



Escola de Camins

Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports

UPC BARCELONATECH

Sensibilidad del ensayo Fénix sobre mezclas discontinuas. Efecto del tamaño máximo de árido y altura de probeta

Treball realitzat per:

Miquel Puigrefagut Pla

Dirigit per:

José Rodrigo Miró Recasens

Grau en:

Ingeniería de Obras Públicas

Barcelona, 06/2018

Departamento de Ingeniería civil y ambiental

TREBALL FINAL DE GRAU

AGRADECIMIENTOS

Supongo que no haría falta mencionar que durante los años que he estado realizando este Grado ha sido necesaria la ayuda de muchos. No ha sido una tarea fácil, pues desde el primer momento y hasta el último han sido imprescindibles dedicación, esfuerzo y sacrificio, y aunque cuando uno está ya terminando, la satisfacción que siente puede dejar en un segundo plano todo esto. Creo que ahora es el momento indicado para agradecer a aquellos que han hecho posible que hoy pueda estar escribiendo estas palabras en mi trabajo de fin de grado, su ayuda incondicional, necesaria y puede que en algunos momentos, poco valorada por mi parte.

En primer lugar, agradecer a mis tutores del trabajo, el profesor José Rodrigo Miró Recasens y la profesora Adriana Martínez Reguero su paciencia, dedicación y ayuda en todo momento, ante mis numerosas dudas y preguntas. Destacar su profesionalidad e interés docente y agradecer la orientación durante el transcurso del estudio, tanto durante la parte experimental como posteriormente en la parte de resultados.

Agradecimiento también a José Amorós y a Jordi, profesores del Laboratorio de Caminos; sin su ayuda y dedicación no hubiera sido posible realizar las tareas de laboratorio.

Por último, a mi familia y amigos, en especial a Aina, mi pareja, y a Anna, que han estado a mi lado en todo momento y han permitido que hoy pueda entregar mi trabajo de fin de grado.

RESUMEN

Título: Sensibilidad del ensayo Fénix sobre mezclas discontinuas. Efecto del tamaño máximo de árido y altura de probeta.

Autor: Miquel Puigregafut Pla

Tutor: José Rodrigo Miró Recasens

Este trabajo de investigación tiene como objetivo principal el estudio de la sensibilidad del método Fénix, ensayo a tracción desarrollado por el Laboratorio de Caminos de la Universidad Politécnica de Catalunya, para evaluar el comportamiento de las mezclas asfálticas frente el proceso de fisuración.

Mediante este ensayo pueden obtenerse parámetros relativos a la mecánica de fractura de mezclas bituminosas que permitirán una mejora en el diseño y en las propiedades de las mezclas usadas en la construcción de los firmes, concretamente en las capas de rodadura, afectadas sobre todo por una patología principal, la fisuración. El elevado coste económico del mantenimiento y reparación de los firmes exige un método de estudio de la fractura que pueda proporcionar información de forma fiable, sencilla y económica.

Mediante el ensayo a dos temperaturas diferentes de distintas series de probetas elaboradas en el laboratorio, en las que se variarán el tamaño del árido y la altura, y siguiendo la metodología del ensayo Fénix, se obtendrán resultados experimentales de tres parámetros: energía de fractura, índice de resistencia a tracción y desplazamiento al 50% de la carga máxima postpico. El tratamiento estadístico de éstos y el análisis de los resultados permite establecer la sensibilidad del ensayo frente a las variables estudiadas.

El resultado de la investigación concluye que el método Fénix es un procedimiento efectivo, práctico, simple y con sensibilidad suficiente para el estudio de las mezclas bituminosas y para la determinación de sus propiedades.

ABSTRACT

Title: Study of Fénix's sensibility essay about discontinuous mixtures. Effect of maximum aggregate size and specimen height.

Author: Miquel Puigregafut Pla

Tutor: José Rodrigo Miró Recasens

The aim of this research is to test the sensitivity of the Fénix method, which is a tensile test developed by Polytechnic University of Catalonia that evaluates the behavior of asphalt mixtures against the cracking process.

Through this test, parameters can be obtained relative to the fracture mechanics of bituminous mixtures allowing an improvement in the design and properties of mixtures used in the construction of the pavements, concretely in the layers of pavement, where the cracks are the most common pathology. The raised cost of the maintenance and repair of the pavements requires a methodology of the study that provides information in a reliable, simple and economical way.

By testing at two different temperatures distinct series of test specimens made in the laboratory, which will vary the size of the aggregate and height, and following the methodology of the Fénix test, experimental results will be obtained from three parameters: fracture energy, tensile strength index and displacement at 50% of the maximum postpeak load. The statistical treatment of these parameters and the analysis of the results will establish the sensitivity of the test against the variables studied.

The results of the performed investigation conclude that the Fénix method is an effective, valid, practical and simple procedure with enough sensitivity in order to be applied in the study of bituminous mixtures and determine their properties.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE	4
2.1. Generalidades.....	4
2.2. Mezclas bituminosas BBTM.....	5
2.2.1. Definición y tipos de BBTM.....	5
2.2.2. Áridos en BBTM.....	8
2.2.3. Polvo mineral o filler en BBTM.....	9
2.2.4. Betún o ligante en BBTM.....	10
2.2.5. Especificaciones mezclas BBTM.....	11
2.2.6. Propiedades.....	12
2.3. Métodos de compactación.....	13
2.4. Estudios de fractura mezclas bituminosas.....	15
2.4.1. Ensayo SE(B).....	16
2.4.2. Ensayo SCB.....	17
2.4.3. Ensayo DC(T).....	18
2.4.4. Ensayo BTD.....	20
2.4.5. Ensayo Fénix.....	21
CAPÍTULO 3. ESTUDIO EXPERIMENTAL.....	23
3.1. Introducción	23
3.2. Plan de trabajo.....	23
3.3. Materiales empleados	24
3.3.1. Áridos	24
3.3.2. Betún.....	25
3.4. Granulometría	26
3.5. Fabricación de las probetas.....	27
3.5.1. Preparación de los áridos.....	27
3.5.2. Fabricación de la mezcla.....	29
3.6. Determinar los contenidos de huecos y la densidad máxima	31
3.7. Ensayo Fénix	35
3.7.1. Introducción.....	35

3.7.2. Descripción del ensayo	35
3.7.3. Aplicación del ensayo	39
CAPÍTULO 4. RESULTADOS	43
4.1. Introducción	43
4.2. Procesamiento de datos	43
4.2.1. Test de Grubbs'	45
4.2.2. Descripción estadística	46
4.2.3. Límite de repetibilidad	46
4.2.4. Test de Normalidad (Kolmogorov-Smirnov)	46
4.2.5. Test de varianzas iguales (Levene)	47
4.2.6. Test T-Student.....	49
4.2.7. Resultados estadísticos	51
4.3. Análisis de resultados	54
4.3.1. Influencia del tamaño máximo de los áridos	54
4.3.1.1. Huecos (%).....	54
4.3.1.2. Índice de rigidez a tracción (IRT).....	55
4.3.1.3. Energía de fractura (GF)	57
4.3.1.4. Desplazamiento al 50% de la carga máxima postpico (d0.5 PM).....	58
4.3.1.5. Tabla resumen resultados T-student	59
4.3.2. Influencia de la altura de la probeta	60
4.3.2.1. Huecos (%).....	60
4.3.2.2. Índice de rigidez a tracción (IRT).....	60
4.3.2.3. Energía de fractura (GF)	61
4.3.2.4. Desplazamiento al 50% de la carga máxima postpico (d0,5 PM).....	62
4.3.2.5. Tabla resumen resultados T-student	63
4.3.3. IRT vs d0,5 PM.....	64
4.3.4. Gráfica IRT vs GF	65
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES.....	66
CAPÍTULO 6. BIBLIOGRAFÍA.....	68
Otra Bibliografía:	69
ANEJO 1	70
Tablas densidades y contenido de huecos	70
ANEJO 2	75
Gráficas ensayo Fénix	75
ANEJO 3	92
Tablas Resumen.....	92

ANEJO 4 101

Test de Grubbs' 101

ANEJO 5 112

Test de Levene..... 112

ANEJO 6 137

Test de T-STUDENT 137

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 2.1 ENSAYO A FLEXIÓN DE VIGA CON ENTALLADA.....	16
FIGURA 2.2 ENSAYO DE FLEXIÓN EN PROBETA SEMICIRCULAR. (CLYNE ET AL. 2009)	17
FIGURA 2.3 GEOMETRÍA Y DIMENSIONES RECOMENDADAS PARA LA PROBETA DC (T) (WAGONER ET AL. 2005C)	18
FIGURA 2.4 BASES DE LA PROBETA, PROBETA PARA EL ENSAYO Y ESQUEMA DEL ENSAYO. FUENTE (ETSECCPB)	20
FIGURA 2.5 ESQUEMA DE ENSAYO Y GRÁFICA DE RESULTADOS DEL ENSAYO FÉNIX	22
FIGURA 3.6 PREPARACIÓN DE LOS ÁRIDOS	28
FIGURA 3.7 FABRICACIÓN DE LA MEZCLA.....	30
FIGURA 3.8 COMPACTADORA MARSHALL.....	30
FIGURA 3.9 DESGRANADO DE LA MEZCLA.....	32
FIGURA 3.10 BAÑO DE AGUA.....	32
FIGURA 3.11 PICNÓMETROS.....	33
FIGURA 3.12 GRÁFICO CARGA-DESPLAZAMIENTO	36
FIGURA 3.13 RESINA Y CATALIZADOR.....	40
FIGURA 3.14 PROBETAS ADHERIDAS A LAS PLACAS.....	40
FIGURA 3.15 PRENSA DEL ENSAYO FÉNIX.....	41
FIGURA 4.16 GRÁFICA CARGA DESPLAZAMIENTO 20°C Y 5°C.....	44
FIGURA 4.17 GRÁFICA CONTENIDO DE HUECOS (%).....	55
FIGURA 4.18 GRÁFICA IRT.....	56
FIGURA 4.19 GRÁFICA GF	57
FIGURA 4.20 GRÁFICA D0,5 PM	58
FIGURA 4.21 GRÁFICA IRT - D0,5PM.....	64
FIGURA 4.22 GRÁFICA IRT – GF	65

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 2.1 HUSOS GRANULOMETRICOS DE BBTM (% EN MASA)	9
TABLA 2.2 REQUISITOS PARA EL POLVO MINERAL	9
TABLA 2.3 TIPO DE LIGANTE HIDROCARBONADO	10
TABLA 2.4 DOTACIÓN DE LIGANTE	10
TABLA 2.5 CONTENIDO DE HUECOS	11
TABLA 2.6 PENDIENTE MEDIA DE DEFORMACIÓN EN PISTA (MM PARA 103CICLOS DE CARGA). MEZCLAS DISCONTINUAS (ORDEN CIRCULAR 24/2008. ART. 543).....	12
TABLA 2.7 MÉTODOS DE ENSAYO PROBETAS SIMPLES	16
TABLA 3.8 CARACTERÍSTICAS DEL BETÚN PMB 45/80-65	25
TABLA 3.9 BBTM-11B 800	26
TABLA 3.10 BBTM-11B 500	26
TABLA 3.11 BBTM-8B 800	27
TABLA 3.12 BBTM-8B 500	27
TABLA 4.13 EJEMPLO TABLA RESUMEN BBTM-8B 5CM A 20°C	44
TABLA 4.14 ESTADÍSTICOS BBTM 8B 4,75% 20°C 5CM	51
TABLA 4.15 ESTADÍSTICOS BBTM 8B 4,75% 5°C 5CM	51
TABLA 4.16 ESTADÍSTICOS BBTM 8B 4,75% 20°C 3CM	52
TABLA 4.17 ESTADÍSTICOS BBTM 8B 4,75% 5°C 3CM	52
TABLA 4.18 ESTADÍSTICOS BBTM 11B 4,75% 20°C 5CM	52
TABLA 4.19 ESTADÍSTICOS BBTM 11B 4,75% 5°C 5CM	53
TABLA 4.20 ESTADÍSTICOS BBTM 11B 4,75% 20°C 3CM	53
TABLA 4.21 ESTADÍSTICOS BBTM 11B 4,75% 5°C 3CM	53
TABLA 4.22 P-VALOR IRT, GF, D0,5PM. INFLUENCIA TAMAÑO MÁXIMO ÁRIDO	59
TABLA 4.23 P-VALOR HUECOS. INFLUENCIA TAMAÑO MÁXIMO ÁRIDO	59
TABLA 4.24 P-VALOR IRT, GF, D0,5PM. INFLUENCIA ALTURA PROBETA	63
TABLA 4.25 P-VALOR HUECOS. INFLUENCIA ALTURA PROBETA	63

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

El transporte por carretera es en la actualidad una parte fundamental para el funcionamiento de la economía de las sociedades modernas. Las infraestructuras viarias tienen una importancia indiscutible en el desarrollo económico; la movilidad, el flujo de personas y mercancías y la accesibilidad que proporcionan son vitales y están intrínsecamente vinculadas al estado de esas. Es esencial que las vías tengan un estado óptimo que permita un uso seguro, confortable y que permita atender a un número elevado de usuarios durante el mayor tiempo posible.

Es interesante conocer algunas cifras sobre la modalidad del transporte de mercancías y pasajeros, para tener una idea más aproximada del uso de las infraestructuras viarias y de la importancia de los recursos destinados a la I+D+i en este campo. El 44% de todas las mercancías transportadas en la UE se desplazan por carretera, frente al 39% por vía marítima, el 10% por ferrocarril y el 3% por vías navegables interiores. El predominio de la carretera es aún más acusado en el transporte de pasajeros, principalmente en automóvil, que representa el 81%, frente al 6% del ferrocarril y el 8% del avión. [1]

Es evidente la dependencia de nuestra sociedad respecto a estas infraestructuras y la necesidad del estudio y desarrollo de firmes de elevadas prestaciones y larga duración. Actualmente, las mezclas más usadas para la construcción de las capas de rodadura son las mezclas bituminosas discontinuas en caliente, las mezclas BBTM. Su estudio es determinante para minimizar su deterioro y conseguir un firme con las propiedades y cualidades deseadas. A pesar de existir distintas causas de deterioro, se ha podido determinar que el problema principal que conlleva un coste económico y técnico elevado a medio y largo plazo es la fisuración. Las fisuras en los pavimentos implican una tarea de conservación y rehabilitación continua. El estudio de los firmes y en concreto de las propiedades mecánicas del proceso de fisuración representan una de las prioridades de las investigaciones de la ingeniería de carreteras

Es indiscutible la necesidad de disponer de ensayos fiables, que sean económicos, simples, que reproduzcan las condiciones de carga a las que está sometida una mezcla en uso, que permitan el ensayo a probetas fabricadas o muestras reales, que sean sensibles a la variación de diversos parámetros y que no conlleven una elevada dificultad de fabricación de las probetas. A partir de éstos tendrán que obtenerse resultados que puedan ser extrapolados y tratados estadísticamente con facilidad, que permitan evaluar de forma precisa el comportamiento de la mezcla y diseñar de un firme óptimo.

En este trabajo el objeto de estudio es el método Fénix, un método de ensayo desarrollado por la Universidad Politécnica de Cataluña para el estudio de la mecánica de fractura. Concretamente el objetivo será el estudio de la sensibilidad del método sobre mezclas discontinuas frente la variación del tamaño máximo de árido y la altura de la probeta, mediante la aplicación del ensayo Fénix a las temperaturas de 5 y 20°C.

El trabajo se divide en diferentes capítulos que estructuran el estudio. El primer capítulo es una breve presentación del estudio y el interés de éste, junto con un comentario de cada uno de los capítulos que lo conforman.

El segundo capítulo incluye el estado del arte, en el que se hace referencia al tipo de mezcla objeto de estudio y sus principales características, al método de compactación que se ha usado en el laboratorio para preparar las muestras ensayadas y contiene también una revisión de los principales métodos de estudio actuales de la mecánica de la fractura para mezclas bituminosas discontinuas, entre los que se encuentra el método Fénix.

En el tercer capítulo se describe detalladamente la metodología seguida para el ensayo, especificando cada uno de los procesos que lo componen que incluyen:

- Preparación de los áridos.
- Fabricación de las probetas.
- Preparación de las probetas para el ensayo.
- Realización del ensayo Fénix.
- Recopilación de datos.

Contiene también las medidas y los cálculos necesarios para conocer el contenido de huecos de las muestras.

El cuarto capítulo contiene una descripción de los estadísticos usados para el estudio de los resultados obtenidos durante el ensayo. Es dónde se muestran los resultados obtenidos de los parámetros estudiados y donde se realiza el tratamiento estadístico de éstos, permitiendo mediante los test estadísticos correspondientes para conocer la sensibilidad del método Fénix frente al tamaño máximo de los áridos y la altura de la probeta. En este capítulo es dónde se realiza la discusión de los resultados.

El quinto y último capítulo contiene las conclusiones obtenidas a lo largo del estudio. Las referencias bibliográficas y los anexos se recogen al final del documento.

CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE

2.1. Generalidades

En la construcción de carreteras se utilizan gran cantidad de materiales que no necesitan demasiadas prestaciones para la elaboración de terraplenes, explanadas y para las capas interiores del firme, su misión consiste simplemente en transmitir esfuerzos de compresión y por este motivo los requerimientos de las mezclas usadas no son tan exigentes, todo lo contrario, a los que forman la capa superior de la sección, la capa de rodadura, que deberá ser más resistente a la flexión y a la cizalla. Las exigencias mecánicas de las mezclas bituminosas usadas en las capas de rodadura implican un estudio exhaustivo de sus propiedades para garantizar y mejorar unas prestaciones acordes con su función.

En el diseño y dosificación de las mezclas asfálticas, deben tenerse en cuenta numerosas propiedades y la variación de éstas. Por este motivo se recurre a ensayos que facilitan los datos necesarios en función de las características principales que deberá cumplir nuestra mezcla, determinadas por su ubicación y uso. A partir de los resultados se fijará una granulometría, dosificación y tipo de ligante y posteriormente podrán estudiarse las variaciones de los parámetros prioritarios en función de los factores específicos para que la mezcla diseñada cumpla las características establecidas.

Existen diferentes propiedades mecánicas a optimizar en los casos de las mezclas bituminosas para capas de rodadura. Durante la vida de servicio de los firmes, debido a los efectos climáticos y las cargas del tráfico, uno de los deterioros más frecuentes en las capas bituminosas es el fallo por fisuración que se inicia mediante microfisuras en el material y conforme van progresando, provoca un debilitamiento de la estructura, permitiendo la infiltración del agua y pudiendo conllevar consecuencias nefastas. Éstas, conducen a la necesidad de llevar a cabo distintas operaciones de reparación del firme con el fin de devolverle sus características funcionales y estructurales iniciales.

Debido a las características reológicas de las mezclas, su comportamiento frente a la fisuración es complejo de analizar ya que al depender de muchos factores el material puede comportarse de manera completamente diferente según las condiciones específicas a las que está sometido.

Desde hace muchos años, se han estudiado las propiedades mecánicas de las mezclas en relación con la pérdida por abrasión, resistencia a la deformación plástica o factores volumétricos mediante varios ensayos experimentales que permiten la obtención de parámetros que proporcionan información del comportamiento mecánico de las mezclas frente la variación de diferentes condicionantes como pueden ser la temperatura, la composición, el contenido de ligante o las condiciones de mezcla.

En los últimos años y dada la importancia de estos estudios, se han realizado investigaciones con la finalidad de comprender el comportamiento de las mezclas bituminosas frente la fisuración mediante modelos que simulen el mecanismo de fisuras y permitan evaluar la resistencia ante su deterioro con la variación de distintos factores buscando un método que permita hacerlo de forma precisa, exacta, sencilla, económica, fiable, específica y sensible.

2.2. Mezclas bituminosas BBTM

2.2.1. Definición y tipos de BBTM

Definimos mezclas bituminosas aquellas resultantes de la combinación de un betún asfáltico, áridos, filler y eventualmente aditivos de manera que todas las partículas del árido queden recubiertas por una película uniforme del sistema filler-betún, formando un medio continuo y viscoso que mantiene las partículas minerales unidas y cohesionadas.

Después del compactado, los áridos gruesos forman un esqueleto mineral rígido y resistente, los huecos del cual se rellenan de partículas finas.

En función de la temperatura necesaria para su fabricación y puesta en obra, pueden clasificarse en calientes y semicalientes. En las calientes, el proceso de fabricación implica calentar el ligante junto con los áridos, y su colocación tiene que realizarse también a una temperatura superior a temperatura ambiente.

Otra clasificación atiende a los huecos que contiene la mezcla después de su compactación en un ensayo normalizado. Las mezclas que tienen un contenido de huecos grande son las abiertas y aquellas que lo tienen pequeño se denominan cerradas. Las mezclas semicerradas tienen un contenido intermedio de huecos.

Cada tipo de mezcla tiene unas propiedades y características diferentes que condicionan su campo de aplicación. La funcionalidad y las propiedades que tienen que prevalecer determinarán el tipo de mezcla a usar y por lo tanto sus constituyentes, dosificación, fabricación y puesta en obra. Las características de las mezclas difieren según si van destinadas a un uso en capas de rodadura, capas intermedias o bajas.

Según su granulometría, las mezclas bituminosas para capas de rodadura se clasifican en drenantes y discontinuas:

Las mezclas bituminosas drenantes son las que tienen una granulometría continua y presentan una baja proporción de árido fino por lo que tienen un contenido muy alto de huecos interconectados que les proporcionan sus características drenantes. Su aplicación en las capas de rodadura tiene una media de 4 a 5 cm de espesor.

Las mezclas bituminosas discontinuas pueden definirse como mezclas bituminosas con áridos de granulometría discontinua de tamaño máximo de 8 y 11 mm. Presentan una discontinuidad granulométrica muy acentuada en los tamices inferiores del árido grueso, contienen entre un 70-80% de éste, representando los áridos finos tan sólo un 10% de la mezcla. Los requisitos de los áridos en este tipo de mezclas son más restrictivos que en otros. Se colocan en capas de espesor pequeño o muy pequeño, para capas de rodadura con un promedio inferior o igual a 3.5 cm.

Presentan una estructura macrorugosa áspera y excelentes propiedades mecánicas. Se emplean en capas de rodadura y aunque por su espesor no resuelven problemas estructurales graves, la aplicación de una capa fina proporciona un aporte estructural y restituye las características superficiales del firme.

Existen dos tipos de mezclas discontinuas en caliente usadas en Europa:

- Los Splittmastixasphalt SMA, fueron desarrolladas en Alemania a finales de los 60 para mejorar las propiedades superficiales de resistencia del firme a los neumáticos de clavos.
- Los “Beton Bitumineux Tres Minces” (BBTM), desarrollados en Francia en la década de los 70, son aglomerados discontinuos muy delgados puestos en obra con espesores de 2-2,5 cm.

El uso de las mezclas BBTM en España tiene sus orígenes en la década de los 80. Su finalidad era mejorar el estado de conservación del firme de las carreteras con tráfico intenso. Su eficacia y rendimiento hizo que su uso se extendiera y a mediados de los 90 se aplicaron para mejorar las características de todo tipo de firmes sin necesidad de tener problemas estructurales, se usaron en autopistas, vías interurbanas y en general todo tipo de carreteras.

La designación de las mezclas bituminosas según la norma UNE-EN 13108-2 sigue el esquema:

BBTM	D	CLASE	LIGANTE
------	---	-------	---------

Donde:

- **BBTM:** indicación relativa a que la mezcla bituminosa es de tipo discontinuo.
- **D:** tamaño máximo del árido, expresado como la abertura del tamiz que deja pasar entre un noventa y un cien por ciento del total del árido.
- **Clase:** designación de la clase de mezcla discontinua, será A o B.
- **Ligante:** tipo de ligante hidrocarbonado utilizado.

2.2.2. Áridos en BBTM

Respecto a los áridos, se definen los áridos gruesos como la parte del árido total que queda retenida en el tamiz 2 mm de la UNE-EN 933-2:1996 y los áridos finos la parte total del árido que pasa por el tamiz 2 mm y queda retenida en el tamiz 0.063 mm de la UNE-EN 933-2.

Los áridos gruesos podrán ser de naturaleza artificial o natural siempre que cumplan las especificaciones del artículo 543. Deberá estar exento de arcilla, materia vegetal, marga o materias extrañas que afecten su durabilidad. El contenido de finos en el árido grueso será inferior al cinco por mil (0.5%) en masa.

El árido fino deberá proceder de la trituración de piedra de cantera o grava natural en su totalidad, o en parte de yacimientos naturales.

La granulometría que corresponde a los dos tipos de mezclas puede observarse en la tabla 2.1.

TIPO DE MEZCLA (**)	ABERTURA DE LOS TAMICES (mm)								
	22	16	11,2	8	5,6	4	2	0,5	0,063
BBTM 8B (*)		-	100	90-100	42-62	17-27	15-25	8-16	4-6
B8TM 11B (*)		100	90-100	60-80		17-27	15-25	8-16	4-6
BBTM 8 ^a (*)		-	100	90-100	50-70	28-38	25-35	12-22	7-9
BBTM11 A (*)		100	90-100	62-82		28-38	25-35	12-22	7-9
PA 16	100	90-100		40-60		13-27	10-17	5-12	3-6
PA 11		100	90-100	50-70		13-27	10-17	5-12	3-6

Tabla 2.1 Husos granulométricos de BBTM (% en masa)

2.2.3. Polvo mineral o filler en BBTM

El filler o polvo mineral corresponde a la fracción total del árido que pasa por el tamiz 2mm y queda retenida en el 0,063mm. El polvo mineral que quede adherido a los áridos después de la operación de secado no debe ser superior al 2% del peso de la mezcla. El filler puede provenir de los áridos seleccionados o bien puede ser un producto comercial. Las especificaciones que debe cumplir el polvo mineral se recogen en la tabla 2.2.

Ensayos	Requisitos	Norma
Densidad aparente	0,5-0,8 g/cm ³	UNE-EN 1097-3

Tabla 2.2 Requisitos para el polvo mineral

2.2.4. Betún o ligante en BBTM

El tipo de betún o ligante hidrocarbonado será determinado en función de la categoría del tráfico pesado, definidos por la Norma 6.1 IC de Secciones de firme o en la Norma 6.3 IC de Rehabilitación de firmes.

ZONA TÉRMICA ESTIVAL	CATEGORÍA DE TRÁFICO PESADO				
	T0	T1	T2 y T31	T32 y ARCENES	T4
CÁLIDA	35/50 BC35/50 PBM 25/55-65 PBM 45/80-65	35/50 BC35/50 PBM 25/55-65 PBM 45/80-60 PBM 45/80-65	35/50 50/70 BC35/50 BC50/70 PBM 45/80-60	50/70 BC50/70	50/70 70/100 BC50/70
	35/50 BC35/50 PBM 45/80-60 PBM 45/80-65	35/50 50/70 BC35/50 BC50/70 PBM 45/80-60	50/70 BC50/70 PBM 45/80-60	50/70 70/100 BC50/70	
TEMPLADA	50/70 BC50/70 PBM 45/80-60 PBM 45/80-65	50/70 70/100 BC50/70 PBM 45/80-60			

Tabla 2.3 Tipo de ligante hidrocarbonado

La dotación de ligante se encuentra también reflejada en la tabla siguiente:

CARACTERÍSTICA	TIPO DE MEZCLA					
	PA 11	PA 16	BBTM8B	BBTM11B	BBTM8A	BBTM11A
DOTACIÓN MEDIA DE MEZCLA (kg/m ²)	75-90	95-110	35-50	55-70	40-55	65-80
DOTACIÓN MÍNIMA(*) DE LIGANTE (% en masa sobre el total de la mezcla)	4,30		4,75		5,20	
LIGANTE RESIDUAL EN RIEGO DE ADHERENCIA (kg/m ²)	FIRME NUEVO	> 0,30			> 0,25	
	FIRME ANTIGUO	> 0,40			> 0,35	

Tabla 2.4 Dotación de ligante

Por lo que hace referencia al ligante, en algunos casos es necesario el uso de ligantes modificados con polímeros o fibras adicionales para evitar riesgos de escurrimiento y segregaciones. El bajo contenido en mortero de este tipo de mezclas puede hacer

incidencia en la cohesión y la durabilidad. Los polímeros incorporados al betún o las fibras adicionales tienen la finalidad de disminuir la fragilidad del sistema, proporcionándole resistencia a la fisuración y a la abrasión y haciéndole menos deformables. La proporción de ligante modificado en la mezcla se determinará de tal forma que además de proporcionar las propiedades adicionales se garantice un comportamiento de la mezcla mínimo semejante al que se obtendría del uso de los ligantes sin modificar.

2.2.5. Especificaciones mezclas BBTM

Las mezclas BBTM tienen que cumplir unas especificaciones y características que se encuentran recogidas en el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales, mostraremos las que se refieren al contenido de huecos y la resistencia a la deformación.

El contenido de huecos difiere entre las de tipo A y B y se recoge en la tabla 2.5.

Tipo de mezcla	% de huecos (Norma UNE-EN 12697-8)
BBTM A	≥ 4
BBTM B	≥ 12 y ≤ 18
Drenante (PA)	≥ 20

Tabla 2.5 Contenido de huecos

La resistencia a la deformación plástica se determina en el laboratorio mediante el ensayo de pista y se recoge en la tabla 2.6.

ZONA TÉRMICA ESTIVAL	CATEGORÍA DE TRÁFICO PESADO	
	T00 a T2	T3, T4 y arcenes
CÁLIDA y MEDIA	0,07	0,10
TEMPLADA		-

Tabla 2.6 Pendiente media de deformación en pista (mm para 103 ciclos de carga). Mezclas discontinuas (Orden Circular 24/2008. Art. 543)

2.2.6. Propiedades

Las mezclas BBTM proporcionan capas de rodadura de prestaciones elevadas, con gran resistencia a la fricción, a la deformación plástica, buena sonoridad, comodidad y durabilidad. Éstas son algunas de sus principales características que se analizarán en más detalle.

Seguridad:

En España, la normativa sobre mezclas bituminosas en caliente evalúa la seguridad de las capas de rodadura mediante dos ensayos; la macrotextura es evaluada mediante el ensayo de la mancha de arena en el que se establece una limitación mínima de 0.70 mm de altura de arena, la microtextura es evaluada mediante el ensayo del coeficiente de resistencia al deslizamiento en el que se exige para todas las mezclas un valor del coeficiente de resistencia al deslizamiento con péndulo superior a 0.65, resultados que deben conseguirse después de dos meses de la apertura del tramo. Las mezclas de tipo F-10 alcanzan valores entre 1.2 y 2 mm del coeficiente, por lo tanto, mucho mayor del esperado y como consecuencia ofrecen una mayor seguridad al usuario de la vía en un amplio margen de velocidades.

