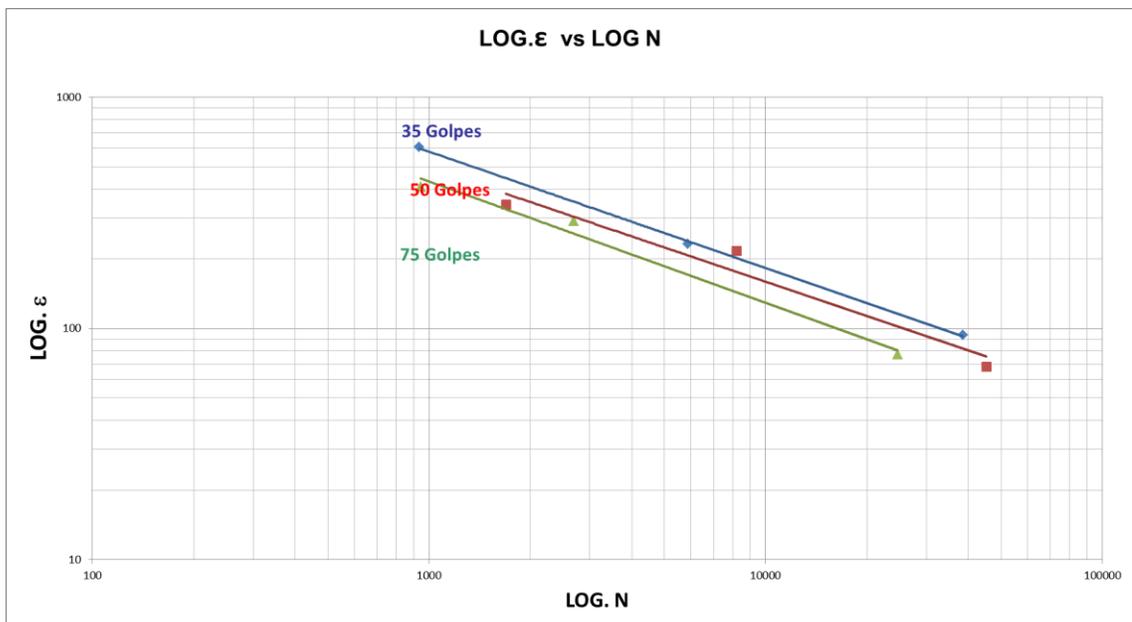


Fig. 97: Relación típica entre deformación y repeticiones.

La rigidez de una capa asfáltica influye en la deformación por tracción (en la parte inferior de dicha capa) de manera opuesta que en la tensión. Es decir, al incrementarse la rigidez (en nuestro caso con el aumento del número de golpes a 75) se reduce la deformación y aumenta la tensión en la capa. Consecuentemente, una capa rígida es deseable para prevenir el inicio de las grietas, pero acelerará su subsiguiente propagación.

Deformación permanente (Creep Dinámico).

Los resultados obtenidos son en general positivos o buenos ya que para una energía de compactación de 75 golpes por cara, que correspondería al 100% de la energía aplicada en el campo, se tienen valores inferiores al 1% de deformación.

Al relacionar el porcentaje de deformación permanente con el porcentaje de vacíos podemos darnos cuenta que se mantiene una estrecha relación entre ambos y marcan una tendencia. Y en nuestras mezclas ensayadas se da, que mientras se maneje un % de vacíos menor (en un rango entre 3.50% y 4.84%), se tendrá una menor deformación axial.

Es decir que, en las mezclas de todas las plantas analizadas, de aplicarse un 100% de la energía de compactación, se alcanzan valores de deformación por debajo o igual que 1%, por lo que estas mezclas tendrían un buen comportamiento a las deformaciones plásticas. No obstante, para los vacíos menores de 6.44% correspondientes a la tabla 40 y para 50 golpes por cara, las deformaciones de 3 plantas ya superarían el límite de 1%. Nótese que estos vacíos en general cumplirían los criterios actuales de aceptación en obra.