Por lo que se refiere a la drenabilidad, su gran macrorugosidad aporta una buena drenabilidad superficial en tiempo de lluvia, impidiendo la formación de una película de agua continua y aumentando pues la seguridad de la conducción.

El paso del tiempo provoca una disminución de la textura superficial y una amortiguación de la macrorugosidad de las mezclas, agravándose en los casos de tráfico

intenso al provocar la postcompactación. El uso de betunes modificados, ayuda al mantenimiento de la macrorugosidad de éstos en el tiempo.

Sonoridad:

El tipo de mezclas discontinuas calientes se caracterizan por aportar una disminución del ruido de rodadura de los vehículos respecto las mezclas convencionales. Esta característica es cada día más importante y se contempla en los reglamentos de impacto ambiental, pero no implica tan sólo la disminución del ruido para el entorno sino que también comporta un aumento en la comodidad de los conductores.

En estas mezclas la superficie de rodadura amortigua los ruidos y su macrotextura es la responsable, ya que actúa disminuyendo los fenómenos de compresión y expansión de las bolsas de aire. Se observan disminuciones del nivel sonoro de 1,5 a 2 dB con pavimento seco y de 2 a 5 dB con pavimento mojado respecto a las mezclas convencionales.

Durabilidad:

Los factores que limitan la durabilidad son el envejecimiento, la fatiga y la deformación. Estos parámetros están relacionados con el contenido de ligante en la mezcla, en estos microaglomerados los contenidos de ligante son elevados, se sitúan entre el 5.5 y 7.5% que, junto con la incorporación de betunes modificados con polímeros, aumentan la durabilidad.

2.3. Métodos de compactación

La fabricación de probetas de mezclas bituminosas en España está contenida en la normativa UNE-EN 12697, en la que se dispone la compactación de probetas mediante cuatro procedimientos diferentes. El método de compactación con rodillo (UNE-EN12697-33) se usa para fabricar probetas prismáticas y los otros tres procedimientos se usarán para fabricar probetas cilíndricas: compactación por impacto (UNE-EN 12697-30), máquina giratoria (UNE-EN 12697-31) y equipo vibratorio (UNE-EN 12697-32).

Actualmente el método de compactación de probetas más usado en España es el de compactación por impacto o compactación Marshall.

El método Marshall, en el diseño de mezclas para pavimentación, fue formulado por Bruce Marshall, ingeniero de asfaltos del estado de Mississippi en 1930. Posteriormente el Cuerpo de Ingenieros de Estados Unidos, a través de una extensiva investigación y estudios de correlación, mejoró y adicionó ciertos aspectos al procedimiento de prueba Marshall, a la vez que desarrolló un criterio de diseño de mezclas.

El método original únicamente es aplicable a mezclas asfálticas en caliente para pavimentación que contenga agregados con un tamaño máximo de 25 mm o menor. El método Marshall modificado se desarrolló para tamaños máximos de 38 mm.

Es un método pensado para diseño en laboratorio y control en campo de mezclas asfálticas en caliente. Se utiliza para diseñar mezclas bituminosas por medio de un análisis de su estabilidad, deformación, densidad y huecos. Hasta ahora ha sido el más empleado a nivel mundial. Tiene la desventaja de no simular la densificación real de la mezcla que se produce en la obra.

Actualmente en España se emplea como control de compactación y de huecos en mezclas y en áridos y se aplica a mezclas bituminosas, tanto las obtenidas en laboratorio como a los testigos recogidos en obra, en granulometrías con tamaño de áridos no superiores a 22,4 mm. El número de golpes aplicados depende de la granulometría seleccionada, siendo valores habituales de 75 y 50 golpes por cara. Se trata de una energía que, en algunos casos (áridos con un coeficiente de los Ángeles alto), puede llegar a producir la rotura de las partículas. Este método está recogido en la norma UNE-EN 12697-30 (2006).

2.4. Estudios de fractura mezclas bituminosas

Los métodos que tienen como objetivo el estudio del fenómeno de la fisuración en mezclas bituminosas se basan en la mecánica de fractura de los materiales. En los últimos años estas investigaciones se han aplicado a los llamados materiales cuasi frágiles, que presentan un comportamiento elastoplástico, como por ejemplo el hormigón y en concreto las mezclas BBTM.

Su comportamiento es muy distinto al de los materiales frágiles y para comprenderlo es necesario hacer hincapié en algunas definiciones como la tenacidad del material, que podría establecerse como la capacidad de absorber energía durante el proceso de deformación, siendo capaz pues, de continuar soportando esfuerzos a deformaciones superiores a la del esfuerzo máximo sin que se produzca la rotura. En la mecánica de fractura se establece también el parámetro de la energía de fractura o energía disipada, que es el trabajo almacenado en energía de deformación durante el proceso de aplicación de la carga hasta llegar el momento de rotura en el cual esta energía acumulada se transforma en la energía de fractura. El estudio de las propiedades mecánicas de la fractura de mezclas bituminosas ha desarrollado nuevos ensayos que permiten obtener parámetros mecánicos para caracterizarlas y establecer pautas de comportamiento de éstas frente diferentes condiciones.

Poder utilizar ensayos que reproduzcan de forma fiable las sollicitaciones de los firmes es fundamental para garantizar el comportamiento del material frente las fisuras a las que será sometido durante su vida útil. La simulación de este comportamiento a partir de los ensayos permitirá el diseño específico de los materiales.

Los métodos de evaluación de la fisuración para mezclas utilizan diferentes principios de ensayo que varían de un tipo de ensayo a otro como son: la geometría de la probeta, los puntos de aplicación de la carga, el tipo de sollicitación aplicada y los puntos de apoyo de la probeta. Difieren también en las condiciones de aplicación de la carga que en algunos es aplicada de forma monótona hasta el fallo de la probeta y en otros se aplica de forma cíclica.

Existen numerosos ensayos, en este apartado procederé a la descripción tan solo de algunos de ellos.

Material Ensayado	Tipo de sollicitación o esfuerzo aplicado	Ensayos
Materiales simples	Flexión	SCB; SE(B); 3P CEDEX; 4P Image;
	Tracción-Compresión	Univ. Viena; Tracción AASHTO; Tracción Caltrans; BDT; Tensión Compacta; DC(T); Tracción Directa UPC; EBADE; Fenix
	Tracción Indirecta	Tracción Indirecta; Disco con entalla
	Cortante	3MSGC Egletons; RCD; Univ. Delft

Tabla 2.7 Métodos de ensayo probetas simples

2.4.1. Ensayo SE(B)

El ensayo SE(B), Single-Edge Notched Beam, ensayo de la viga entallada a flexotracción, se ha usado en varios estudios para determinar las propiedades de fractura de las mezclas bituminosas bajo diferentes condiciones de carga, temperatura y dimensiones de la probeta.

Su metodología consiste en la aplicación de una carga centrada en la cara opuesta de la cara fisurada de una probeta, prismática para evaluar la respuesta de la mezcla bituminosa en función de la temperatura de ensayo y la velocidad de aplicación de carga. La geometría del ensayo proporciona una propagación adecuada de la fisura de acuerdo con el Modo I, permitiendo un crecimiento estable, aunque la desventaja del método es que usa una probeta no estandarizada y por tanto limita su aplicabilidad a vigas compactadas.

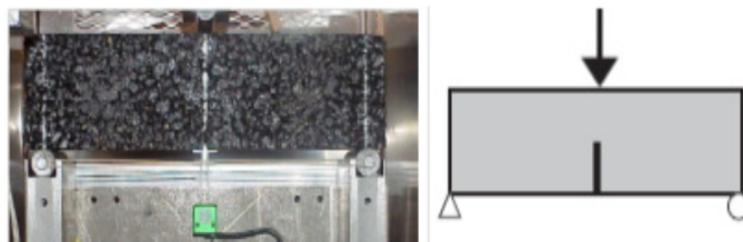


Figura 2.1 Ensayo a flexión de viga con entallada

2.4.2. Ensayo SCB

El SCB, ensayo de flexión en probeta semicircular, fue desarrollado en la Universidad de Minnesota para investigar la resistencia de las mezclas bituminosas a la fisuración debido a las bajas temperaturas. El ensayo se lleva a cabo sobre probetas semicirculares cortadas de probetas cilíndricas con una muesca en el centro que facilita la propagación de la fisura y es utilizado para calcular la energía de fractura y la resistencia a la fractura. El ensayo consiste en colocar la probeta semicircular de mezcla bituminosa sobre dos apoyos situados en los extremos, aplicando una carga central que provoca la flexión de la probeta en su zona inferior, donde se coloca un medidor de deformaciones que permite controlar la abertura de la grieta producida en la probeta conforme se aplica la carga.

En España este ensayo viene regido por la norma UNE-EN 12697-44 (AENOR 2001) y actualmente se trata del único ensayo normalizado en nuestro país para evaluar el comportamiento de las mezclas bituminosas ante los fenómenos de fisuración.

Este ensayo ha sido aplicado en numerosos estudios [2] y se destacan las ventajas del ensayo por su aplicación sencilla, la posibilidad de aplicarlo a probetas y testigos y que requiere menos muestras por la geometría de la probeta.

El inconveniente que presenta es que, por la forma de aplicación de la carga, se produce un estado tensional que genera un arco de altos esfuerzos de compresión en la zona cercana a la fisura.

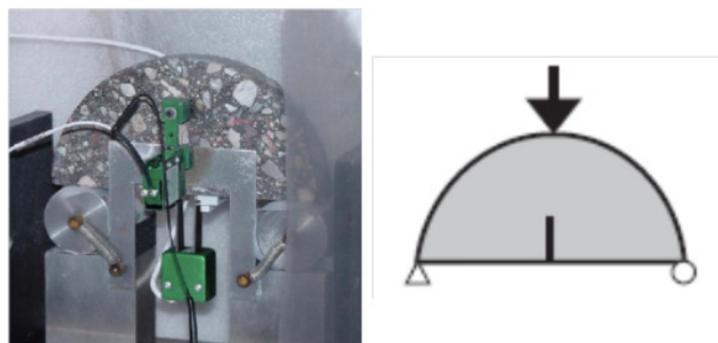


Figura 2.2 Ensayo de flexión en probeta semicircular. (Clyne et al. 2009)

2.4.3. Ensayo DC(T)

El ensayo DC(T), Disk-Shaped Compact Tension Test, fue desarrollado en EE. UU. por Wagoner en la Universidad de Illinois. Es un ensayo de tracción directa que utiliza una probeta circular en forma de disco y determina la energía de fractura mecánica en las mezclas bituminosas. Las probetas se fabrican en el laboratorio mediante la compactación giratoria o se obtienen mediante testigos cilíndricos. Para la realización del ensayo durante la preparación de las probetas se realizan dos orificios circulares a cada lado de una fisura, y es donde se aplica la carga a tracción. La norma que recoge los parámetros del ensayo estandarizado es la ASTM D7313-07.

Durante el ensayo se obtiene la variación de la energía de fractura que puede obtenerse a diferentes velocidades de aplicación de la carga.

Este ensayo presenta un tamaño mayor del área de fractura y permite la aplicación a testigos, pero tiene el inconveniente de que la creación de los orificios es un proceso dificultoso y es posible crear microfisuras alrededor de los orificios donde aplicamos la carga y por tanto los resultados pueden verse alterados o bien producirse la rotura de la probeta. Cabe destacar también que el ensayo es complejo de realizar a temperaturas superiores a los 10°C.

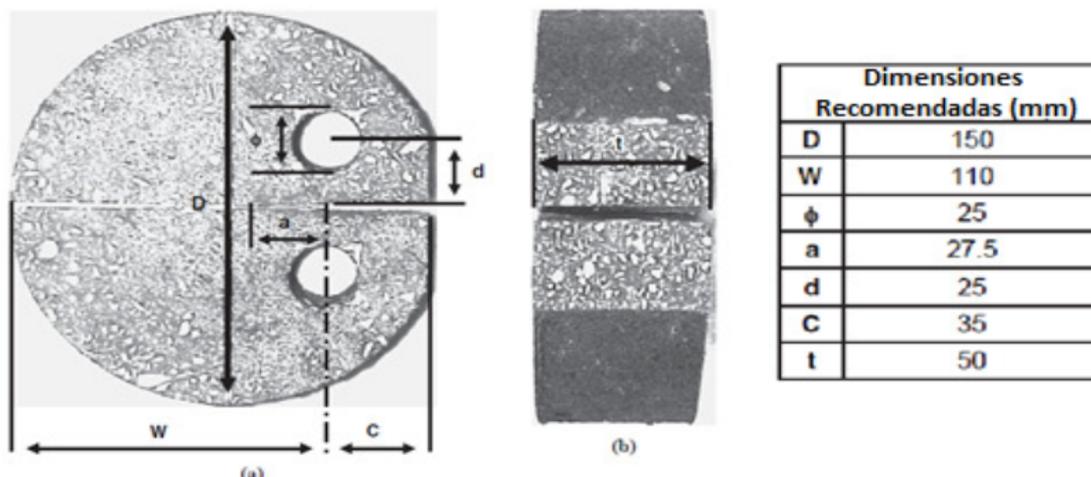


Figura 2.3 Geometría y dimensiones recomendadas para la probeta DC (T) (Wagoner et al. 2005c)

Según un estudio realizado por M.P. Wagoner, W. g. Buttlar y G. H. Paulino [3] sobre este método de ensayo y después del análisis de los resultados se extraen las conclusiones:

- La energía de la fractura obtenida de la geometría de DC(T) es comparable con la obtenida en la literatura para las geometrías de SE(B) y de SCB, quedando dentro de unos rangos aceptables.
- Un análisis estadístico de la variación de la trayectoria de la fisura demuestra que no existe correlación entre la energía de la fractura y el ángulo de la desviación de la fisura. No en todas las probetas ensayadas se producía la trayectoria recta esperada tipo I¹, se encontraron los tres tipos de grietas, siendo la de tipo II² la más común, siguiéndole la de tipo I y por último la de tipo III³.
- El efecto del espesor de la probeta influye en la energía de fractura.
- La determinación experimental de la energía de la fractura resulta satisfactoria en mezclas bituminosas a bajas temperaturas, cuando el material es relativamente rígido, pero queda sin definir la determinación de la energía de la fractura a temperaturas más altas.
- La energía de la fractura de las mezclas bituminosas aumenta con el aumento de temperatura, sugiriendo que el material experimenta una transición de frágil a dúctil. Para el rango de temperaturas investigadas (-20,-10 y 0°C), la energía de la fractura aumenta con la disminución de la velocidad de carga.

¹ Tipo I. Apertura: El desplazamiento relativo de las superficies de fractura es normal a las paredes de la fisura. Es evidente que este modo de fractura se debe a tensiones de tracción.

² Tipo II. Deslizamiento: Desplazamiento tangencial de las paredes de fisura en dirección perpendicular al frente de fisura. Obviamente producido por tensiones de cizalladura.

³ Tipo III. Desgarramiento: Desplazamiento tangencial de las paredes de fisura en dirección paralela al frente de fisura. Producido por tensiones de cizalladura pura (no hay tensiones normales).

2.4.4. Ensayo BTD

En 1997 el Laboratorio de Caminos de la Universidad Politécnica de Cataluña, desarrolló el ensayo BDT, Barcelona Tracción Directa, para evaluar la resistencia a la fisuración de mezclas bituminosas de manera rápida y sencilla [4].

Las probetas utilizadas en este ensayo son fabricadas mediante una compactadora de impactos a partir de un molde formado por dos semicírculos con un resalto en la zona de contacto, de forma que se crea una fisura en la parte central de la probeta, debilitando esta zona para provocar la formación de un plano de fisuración, y de la misma forma, crear un sistema de anclaje donde aplicar los esfuerzos que permitan ensayar la probeta a tracción. La carga de tracción se aplica a velocidad constante, de forma que la fisura se va abriendo. Con este ensayo pueden determinarse propiedades como la resistencia a la tracción, la energía de fractura, el módulo de carga y la deformación en rotura de las mezclas.

El principal inconveniente es la aplicación del BTD a testigos, debido al proceso de fabricación de la probeta que se elabora con las placas puestas.

También cabe destacar que la probeta no se encuentra sometida a tracción pura ya que aparecen compresiones en el extremo opuesto a la aplicación de la carga y por lo tanto los cálculos se complican.



Figura 2.4 Bases de la probeta, probeta para el ensayo y esquema del ensayo. Fuente (ETSECCPB)

2.4.5. Ensayo Fénix

El ensayo Fénix, es uno de los más recientes para el análisis del comportamiento a fractura de mezclas bituminosas y la caracterización frente a los fenómenos de fisuración. Fue desarrollado por la Universidad Politécnica de Catalunya dentro del marco del Proyecto CENIT: Investigación Estratégica de Carreteras más Seguras y Sostenibles, Acrónimo: FÉNIX [5]. El ensayo se encuentra dentro de las líneas de los citados anteriormente, pero pretende mejorar sus desventajas como la generación de estados tensionales que afectan a la propagación de la fisura, la complejidad en la elaboración de las probetas o la imposibilidad de aplicarlo a testigos de obra.

El objetivo principal del ensayo es el estudio de la resistencia a la fisuración y la tenacidad de las mezclas bituminosas determinando la resistencia a la tracción, la energía disipada en el proceso de fractura, el índice de rigidez a tracción, el índice de tenacidad y los desplazamientos en rotura.

Es un método aplicable a mezclas densas, semidensas y gruesas y a microaglomerados. Permite el estudio de la influencia en las propiedades mecánicas de los cambios en los materiales constituyentes como: ligantes, aditivos, fillers o diferentes granulometrías, y la influencia de los factores externos como: la variación de la temperatura de ensayo, la temperatura de compactación, velocidad de aplicación de la carga, la susceptibilidad al agua o el envejecimiento (protocolo SHRP).

El procedimiento del ensayo consiste en someter media probeta cilíndrica, fabricada mediante el proceso Marshall, con una fisura inducida de 6 mm de longitud, a un esfuerzo de tracción aplicado a una velocidad de desplazamiento constante de 1mm/min. Para ello se fijan las dos secciones de la cara plana de la probeta a unas placas de acero que se encuentran unidas al eje axial de aplicación de carga de la prensa, en el cual se permite un movimiento de rotación. El ensayo se lleva a cabo en una cámara térmica que permite realizarlo a cualquier temperatura.

Durante el ensayo se registran las cargas generadas en función del desplazamiento de manera que permitan la obtención de la curva carga-desplazamiento y los parámetros mecánicos correspondientes como son el índice de tenacidad IT, el índice de rigidez a tracción IRT, la carga máxima a tracción F_{max} , el desplazamiento a carga máxima ΔF_{max} ,

y el desplazamiento de rotura ΔR . Todos los parámetros serán definidos en el apartado experimental.

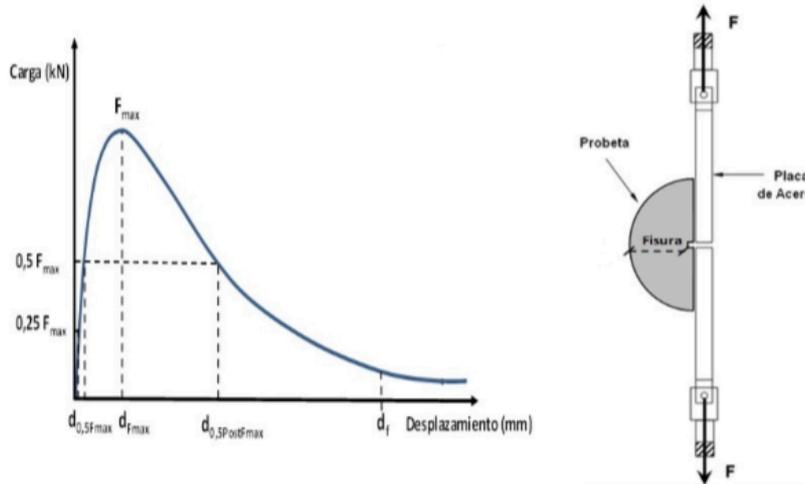


Figura 2.5 Esquema de Ensayo y Gráfica de Resultados del Ensayo Fénix

El ensayo Fénix es de fácil aplicación y la elaboración de las probetas es simple. Pueden usarse probetas elaboradas en el laboratorio o testigos de la obra y puede usarse en un amplio rango de temperaturas.

Des de su desarrollo el ensayo Fénix ha sido usado en numerosos trabajos experimentales con el fin de determinar parámetros como su efectividad, sensibilidad y validez.

Según un estudio del ensayo Fénix para medir la resistencia a la fisuración de mezclas bituminosas [6] en el que las variables estudiadas eran: velocidad de aplicación de la carga, envejecimiento, contenido de ligante, temperatura de ensayo y temperatura de compactación de la mezcla, los autores determinan que el ensayo es un procedimiento práctico y efectivo para determinar las propiedades mecánicas vinculadas con el deterioro de fisuración en las mezclas asfálticas.

Mediante el tratamiento estadístico de los resultados obtenidos se determina que el ensayo tiene sensibilidad frente la variación de los factores estudiados.

La repetitividad fue evaluada a través de los valores del coeficiente de variación calculados a partir de las probetas ensayadas. Se obtuvo un valor promedio de Cv del 15% para la energía disipada, por lo tanto, el ensayo presenta una buena repetibilidad, comparado con los ensayos SE(B) (3-18%), DC(T) (4-25%) y SCB (15-34%) [7].

CAPÍTULO 3. ESTUDIO EXPERIMENTAL

3.1. Introducción

En este capítulo se explica el procedimiento empleado para la fabricación de las probetas y el ensayo con el método Fénix que se ha realizado en el Laboratorio de Caminos del Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad Politécnica de Cataluña.

Con este estudio, se pretende definir la sensibilidad del ensayo Fénix sobre mezclas discontinuas, variando el tamaño máximo de árido y la altura de la probeta.

3.2. Plan de trabajo

Para poder elaborar las probetas, se fabricarán cuatro tipos de mezclas discontinuas, dos BBTM-11B de 3 y 5 cm de altura, y dos BBTM-8B también de 3 y 5 cm, las cuatro con un betún PMB 45/80-65 y un 4,75% de contenido de éste.



Para cada tipo de mezcla, se fabricarán 16 probetas, lo que hace un total de 64. Una vez fabricada las probetas, se cortarán por la mitad, marcando las caras A y las caras B. Las caras A, se ensayarán a 20º y las caras B a 5º.

Al terminar los ensayos de todas las probetas, se procesarán los resultados obtenidos y se compararán entre sí para determinar si existe relación o, por el contrario, los ensayos presentan diferencias significativas.

3.3. Materiales empleados

3.3.1. Áridos

Esta mezcla esta compuesta por tres tipos de áridos: los áridos gruesos, que son de naturaleza porfídica, los áridos finos, que son de naturaleza caliza; los cuales provienen de la cantera FOJ. El filler es carbonato cálcico (CaCO_3).

Según las propiedades que se deseen de la mezcla bituminosa en cuestión, se elegirán unos u otros áridos, teniendo en cuenta también, que la afinidad del árido con el betún varía según el que escojamos. En este caso el árido fino calizo es hidrófobo, es decir, no presenta afinidad para el agua. El árido grueso presenta una resistencia elevada al pulimiento. [8]

3.3.2. Betún

En esta investigación, se ha utilizado un betún modificado, en concreto el PMB 45/80-65, que se utiliza para mezclas bituminosas discontinuas en capa de rodadura.

A continuación se muestra una tabla sobre las características de este betún:

Características	Valor
Betún empleado:	
Penetración/ 25°C; 100g; 5s	57
Punto de reblandecimiento (°C)	65,3
Punto de fragilidad Fraass (°C)	-15
Estabilidad al almacenamiento:	
Punto de inflamación (°C)	290
Residuo después de película fina y rotatoria:	
Variación de masa (%)	0,29
Penetración (25°C; 100g; 5s) (%)	64
Incremento punto de reblandecimiento (°C)	10

Tabla 3.8 Características del betún PMB 45/80-65

Temperaturas orientativas de trabajo:

- Temperatura de mezcla (°C): 160-170
- Temperatura de almacenamiento y uso del ligante (°C): 160-170
- Temperatura de compactación (°C): 155-165
- Temperatura máxima de calentamiento (°C): 180

3.4. Granulometría

Para poder fabricar las distintas mezclas se debe calcular el peso de la mezcla para que tengan una altura de probeta deseado, en nuestro caso de 3 y 5cm. Por lo tanto, para las mezclas BBTM-8B y BBTM-11B, el peso para una altura de 5cm es de 800g y para la de 3cm, 500g. A continuación, mostraremos las tablas granulométricas para las distintas muestras:

tamiz	%pasa	% retenido	peso ret. (g)	peso acumulado (g)	Peso (g)
16	100	—	—	—	800
11,2	95	5%	40	40	
8	70	25%	200	240	
4	22	48%	384	624	
2	20	2%	16	640	
0,5	12	8%	64	704	
0,063	5	7%	56	760	

Tabla 3.9 BBTM-11B 800

tamiz	%pasa	% retenido	peso ret. (g)	peso acumulado (g)	Peso (g)
16	100	—	—	—	500
11,2	95	5%	25	25	
8	70	25%	125	150	
4	22	48%	240	390	
2	20	2%	10	400	
0,5	12	8%	40	440	
0,063	5	7%	35	475	

Tabla 3.10 BBTM-11B 500

tamiz	%pasa	% retenido	peso ret. (g)	peso acumulado (g)	Peso (g)
11,2	100	—	—	—	800
8	95	5%	40	40	
5,6	52	43%	344	384	
4	22	30%	240	624	
2	20	2%	16	640	
0,5	12	8%	64	704	
0,063	5	7%	56	760	

Tabla 3.11 BBTM-8B 800

tamiz	%pasa	% retenido	peso ret. (g)	peso acumulado (g)	Peso (g)
11,2	100	—	—	—	500
8	95	5%	25	25	
5,6	52	43%	215	240	
4	22	30%	150	390	
2	20	2%	10	400	
0,5	12	8%	40	440	
0,063	5	7%	35	475	

Tabla 3.12 BBTM-8B 500

A continuación, se debe calcular la cantidad de betún que se debe añadir en la mezcla. Se utilizará un contenido de ligante del 4,75% sobre la mezcla, por lo tanto, para las mezclas de 800 g habrá 39,8 g y para las mezclas de 500 g, 24,9 g.

3.5. Fabricación de las probetas

3.5.1. Preparación de los áridos

En primer lugar, se procederá a la tamización de los áridos requeridos, usando la tamizadora mecánica y obteniendo mediante el paso por los distintos tamices UNE, las diferentes fracciones por separados según los tamaños. Al final del proceso tendremos clasificados los áridos según su granulometría característica.



Figura 3.6 Preparación de los áridos

Con la finalidad de eliminar los restos de árido fino que no son adecuados, la porción que se retiene en la fracción 0,063, se somete a un proceso de lavado exhaustivo.

Una vez se tienen los áridos fraccionados, se empezará a la preparación de cada probeta. Por ello será necesario colocar unas bandejas en la balanza de precisión que tiene un error $\pm 0,1$ g, para poder seleccionar i pesar los áridos tal como las tablas granulométricas nos indican para sus correspondientes pesos.

De la primera serie BBTM-8B 800 g se prepararán 17 bandejas, 16 para las probetas, y la otra mezcla para calcular la densidad. Para la segunda serie, BBTM-8B 500 g se prepararán otras 16 bandejas para las 16 probetas.

Para la serie BBTM-11B 500, también se prepararán 17 bandejas, una para calcular la densidad y las otras 16 para las probetas. Para la ultima serie, BBTM-11B 500 g, se harán 16 bandejas para las respectivas 16 probetas.

Para la preparación del filler, se pesa en la misma balanza de precisión la cantidad necesaria para cada probeta, esta sale de la resta del peso total de la mezcla (800g o 500g) menos el peso acumulado final de los áridos. Por ejemplo, en la granulometría de la BBTM-11B 500g, tiene un peso acumulado de los áridos de 475g, por lo tanto, la fracción de filler será de 25g.

3.5.2. Fabricación de la mezcla

Una vez se tienen los áridos pesados, las bandejas se deben poner en un horno a 160°C como mínimo unas 4h antes de la fabricación, excepto el filler que se deja a temperatura ambiente, ya que, al ser tan fino, con la temperatura alta, se podría dañar. También se debe poner el betún en el horno, pero se debe tener en cuenta que no puede estar mas de 4h porque no sufra un proceso de envejecimiento muy elevado.

También es necesario que los moldes cilíndricos donde vamos a poner la mezcla para su compactación se pongan en el horno a una temperatura de 160°C.

Para una correcta fabricación, todo material que se utilice, para la fabricación debe estar a la temperatura de fabricación de la mezcla, que será entre 160°C – 170°C.

Una vez se tiene todo listo para la fabricación se procede a fabricar. En primer lugar, se saca la bandeja del horno y se vierten los áridos en un recipiente metálico que se encontrará en la plancha donde fabricaremos las mezclas, esta plancha de gas estará a unos 170°C aprox.

A continuación, se colocará el recipiente en la balanza de precisión para proceder a añadir el contenido de betún correspondiente. Una vez se tiene la cantidad exacta de betún en el recipiente con los áridos, se vuelve a la plancha para mezclar hasta que los áridos queden uniformemente mezclados con el betún. Después de esto, se verterá la cantidad de filler para cada mezcla y se mezclará todo para que quede uniforme. Una vez este todo homogenizado, se controlará la temperatura y si esta temperatura está entre 155°C – 160°C, se colocará la mezcla en el molde cilíndrico y un collarín para proceder a la compactación por el método Marshall.



Figura 3.7 Fabricación de la mezcla

Para la compactación con el método Marshall, se aplicarán 50 golpes en una cara; una vez terminados los 50 golpes, se girará el molde y se le aplicarán otros 50 golpes a la otra cara.



Figura 3.8 Compactadora Marshall

Una vez finalizada la compactación, se extrae la probeta, se numera y se deja enfriar durante un día. Este proceso de fabricación se llevará a cabo 16 veces para cada serie.

Al día siguiente se desmoldarán las probetas mediante un gato hidráulico, una vez desmoldados se tendrán que volver a numerar las probetas en una zona visible.

3.6. Determinar los contenidos de huecos y la densidad máxima

A continuación, se describirá como se determina el contenido de huecos y la densidad máxima de cada una de las probetas.

Para empezar, se deberán medir las alturas de las probetas; este proceso se realizará con un pie de rey, se realizarán tres mediciones uniformemente espaciadas, divididas con un ángulo de 60° respectivamente. Una vez medidas, se pesarán las probetas en la balanza de precisión.

Estas mediciones servirán para hacer el cálculo de la densidad geométrica, ya que se define como la masa por unidad de volumen, incluyendo el porcentaje de huecos.

El diámetro del molde de Marshall y por lo tanto el diámetro de la probeta viene definido y es de 101,6 mm.

Una vez obtenidas las medidas, procederemos a determinar la densidad geométrica mediante la siguiente ecuación:

$$\rho = \frac{m}{h_m * \pi * \frac{\phi^2}{4}}$$

Donde:

h_m Altura media de la probeta (cm)

ϕ Diámetro de la probeta (cm)

m Masa de la probeta (g)

Para poder calcular la densidad aparente, se necesitará realizar un ensayo mas completo, el cual consiste en utilizar la mezcla fabricada de mas para las series pertinentes, y desgranar todos los áridos, con el condicionante de que no deben quedar áridos con mas de 3cm de diámetro según estipula la norma UNE-EN 1297-5:2003+A1.



Figura 3.9 Desgranado de la mezcla

Una vez se ha finalizado el desgranado, primeramente, se pesarán dos picnómetros vacíos, una vez pesados se dividirá la muestra en dos y se verterán en dos picnómetros; se volverán a pesar con la muestra y seguidamente se rellenarán con agua destilada y se introducirán en un baño de agua a una temperatura de 25°C.



Figura 3.10 Baño de agua

Los picnómetros deben permanecer en el baño 30 minutos, además de estar conectados 15 minutos a una máquina de vacío para quitar el aire entre partículas. (cada 5 minutos se debe de agitar cada picnómetro para ayudar a la extracción de aire).



Figura 3.11 Picnómetros

Una vez finalizado este proceso, se obtendrán los pesos necesarios para poder calcular la densidad máxima de la muestra:

- m1 masa del picnómetro. (g)
- m2 masa del picnómetro y muestra de la mezcla. (g)
- m3 masa del picnómetro, muestra de la mezcla y agua destilada. (g)
- m4 masa del picnómetro, muestra de la mezcla y agua destilada hasta la referencia. (g)
- Vp Volumen del picnómetro. (m³)

Con estos datos se deberá calcular la densidad máxima, de acuerdo con la norma española UNE-EN 12697-5:2002+A1 :2007 se calculará con la siguiente fórmula:

$$\rho_{mv} = \frac{m_2 - m_1}{1000 * (V_p - \frac{(m_3 - m_2)}{\rho_w})}$$

Donde:

ρ_w Densidad del agua o el disolvente a la temperatura de ensayo
(kg/m³) con aproximación a 0,1 Kg/m³

Una vez se han obtenido las densidades, se procederá a calcular %Huecos con la fórmula que nos indica la norma UNE-EN 12697-8:2003:

$$\%H = \frac{\rho_m - \rho_b}{\rho_m} * 100\%$$

Donde:

ρ_b Densidad geométrica de la probeta. (kg/m³)

Este procedimiento se repetirá para la mezcla BBTM-8B y para la mezcla BBTM-11B.

3.7. Ensayo Fénix

3.7.1. Introducción

El ensayo Fénix es un ensayo de tracción para evaluar los mecanismos de fisuración en las mezclas asfálticas. Se trata de un ensayo que permite determinar la resistencia a fisuración de las mezclas asfálticas mediante el cálculo de la energía disipada en la fisuración.

Por lo tanto, con el ensayo Fénix se puede simular el mecanismo de fisuración de las mezclas bituminosas cuando estas están sometidas a esfuerzos térmicos y a las sollicitaciones del tráfico en un ámbito real.

3.7.2. Descripción del ensayo

El ensayo consiste en aplicar un esfuerzo mediante dos placas pegadas a la probeta semicilíndrica con una fisura inducida de 6 mm de profundidad, que van sujetas a los anclajes de la prensa. La carga se aplica a una velocidad de desplazamiento constante del pistón de 1 mm/min. Durante el ensayo se registra la carga aplicada en función del desplazamiento. Con estos datos registrados, podemos graficar una curva carga-desplazamiento.

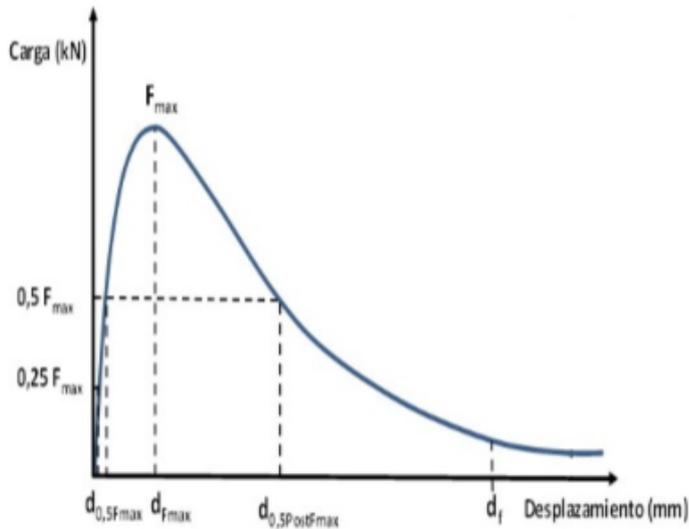


Figura 3.12 Gráfico Carga-Desplazamiento

A partir de la gráfica, se podrán calcular los parámetros mecánicos vinculados al proceso de fisuración que se explican a continuación:

La carga máxima a tracción ($F_{m\acute{a}x}$) registrada en el ensayo de tracción directa (KN)

El desplazamiento a carga máxima ($\Delta F_{m\acute{a}x}$) realizado por el pistón cuando se registra la carga máxima a tracción (mm)

La resistencia a tracción (R_T) es la relación entre la carga máxima, $F_{m\acute{a}x}$, y el área de fractura.

$$R_T = \frac{1000 \times F_{m\acute{a}x}}{h \times l}$$

Donde:

R_T Resistencia a tracción (MPa)

$F_{m\acute{a}x}$ Carga máxima a tracción (KN)

- H Espesor de la probeta (m)
- L Longitud inicial del ligamento (m)

La energía de fractura (G_F) es el trabajo disipado en el proceso de fisuración (W_D) dividido entre el área de fractura perpendicular a la fuerza aplicada.

$$G_F = \frac{W_D}{h \times l}$$

Donde:

- G_F Energía de Fractura por unidad de superficie en el proceso de fisuración (J/m²)
- W_D Trabajo realizado en el proceso de fisuración (área bajo la curva Carga-Desplazamiento) (KN·mm)
- h Espesor de la probeta (m)
- l longitud inicial de ligamento (m)

Desplazamiento al 50% $F_{m\acute{a}x}$ postpico (Δ_{mdp}) (mm) es el desplazamiento registrado por la muestra una vez que el valor de la carga ha disminuido a la mitad de la carga máxima. Este parámetro indica la capacidad que tiene la mezcla evaluada de admitir desplazamientos, puesto que a medida que las mezclas son más dúctiles, (más deformables), se obtienen mayores valores de Δ_{mdp} .

Índice de tenacidad (I_T) se define como la energía disipada en el proceso de ablandamiento multiplicada por un factor de fragilidad, el cual corresponde al desplazamiento realizado desde la carga máxima F_{max} , hasta que la carga ha caído a la mitad de su valor máximo. Este índice tiene la finalidad de evaluar la tenacidad de la mezcla.

$$I_T = \frac{W_D - WF_{m\acute{a}x}}{h \times l} * (\Delta_{mdp} - \Delta F_{m\acute{a}x})$$

Donde:

- I_T Índice de tenacidad ((J/m²)mm)
- W_D Trabajo realizado en el proceso de fisuración, área bajo la curva carga-desplazamiento (kN-m)
- WF_{max} Trabajo realizado hasta la carga máxima (kN-mm)
- ΔF Desplazamiento a F_{max} (mm)
- Δ_{mdp} Desplazamiento a $\frac{1}{2} F_{max}$ postpico (mm)
- h Espesor de la probeta (m)
- l Ancho de la probeta (m)

Índice de rigidez a tracción (I_{RT}) se define como la relación entre el valor medio de la carga máxima, y el desplazamiento a ese valor de carga antes de la carga máxima. Este índice muestra una pseudo-rigidez del material, mostrando qué tan flexible o rígida es la mezcla asfáltica evaluada.

$$IRT = \frac{F_{50} - F_{25}}{d_{50} - d_{25}} \times \frac{1000}{h \times l}$$

Donde:

I_{RT} Índice de rigidez a la tracción (MPa/mm)

F_{max} Carga máxima registrada (kN)

Δm Desplazamiento antes a la carga máxima a $\frac{1}{2} F_{max}$ (mm)

3.7.3. Aplicación del ensayo

Una vez finalizada la fabricación de las probetas, se deberán cortar por la mitad y hacer un corte de penetración de 6mm de profundidad. Una vez cortadas, se deberán medir con el pie de rey, para verificar que las medidas sean las correctas y así poder calcular el área de fractura. Se medirán las distancias desde el centro de la probeta hasta su extremo y del corte de profundidad hasta el extremo consiguiendo así la distancia de ranura.

Una vez se ha terminado este proceso, se iniciará el pegado de las probetas.

Se prepararán 32 placas de acero para cada serie; este proceso implica el limpiado de estas, para que las placas tengan una mayor adherencia.

A continuación, se preparará la resina con la que se pegaran las probetas en las placas.

Para preparar esta resina, es necesario seguir la proporción 3 a 1, tres partes de resina y una parte de catalizador, para dar tiempo a pegar todas las probetas sin que la resina empiece a hacer efecto.

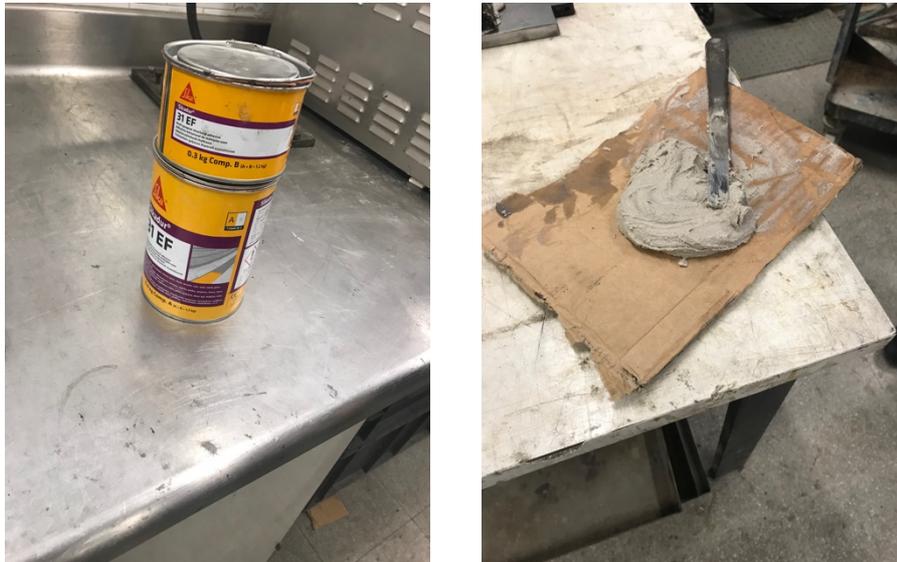


Figura 3.13 Resina y Catalizador

Para finalizar el proceso se pegarán las probetas a las placas, añadiendo la resina y controlando que las placas queden bien alineadas.



Figura 3.14 Probetas adheridas a las placas

Para poder acondicionar las probetas, una vez finalizado el pegado, se dejarán reposar 48h; 24 horas a temperatura ambiente y 24 horas mas dentro de los refrigeradores: las caras A a 20°C y las caras B a 5°C.

Una vez las probetas han reposado el tiempo pertinente a la temperatura de ensayo, se procederá a empezar el ensayo Fénix. Así pues, para empezar, se fijarán las placas con las probetas a la prensa en posición vertical; para que las placas queden tensas se le aplicara una fuerza de tracción a la prensa antes de empezar de 3KN. Una vez se tiene las placas colocadas, ajustaremos la temperatura de ensayo pertinente (20°C o 5°C). Cuando la cámara alcance la temperatura deseada, se empezará el ensayo con una tracción a una velocidad de 1mm/min.



Figura 3.15 Prensa del ensayo Fénix

En todo momento se seguirá el ensayo por el ordenador, donde se verá la progresión del ensayo. Este equipo permite una recolección de datos, estos servirán para que una vez obtenidos todos, poderlos procesar y así obtener los resultados.

Se dará por finalizado el ensayo cuando alcancemos una deformación de 4mm i una carga mínima de 5KN.

Para finalizar con el proceso, una vez ensayadas las probetas, se pondrán las placas con las probetas en la plancha, para poder despegarlas de una manera mas fácil, ya que la resina se reblandece.

Con las probetas ya despegadas, estas se desechan ya se procede a limpiar las placas para poder utilizarlas en un ensayo futuro.

El procesado de los datos, así como los test estadísticos aplicados, se explicarán en el capítulo siguiente.

CAPÍTULO 4. RESULTADOS

4.1. Introducción

Una vez se ha finalizado el estudio experimental, se muestran los resultados obtenidos en el ensayo Fénix y en el cálculo de contenido de huecos y se analizan. Como ya se ha explicado anteriormente, se han realizado 8 ensayos, de 16 medias probetas cada uno, como se expuso en el capítulo anterior. De cada serie fabricada, las caras A se ensayan a 20°C y las B a 5°C, en el momento de estudiar los resultados, se hará en función del tamaño máximo de árido, y de la altura de la probeta, las variaciones de temperatura no se estudiarán porque las diferencias son evidentes, aunque usemos diferentes temperaturas para realizar los ensayos. Así pues, diferenciaremos los grupos: BBTM-8B de 5cm y 3cm, y BBTM-11B de 5 y 3cm.

4.2. Procesamiento de datos

Habiéndose finalizado los ensayos, tendremos que procesar los datos que se han recopilado, para ello, se van a introducir los resultados en una plantilla Excel proporcionada por el equipo que ha desarrollado el ensayo Fénix. Esta plantilla incorpora todas las funciones para poder calcular los parámetros necesarios para el análisis del ensayo que serán: IRT, d0,5 PM, GF, RT. Además, también se obtendrá la grafica carga-desplazamiento.

Una vez obtenidos los parámetros de cada probeta, se harán dos procedimientos: el primero será elaborar una tabla resumen para cada serie, y a partir de ésta, se graficarán los parámetros para poder compararlos con más facilidad.

A continuación, se muestra un ejemplo de la curva carga-desplazamiento a temperaturas de ensayo de 5°C y de 20°C, también se muestra la tabla resumen de la serie BBTM-8B 5cm a 20°C. En la tabla se muestran distintos parámetros que nos ayudarán a comparar y que posteriormente serán usados para hacer los test estadísticos.

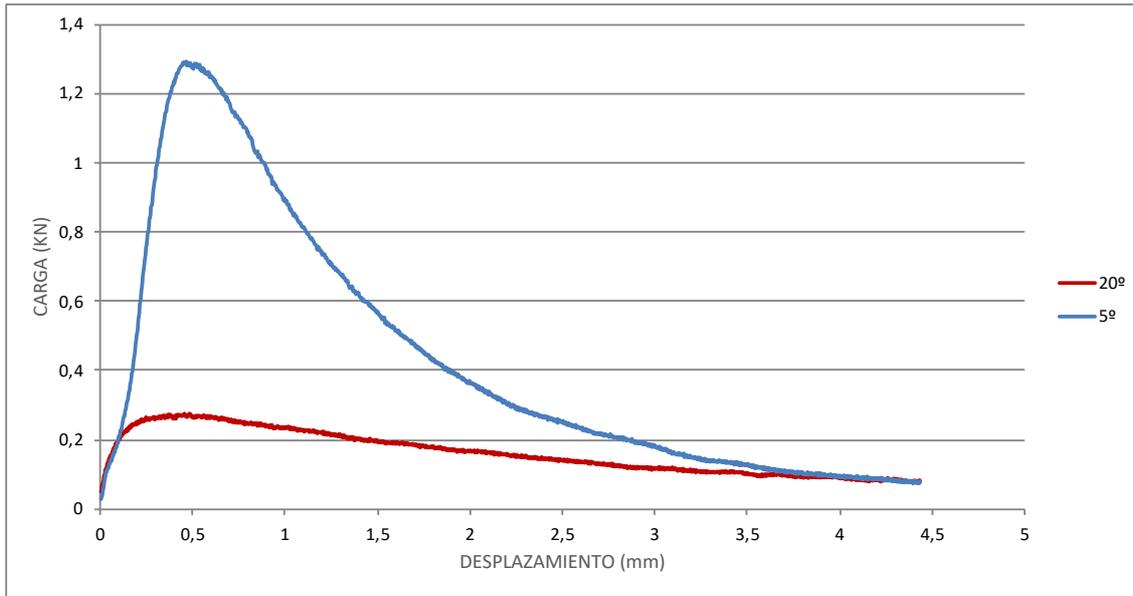


Figura 4.16 Gráfica carga desplazamiento 20°C y 5°C

Probeta		Huecos (%)	Índice Rigidez a Tracción IRT (MPa/mm)	Energía de Fractura GF (J/m ²)	Despl. al 50% carga postp d0,5Pm (mm)
1		15,91	0,88	361,49	2,85
2		15,47	0,75	341,44	3,14
3		15,76	0,69	368,80	2,41
5		15,31	0,91	315,16	2,52
6		16,05	0,89	348,88	2,82
7		15,89	0,63	404,57	3,71
8		14,84	0,66	419,86	3,44
9		15,13	0,87	436,40	3,32
10		16,00	1,00	349,14	2,85
11		16,25	0,77	382,45	2,93
12		14,94	0,72	346,64	2,55
13		14,81	0,76	398,53	2,85
14		15,65	0,82	407,60	2,81
15		15,24	0,88	305,67	2,42
16		15,33	1,18	325,93	2,51
Media		15,50	0,83	367,50	2,87
Desvest (Sr)		0,47	0,14	39,45	0,39
COV (%)		3,00	17,14	10,73	13,43
Intervalos de confianza 95% para la Media	Int. Inf. M	15,25	0,75	345,66	2,66
	Int. Sup. M	15,76	0,91	389,35	3,09
Límite de repetibilidad (r)		1,30	0,40	110,45	1,08

Tabla 4.13 Ejemplo tabla resumen BBTM-8B 5cm a 20°C

En segundo lugar, con el software MiniTab, se realizarán los test estadísticos. Este estudio estadístico, nos permitirá determinar si hay valores atípicos y si los resultados obtenidos muestran diferencias estadísticamente significativas y así poder determinar si el ensayo Fénix es sensible o no frente a las variables del estudio.

A continuación, se explicarán brevemente los test estadísticos realizados.

4.2.1. Test de Grubbs'

Dada una muestra simple de tamaño variable, el analista puede sospechar que uno de los resultados, forzosamente el menor o el mayor valor, es discrepante o atípico. La presencia de un valor anómalo puede alterar sensiblemente los resultados de un análisis por lo que es conveniente eliminar una observación discrepante.

El Test de Grubbs' es usado para tomar decisiones estadísticas en el rechazo de valores discrepantes o atípicos de una muestra. El test exige que la muestra proceda de una población normal y plantea un contraste entre dos hipótesis:

H_0 : "no hay datos atípicos en la muestra"

H_1 : "hay al menos un dato atípico".

Para determinar cual es la hipótesis correcta se hará uso del estadístico:

$$G = \frac{\max |x_i - \bar{x}|}{s},$$

siendo \bar{x} la media y s la desviación típica muestrales.

La región crítica de este contraste se puede obtener aproximadamente tomando como referencia la distribución t_{n-2} de Student con $(n - 2)$ grados de libertad, siendo n el tamaño de la muestra. Así, definiendo k tal que

$$\Pr \{t_{n-2} > k\} = \frac{\alpha}{2n},$$

Siendo $\alpha = 0.05$ nuestro nivel de significación, se aceptará la hipótesis alternativa H_1 de existencia de dato atípico si G excede de cierto valor crítico:

$$G > \frac{n-1}{\sqrt{n}} \sqrt{\frac{k^2}{n-2+k^2}}$$

4.2.2. Descripción estadística

Los parámetros estadísticos obtenidos para completar el análisis de los resultados obtenidos durante el ensayo se presentan en este apartado y son: la media, la desviación estándar, el coeficiente de variación y los intervalos de confianza a un 95%.

4.2.3. Límite de repetibilidad

La repetibilidad puede expresarse cuantitativamente como la dispersión característica de los resultados. Su definición sería la proximidad de concordancia entre los resultados obtenidos de mediciones sucesivas del mismo parámetro bajo las mismas condiciones de repetibilidad que incluyen: el mismo procedimiento de medición, el mismo observador, el mismo instrumento, las mismas condiciones de uso del instrumento, el mismo lugar y que las repeticiones se realicen en un período corto de tiempo. El cálculo del límite de repetibilidad es 2.8 veces la desviación estándar.

4.2.4. Test de Normalidad (Kolmogorov-Smirnov)

El test de normalidad de Kolmogórov-Smirnov es un test no paramétrico que determina la bondad de ajuste de dos distribuciones de probabilidad entre sí.

Este test se usa para comparar la función de distribución acumulada observada de una variable con una distribución teórica determinada como puede ser la normal. Mediante esta prueba de bondad de ajuste se contrasta si las observaciones podrían razonablemente proceder de la distribución especificada.

Se plantean dos hipótesis:

H_0 : Los datos analizados siguen una distribución N.

H_1 : Los datos analizados no siguen una distribución N.

El estadístico D es la mayor diferencia absoluta observada entre la frecuencia acumulada observada $F_n(x)$ y la frecuencia acumulada teórica $F_0(x)$, obtenida a partir de la distribución de probabilidad que se especifica como hipótesis nula.

Si los valores observados $F_n(x)$ son similares a los esperados $F(x)$, el valor de D será pequeño. Cuanto mayor sea la discrepancia entre la distribución empírica $F_n(x)$ y la distribución teórica, mayor será el valor de D.

El valor de D se compara con los valores tabulados según el nivel de significación de la prueba y el tamaño de la muestra de manera que:

Si $D \leq D_\alpha \Rightarrow$ Aceptar H_0

Si $D > D_\alpha \Rightarrow$ Rechazar H_0

$P(\text{Rechazar } H_0 / H_0 \text{ es cierta}) = P(D > D_\alpha / \text{Los datos siguen la distribución } M) = \alpha$ (nivel de significación de la prueba)

Este test es una de las condiciones que se analizan antes de realizar un análisis de varianzas.

4.2.5. Test de varianzas iguales (Levene)

El test de Levene es una prueba estadística inferencial⁴ que se utiliza para evaluar la igualdad de las varianzas para una variable calculada para dos o más grupos. Éste pone en duda la hipótesis nula de que las varianzas poblacionales son iguales. Si el p-valor⁵

⁴ La estadística inferencial es aquella que permite inducir a partir de la información empírica proporcionada por una muestra, el comportamiento de una población con un riesgo de error medible en términos de probabilidad.

⁵ El p-valor es el nivel (de significancia) más bajo en el que el valor observado de la estadística de prueba es significativo. Al proporcionar el p-valor obtenido con la muestra actual la decisión se hará de acuerdo con la regla siguiente:

- Si $p\text{-valor} \leq \alpha$, aceptar H_1
- Si $p\text{-valor} > \alpha$, aceptar H_0

resultante del test es inferior a un cierto nivel de significación ($\alpha=0,05$), es poco probable que las diferencias obtenidas en las variaciones de la muestra se hayan producido sobre la base de un muestreo aleatorio de una población con varianzas iguales. El test de Levene se utiliza a menudo antes de una comparación de medias. Cuando la prueba de Levene muestra significación, se debe cambiar a pruebas no paramétricas.

El estadístico de prueba de Levene se define como [9]:

$$W = \frac{(N - k) \sum_{i=1}^k N_i (Z_{i.} - Z_{..})^2}{(k - 1) \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{N_i} (Z_{ij} - Z_{i.})^2},$$

donde Z_{ij} puede tener una de las siguientes tres definiciones:

1. $Z_{ij} = |X_{ij} - X_i|$ donde X_i es la media del i ésimo subgrupo.
2. $Z_{ij} = |X_{ij} - X_i|$ donde X_i es la mediana del i ésimo subgrupo.
3. $Z_{ij} = |X_{ij} - X'_i|$ donde X'_i es la media recortada al 10% del i ésimo subgrupo.

$Z_{..}$ es la media global de Z_{ij} y $Z_{i.}$ es la media del i ésimo subgrupo de los Z_{ij} .

k : Número de diferentes grupos a los que pertenecen los casos muestreados

N : Número total de casos en todos los grupos

N_i : Número de casos en el grupo i

La prueba de Levene rechaza la hipótesis de que las varianzas son iguales con un nivel de significancia α si $W > F(\alpha, k-1, N-k)$ donde $F(\alpha, k-1, N-k)$ es el valor crítico superior de la distribución F con $k - 1$ grados de libertad en el numerador y $N - k$ grados de libertad en el denominador a un nivel de significancia α .

4.2.6. Test T-Student

El test t-Student se utiliza para determinar si hay una diferencia significativa entre las medias de dos grupos. Se usa para la comparación de dos medias de poblaciones independientes y normales. Para conocer si los datos siguen una distribución normal se habrá realizado con anterioridad un test de bondad de ajuste como la prueba de Kolmogorov.

Hay dos versiones del test t-Student, una para poblaciones con varianzas iguales y otra para poblaciones que no las asumen. Para determinar cual es la versión que usaremos se debe realizar previamente un test de comparación de varianzas.

El test formula dos hipótesis que serán:

$$H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$$

$$H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$$

Para determinar cual es la hipótesis que consideramos correcta tendremos que calcular el estadístico de contraste.

El cálculo del estadístico de contraste para varianzas iguales será:

$$t = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{EE(\bar{X}_1 - \bar{X}_2)} = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}}$$

con grados de libertad $gl = (n_1 - 1) + (n_2 - 1) = (n_1 + n_2 - 2)$.

En el caso de varianzas diferentes, el estadístico será:

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{EE(\bar{x}_1 - \bar{x}_2)} = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}}$$

con grados de libertad:

$$gl = \frac{[EE(\bar{x}_1 - \bar{x}_2)]^4}{\frac{1}{n_1 - 1} [EE(\bar{x}_1)]^4 + \frac{1}{n_2 - 1} [EE(\bar{x}_2)]^4}$$

Los estadísticos calculados para el test t pueden usarse para pruebas de una cola o de dos colas. Después del cálculo del estadístico de contraste, se procede a buscar el p-valor asociado en la tabla de valores de distribución t. Si el valor estadístico calculado es menor al límite elegido por significancia estadística (usualmente a niveles de significancia 0,10; 0,05 o 0,01), entonces la hipótesis nula se rechaza en favor de la hipótesis alternativa.

4.2.7. Resultados estadísticos

A continuación, se mostrarán los parámetros estadísticos obtenidos para completar el análisis de los resultados:

BBTM 8B 4,75% 20°C 5cm		Huecos	IRT	GF	d0,5 PM
Media		15,50	0,83	367,50	2,87
Desvest (Sr)		0,47	0,14	39,45	0,39
COV (%)		3,00	17,14	10,73	13,43
Intervalos de confianza 9% para la Media	Int. Inf. M	15,25	0,75	345,66	2,66
	Int. Sup. M	15,76	0,91	389,35	3,09
Límite de repetibilidad (r)		1,30	0,40	110,45	1,08

Tabla 4.14 Estadísticos BBTM 8B 4,75% 20°C 5cm

Una vez realizado el test de Grubbs', para esta serie, se ha despreciado la probeta 4 ya que era un valor atípico que alteraba la muestra. Por lo tanto, se seguirá el análisis con 15 probetas.

BBTM 8B 4,75% 5°C 5cm		Huecos	IRT	GF	d0,5 PM
Media		15,56	3,85	694,03	0,96
Desvest (Sr)		0,50	0,69	95,87	0,18
COV (%)		3,23	18,02	13,81	18,65
Intervalos de confianza 9% para la Media	Int. Inf. M	15,29	3,48	642,94	0,86
	Int. Sup. M	15,63	4,22	745,11	1,05
Límite de repetibilidad (r)		1,41	1,94	268,44	0,50

Tabla 4.15 Estadísticos BBTM 8B 4,75% 5°C 5cm

BBTM 8B 4,75% 20°C 3cm		Huecos	IRT	GF	d0,5 PM
Media		14,55	0,96	230,64	2,46
Desvest (Sr)		0,61	0,38	65,96	0,32
COV (%)		4,16	39,49	28,60	12,86
Intervalos de confianza 9% para la Media	Int. Inf. M	14,20	0,74	192,56	2,28
	Int. Sup. M	14,90	1,18	268,72	2,64
Límite de repetibilidad (r)		1,70	1,06	184,67	0,89

Tabla 4.16 Estadísticos BBTM 8B 4,75% 20°C 3cm

En esta serie, a partir del test de Grubbs' se han despreciado por contener valores atípicos las probetas 3 y 5, por lo que se seguirá con 14 probetas.

BBTM 8B 4,75% 5°C 3cm		Huecos	IRT	GF	d0,5 PM
Media		14,50	3,53	732,73	1,08
Desvest (Sr)		0,58	1,21	119,64	0,23
COV (%)		4,02	34,25	16,33	21,00
Intervalos de confianza 9% para la Media	Int. Inf. M	14,18	2,86	666,48	0,95
	Int. Sup. M	14,82	4,20	798,99	1,20
Límite de repetibilidad (r)		1,63	3,38	334,98	0,63

Tabla 4.17 Estadísticos BBTM 8B 4,75% 5°C 3cm

En esta serie, también se ha despreciado una probeta, la probeta 1, a partir del test de Grubbs' por contener también valores atípicos.