Relación Porcentaje deformación axial y porcentaje de vacíos						
Energía de compactación	35		50		75	
Planta. Porcentajes	% Deformación axial	% Vacíos	% Deformación axial	% Vacíos	% Deformación axial	% Vacíos
Durán	1.94	7.20	1.66	5.24	0.96	3.50
Chivería	1.30	6.44	1.09	5.15	1.00	4.34
KM26	1.57	6.09	1.52	5.31	0.97	4.28
Vía a la costa	1.09	8.98	0.82	6.44	0.81	4.84

Tabla 40: Porcentaje de deformación axial y porcentaje de vacíos.

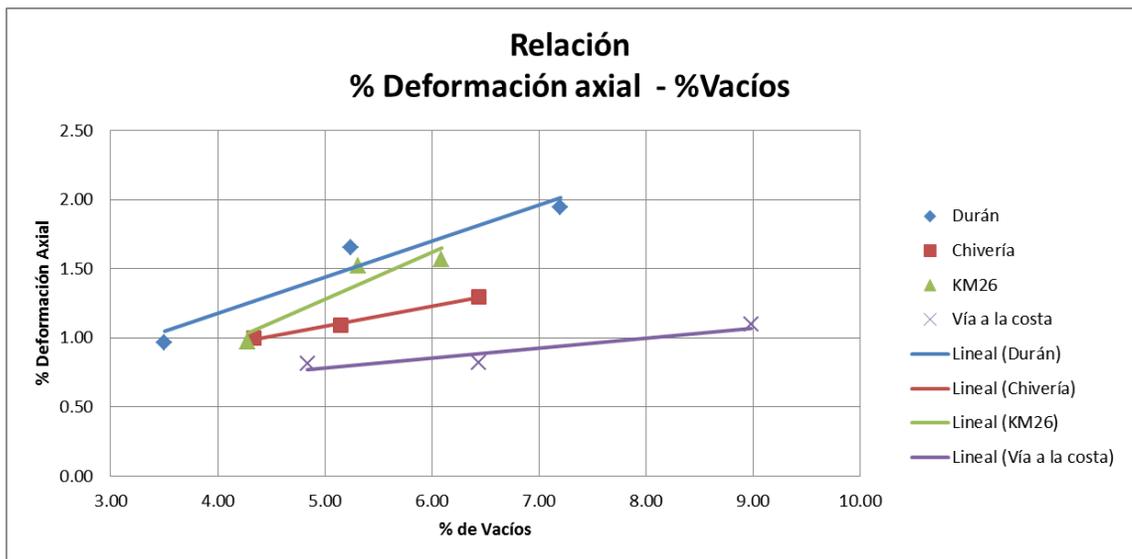


Fig. 98: Gráfico de porcentajes de deformación axial y vacíos.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES.

1. Las pruebas de desempeño permiten vincular la calidad evaluada a nivel de laboratorio con el comportamiento real de las mezclas en obra, en este caso su capacidad estructural (Módulo de rigidez), su resistencia a deformarse (creep dinámico) y su resistencia a fisurarse (fatiga).
2. Las pruebas de módulo de rigidez y creep dinámico tienen al momento ciertas exigencias o especificaciones válidas aunque posibles de perfeccionar o ajustar para nuestro tráfico y clima.
3. En el caso de la fatiga, el fenómeno a investigar y el manejo de exigencias se hace más complejo, ya que la magnitud de las deformaciones esperadas depende del espesor de la capa asfáltica, del resto de la estructura del pavimento, de las cargas actuantes y del clima. Es decir el comportamiento a la fatiga de una mezcla, en un caso en particular, pudiera ser bueno o malo de acuerdo, por ejemplo, a la estructura del pavimento existente.
4. Es importante considerar que mezclas asfálticas colocadas en obra que cumplen con los requisitos de compactación, osea, porcentaje de huecos menores a 6.5%, no cumplirían con algunas de las pruebas de desempeño. Este detalle implica la necesidad de perfeccionar los diseños para considerar en los mismos la incidencia de una densidad relativa mínima del 97%, valor recomendado en el país.
5. Si bien los diseños convencionales por el método Marshall y los controles de calidad convencionales son válidos y permiten un primer paso hacia

mezclas bien fabricadas y colocadas, es imprescindible el empleo de pruebas de desempeño para perfeccionar los diseños y controles.