BBTM 11B 4,75% 20°C 5cm		Huecos	IRT	GF	d0,5 PM
Media		17,75	0,81	361,54	3,24
Desvest (Sr)		0,63	0,20	39,37	0,63
COV (%)		3,52	24,82	10,89	19,58
Intervalos de confianza 9% para la Media	Int. Inf. M	17,42	0,70	340,56	2,90
	Int. Sup. M	18,08	0,91	382,52	3,58
Límite de repetibilidad (r)		1,75	0,56	110,24	1,78

Tabla 4.18 Estadísticos BBTM 11B 4,75% 20°C 5cm

BBTM 11B 4,75% 5°C 5cm		Huecos	IRT	GF	d0,5 PM
Media		17,75	3,63	884,27	1,13
Desvest (Sr)		0,63	0,89	127,69	0,22
COV (%)		3,52	24,62	14,44	19,59
Intervalos de confianza 9% para la Media	Int. Inf. M	17,42	3,23	816,22	1,01
	Int. Sup. M	18,08	4,27	952,31	1,24
Límite de repetibilidad (r)		1,75	2,50	357,54	0,62

Tabla 4.19 Estadísticos BBTM 11B 4,75% 5°C 5cm

BBTM 11B 4,75% 20°C 3cm		Huecos	IRT	GF	d0,5 PM
Media		16,94	0,56	314,37	3,03
Desvest (Sr)		1,55	0,20	61,72	0,61
COV (%)		9,12	36,49	19,63	20,25
Intervalos de confianza 9% para la Media	Int. Inf. M	16,12	0,45	281,48	2,70
	Int. Sup. M	17,77	0,67	347,25	3,36
Límite de repetibilidad (r)		4,33	0,57	172,81	1,72

Tabla 4.20 Estadísticos BBTM 11B 4,75% 20°C 3cm

BBTM 11B 4,75% 5°C 3cm		Huecos	IRT	GF	d0,5 PM
Media		16,94	4,39	825,08	1,08
Desvest (Sr)		1,55	0,70	202,09	0,27
COV (%)		9,12	16,04	24,49	24,52
Intervalos de confianza 9% para la Media	Int. Inf. M	16,12	4,02	717,40	0,86
	Int. Sup. M	17,77	4,77	932,77	1,05
Límite de repetibilidad (r)		4,33	1,97	565,86	0,74

Tabla 4.21 Estadísticos BBTM 11B 4,75% 5°C 3cm

4.3. Análisis de resultados

A partir de los resultados obtenidos experimentalmente y mediante los test estadísticos realizados, se analizan los resultados en función de cada una de las variables estudiadas. La influencia de la temperatura, no ha sido analizada directamente en este estudio ya que es un parámetro muy estudiado del que ya se conocen sus características y variaciones; se ha demostrado en diversos estudios que cuando la temperatura disminuye el IRT y el GF aumenta y el $d_{0,5PM}$ disminuye. La sensibilidad del método Fénix ha sido pues ya evaluada frente a la temperatura y no va a ser objeto de estudio en nuestro caso.

4.3.1. Influencia del tamaño máximo de los áridos

En este estudio se han usado dos tamaños máximos de árido diferentes; 8 y 11mm. Los resultados obtenidos experimentalmente de los parámetros estudiados (Huecos, IRT, GF, $d_{0,5 PM}$) para cada uno de los tamaños, se analizan y comparan para determinar la influencia de éstos en cada uno de los parámetros y así poder determinar la sensibilidad del método frente el tamaño del árido.

4.3.1.1. Huecos (%)

A partir de la variación del tamaño de los áridos tenemos dos grupos de resultados para las dos alturas de las probetas ensayadas.

En las probetas de 3cm, al comparar los resultados del contenido de huecos para las muestras de tamaño máximo de árido de 8 y 11mm mediante el test t-Student, obtenemos un p-valor menor a 0.05, indicando que el contenido de huecos es significativamente diferente en las dos muestras y por lo tanto indicando que el tamaño del árido influye en el resultado del porcentaje de huecos.

En el caso de las probetas de 5 cm, el resultado es el mismo y comprobamos que también existen diferencias significativas para el contenido de huecos.

Comprobamos pues que la granulometría influye en el contenido de huecos ya que la granulometría diferente puede abrir o cerrar la mezcla aumentando o disminuyendo los huecos.

A continuación, se muestra la gráfica de contenido de huecos (%) para las distintas muestras:

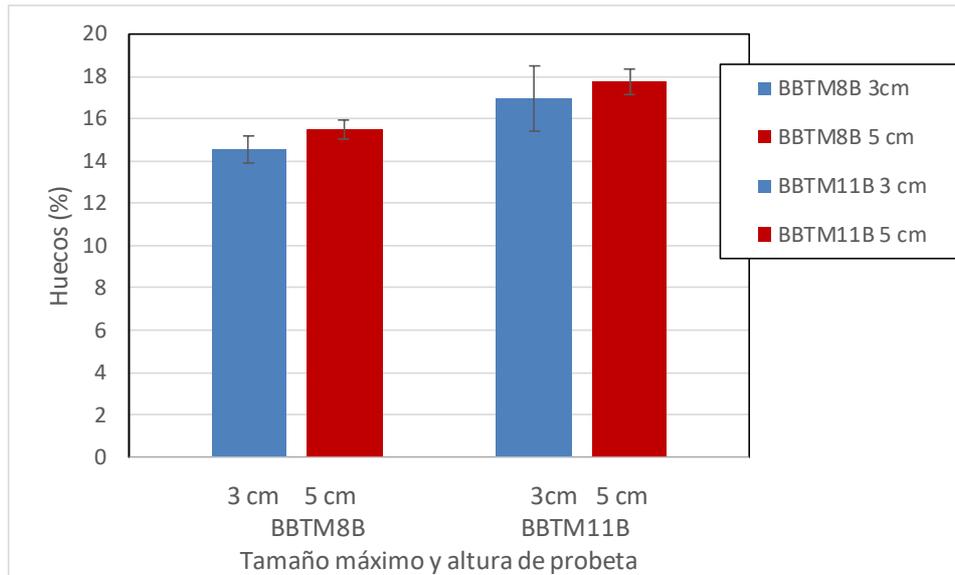


Figura 4.17 Gráfica contenido de Huecos (%)

4.3.1.2. Índice de rigidez a tracción (IRT)

Al analizar la influencia del tamaño del árido en el IRT se tendrán cuatro grupos de resultados obtenidos de la comparación de ocho muestras, ya que se tendrán resultados para las dos temperaturas de ensayo (20°C y 5°C) y para las dos alturas de probetas.

En el estudio de los resultados del IRT para las muestras de tamaño 8 y 11 mm de árido en probetas de 3 cm a 20 °C obtenemos un p-valor de 0.002, inferior a 0.05, indicando por lo tanto que los dos grupos de resultados son significativamente diferentes. Los mismos resultados se obtienen para el IRT cuando la temperatura es de 5°C en el mismo tamaño de probeta siendo pues los IRT obtenidos significativamente diferentes.

Al comparar el IRT de las probetas de 5 cm para los dos tamaños de árido, obtenemos un p-valor mayor a 0.05 en el caso de la temperatura de 5°C y de 20°C, indicando en los

dos casos que los valores de IRT para los dos tamaños de árido son los mismos para la altura de 5 cm en las dos temperaturas.

En la gráfica posterior se muestran los resultados del IRT para las distintas muestras según el tamaño del árido y en función de las diferentes alturas de probeta y temperaturas de ensayo.

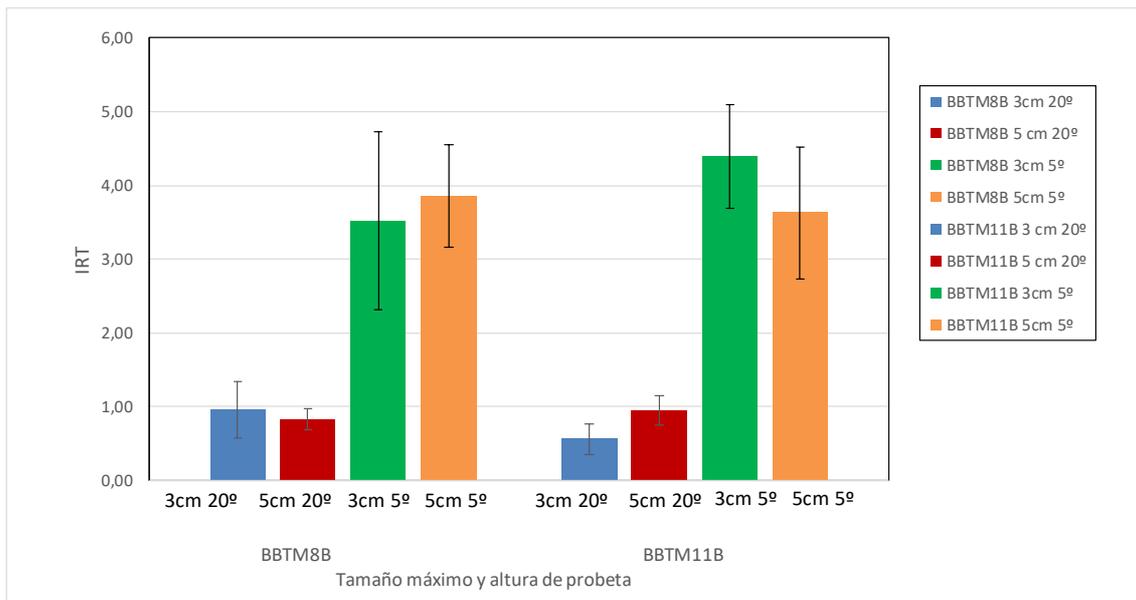


Figura 4.18 Gráfica IRT

Observamos pues que en las probetas de 3 cm el tamaño máximo de árido influye en el valor del IRT y en las probetas de 5 cm ocurre lo contrario y el tamaño máximo de árido no influye en el IRT.

4.3.1.3. Energía de fractura (GF)

Los resultados para la energía de fractura en función de la variación del tamaño máximo del árido 8 y 11mm para las probetas de 3 cm a 20°C muestran un resultado de un p-valor 0.001, inferior a 0.05, indicando que los resultados de las dos muestras son significativamente diferentes y por lo tanto que el tamaño del árido influye en el resultado de la energía de fractura en este caso.

En las probetas de 3cm a la temperatura de 5°C el p-valor obtenido es de 0.136, superior a 0.05 y por lo tanto en este caso el valor de GF no es significativamente diferente para los dos tamaños del árido, por lo tanto, el tamaño del árido no influye en el valor de la energía en estas condiciones.

Para las probetas de 5 cm, a la temperatura de 20°C el p-valor es mayor a 0.05 y por lo tanto consideramos que los valores de la energía no muestran diferencias significativas para los dos tamaños del árido. No es así en el caso de la temperatura de 5°C para las probetas de 5 cm en las que el p-valor es inferior a 0.05 y por lo tanto los resultados de la energía para los dos tamaños del árido son significativamente diferentes.

La gráfica a continuación muestra los valores de la energía de fractura para las distintas muestras:

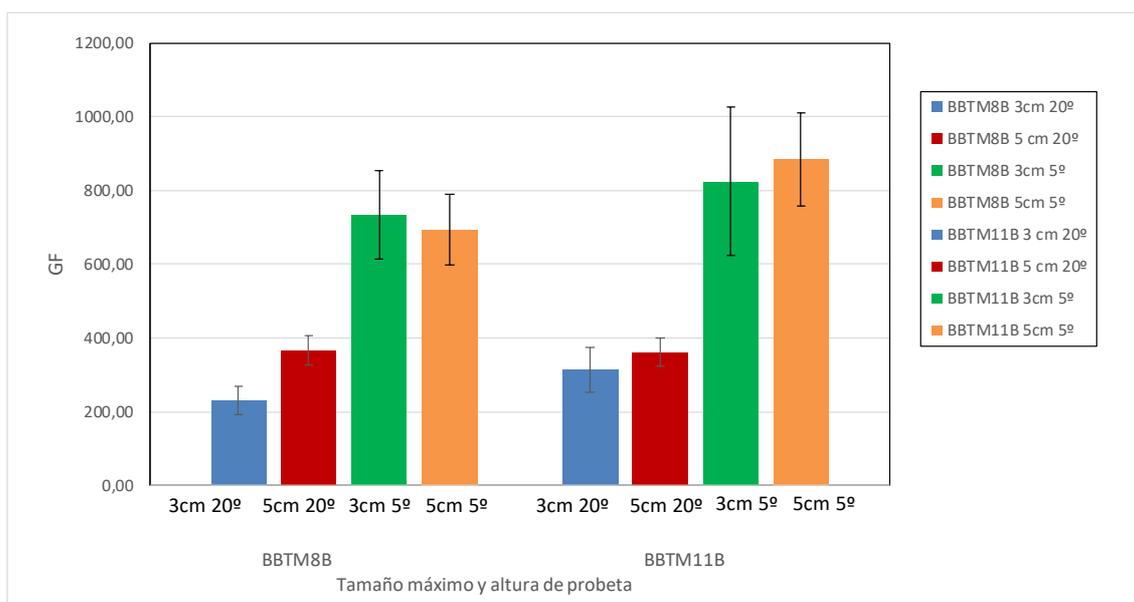


Figura 4.19 Gráfica GF

4.3.1.4. Desplazamiento al 50% de la carga máxima postpico (d0.5 PM)

Para el estudio del desplazamiento al 50% de la fuerza máxima para los diferentes tamaños máximos de árido, en el caso de las probetas de 3 cm a la temperatura de 20°C obtenemos un p-valor inferior a 0.05 y por lo tanto determinamos que los resultados son significativamente diferentes para los dos tamaños de árido. Todo lo contrario de lo que obtenemos para el mismo tamaño de probeta, pero a una temperatura de 5°C para la cual el p-valor obtenido es superior a 0,05 y por tanto el tamaño del árido no influye en el resultado del desplazamiento.

Para las probetas de 5 cm, el p-valor de las muestras a 20°C es superior a 0.05 y por lo tanto los resultados del desplazamiento no son significativamente diferentes para los dos tamaños de árido, en cambio, para los resultados obtenidos a 5°C obtenemos un p-valor inferior a 0.05 y por lo tanto los resultados para los diferentes tamaños de árido son significativamente diferentes.

En la gráfica posterior podemos observar la representación de los valores del desplazamiento al 50% de la fuerza máxima según los distintos parámetros.

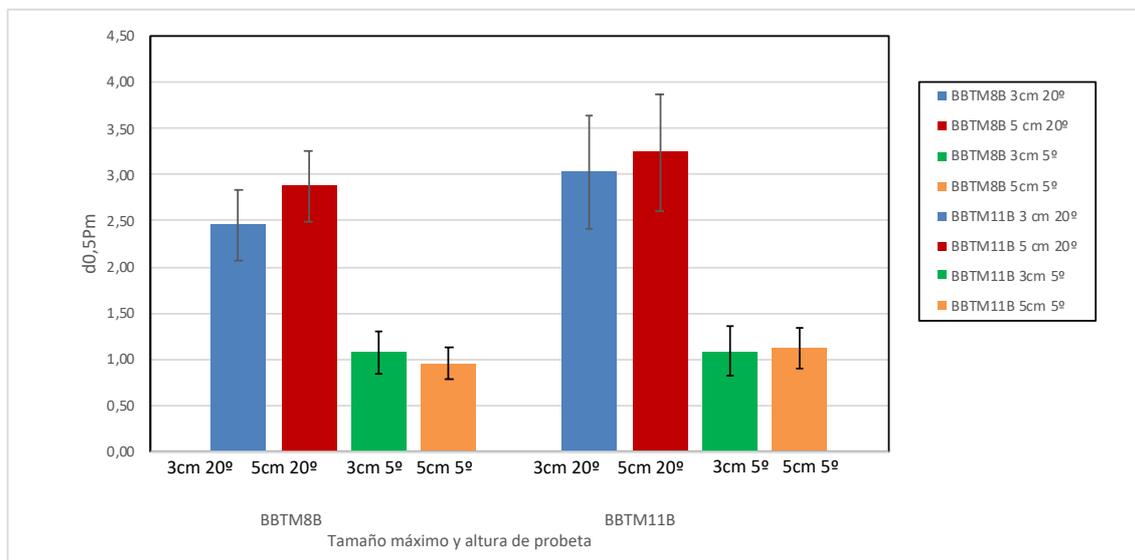


Figura 4.20 Gráfica d0,5 PM

4.3.1.5. Tabla resumen resultados T-student

Para poder agrupar todos los resultados obtenidos de los test t que muestran si existen diferencias significativas o no para la variable estudiada respecto a los parámetros obtenidos, se elaboran unas tablas en las que se indican los resultados del p-valor en cada uno de los casos.

Se indican en color rojo los valores inferiores a 0.05, es decir, los casos en los que el test indica que existen diferencias significativas entre las muestras comparadas. En color verde se indican los valores superiores a 0.05 y por lo tanto los parámetros que según el test no tienen diferencias significativas.

En la tabla 4.10 se muestran los p-valor obtenidos para el caso de la variación de tamaño máximo de árido para las dos temperaturas y para cada altura de probeta.

El contenido de huecos según el tamaño del árido se ha puesto también de la misma forma, en la tabla 4.11, se pueden observar en rojo los p-valor para las dos alturas de probeta según el distinto tamaño de árido.

Grupos	Tamaño árido	P-valor IRT	P-valor GF	P-valor d0,5 PM
3cm 20°C	11mm	0,002	0,001	0,004
	8mm			
3cm 5°C	11mm	0,024	0,136	0,92
	8mm			
5cm 20°C	11mm	0,757	0,677	0,064
	8mm			
5cm 5°C	11mm	0,747	0,000	0,022
	8mm			

Tabla 4.22 P-valor IRT, GF, d0,5PM. influencia tamaño máximo árido

Grupos	Tamaño árido	P-valor huecos
3cm	11mm	0,00
	8mm	
5cm	11mm	0,00
	8mm	

Tabla 4.23 P-valor Huecos. influencia tamaño máximo árido

4.3.2. Influencia de la altura de la probeta

Se han ensayado dos alturas de probetas: 3 cm y 5 cm para cada tamaño de árido, y cada una de ellas, se ha ensayado a la temperatura de 20 y 5°C. En este apartado se estudiará la relación de los parámetros obtenidos en función de la diferencia de altura y manteniendo constantes temperatura y tamaño máximo de árido.

4.3.2.1. Huecos (%)

En el tamaño de árido 8mm el p-valor obtenido mediante el t de Student es inferior a 0.05 y por lo tanto los dos grupos de valores de huecos obtenidos en las dos alturas de probetas son significativamente diferentes, indicando que la altura de la probeta influye en el contenido de huecos para este tamaño.

En el tamaño 11 mm el test muestra un p-valor superior a 0.05 y por lo tanto puede considerarse que el contenido de huecos no presenta diferencias significativas en las dos alturas de probetas.

Este resultado es debido a que en la muestra BBTM 11 B de 3 cm hay una dispersión muy elevada. A pesar de este resultado se puede concluir que la altura de la probeta influye en el contenido de huecos. Estos valores pueden observarse en la figura 4.2.

4.3.2.2. Índice de rigidez a tracción (IRT)

En la muestra BBTM 8B para la temperatura de 20°C obtenemos un p-valor de 0.2, superior a 0.05, que indica que los valores del IRT para los tamaños de 5 y 3 cm no son significativamente diferentes y, por lo tanto, en esta muestra, el IRT no depende del tamaño de la probeta.

Observamos el mismo comportamiento en la muestra BBTM 8B a una temperatura de 5°C, para las que obtenemos también un p-valor superior a 0.05 al comparar los resultados de los distintos tamaños.

En la muestra BBTM 11B a 20°C se obtiene un p-valor de 0.02, inferior a 0.05, que indica que los resultados del IRT obtenidos para las dos alturas de probetas pueden considerarse significativamente diferentes, habiendo pues relación entre el IRT y el tamaño de la probeta para este tamaño de árido. Los resultados obtenidos para la misma muestra a una temperatura de 5°C son los mismos, es decir confirman que los IRT para las dos alturas son significativamente diferentes.

Los IRT de las muestras pueden verse reflejados en la figura 4.3.

A partir de los resultados obtenidos se puede concluir que, en el tamaño máximo de árido de 8 mm, la altura de la probeta no influye en el valor del IRT, en cambio, no ocurre lo mismo en las mezclas de tamaño 11 mm en las que la altura de la probeta sí influye.

4.3.2.3. Energía de fractura (GF)

Para la muestra BBTM 8B a 20°C, observamos un p-valor de 0.000 al comparar los resultados de la energía de fractura de las probetas de 3 y 5 cm, un valor inferior a 0,05 que indica que los valores de la energía obtenidos en los ensayos son significativamente diferentes y por lo tanto que dependen del tamaño de la probeta en estas condiciones. Al comparar los resultados de la energía de fractura para el mismo tamaño de árido per a una temperatura de 5°C, el p-valor es de 0.327, superior a 0.05 y por lo tanto no existen diferencias significativas entre las energías de fractura para las dos alturas de las probetas.

Para el grupo de muestras BBTM 11B, en el ensayo a 20°C obtenemos un p-valor de 0.015, inferior a 0.05, y por lo tanto comprobamos que existen diferencias significativas para la energía de fractura al variar la altura de las probetas.

El ensayo de la misma muestra a la temperatura de 5°C tenemos un p-valor de 0.33 que indica que los grupos de resultados de la energía de fractura para el tamaño de 5 y 3 cm de la probeta no tienen diferencias significativas.

Observamos pues que en las mezclas ensayadas a 20°C la altura de la probeta influye en el valor del GF y en las ensayadas a 5°C no influye. Los valores de la energía de fractura para las diferentes muestras quedan reflejados en la figura 4.4.

4.3.2.4. Desplazamiento al 50% de la carga máxima postpico (d0,5 PM)

El estudio del desplazamiento al 50% de la fuerza máxima para la muestra BBTM 8B a la temperatura de 20°C muestra un p-valor de 0.004, inferior a 0.05 al comparar las muestras de 3 y 5 cm de altura, indicando que los grupos de resultados son significativamente diferentes y por lo tanto que el valor del desplazamiento es diferente para distintos tamaños de la probeta.

Cuando se analizan los resultados para la misma muestra a 5°C el test muestra un p-valor de 0.110, superior a 0,05 y por lo tanto indica que no existen diferencias significativas para los valores de desplazamiento para probetas de diferentes medidas a esta temperatura.

En la muestra BBTM11B observamos un p-valor superior a 0.05 para la temperatura de 5 y 20°C, por lo que los resultados del desplazamiento para las probetas de 3 y 5 cm no tienen diferencias significativas en ninguna de las dos temperaturas ensayadas.

A partir de los resultados obtenidos observamos que sólo en un caso existe influencia entre la altura de la probeta y el valor del desplazamiento, que es en las series de 8mm a 5°C.

Los valores del desplazamiento quedan reflejados en la figura 4.5.

4.3.2.5. Tabla resumen resultados T-student

Como se ha hecho anteriormente en el estudio de la influencia del tamaño del árido, se han elaborado unas tablas para poder observar de forma global los resultados del p-valor de los test t correspondientes a la variación de la altura de la probeta para cada uno de los parámetros obtenidos en el ensayo y con las diferentes temperaturas y tamaños de árido.

Se muestran también en verde los p-valor superiores, indicando pues que para la muestra correspondiente, no existen diferencias significativas para el parámetro obtenido al variar la altura de la probeta. Los p-valor mostrados en rojo, indican lo contrario y por lo tanto permiten concluir que existen diferencias significativas entre las dos muestras comparadas para el parámetro indicado.

En la tabla 4.13 se indican los p-valor referentes al contenido de huecos con la variación de la altura de la probeta para cada tamaño de árido.

Grupos	Altura probeta	P-valor IRT	P-valor GF	P-valor d0,5 PM
8mm 5°C	3cm	0,373	0,327	0,91
	5cm			
8mm 20°C	3cm	0,2	0,00	0,004
	5cm			
11mm 5°C	3cm	0,042	0,33	0,63
	5cm			
11mm 20°C	3cm	0,02	0,015	0,345
	5cm			

Tabla 4.24 P-valor IRT, GF, d0,5PM. influencia altura probeta

Grupos	Altura probeta	P-valor huecos
8mm	3cm	0,00
	5cm	
11mm	3cm	0,068
	5cm	

Tabla 4.25 P-valor Huecos. influencia altura probeta

4.3.3. IRT vs d0,5 PM

Para poder profundizar más, se ha realizado una gráfica IRT - d0,5 PM, para poder comparar la relación existente entre si. En esta gráfica, podemos observar el efecto de la temperatura, a través de los parámetros IRT y d0,5 PM, a mayor IRT menor d0,5 PM, es decir, al disminuir la temperatura de ensayo, la mezcla se vuelve mas rígida y por lo tanto la vuelve menos dúctil. Tanto las probetas de 3cm como las de 5cm muestran la misma tendencia.

A continuación, se muestra la gráfica realizada:

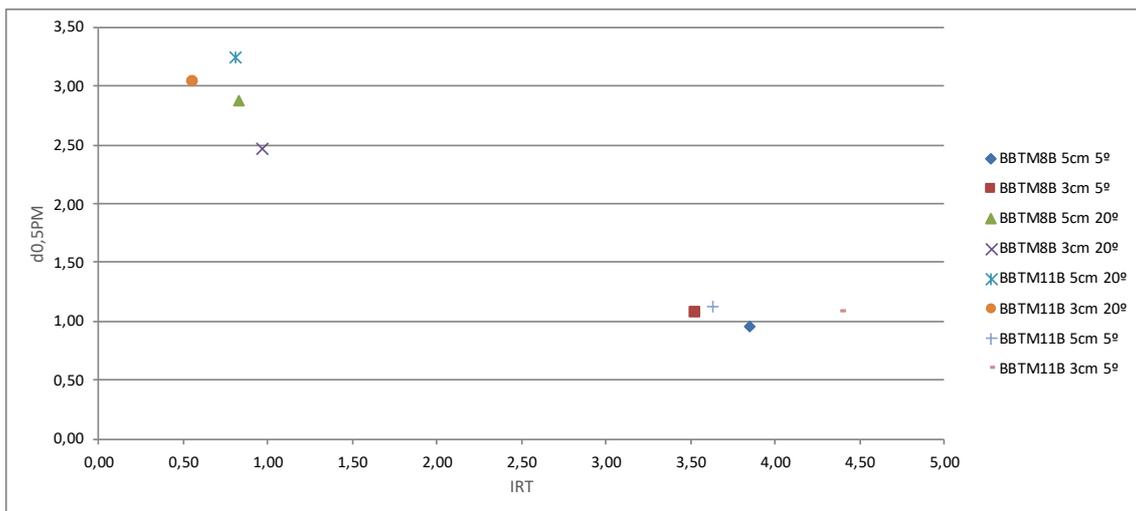


Figura 4.21 gráfica IRT - d0,5PM

4.3.4. Gráfica IRT vs GF

Por otro lado, también se ha realizado una gráfica para ver el comportamiento del IRT con la energía de fractura (GF).

En esta gráfica, observamos que hay una correlación entre el IRT y GF directamente proporcional, es decir, a mayor IRT mayor GF. Estos parámetros, crecen cuando la temperatura de ensayo baja para ambas alturas de probetas.

Igual que en la figura anterior, teniendo solo dos temperaturas, no se puede decir exactamente, que tendencias se tratan.

Esta es la gráfica IRT – GF:

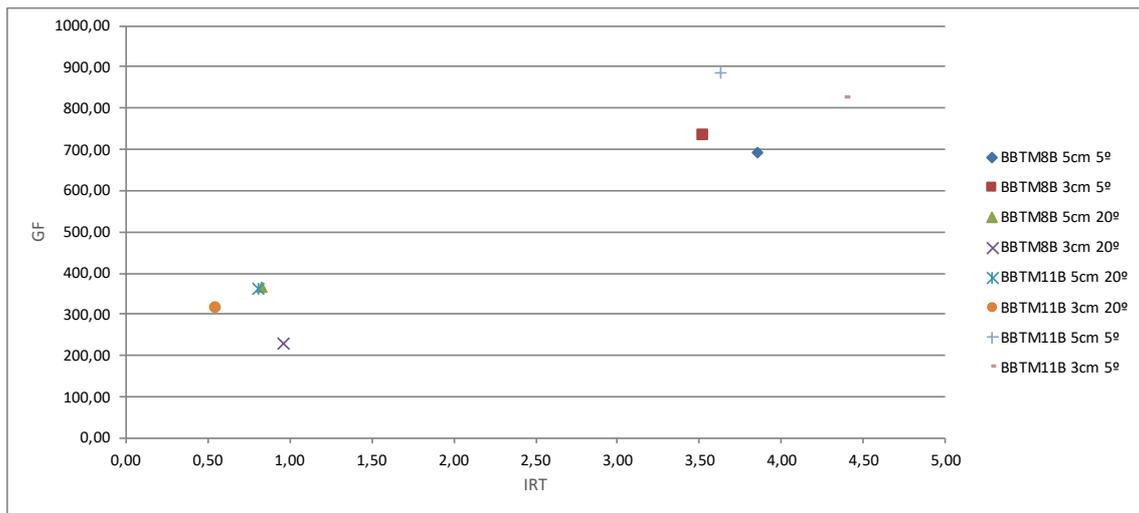


Figura 4.22 Gráfica IRT – GF

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES

A partir de todos los resultados obtenidos experimentalmente y de su análisis estadístico se puede extraer las siguientes conclusiones:

Se ha estudiado cómo influyen las variables tamaño máximo de árido y altura de la probeta en los parámetros obtenidos mediante la aplicación del ensayo Fénix y también en el contenido de huecos. Según los resultados, se ha determinado si el ensayo Fénix es sensible frente a estas variables.

En lo que refiere al contenido de huecos, pese a la elevada dispersión de uno de los valores obtenidos para la probeta BBTM11B de 3 cm, que puede ser debida a numerosos factores difíciles de determinar, se concluye que existe una relación entre el tamaño del árido y el contenido de huecos y de la misma forma entre la altura de la probeta y el contenido de huecos.

Los resultados obtenidos mediante los ensayos llevados a cabo en probetas con distintos tamaños máximo de árido, se observa que la variación del tamaño influye en todos los parámetros (IRT, d0.5PM, GF) para las probetas ensayadas a 20aC de 3 cm de altura. Todo lo contrario, ocurre con las probetas ensayadas a la misma temperatura, pero de 5 cm de altura, en las que ninguno de los parámetros obtenidos varía significativamente al cambiar el tamaño del árido.

En las probetas ensayadas a 5°C, hay variabilidad de resultados, ya que, sin seguir ninguna tendencia, en algunas de ellas los parámetros obtenidos cambian significativamente con el tamaño del árido, y en otras no.

Para los ensayos realizados en probetas con distintas alturas, se observa que la variación de la altura de las probetas no influye en ningún parámetro obtenido para las 64 probetas con tamaño máximo de árido de 8mm ensayadas a 5°, pero para el resto de los ensayos, sin seguir una tendencia clara, influye en algunos casos, dando resultados significativamente diferentes de IRT, GF y d0.5PM, y en otros no.

El ensayo Fénix es un método simple, no tiene ninguna dificultad técnica y la metodología es de fácil aplicación. La elaboración de las probetas objeto de ensayo, tampoco presenta ninguna complicación y el procesamiento de los resultados obtenidos no requiere mucho tiempo ni conocimientos de cálculo específicos.

CAPÍTULO 6. BIBLIOGRAFÍA

[1] Temario general de la ESTT OEP 2013 especialidad régimen jurídico del tráfico Tema 8 página 4.

[2] **Molenaar A., Scarpas A., Liu X. and Erkens S. (2002)**. Semi-Circular Bending Test; Simple but Useful? Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 71, 795-815.

[3] **Wagoner, M. P., Buttlar, W. G., Paulino, G. H., Blankenship, P. (2005c)**. "Investigation of the fracture resistance of hot-mix asphalt concrete using a disk-shaped compact tension test." Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board of the National Academies, Washington D. C, No. 1929, pp. 183-192.

[4] **Pérez Jiménez, F., Miró Recasens, R., Fonseca Rodríguez, C. (1997)**. « Essai BDT pour la détermination de la ténacité et résistance au fissurage des mélanges bitumineux. » Quatrième Symposium International RILEM «Essais mécaniques pour les matériaux bitumineux », Lyon, pp. 391-396.

[5] **VALDÉS, G., PÉREZ-JIMÉNEZ, F., BOTELLA, R.**, Ensayo Fénix, una Nueva Metodología para Medir la Resistencia a la Fisuración en Mezclas Asfálticas. Revista de la Construcción [en línea] 2009, 8

[6] **Valdés, G., Botella, R., Pérez, F. (2009)**. "Evaluación de la Resistencia a la Fisuración en Mezclas Bituminosas Mediante la Utilización del Ensayo Fénix." IV Jornada Nacional de ASEFMA, Madrid.

[7] **Wagoner M., Buttlar W. and Paulino G., (2005)**. Disk- shaped Compact Tension Test for Asphalt Concrete Fracture, Experimental Mechanics, 45(3), 270-277.

[8] Declaraciones de prestaciones (Sorigué). No DdP09-2004TO/4ASF.CUM.

[9] Revista Colombiana de Estadística Volumen 29 No 1. pp. 57 a 76. Junio 2006

Otra Bibliografía:

Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3), específicamente en el artículo 543 – Mezclas bituminosas para capas de rodadura. Mezclas drenantes y discontinuas, publicado en la Orden Circular 24/2008.

https://www.emis.de/journals/RCE/V29/V29_1_57Correalral.pdf

ANEJO 1

Tablas densidades y contenido de huecos

En este anejo se presentan los valores de las densidades, los huecos y las alturas recogidas de cada una de las probetas fabricadas en el laboratorio, tanto de las mezclas BBTM8B y BBTM11B.

Tipo de Mezcla	m1(g)	m2(g)	m3(g)	m4(g)	Vp(m3)
Betún 8B					
237	887,7	1312,9	2419,4	2162,9	1275,2
242	816,2	1249,7	2368,3	2118,8	1302,6
Dmàx 237	2,6				
Dmàx 242	2,4				
Mitja Dmàx	2,5				

5cm 8B							
Probeta nº	H1(mm)	H2(mm)	H3(mm)	H(mm)	Peso seco (g)	Densidad geo (g/cm3)	%H
1	49	48,7	49,1	48,9	829,2	2,090	15,91
2	48,7	49	49	48,9	832,9	2,101	15,47
3	48,3	48,3	48,4	48,3	820,5	2,094	15,76
4	49,3	49,5	50,1	49,6	836,1	2,078	16,40
5	48,5	48,8	48,9	48,7	831,7	2,105	15,31
6	48,8	49	49	48,9	827,8	2,087	16,05
7	48,5	48,8	49,3	48,9	828,2	2,090	15,89
8	48,6	49,1	49	48,9	839,2	2,117	14,84
9	48,4	49,1	48,5	48,7	832,3	2,109	15,13
10	49,9	50,4	49,2	49,8	843,5	2,088	16,00
11	48,9	48,9	49	48,9	825,8	2,082	16,25
12	49,1	48,9	48,3	48,8	835,9	2,114	14,94
13	48,7	48,6	48,6	48,6	834,9	2,117	14,81
14	48,9	48,6	48,9	48,8	829,5	2,097	15,65
15	49	49,1	49,3	49,1	839,2	2,107	15,24
16	48,5	48,6	48,8	48,6	829,8	2,105	15,33

3cm 8B

Probeta nº	H1(mm)	H2(mm)	H3(mm)	H(mm)	Peso seco (g)	Densidad geo (g/cm3)	%H
1	29,8	30,2	30,4	30,1	513,3	2,101	15,47
2	30,1	30,3	29,6	30,0	511,2	2,102	15,44
3	30,2	32,2	30,1	30,8	526,6	2,107	15,25
4	30,1	30,9	29,8	30,3	518,7	2,114	14,95
5	30,2	30	30,1	30,1	522	2,139	13,94
6	30	30,6	29,9	30,2	518,3	2,119	14,74
7	29,9	30	30,3	30,1	516,2	2,118	14,80
8	30,1	30,3	30,2	30,2	526,5	2,150	13,48
9	30,3	29,8	30,4	30,2	516,2	2,111	15,08
10	30,2	31	29,7	30,3	522	2,125	14,51
11	30,1	29,8	30	30,0	517	2,128	14,38
12	30,5	30	30	30,2	520,7	2,129	14,34
13	30,6	29,9	29,8	30,1	518,2	2,124	14,57
14	30,1	29,7	30	29,9	520,4	2,144	13,73
15	29,9	29,8	29,7	29,8	518,2	2,145	13,71
16	30,2	30,5	30,4	30,4	522,9	2,124	14,55

Tipo de Mezcla	m1(g)	m2(g)	m3(g)	m4(g)	Vp(m3)
Betún 11B					
237	887,7	1304,2	2414	2162,9	1275,2
242	816,2	1225,6	2367,3	2118,8	1302,6
Dmàx 237	2,6				
Dmàx 242	2,6				
Mitja Dmàx	2,6				

5cm 11B							
Probeta nº	H1(mm)	H2(mm)	H3(mm)	H(mm)	Peso seco (g)	Densidad geo (g/cm3)	%H
1	48,03	48,1	48,73	48,3	829,3	2,118	18,05
2	48,37	48,33	48,51	48,4	831,8	2,120	18,00
3	48,65	48,89	48,73	48,8	831,2	2,103	18,65
4	47,95	48,49	48,05	48,2	830,2	2,126	17,75
5	47,62	47,68	47,57	47,6	811,1	2,101	18,73
6	48,32	48,58	48,24	48,4	839,4	2,140	17,21
7	47,97	48,4	48,1	48,2	836,8	2,143	17,09
8	48,26	48,34	48,3	48,3	832,8	2,127	17,73
9	48,67	48,91	48,8	48,8	838,4	2,119	18,01
10	46,36	46,78	47,1	46,7	819,8	2,163	16,32
11	48,12	47,81	48,51	48,1	831,4	2,130	17,60
12	48,25	49,23	48,5	48,7	838,6	2,126	17,77
13	48,3	48,23	48,6	48,4	827,6	2,110	18,37
14	47,59	47,91	48,02	47,8	821,4	2,118	18,07
15	48,35	48,79	48,45	48,5	844,1	2,145	17,01
16	48,59	47,91	48,14	48,2	832,5	2,130	17,61

3cm 11B

Probeta nº	H1(mm)	H2(mm)	H3(mm)	H(mm)	Peso seco (g)	Densidad geo (g/cm ³)	%H
1	30,58	30,25	29,9	30,2	521,9	2,129	17,66
2	29,49	30,1	29,7	29,8	518,6	2,149	16,86
3	29,88	29,92	29,86	29,9	513,6	2,120	18,00
4	29,62	29,63	29,43	29,6	524,2	2,187	15,38
5	29,64	29,8	29,7	29,7	521,7	2,166	16,22
6	30,03	29,68	30,2	30,0	519,9	2,140	17,23
7	29,65	29,7	29,8	29,7	510	2,117	18,11
8	29,42	29,68	29,17	29,4	496,6	2,082	19,47
9	30,2	30,54	30,18	30,3	534,8	2,177	15,80
10	29,73	29,52	29,86	29,7	511	2,122	17,91
11	30,6	30	29,89	30,2	517,5	2,116	18,14
12	27,97	27,84	30,16	28,7	520,6	2,241	13,32
13	29,44	29,3	29,75	29,5	515,7	2,156	16,58
14	29,64	29,25	29,49	29,5	506,3	2,120	18,00
15	29,57	29,49	29,87	29,6	511,4	2,128	17,68
16	29,97	29,83	30	29,9	534,8	2,204	14,75

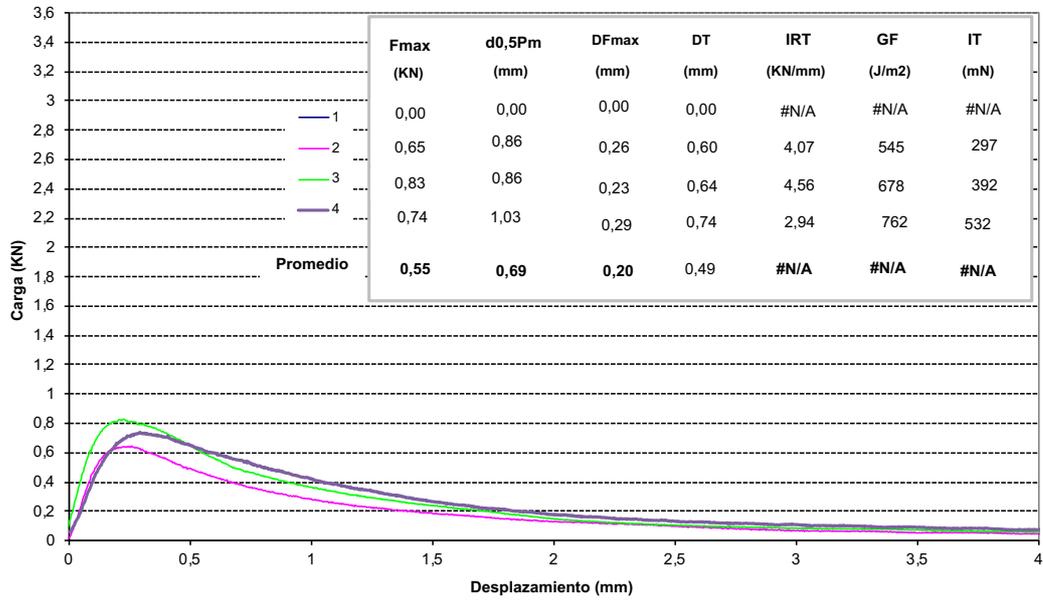
ANEJO 2

Gráficas ensayo Fénix

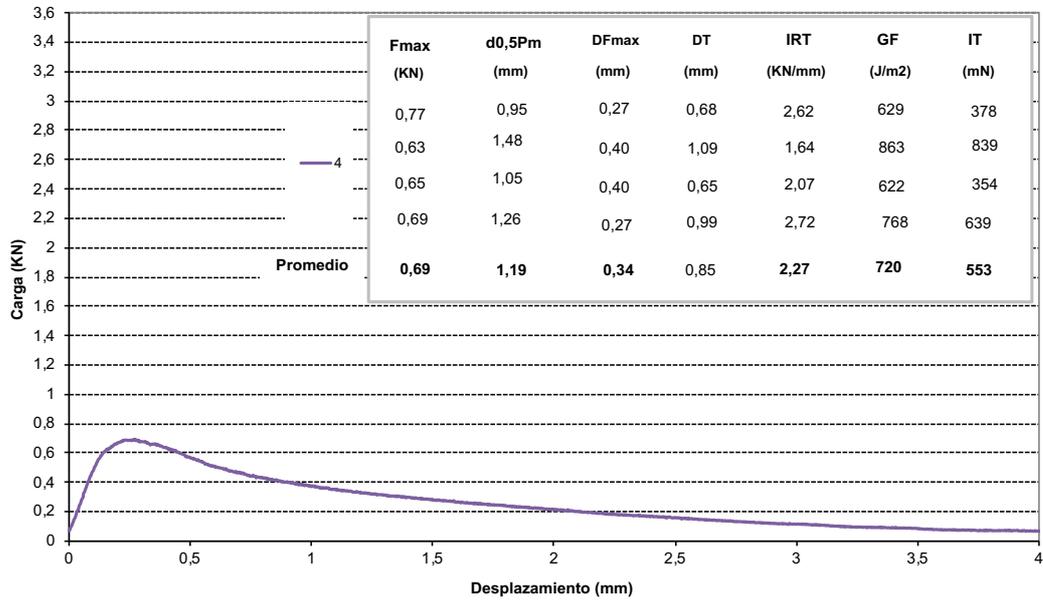
En el presente anejo, se muestran las gráficas obtenidas en el ensayo fénix, a distintas temperaturas, distintas mezclas y distintas alturas de probetas.

Ensayo Fénix 8B a 5°C 3cm y 1 mm/min.

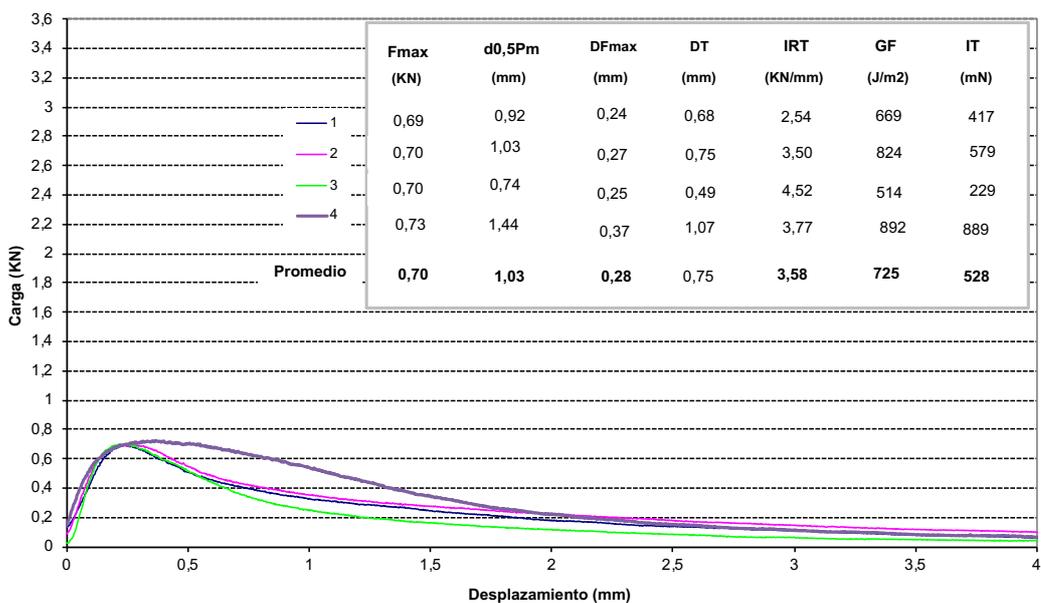
Ensayo Fénix 8B a 5°C 3cm y 1 mm/min.



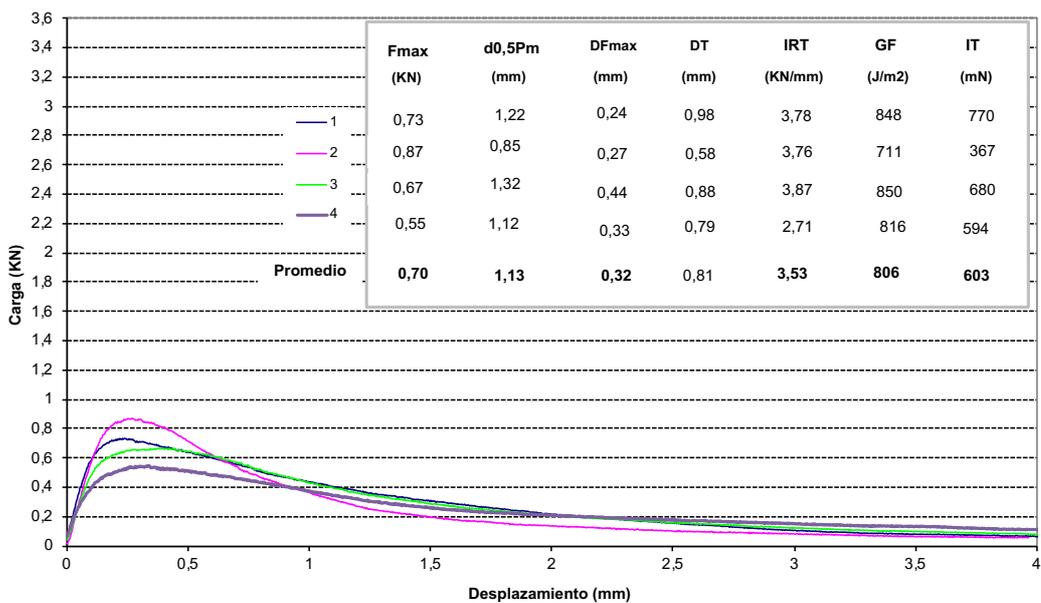
Ensayo Fénix 8B a 5°C 3cm y 1 mm/min.



Ensayo Fénix 8B a 5°C 3cm y 1 mm/min.

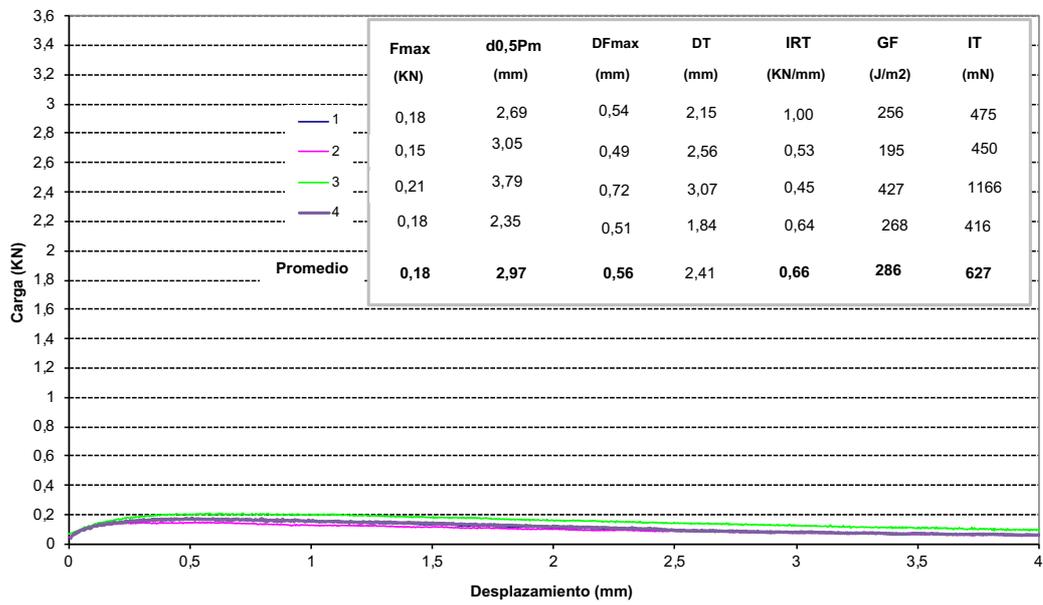


Ensayo Fénix 8B a 5°C 3cm y 1 mm/min.

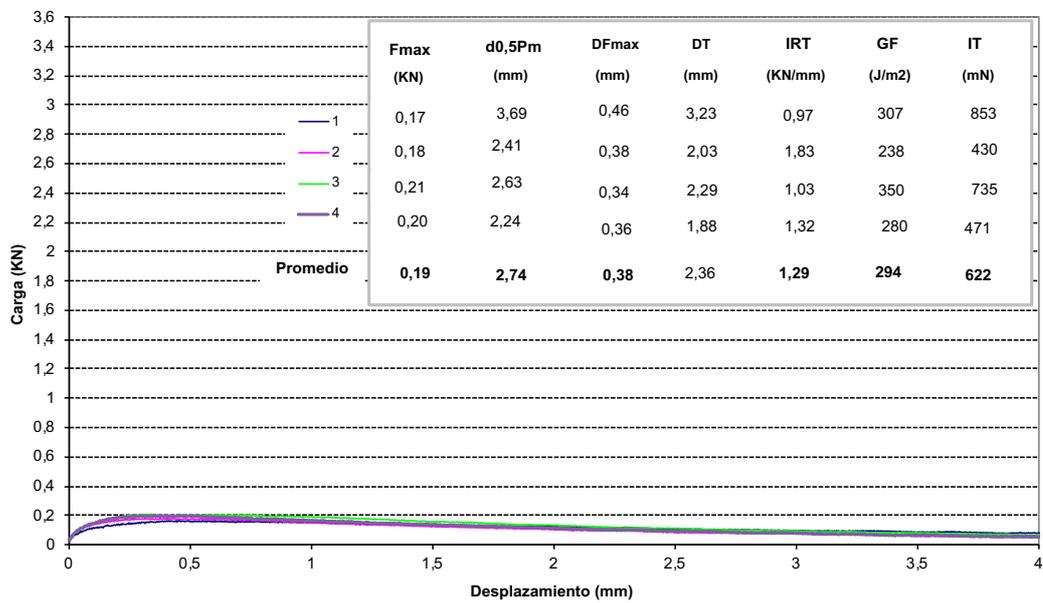


Ensayo Fénix 8B a 20°C 3cm y 1 mm/min.

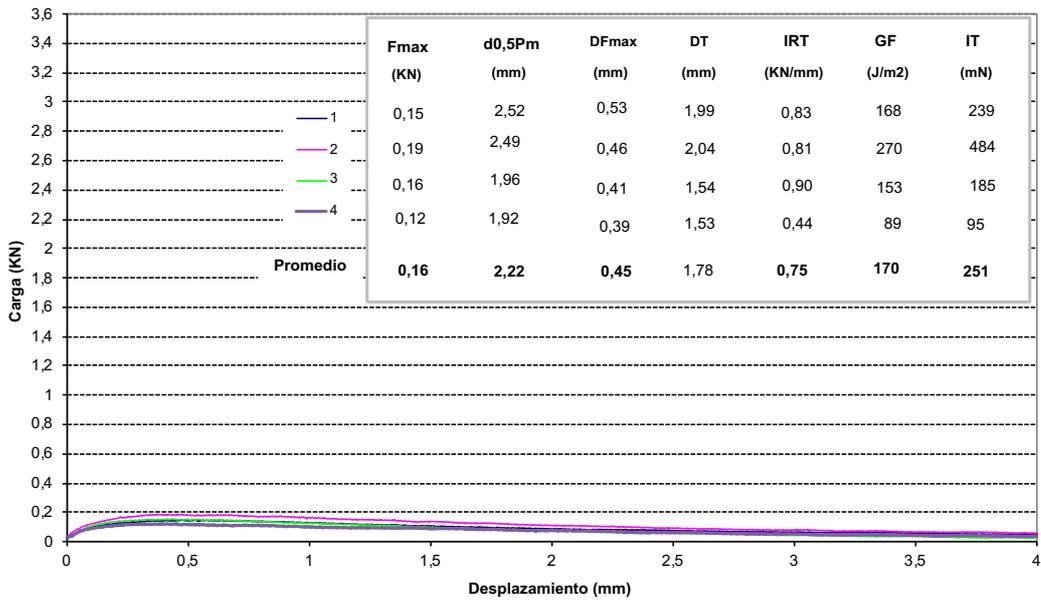
Ensayo Fénix 8B a 20°C 3cm y 1 mm/min.



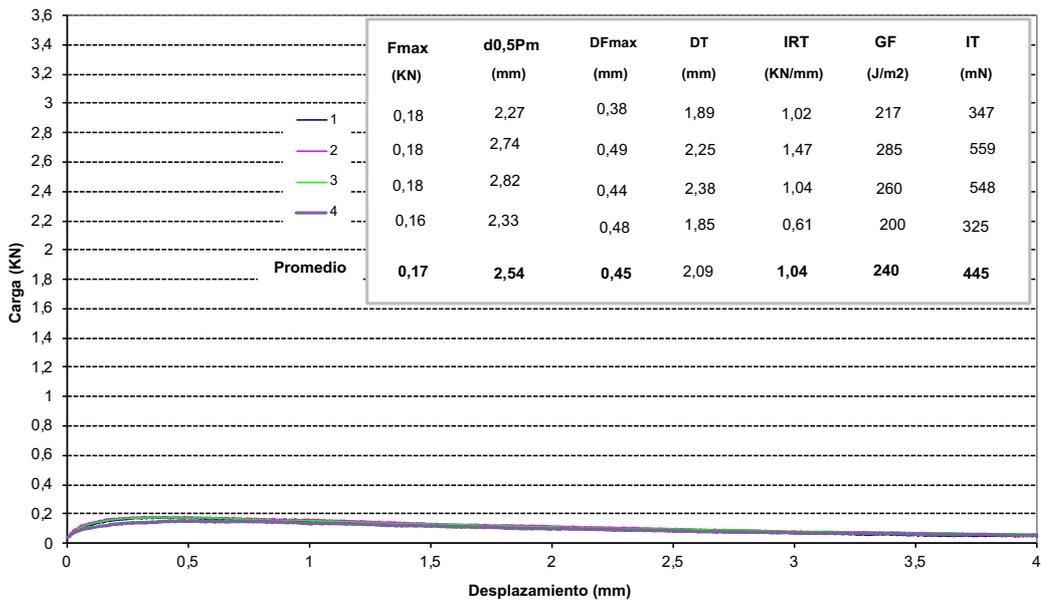
Ensayo Fénix 8B a 20°C 3cm y 1 mm/min.



Ensayo Fénix 8B a 20°C 3cm y 1 mm/min.

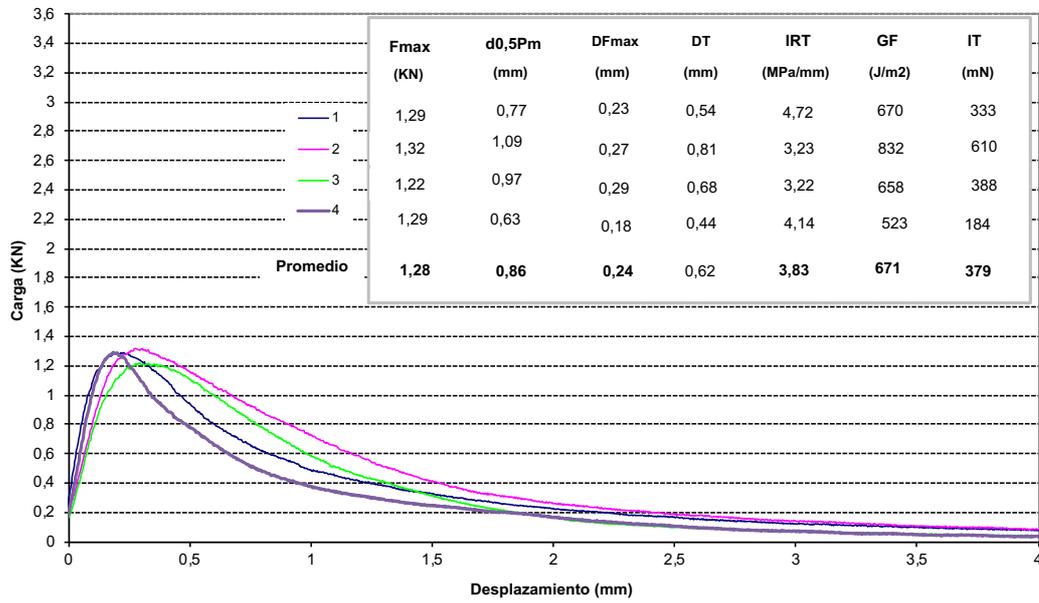


Ensayo Fénix 8B a 20°C 3cm y 1 mm/min.

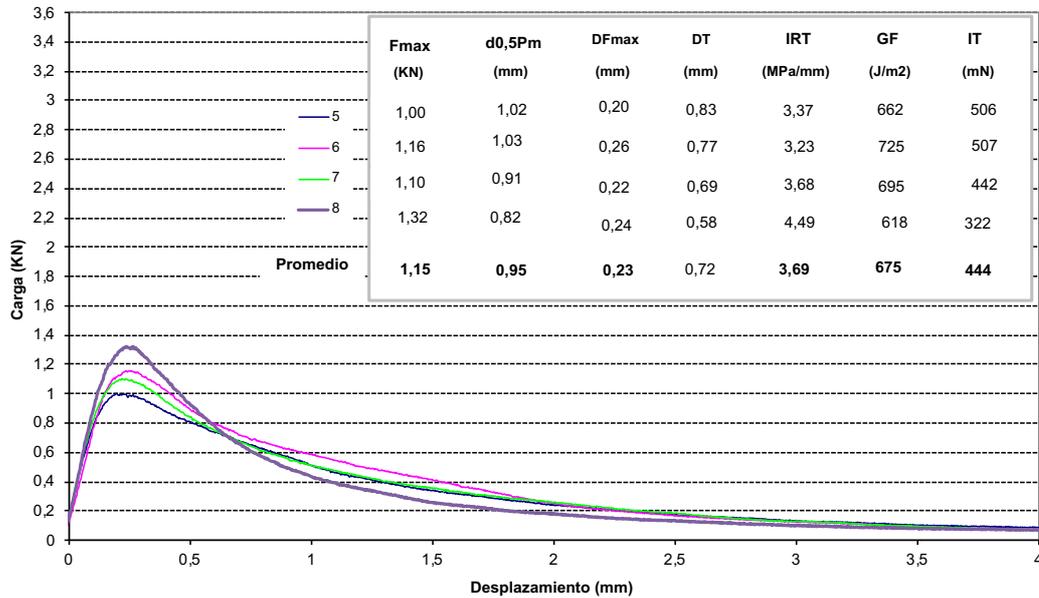


Ensayo Fénix 8B a 5°C 5cm y 1 mm/min.