6. Se debe acometer con mayor intensidad el estudio del fenómeno de fatiga a muestras asfálticas.

RECOMENDACIONES.

1. Es necesario realizar la confección de las briquetas de mezclas asfálticas, siguiendo correctamente los procedimientos indicados, para garantizar así un resultado confiable de resultados.
2. El equipo empleado debe ser el adecuado y técnicamente calificado, para la determinación de pesos, medidas y demás estimaciones necesarias, en cuanto a parámetros geométricos y volumétricos. Para, de esta manera, no generar errores iniciales que incidan en falsos y erróneos resultados posteriores.
3. Dentro del proceso de confección de las briquetas de asfalto es necesario no saltarnos procedimientos o realizarlos incorrectamente, y poner especial atención a los procedimientos de enfriamiento y compactación. Dejando enfriar las briquetas dentro de su molde, para evitar deformaciones, y compactando el número de golpes de la energía de compactación necesaria para el respectivo ensayo a realizar.
4. Llevar un trabajo organizado, con un debido etiquetado y registro de datos, nos ayudara a reducir la probabilidad de cometer errores, disminuyendo las posibilidades de entregar malos resultados.
5. La geometría de las briquetas o muestras de asfalto, deben guardar relaciones simétricas y uniformes para que el Nottingham Asphalt Tester, (NAT), pueda evaluar y proceder correctamente. Variaciones o distorsiones, son algunas veces inevitables, sobre todo en núcleos extraídos en campo. pero deben evitarse en lo posible o modificarse de

manera que no afecte el resultado de la muestra. Guardando sus propiedades esenciales

6. La temperatura dentro de la cabina del NAT, debe ser cuidadosamente mantenida y evitar en lo posible cambios bruscos, y se deben mantener las muestras como mínimo 2 horas a la temperatura de ensayo deseado, antes de iniciar un periodo de pruebas. Para el efecto tratar en lo posible de mantener exteriormente una temperatura cercana a la interior.

BIBLIOGRAFÍA

- American Association of State Highway and Transportation Officials: AASHTO Guide for the Design of Pavement Structures. U.S.A., 1993.
- Committee European of Normalization – CEN 12697. Bituminous mixtures. Test methods for hot mix asphalts – Part 26: Stiffness. Annex C. 2000.
- Committee European of Normalization – CEN 12697. Bituminous mixtures. Test methods for hot mix asphalts – Part 25: Cyclic compression test. Part A. 2000.
- Cooper Research Technology Limited. NU-10 & NU- 5. Operation & Maintenance Manual. United Kingdom, 2002.
- Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones. Especificaciones Técnicas para la Construcción de Carreteras y Puentes. MOPT-001-F, Quito - Ecuador, 2002.
- Rondón, H.A.; Reyes, F.A.; González; L.A.; Vázquez S. E. *Ahuellamiento y fatiga en mezclas asfálticas*. Bogotá – Colombia: Editorial UD. Primera Edición. 2012.
- Normas de Ensayos de Materiales para Carreteras. Tomo III. Materiales y mezclas asfálticas. Instituto Nacional de Vías. 1998. Bogotá. Colombia.
- ASEFMA. IV Jornada Nacional. Madrid. 2009.
- Asphalt Institute. Mix design methods for asphalt concrete. MS-2. Sixth Edition. 2002.
- E.R.Brown, P.S.Kandhal. Performance testing for hot mix asphalt. Auburn University. NCAT Report 01-05. 2001.
- H. Yang. *Pavement analysis and systems*. Mc Graw-Hill. 1995.