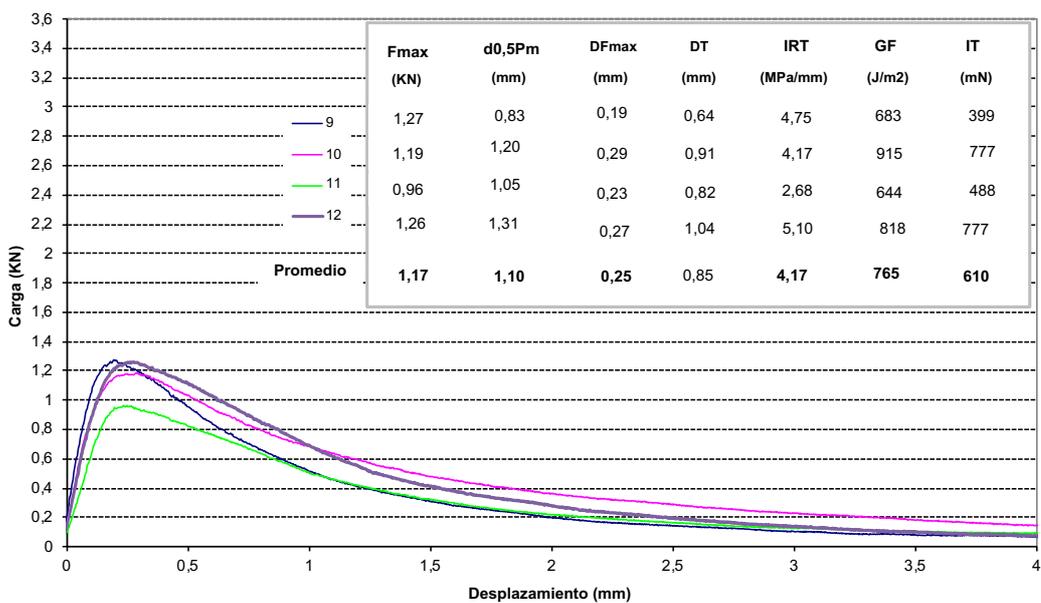
Ensayo Fénix 8B a 5°C 5cm y 1 mm/min.



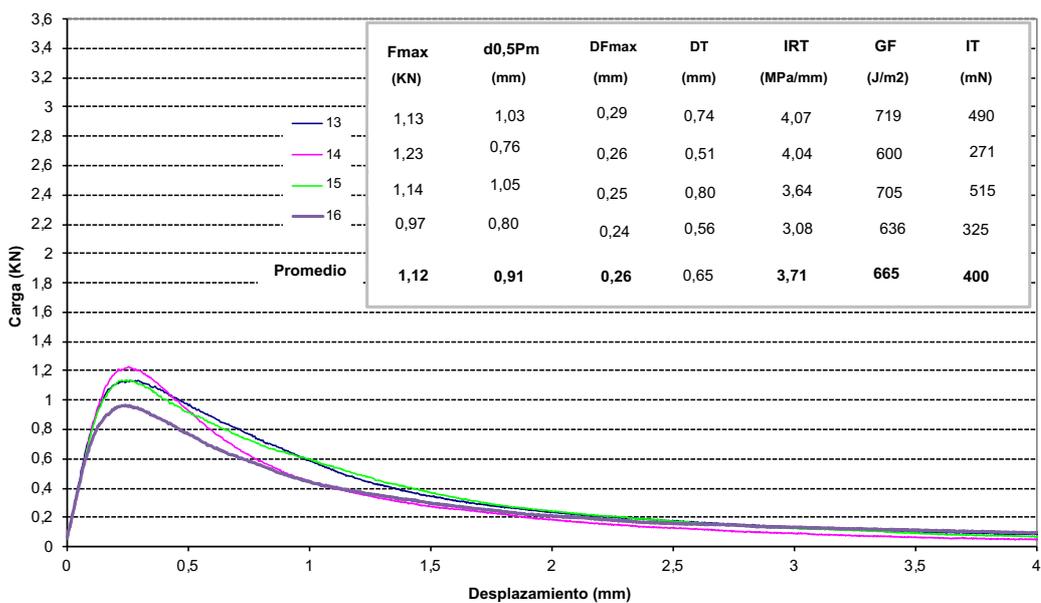
Ensayo Fénix 8B a 5°C 5cm y 1 mm/min.



Ensayo Fénix 8B a 5°C 5cm y 1 mm/min.

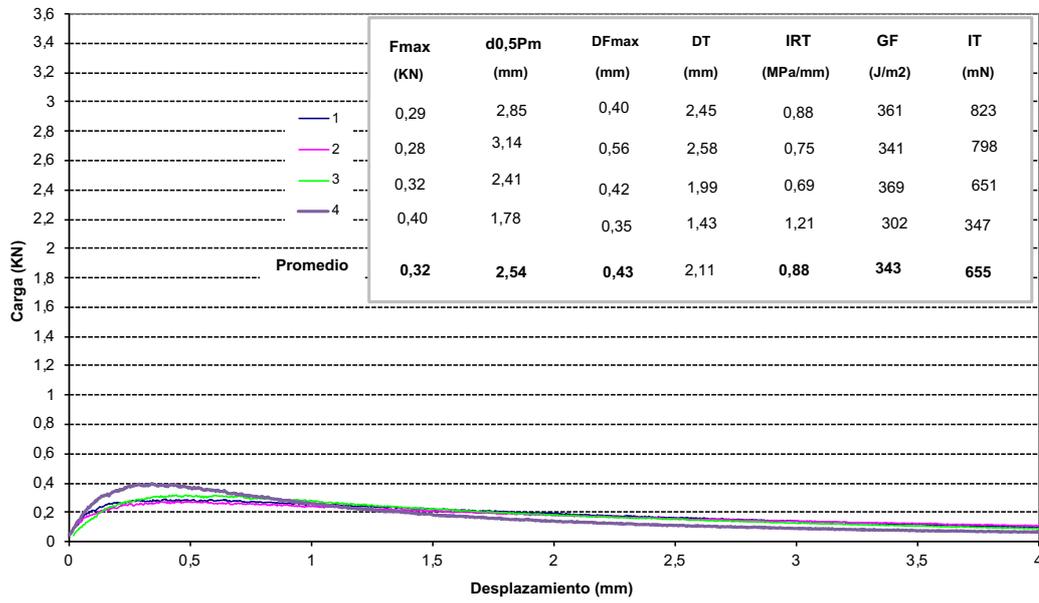


Ensayo Fénix 8B a 5°C 5cm y 1 mm/min.

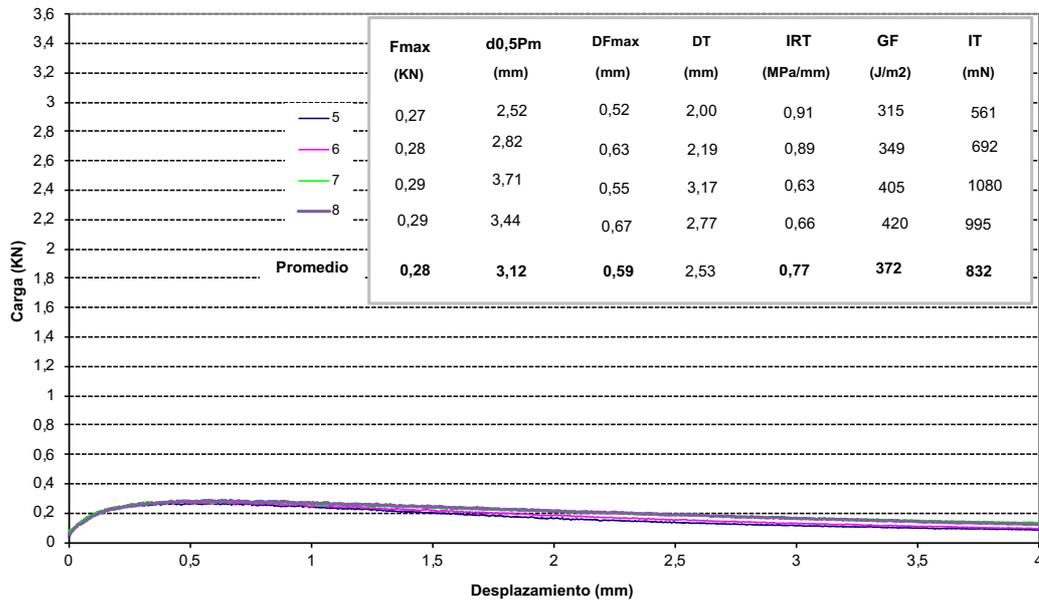


Ensayo Fénix 8B a 20°C 5cm y 1 mm/min.

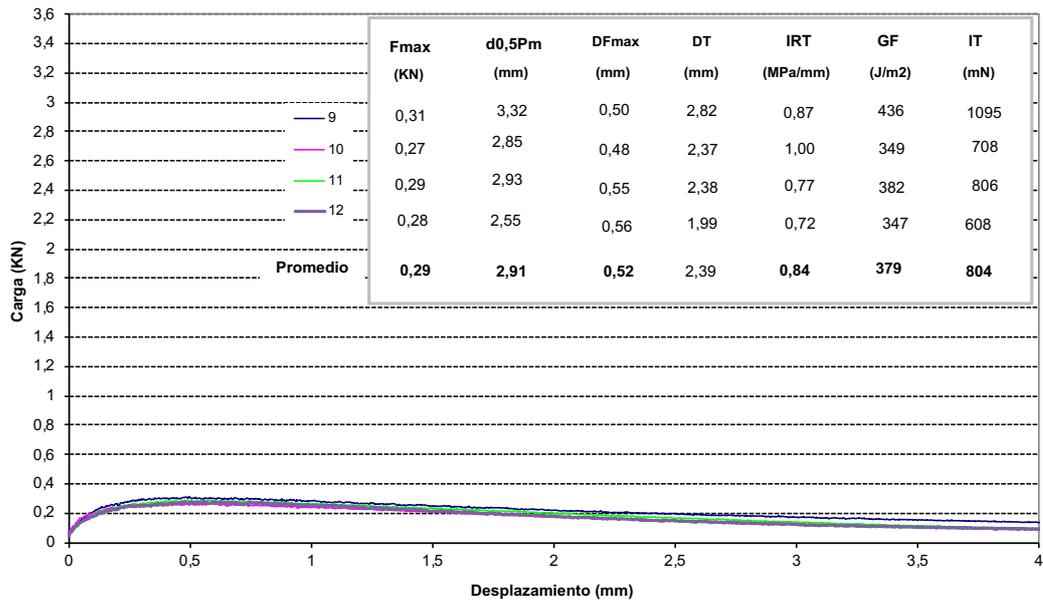
Ensayo Fénix 8B a 20°C 5cm y 1 mm/min.



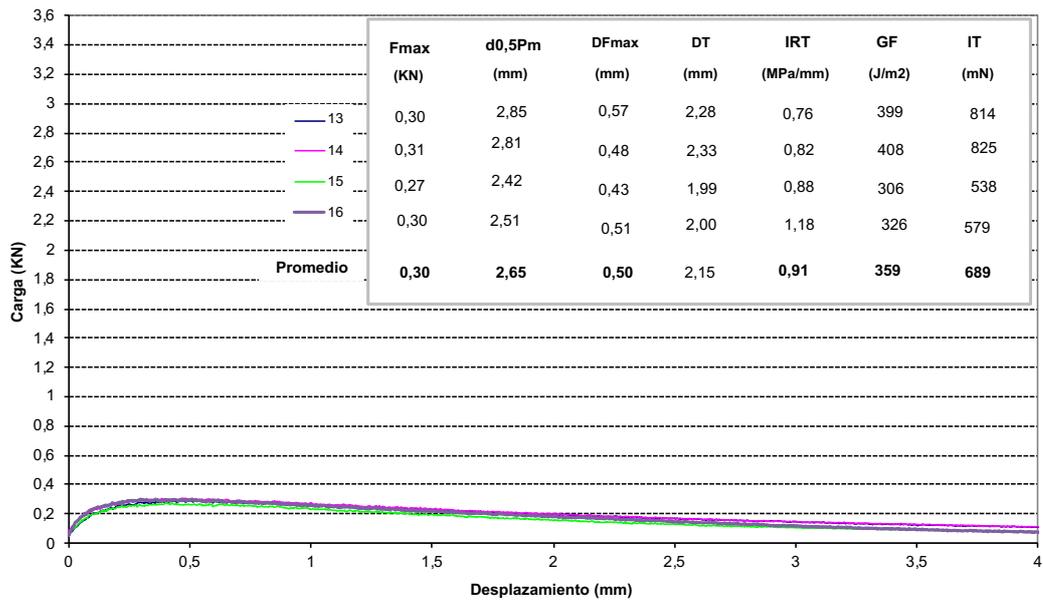
Ensayo Fénix 8B a 20°C 5cm y 1 mm/min.



Ensayo Fénix 8B a 20°C 5cm y 1 mm/min.

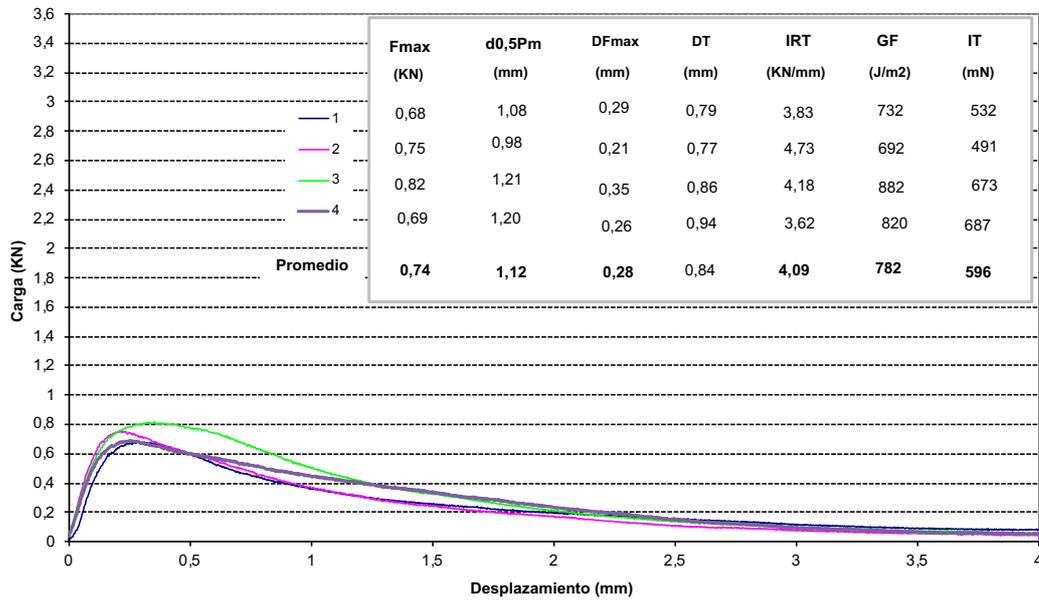


Ensayo Fénix 8B a 20°C 5cm y 1 mm/min.

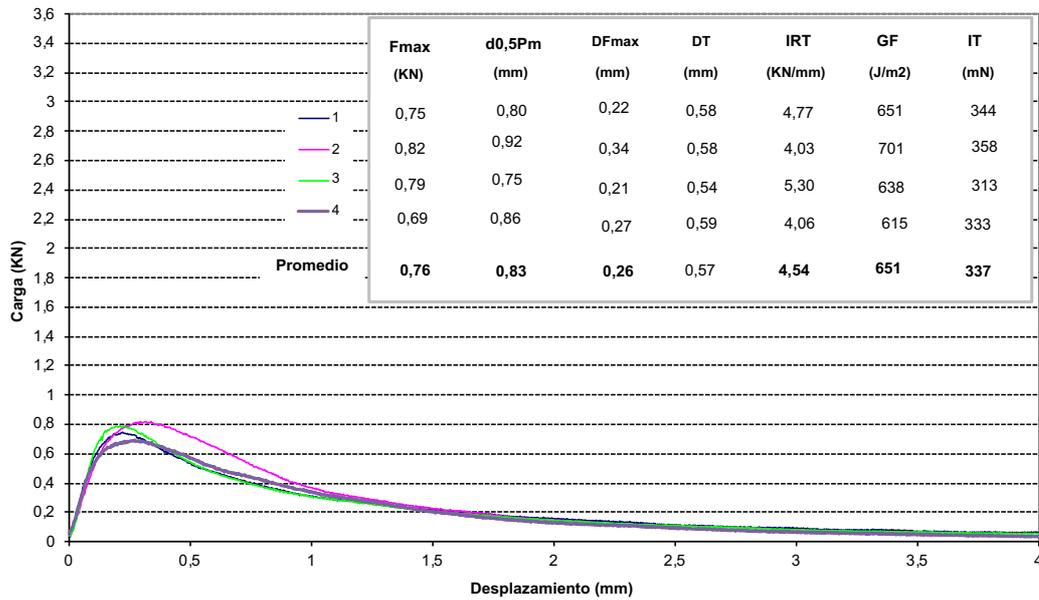


Ensayo Fénix 11B a 5°C 3cm y 1 mm/min.

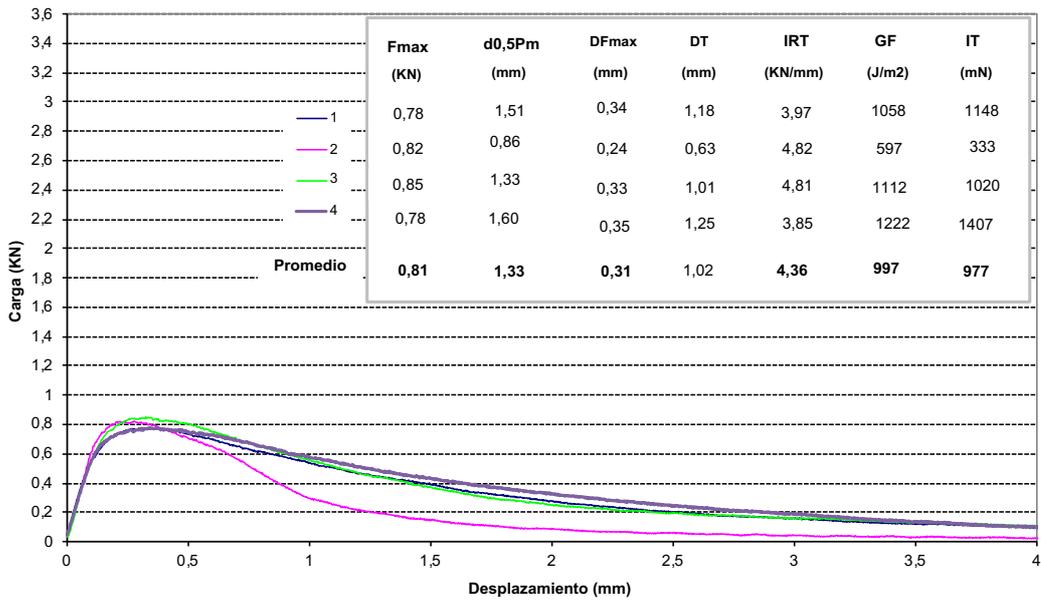
Ensayo Fénix 11B a 5°C 3cm y 1 mm/min.



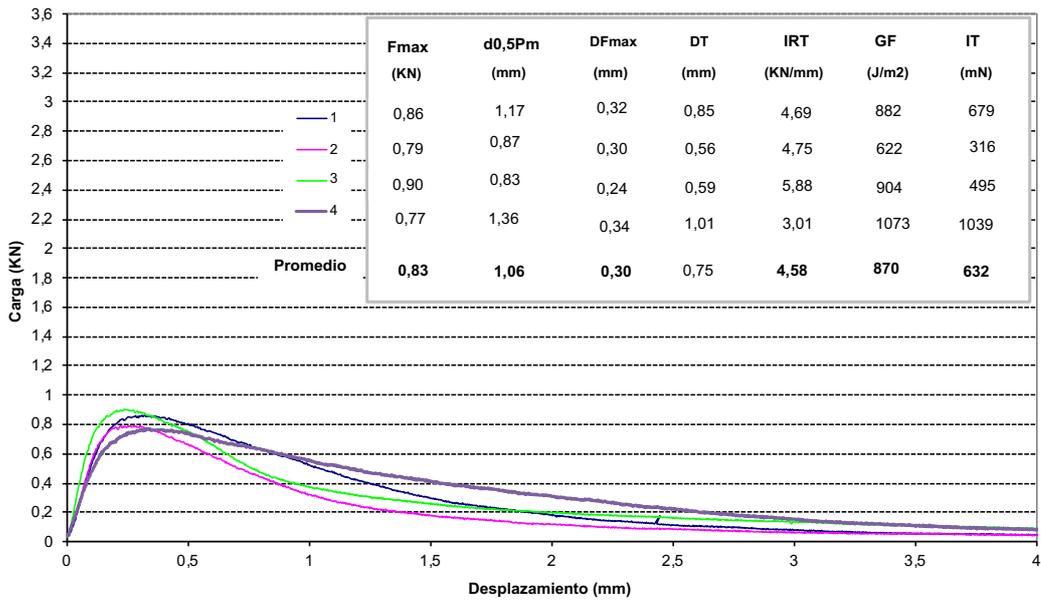
Ensayo Fénix 11B a 5°C 3cm y 1 mm/min.



Ensayo Fénix 11B a 5°C 3cm y 1 mm/min.

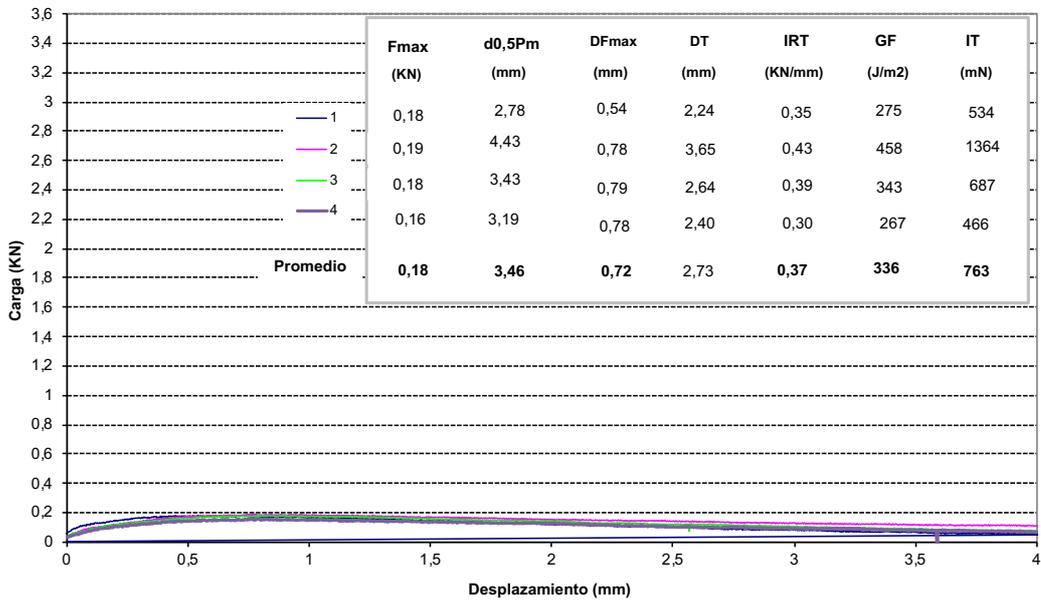


Ensayo Fénix 11B a 5°C 3cm y 1 mm/min.

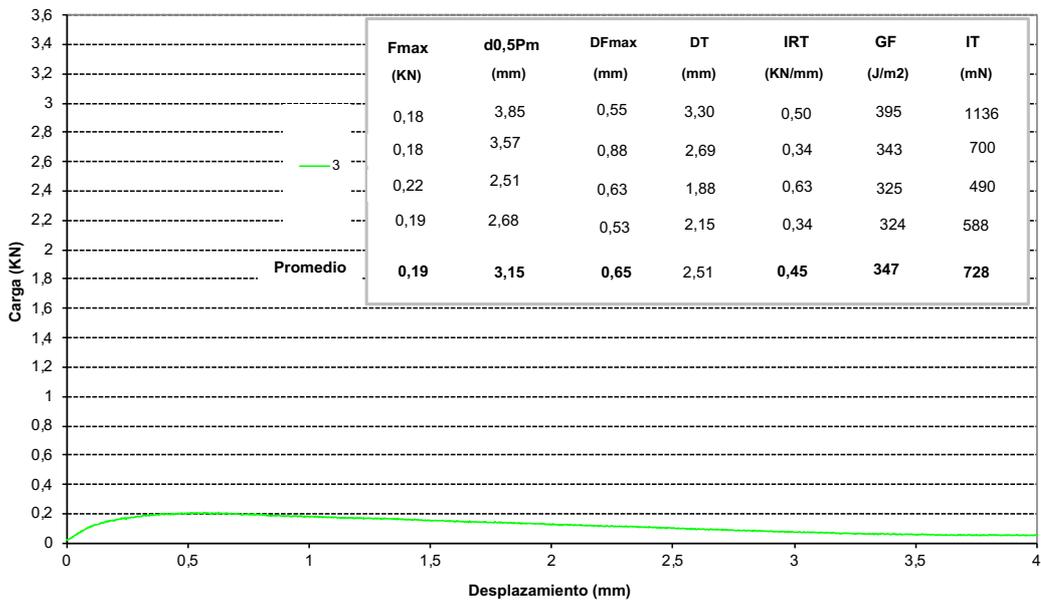


Ensayo Fénix 11B a 20°C 3cm y 1 mm/min.

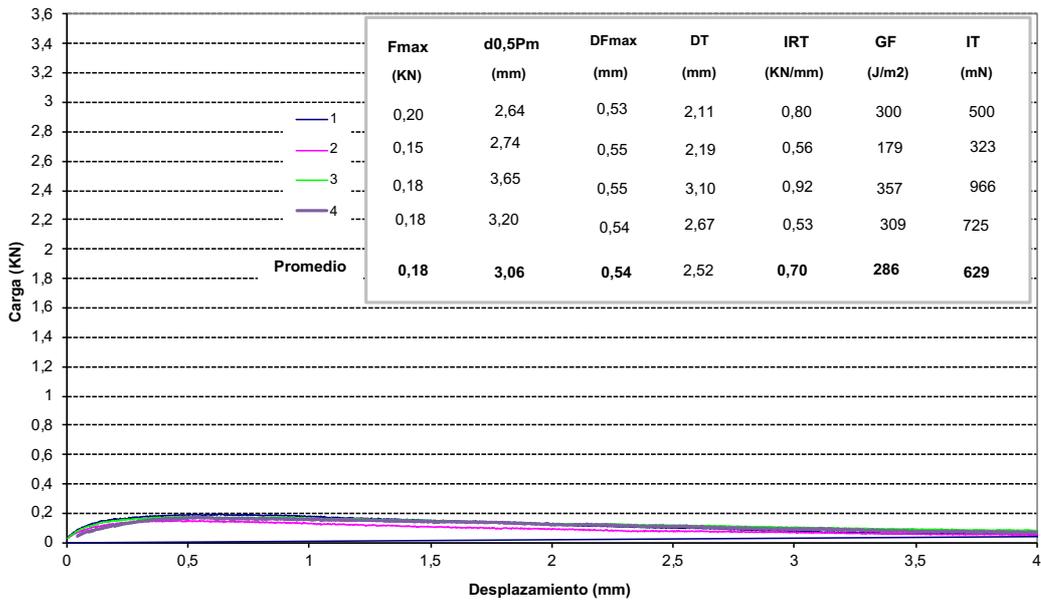
Ensayo Fénix 11B a 20°C 3cm y 1 mm/min.



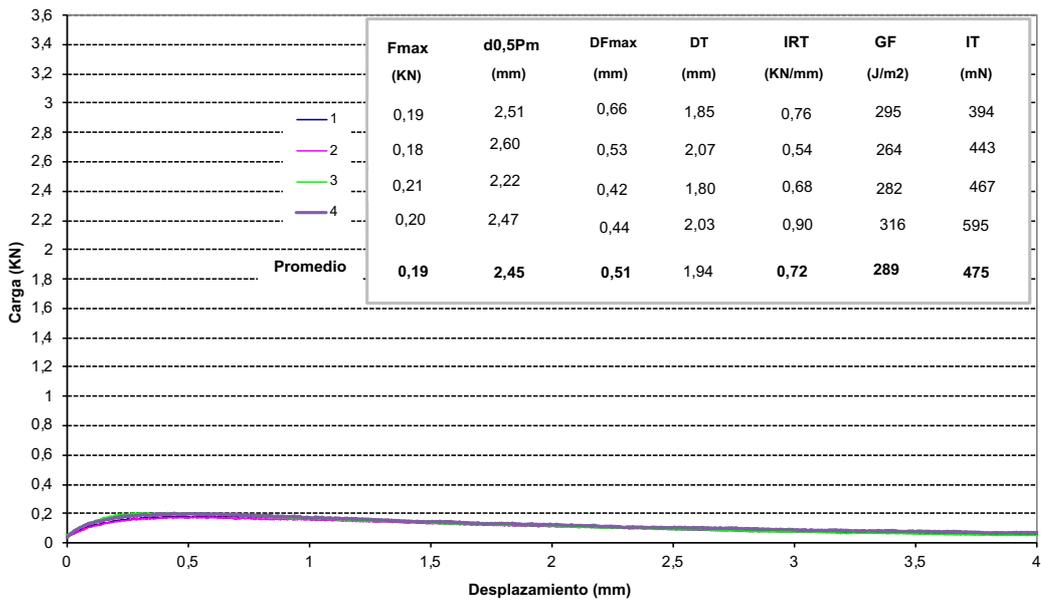
Ensayo Fénix 11B a 20°C 3cm y 1 mm/min,



Ensayo Fénix 11B a 20°C 3cm y 1 mm/min.

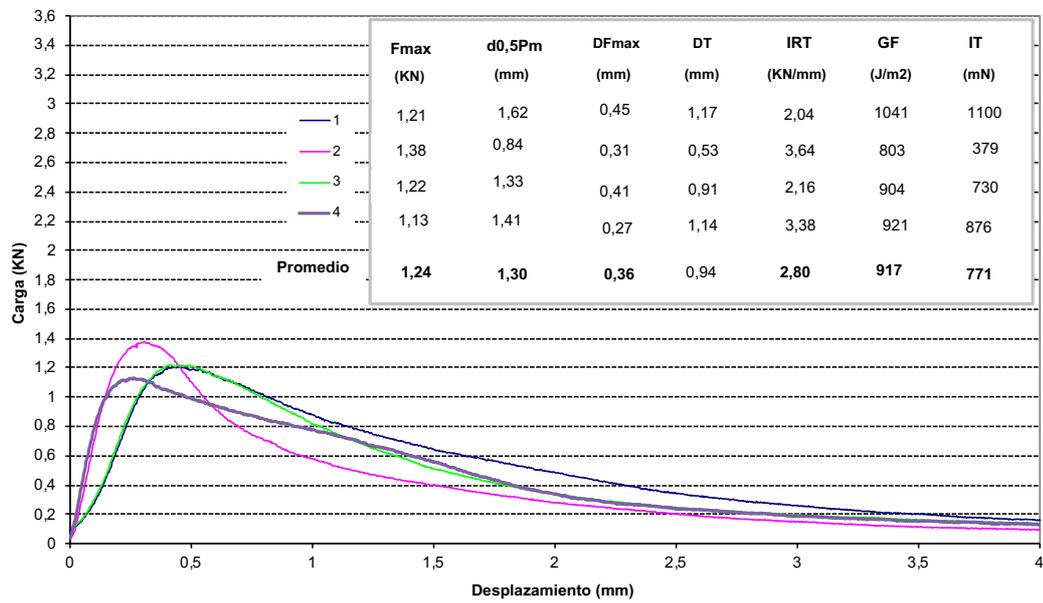


Ensayo Fénix 11B a 20°C 3cm y 1 mm/min.

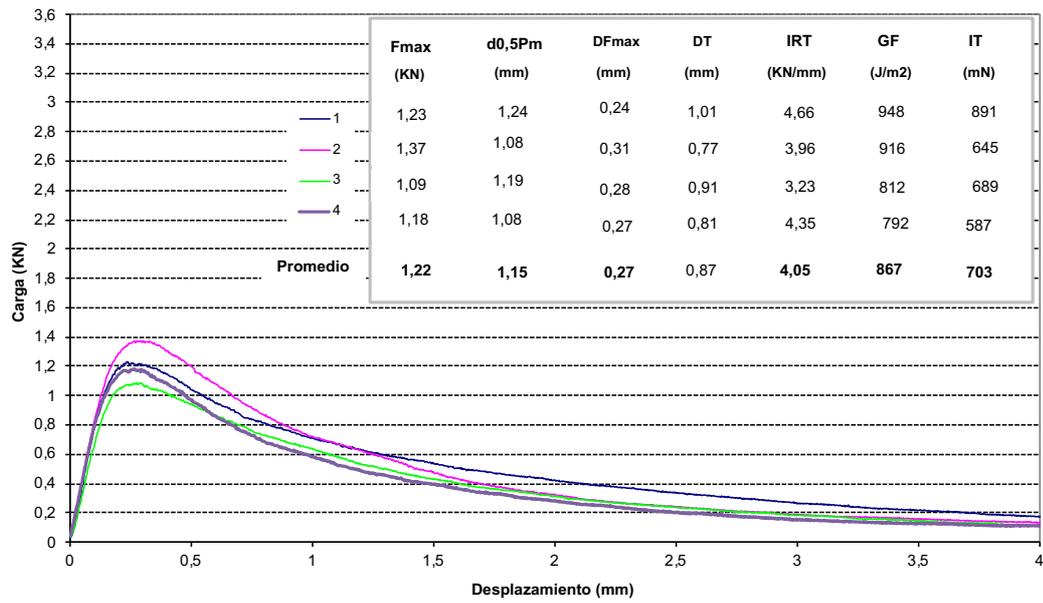


Ensayo Fénix 11B a 5°C 5cm y 1 mm/min.

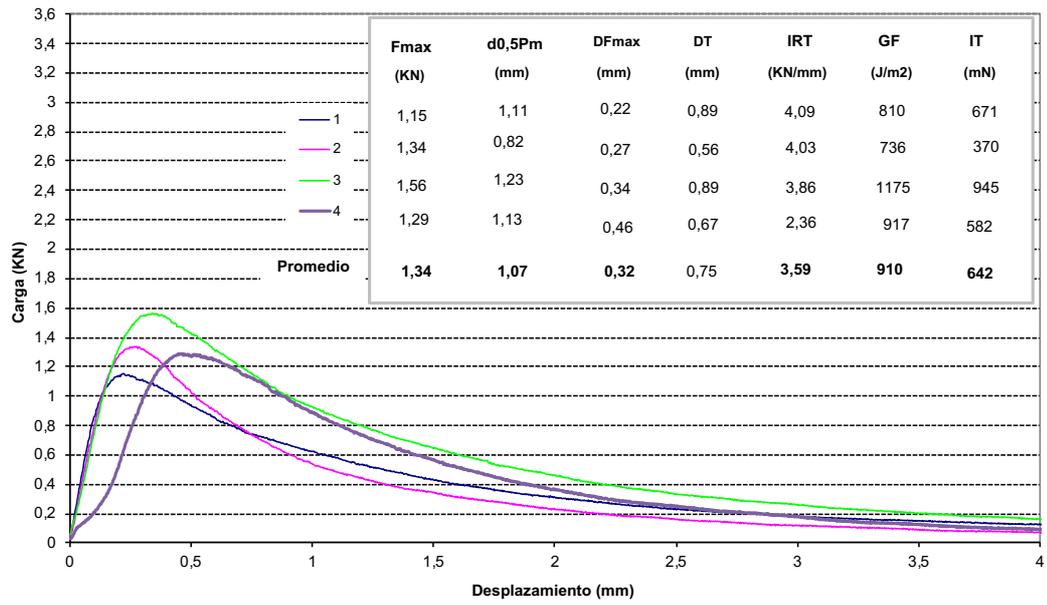
Ensayo Fénix 11B a 5°C 5cm y 1 mm/min.



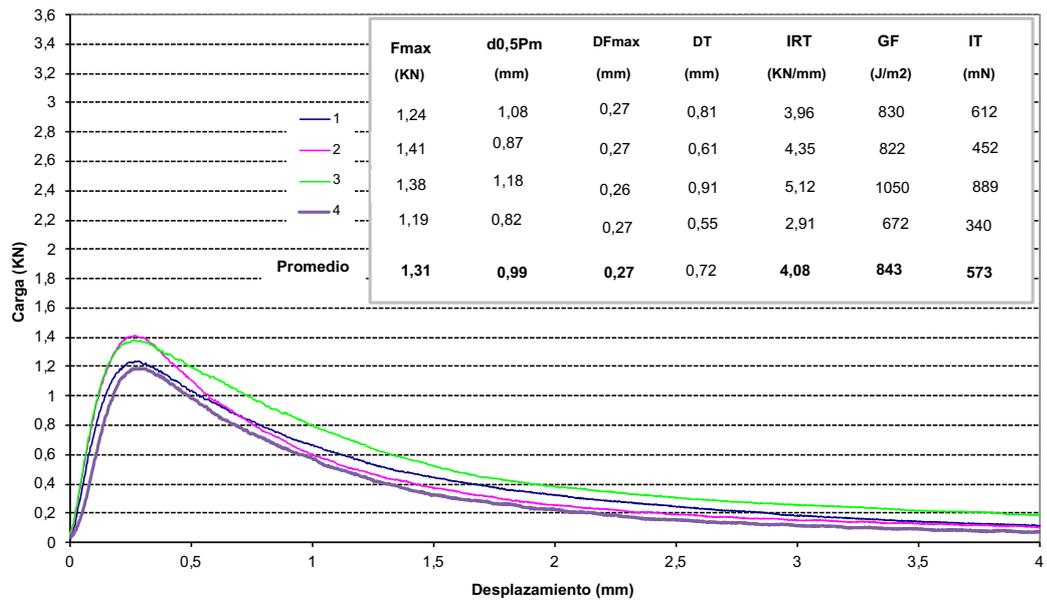
Ensayo Fénix 11B a 5°C 5cm y 1 mm/min.



Ensayo Fénix 11B a 5°C 5cm y 1 mm/min.

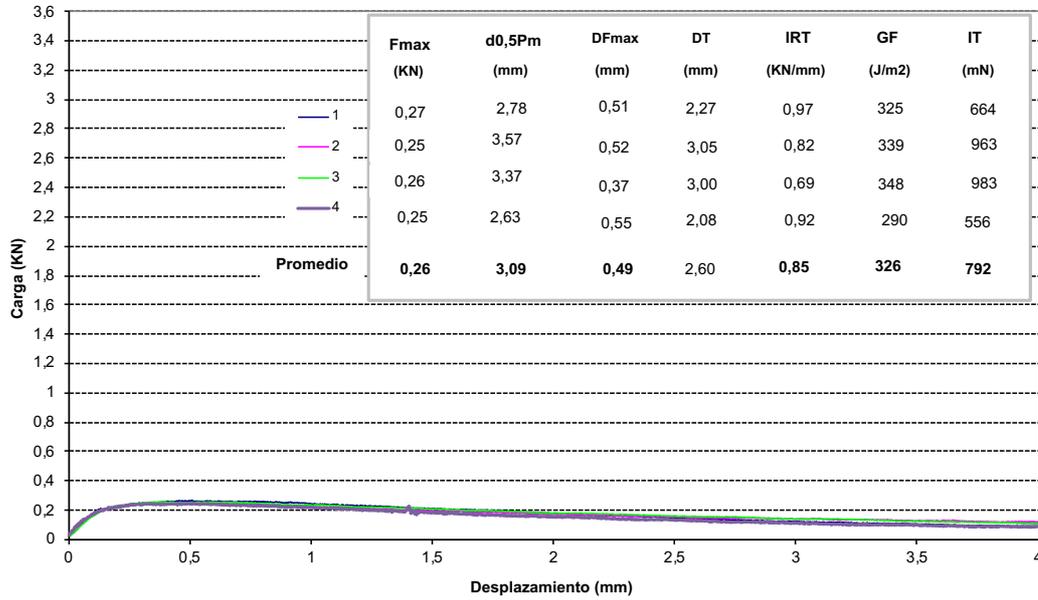


Ensayo Fénix 11B a 5°C 5cm y 1 mm/min.

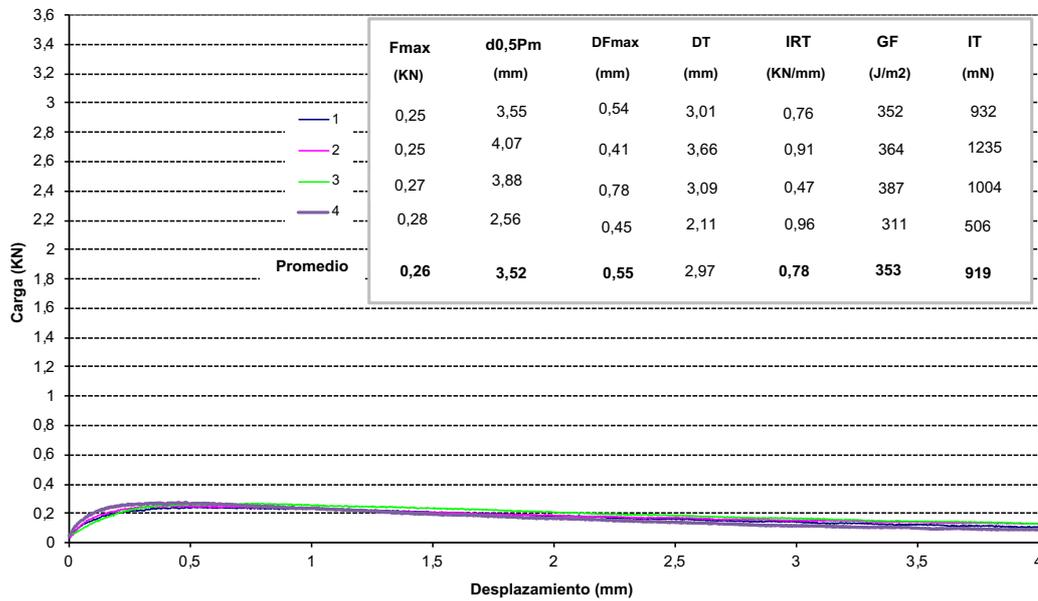


Ensayo Fénix 11B a 20°C 5cm y 1 mm/min.

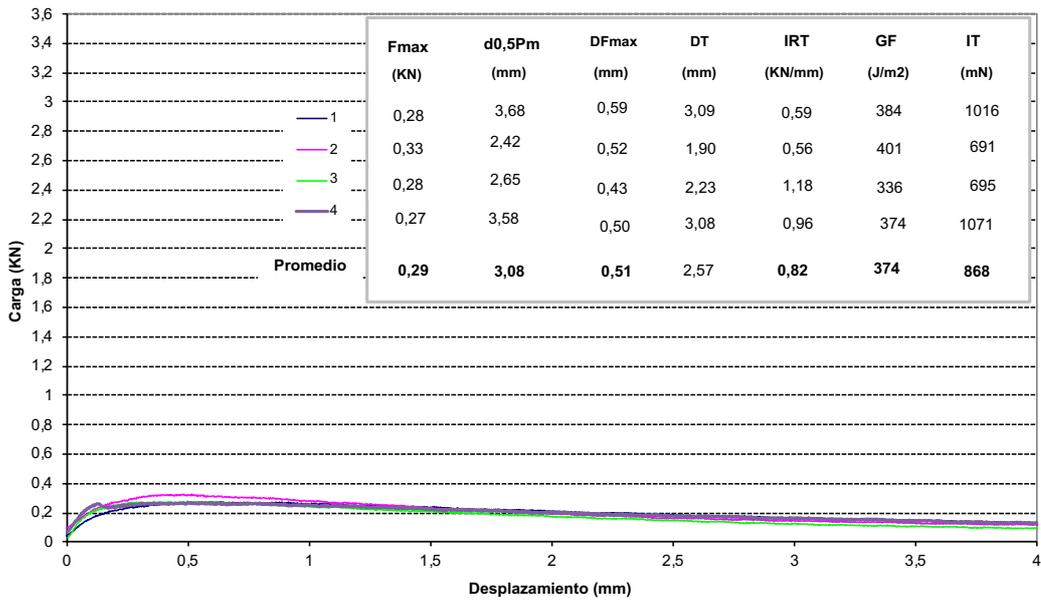
Ensayo Fénix 11B a 20°C 5cm y 1 mm/min.



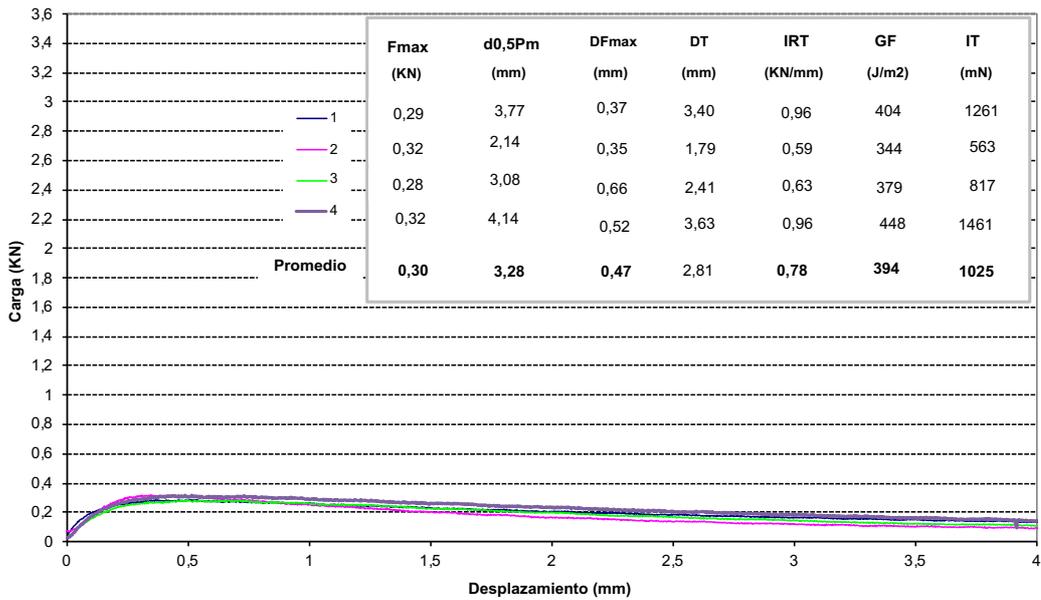
Ensayo Fénix 11B a 20°C 5cm y 1 mm/min.



Ensayo Fénix 11B a 20°C 5cm y 1 mm/min.



Ensayo Fénix 11B a 20°C 5cm y 1 mm/min.



ANEJO 3

Tablas Resumen

En el anejo 3, se presentan las tablas resumen de los resultados obtenidos en el ensayo fénix, a distintas temperaturas, distintas mezclas y distintas alturas de probetas. Como también el contenido de huecos, y los estadísticos básicos.

BBTM 8B 4,75% 20°C

5cm

Probeta		Huecos (%)	Índice Rigidez a Tracción IRT (MPa/mm)	Energía de Fractura GF (J/m ²)	Despl. al 50% carga postp d0,5Pm (mm)
1		15,91	0,88	361,49	2,85
2		15,47	0,75	341,44	3,14
3		15,76	0,69	368,80	2,41
5		15,31	0,91	315,16	2,52
6		16,05	0,89	348,88	2,82
7		15,89	0,63	404,57	3,71
8		14,84	0,66	419,86	3,44
9		15,13	0,87	436,40	3,32
10		16,00	1,00	349,14	2,85
11		16,25	0,77	382,45	2,93
12		14,94	0,72	346,64	2,55
13		14,81	0,76	398,53	2,85
14		15,65	0,82	407,60	2,81
15		15,24	0,88	305,67	2,42
16		15,33	1,18	325,93	2,51
BBTM 8B 4,75% 20°C 5cm					
Media		15,50	0,83	367,50	2,87
Desvest (Sr)		0,47	0,14	39,45	0,39
COV (%)		3,00	17,14	10,73	13,43
Intervalos de confianza 9% para la Media	Int. Inf. M	15,25	0,75	345,66	2,66
	Int. Sup. M	15,76	0,91	389,35	3,09
Límite de repetibilidad (r)		1,30	0,40	110,45	1,08

BBTM 8B 4,75% 5°C
5cm

Probeta		Huecos (%)	Índice Rigidez a Tracción IRT (MPa/mm)	Energía de Fractura GF (J/m2)	Despl. al 50% carga postp d0,5Pm (mm)
1		15,91	4,72	670,36	0,77
2		15,47	3,23	832,26	1,09
3		15,76	3,22	658,38	0,97
4		16,40	4,14	523,07	0,63
5		15,31	3,37	662,48	1,02
6		16,05	3,23	725,36	1,03
7		15,89	3,68	695,46	0,91
8		14,84	4,49	618,04	0,82
9		15,13	4,75	682,92	0,83
10		16,00	4,17	915,45	1,20
11		16,25	2,68	643,65	1,05
12		14,94	5,10	817,79	1,31
13		14,81	4,07	718,51	1,03
14		15,65	4,04	599,69	0,76
15		15,24	3,64	704,74	1,05
16		15,3	3,08	636,33	0,80
BBTM 8B 4,75% 5°C 5cm					
Media		15,56	3,85	694,03	0,96
Desvest (Sr)		0,50	0,69	95,87	0,18
COV (%)		3,23	18,02	13,81	18,65
Intervalos de confianza 9% para la Media	Int. Inf. M	15,29	3,48	642,94	0,86
	Int. Sup. M	15,63	4,22	745,11	1,05
Límite de repetibilidad (r)		1,41	1,94	268,44	0,50

BBTM 8B 4,75% 20°C
3cm

Probeta		Huecos (%)	Índice Rigidez a Tracción IRT (MPa/mm)	Energía de Fractura GF (J/m2)	Despl. al 50% carga postp d0,5Pm (mm)
1		15,5	1,00	256,00	2,69
2		15,4	0,53	195,00	3,05
4		15,0	0,64	268,00	2,35
6		14,7	1,83	238,00	2,41
7		14,8	1,03	350,00	2,63
8		13,5	1,32	280,00	2,24
9		15,1	1,02	217,00	2,27
10		14,5	1,47	285,00	2,74
11		14,4	1,04	260,00	2,82
12		14,3	0,61	200,00	2,33
13		14,6	0,83	168,00	2,52
14		13,7	0,81	270,00	2,49
15		13,7	0,90	153,00	1,96
16		14,6	0,44	89,00	1,92
BBTM 8B 4,75% 20°C 3cm					
Media		14,55	0,96	230,64	2,46
Desvest (Sr)		0,61	0,38	65,96	0,32
COV (%)		4,16	39,49	28,60	12,86
Intervalos de confianza 9% para la Media	Int. Inf. M	14,20	0,74	192,56	2,28
	Int. Sup. M	14,90	1,18	268,72	2,64
Límite de repetibilidad (r)		1,70	1,06	184,67	0,89

BBTM 8B 4,75% 5°C
3cm

Probeta		Huecos (%)	Índice Rigidez a Tracción IRT (MPa/mm)	Energía de Fractura GF (J/m2)	Despl. al 50% carga postp d0,5Pm (mm)
2		15,44	5,28	545	0,86
3		15,25	6,20	678	0,86
4		14,95	3,92	762	1,03
5		13,94	2,62	629	0,95
6		14,74	1,64	863	1,48
7		14,80	2,07	622	1,05
8		13,48	2,72	768	1,26
9		15,08	3,78	848	1,22
10		14,51	3,76	711	0,85
11		14,38	3,87	850	1,32
12		14,34	2,71	816	1,12
13		14,57	2,54	669	0,92
14		13,73	3,50	824	1,03
15		13,71	4,52	514	0,74
16		14,55	3,77	892	1,44
BBTM 8B 4,75% 5°C 3cm					
Media		14,50	3,53	732,73	1,08
Desvest (Sr)		0,58	1,21	119,64	0,23
COV (%)		4,02	34,25	16,33	21,00
Intervalos de confianza 9% para la Media	Int. Inf. M	14,18	2,86	666,48	0,95
	Int. Sup. M	14,82	4,20	798,99	1,20
Límite de repetibilidad (r)		1,63	3,38	334,98	0,63

BBTM 11B 4,75% 20°C
5cm

Probeta		Huecos (%)	Índice Rigidez a Tracción IRT (MPa/mm)	Energía de Fractura GF (J/m2)	Despl. al 50% carga postp d0,5Pm (mm)
1		18,05	0,97	324,72	2,78
2		18,00	0,82	339,29	3,57
3		18,65	0,69	348,34	3,37
4		17,75	0,92	289,95	2,63
5		18,73	0,76	352,12	3,55
6		17,21	0,91	364,05	4,07
7		17,09	0,47	386,96	3,88
8		17,73	0,96	310,59	2,56
9		18,01	0,59	383,94	3,68
10		16,32	0,56	401,10	2,42
11		17,60	1,18	335,62	2,65
12		17,77	0,96	373,79	3,58
13		18,37	0,96	403,69	3,77
14		18,07	0,59	343,54	2,14
15		17,01	0,63	378,98	3,08
16		17,6	0,96	447,98	4,14
BBTM 11B 4,75% 20°C 5cm					
Media		17,75	0,81	361,54	3,24
Desvest (Sr)		0,63	0,20	39,37	0,63
COV (%)		3,52	24,82	10,89	19,58
Intervalos de confianza 9% para la Media	Int. Inf. M	17,42	0,70	340,56	2,90
	Int. Sup. M	18,08	0,91	382,52	3,58
Límite de repetibilidad (r)		1,75	0,56	110,24	1,78

BBTM 11B 4,75% 5°C
5cm

Probeta		Huecos (%)	Índice Rigidez a Tracción IRT (MPa/mm)	Energía de Fractura GF (J/m ²)	Despl. al 50% carga postp d0,5Pm (mm)
1		18,05	2,04	1041,30	1,62
2		18,00	3,64	802,77	0,84
3		18,65	2,16	903,70	1,33
4		17,75	3,38	920,63	1,41
5		18,73	4,66	947,91	1,24
6		17,21	3,96	915,89	1,08
7		17,09	3,23	811,97	1,19
8		17,73	4,35	791,73	1,08
9		18,01	4,09	809,52	1,11
10		16,32	4,03	736,15	0,82
11		17,60	3,86	1175,44	1,23
12		17,77	2,36	917,30	1,13
13		18,37	3,96	829,76	1,08
14		18,07	4,35	821,80	0,87
15		17,01	5,12	1050,13	1,18
16		17,6	2,91	672,23	0,82
BBTM 11B 4,75% 5°C 5cm					
Media		17,75	3,63	884,27	1,13
Desvest (Sr)		0,63	0,89	127,69	0,22
COV (%)		3,52	24,62	14,44	19,59
Intervalos de confianza 9% para la Media	Int. Inf. M	17,42	3,23	816,22	1,01
	Int. Sup. M	18,08	4,27	952,31	1,24
Límite de repetibilidad (r)		1,75	2,50	357,54	0,62

BBTM 11B 4,75% 20°C
3cm

Probeta		Huecos (%)	Índice Rigidez a Tracción IRT (MPa/mm)	Energía de Fractura GF (J/m ²)	Despl. al 50% carga postp d0,5Pm (mm)
1		17,66	0,35	275,32	2,78
2		16,86	0,43	457,99	4,43
3		18,00	0,39	342,84	3,43
4		15,38	0,30	267,03	3,19
5		16,22	0,50	394,80	3,85
6		17,23	0,34	342,55	3,57
7		18,11	0,63	325,35	2,51
8		19,47	0,34	324,00	2,68
9		15,80	0,80	299,50	2,64
10		17,91	0,56	178,64	2,74
11		18,14	0,92	356,78	3,65
12		13,32	0,53	308,72	3,20
13		16,58	0,76	294,67	2,51
14		18,00	0,54	263,61	2,60
15		17,68	0,68	282,48	2,22
16		14,7	0,90	315,58	2,47
BBTM 11B 4,75% 20°C 3cm					
Media		16,94	0,56	314,37	3,03
Desvest (Sr)		1,55	0,20	61,72	0,61
COV (%)		9,12	36,49	19,63	20,25
Intervalos de confianza 9% para la Media	Int. Inf. M	16,12	0,45	281,48	2,70
	Int. Sup. M	17,77	0,67	347,25	3,36
Límite de repetibilidad (r)		4,33	0,57	172,81	1,72

BBTM 11B 4,75% 5°C
3cm

Probeta		Huecos (%)	Índice Rigidez a Tracción IRT (MPa/mm)	Energía de Fractura GF (J/m2)	Despl. al 50% carga postp d0,5Pm (mm)
1		17,66	3,83	731,94	1,08
2		16,86	4,73	691,60	0,98
3		18,00	4,18	882,41	1,21
4		15,38	3,62	820,47	1,20
5		16,22	4,77	650,73	0,80
6		17,23	4,03	700,88	0,92
7		18,11	5,30	637,96	0,75
8		19,47	4,06	615,05	0,86
9		15,80	3,97	1057,56	1,51
10		17,91	4,82	597,25	0,86
11		18,14	4,81	1112,15	1,33
12		13,32	3,85	1221,78	1,60
13		16,58	4,69	881,97	1,17
14		18,00	4,75	622,45	0,87
15		17,68	5,88	903,77	0,83
16		14,7	3,01	1073,39	1,36
BBTM 11B 4,75% 5°C 3cm					
Media		16,94	4,39	825,08	1,08
Desvest (Sr)		1,55	0,70	202,09	0,27
COV (%)		9,12	16,04	24,49	24,52
Intervalos de confianza 9% para la Media	Int. Inf. M	16,12	4,02	717,40	0,86
	Int. Sup. M	17,77	4,77	932,77	1,05
Límite de repetibilidad (r)		4,33	1,97	565,86	0,74

ANEJO 4

Test de Grubbs'

En este anejo, se presentan los test de Grubbs para poder identificar los valores atípicos i así descartarlos.

GRUBBS TEST BBTM8B 500 4,75% 5º

Prueba de valores atípicos: %h; Fmax; RT; DFmax; IRT; GF; IT; d0,5Pm

Método

Hipótesis nula	Todos los valores de los datos provienen de la misma población normal
Hipótesis alterna	El valor más pequeño o más grande de los datos es un valor atípico
Nivel de significancia	$\alpha = 0,05$

Prueba de Grubbs

Variable	N	Media	Desv.Est.	Mín.	Máx.	G	P
%h	15	14,498	0,583	13,480	15,440	1,75	1,000
Fmax	15	0,7067	0,0788	0,5500	0,8700	2,07	0,382
RT	15	0,5527	0,0627	0,4300	0,7000	2,35	0,131
DFmax	15	0,3020	0,0683	0,2300	0,4400	2,02	0,453
IRT	15	3,527	1,208	1,645	6,199	2,21	0,230
GF	15	732,7	119,6	514,0	892,0	1,83	0,816
IT	15	530,4	203,6	229,0	889,0	1,76	0,981
d0,5Pm	15	1,0753	0,2259	0,7400	1,4800	1,79	0,904

* **NOTA** * No hay valor atípico en el nivel de significancia de 5%

GRUBBS TEST BBTM8B 500 4,75% 20º

Prueba de valores atípicos: %H; Fmax; RT; DFmax; IRT; GF; IT; d0,5PM

Método

Hipótesis nula	Todos los valores de los datos provienen de la misma población normal
Hipótesis alterna	El valor más pequeño o más grande de los datos es un valor atípico
Nivel de significancia	$\alpha = 0,05$

Prueba de Grubbs

Variable	N	Media	Desv.Est.	Mín.	Máx.	G	P
%H	16	14,559	0,613	13,480	15,470	1,76	1,000
Fmax	16	0,17500	0,02338	0,12000	0,21000	2,35	0,149
RT	16	0,13875	0,01857	0,10000	0,17000	2,09	0,404
DFmax	16	0,4631	0,0983	0,3400	0,7500	2,92	0,006
IRT	16	0,9308	0,3758	0,4354	1,8261	2,38	0,131
GF	16	247,8	80,3	89,0	428,0	2,25	0,228
IT	16	485,7	261,9	95,0	1166,0	2,60	0,047
d0,5PM	16	2,621	0,532	1,920	3,820	2,25	0,221

Valor atípico

Variable	Fila	Valor atípico
DFmax	3	0,75
IT	3	1166,00

Prueba de valores atípicos: %Hu; Fmax2; RT2; DFmax2; ... T2; d0,5PM2

Método

Hipótesis nula	Todos los valores de los datos provienen de la misma población normal
Hipótesis alterna	El valor más pequeño o más grande de los datos es un valor atípico
Nivel de significancia	$\alpha = 0,05$

Prueba de Grubbs

Variable	N	Media	Desv.Est.	Mín.	Máx.	G	P
%Hu	15	14,513	0,605	13,480	15,470	1,71	1,000
Fmax2	15	0,17267	0,02219	0,12000	0,21000	2,37	0,118
RT2	15	0,13733	0,01831	0,10000	0,17000	2,04	0,428
DFmax2	15	0,4440	0,0639	0,3400	0,5400	1,63	1,000
IRT2	15	0,9626	0,3661	0,4354	1,8261	2,36	0,125
GF2	15	235,7	66,5	89,0	350,0	2,21	0,236
IT2	15	440,3	195,5	95,0	853,0	2,11	0,334
d0,5PM2	15	2,541	0,440	1,920	3,690	2,61	0,036

Valor atípico

Variable	Fila	Valor atípico
d0,5PM2	4	3,69

Prueba de valores atípicos: %H3; Fmax3; RT3; DFmax3; ... T3; d0,5pm3

Método

Hipótesis nula	Todos los valores de los datos provienen de la misma población normal
Hipótesis alterna	El valor más pequeño o más grande de los datos es un valor atípico
Nivel de significancia	$\alpha = 0,05$

Prueba de Grubbs

Variable	N	Media	Desv.Est.	Mín.	Máx.	G	P
%H3	14	14,554	0,606	13,480	15,470	1,77	0,876
Fmax3	14	0,17286	0,02301	0,12000	0,21000	2,30	0,141
RT3	14	0,13786	0,01888	0,10000	0,17000	2,00	0,430
DFmax3	14	0,4429	0,0662	0,3400	0,5400	1,55	1,000
IRT3	14	0,962	0,380	0,435	1,826	2,27	0,155
GF3	14	230,6	66,0	89,0	350,0	2,15	0,259
IT3	14	410,9	164,7	95,0	735,0	1,97	0,485
d0,5pm3	14	2,4586	0,3162	1,9200	3,0500	1,87	0,659

*** NOTA * No hay valor atípico en el nivel de significancia de 5%**

GRUBBS TEST BBTM8B 800 4,75% 5º

Prueba de valores atípicos: %H; Fmáx; RT; DFmáx; IRT; GF; IT; d0,5Pm
Método

Hipótesis nula Todos los valores de los datos provienen de la misma población normal

Hipótesis alterna El valor más pequeño o más grande de los datos es un valor atípico

Nivel de significancia $\alpha = 0,05$

Prueba de Grubbs

Variable	N	Media	Desv.Est.	Mín.	Máx.	G	P
%H	16	15,561	0,503	14,807	16,404	1,68	1,000
Fmáx	16	1,1788	0,1204	0,9647	1,3236	1,78	1,000
RT	16	0,5804	0,0560	0,4784	0,6537	1,82	0,900
DFmáx	16	0,24500	0,03486	0,18484	0,29351	1,73	1,000
IRT	16	3,851	0,694	2,680	5,099	1,80	0,962
GF	16	694,0	95,9	523,1	915,4	2,31	0,177
IT	16	458,5	164,8	184,1	777,5	1,94	0,651
d0,5Pm	16	0,9553	0,1781	0,6285	1,3105	1,99	0,545

* NOTA * No hay valor atípico en el nivel de significancia de 5%

GRUBBS TEST BBTM8B 800 4,75% 20º

Prueba de valores atípicos: %H; Fmáx; RT; DFmáx; IRT; GF; IT; d0,5Pm

Método

Hipótesis nula Todos los valores de los datos provienen de la misma población normal

Hipótesis alterna El valor más pequeño o más grande de los datos es un valor atípico

Nivel de significancia $\alpha = 0,05$

Prueba de Grubbs

Variable	N	Media	Desv.Est.	Mín.	Máx.	G	P
%H	16	15,561	0,503	14,807	16,404	1,68	1,000
Fmáx	16	0,29703	0,03054	0,27115	0,39721	3,28	0,000
RT	16	0,14674	0,01526	0,13326	0,19490	3,16	0,001
DFmáx	16	0,5105	0,0846	0,3465	0,6682	1,94	0,648
IRT	16	0,8511	0,1666	0,6300	1,2069	2,14	0,341
GF	16	363,4	41,5	302,0	436,4	1,76	1,000
IT	16	745,1	202,4	347,5	1095,1	1,96	0,596
d0,5Pm	16	2,806	0,463	1,776	3,711	2,22	0,248

Valor atípico

Variable	Fila	Valor atípico
Fmáx	4	0,397208
RT	4	0,194897

Prueba de valores atípicos: %H1; Fmáx1; RT1; DFmáx1; ... 1; IT1; d0,5Pm1

Método

Hipótesis nula Todos los valores de los datos provienen de la misma población normal

Hipótesis alterna El valor más pequeño o más grande de los datos es un valor atípico

Nivel de significancia $\alpha = 0,05$

Prueba de Grubbs

Variable	N	Media	Desv.Est.	Mín.	Máx.	G	P
%H1	15	15,505	0,466	14,807	16,252	1,60	1,000
Fmáx1	15	0,29035	0,01531	0,27115	0,31954	1,91	0,649
RT1	15	0,14353	0,00853	0,13326	0,15948	1,87	0,725
DFmáx1	15	0,5214	0,0750	0,4017	0,6682	1,96	0,555
IRT1	15	0,8274	0,1418	0,6300	1,1801	2,49	0,068
GF1	15	367,5	39,4	305,7	436,4	1,75	1,000
IT1	15	771,6	178,5	538,4	1095,1	1,81	0,852
d0,5Pm1	15	2,8747	0,3860	2,4072	3,7111	2,17	0,273

* NOTA * No hay valor atípico en el nivel de significancia de 5%

GRUBBS TEST BBTM11B 500 4,75% 5º

Prueba de valores atípicos: %H; Fmax; RT; DFmax; IRT; GF; IT; d0,5Pm

Método

Hipótesis nula	Todos los valores de los datos provienen de la misma población normal
Hipótesis alterna	El valor más pequeño o más grande de los datos es un valor atípico
Nivel de significancia	$\alpha = 0,05$

Prueba de Grubbs

Variable	N	Media	Desv.Est.	Mín.	Máx.	G	P
%H	16	16,943	1,545	13,315	19,466	2,35	0,152
Fmax	16	0,7852	0,0629	0,6811	0,9039	1,89	0,749
RT	16	0,6215	0,0519	0,5223	0,7024	1,91	0,696
DFmax	16	0,2886	0,0516	0,2135	0,3522	1,46	1,000
IRT	16	4,394	0,705	3,010	5,875	2,10	0,382
GF	16	825,1	202,1	597,3	1221,8	1,96	0,599
IT	16	635,5	344,1	313,4	1406,6	2,24	0,232
d0,5Pm	16	1,0844	0,2659	0,7507	1,6002	1,94	0,643

* **NOTA** * No hay valor atípico en el nivel de significancia de 5%

GRUBBS TEST BBTM11B 500 4,75% 20º

Prueba de valores atípicos: %H; Fmax; RT; DFmax; IRT; GF; IT; d0,5Pm

Método

Hipótesis nula	Todos los valores de los datos provienen de la misma población normal
Hipótesis alterna	El valor más pequeño o más grande de los datos es un valor atípico
Nivel de significancia	$\alpha = 0,05$

Prueba de Grubbs

Variable	N	Media	Desv.Est.	Mín.	Máx.	G	P
%H	16	16,943	1,545	13,315	19,466	2,35	0,152
Fmax	16	0,18620	0,01600	0,15410	0,21516	2,01	0,523
RT	16	0,14820	0,01261	0,12471	0,17262	1,94	0,650
DFmax	16	0,6060	0,1351	0,4168	0,8834	2,05	0,450
IRT	16	0,5599	0,2043	0,2976	0,9186	1,76	1,000
GF	16	314,4	61,7	178,6	458,0	2,33	0,165
IT	16	648,7	283,6	322,7	1364,2	2,52	0,069
d0,5Pm	16	3,029	0,613	2,222	4,431	2,29	0,195

*** NOTA * No hay valor atípico en el nivel de significancia de 5%**

GRUBBS TEST BBTM11B 800 4,75% 5º

Prueba de valores atípicos: %H; Fmax; RT; DFmax; IRT; GF; IT; d0,5Pm

Método

Hipótesis nula	Todos los valores de los datos provienen de la misma población normal
Hipótesis alterna	El valor más pequeño o más grande de los datos es un valor atípico
Nivel de significancia	$\alpha = 0,05$

Prueba de Grubbs

Variable	N	Media	Desv.Est.	Mín.	Máx.	G	P
%H	16	17,748	0,625	16,320	18,732	2,28	0,196
Fmax	16	1,2743	0,1253	1,0869	1,5639	2,31	0,176
RT	16	0,6263	0,0625	0,5350	0,7726	2,34	0,157
DFmax	16	0,3054	0,0737	0,2223	0,4640	2,15	0,323
IRT	16	3,754	0,978	2,039	5,303	1,75	1,000
GF	16	884,3	127,7	672,2	1175,4	2,28	0,199
IT	16	672,4	224,1	340,1	1099,7	1,91	0,709
d0,5Pm	16	1,1263	0,2206	0,8233	1,6195	2,24	0,237

* **NOTA** * No hay valor atípico en el nivel de significancia de 5%

GRUBBS TEST BBTM11B 800 4,75% 20º

Prueba de valores atípicos: %H_1; Fmax_1; RT_1;
DFmax_1; ...; d0,5Pm_1

Método

Hipótesis nula	Todos los valores de los datos provienen de la misma población normal
Hipótesis alterna	El valor más pequeño o más grande de los datos es un valor atípico
Nivel de significancia	$\alpha = 0,05$

Prueba de Grubbs

Variable	N	Media	Desv.Est.	Mín.	Máy.	G	P
%H_1	16	17,748	0,625	16,320	18,732	2,28	0,196
Fmax_1	16	0,27780	0,02530	0,24637	0,32703	1,95	0,631
RT_1	16	0,13656	0,01362	0,12189	0,16544	2,12	0,360
DFmax_1	16	0,5040	0,1127	0,3478	0,7822	2,47	0,090
IRT_1	16	0,8077	0,2008	0,4673	1,1843	1,88	0,775
GF_1	16	361,54	39,37	289,95	447,98	2,20	0,275
IT_1	16	901,1	277,8	505,8	1460,8	2,01	0,511
d0,5Pm_1	16	3,241	0,635	2,136	4,145	1,74	1,000

* **NOTA** * No hay valor atípico en el nivel de significancia de 5%

ANEJO 5

Test de Levene

En el anejo presente, se reflejan los test de Levene para poder hacer la comparación de grupos.

IGUALDAD DE VARIANZAS 8B 5-3cm 5º

Prueba de igualdad de varianzas: IRT; IRT 3cm Método

Hipótesis nula Todas las varianzas son iguales

Hipótesis alterna Por lo menos una varianza es diferente

Nivel de significancia $\alpha = 0,05$

Se utiliza el método F. Este método es exacto sólo para datos normales.

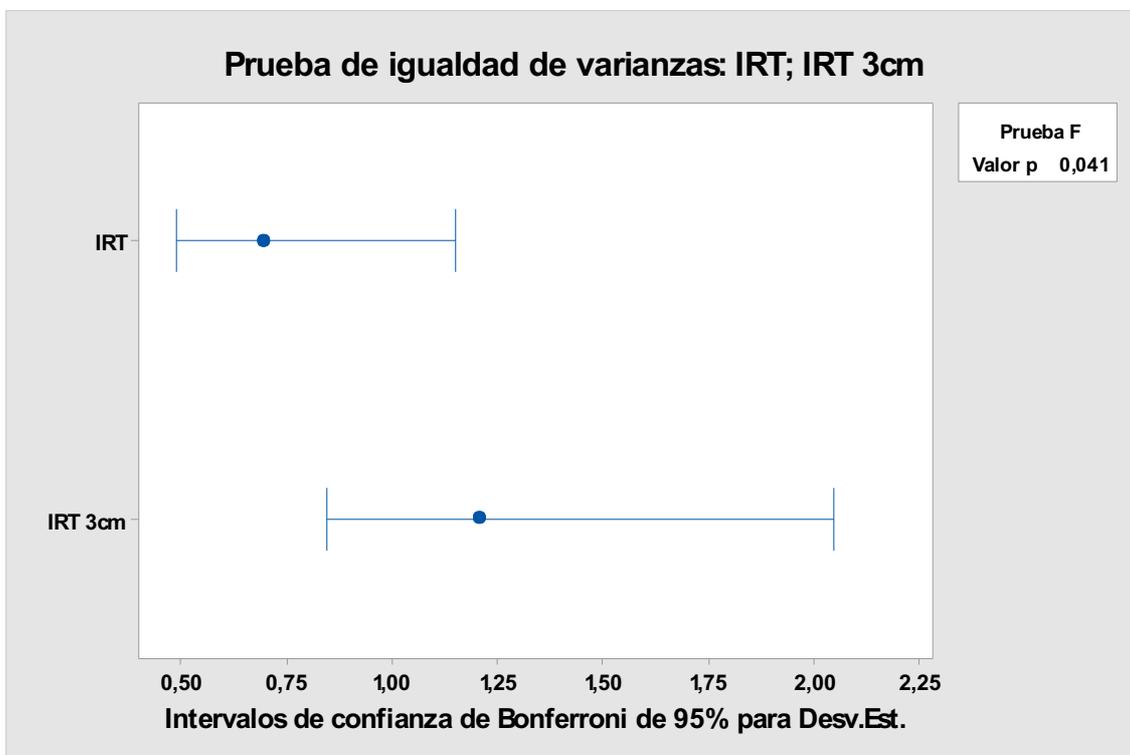
Intervalos de confianza de Bonferroni de 95% para desviaciones estándar

Muestra	N	Desv.Est.	IC
IRT	16	0,69396	(0,491993; 1,15056)
IRT 3cm	15	1,20796	(0,847791; 2,04742)

Nivel de confianza individual = 97,5%

Pruebas

Método	Estadística de prueba	Valor p
F	0,33	0,041



Prueba de igualdad de varianzas: GF; GF 3cm Método

Hipótesis nula Todas las varianzas son iguales
 Hipótesis alterna Por lo menos una varianza es diferente
 Nivel de significancia $\alpha = 0,05$

Se utiliza el método F. Este método es exacto sólo para datos normales.

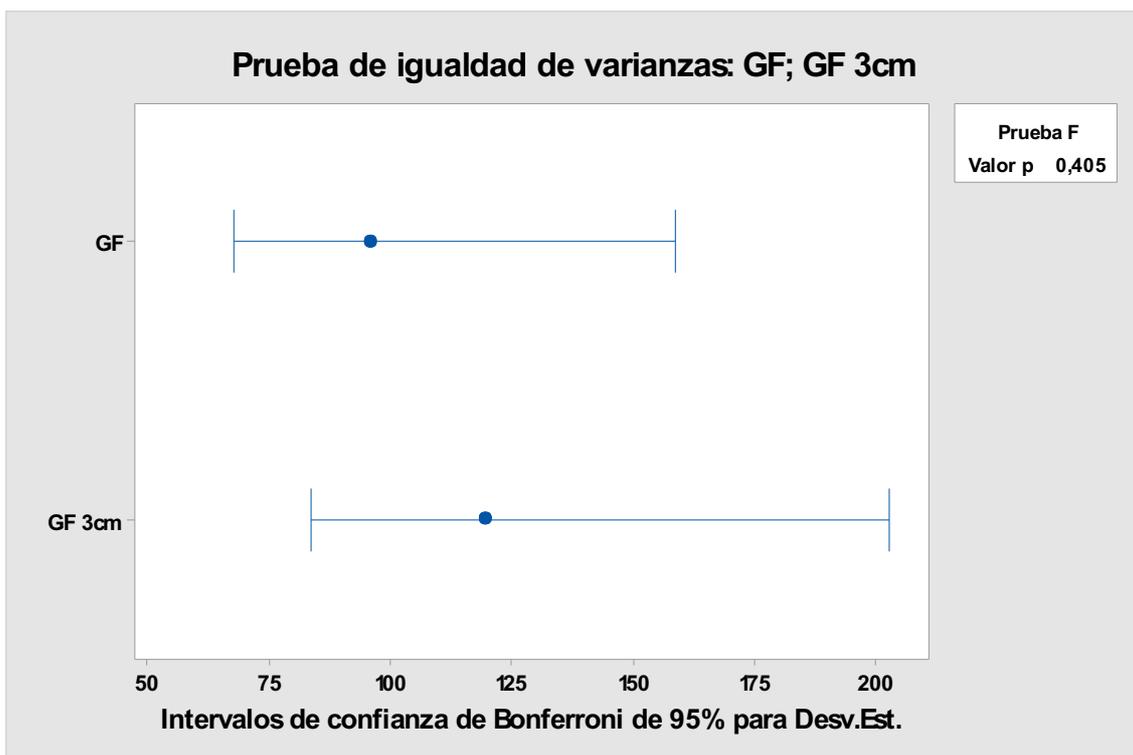
Intervalos de confianza de Bonferroni de 95% para desviaciones estándar

Muestra	N	Desv.Est.	IC
GF	16	95,871	(67,9687; 158,949)
GF 3cm	15	119,635	(83,9648; 202,776)

Nivel de confianza individual = 97,5%

Pruebas

Método	Estadística de prueba	Valor p
F	0,64	0,405



Prueba de igualdad de varianzas: d0,5Pm; d0,5Pm 3cm Método

Hipótesis nula Todas las varianzas son iguales
 Hipótesis alterna Por lo menos una varianza es diferente
 Nivel de significancia $\alpha = 0,05$

Se utiliza el método F. Este método es exacto sólo para datos normales.

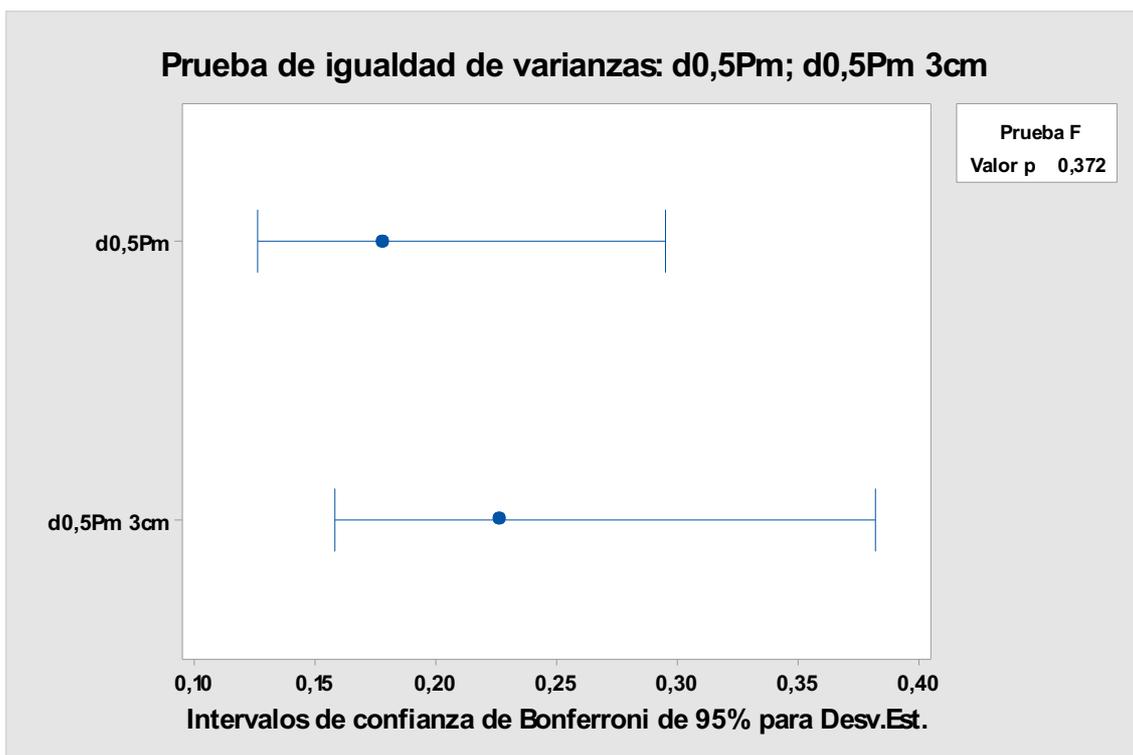
Intervalos de confianza de Bonferroni de 95% para desviaciones estándar

Muestra	N	Desv.Est.	IC
d0,5Pm	16	0,178133	(0,126290; 0,295336)
d0,5Pm 3cm	15	0,225859	(0,158517; 0,382819)

Nivel de confianza individual = 97,5%

Pruebas

Método	Estadística de prueba	Valor p
F	0,62	0,372



IGUALDAD DE VARIANZAS 8B 5-3cm 20º

Prueba de igualdad de varianzas: IRT; IRT3cm

Método

Hipótesis nula Todas las varianzas son iguales

Hipótesis alterna Por lo menos una varianza es diferente

Nivel de significancia $\alpha = 0,05$

Se utiliza el método F. Este método es exacto sólo para datos normales.

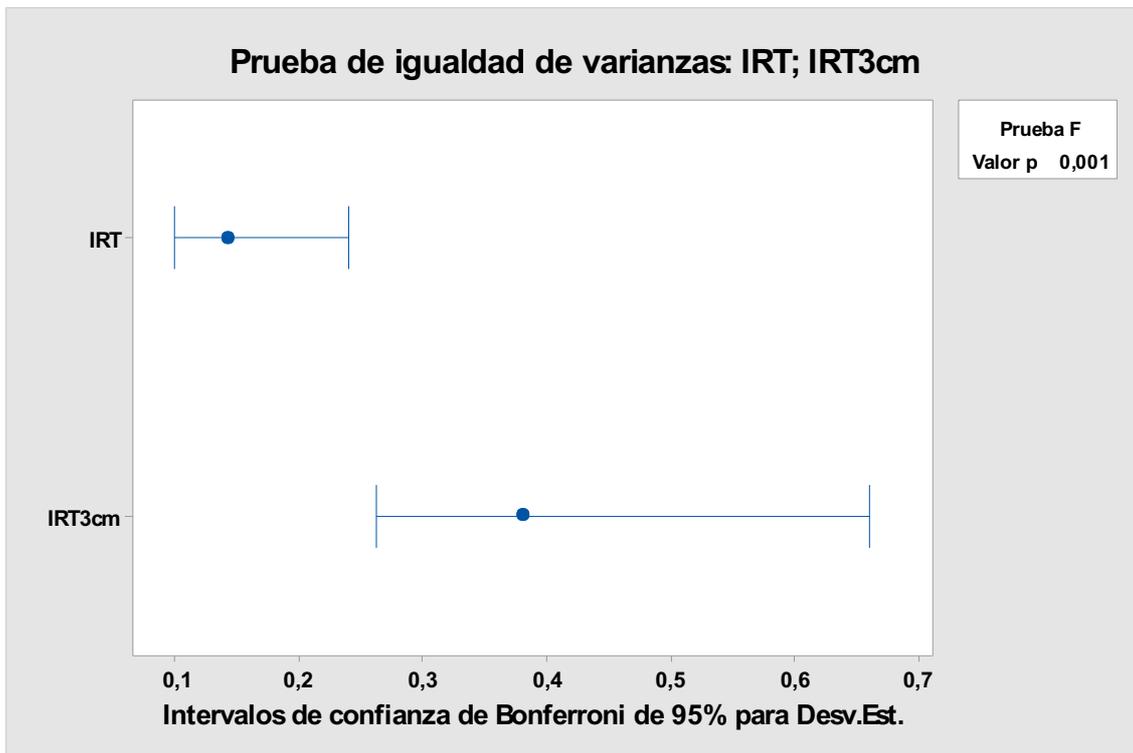
Intervalos de confianza de Bonferroni de 95% para desviaciones estándar

Muestra	N	Desv.Est.	IC
IRT	15	0,141794	(0,099517; 0,240334)
IRT3cm	14	0,379879	(0,263667; 0,660170)

Nivel de confianza individual = 97,5%

Pruebas

Método	Estadística de prueba	Valor p
F	0,14	0,001



Prueba de igualdad de varianzas: GF; GF3cm

Método

Hipótesis nula Todas las varianzas son iguales
Hipótesis alterna Por lo menos una varianza es diferente
Nivel de significancia $\alpha = 0,05$

Se utiliza el método F. Este método es exacto sólo para datos normales.

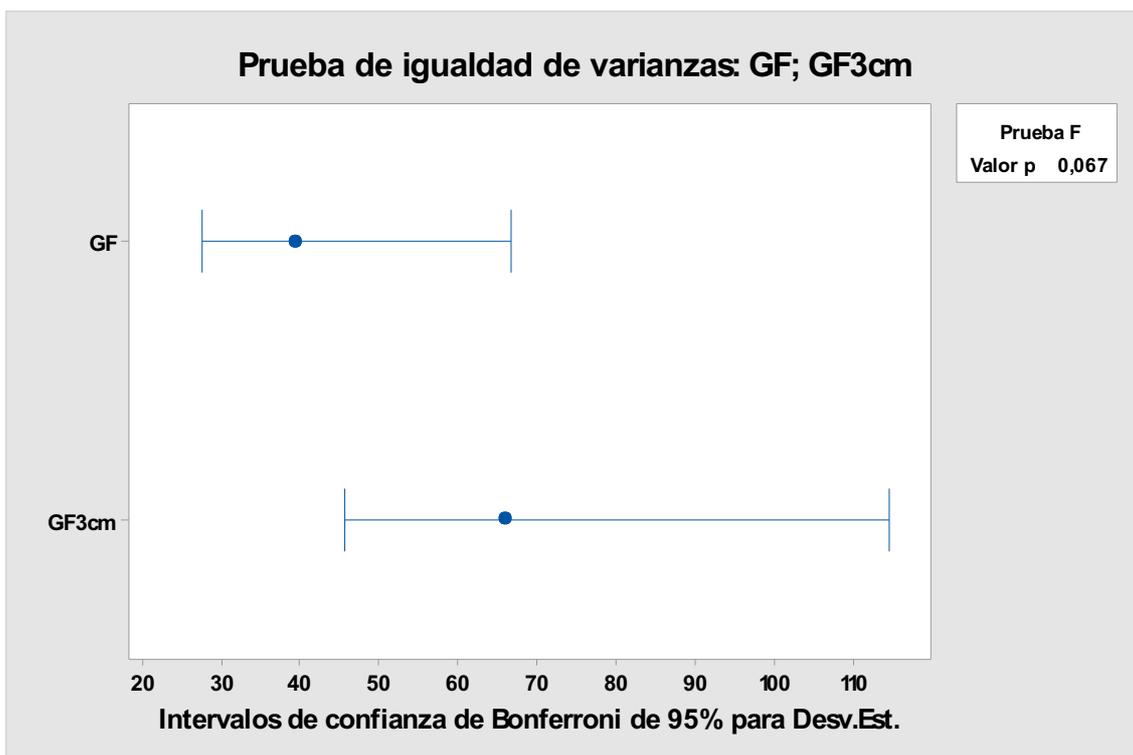
Intervalos de confianza de Bonferroni de 95% para desviaciones estándar

Muestra	N	Desv.Est.	IC
GF	15	39,4452	(27,6842; 66,858)
GF3cm	14	65,9552	(45,7783; 114,620)

Nivel de confianza individual = 97,5%

Pruebas

Método	Estadística de prueba	Valor p
F	0,36	0,067



Prueba de igualdad de varianzas: d0,5Pm; d0,5Pm3cm Método

Hipótesis nula Todas las varianzas son iguales
Hipótesis alterna Por lo menos una varianza es diferente
Nivel de significancia $\alpha = 0,05$

Se utiliza el método F. Este método es exacto sólo para datos normales.

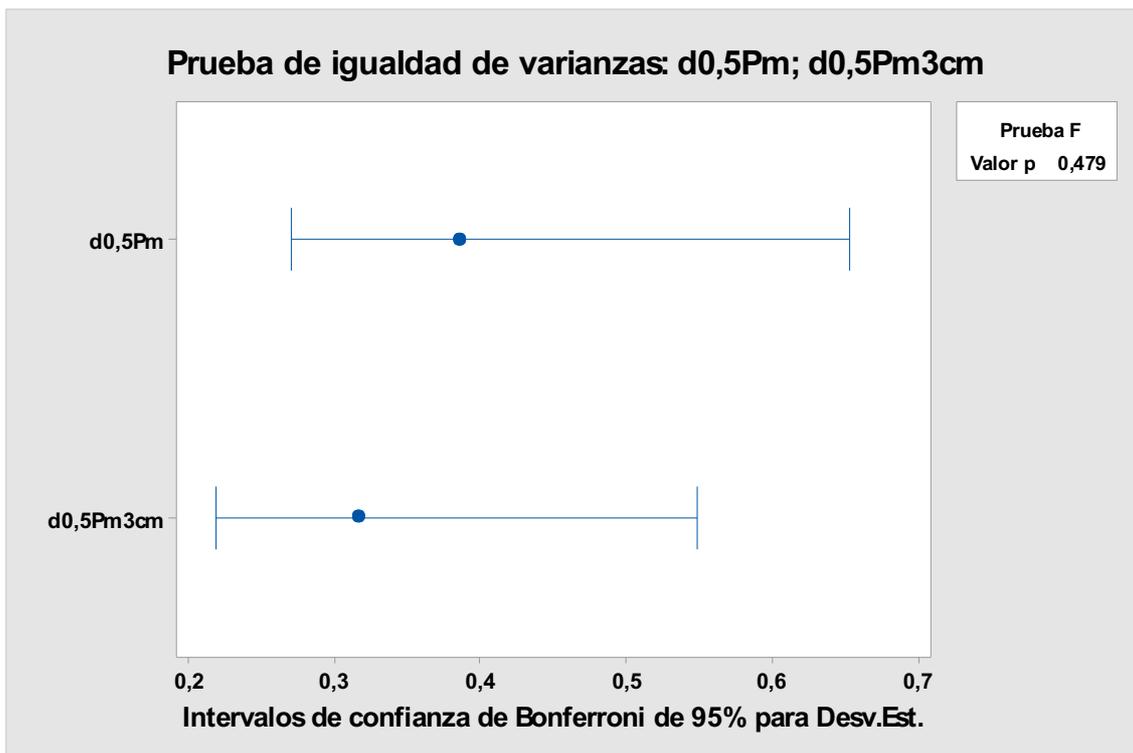
Intervalos de confianza de Bonferroni de 95% para desviaciones estándar

Muestra	N	Desv.Est.	IC
d0,5Pm	15	0,385980	(0,270896; 0,654216)
d0,5Pm3cm	14	0,316224	(0,219485; 0,549548)

Nivel de confianza individual = 97,5%

Pruebas

Método	Estadística de prueba	Valor p
F	1,49	0,479



IGUALDAD DE VARIANZAS 11B 5-3CM 5º

Prueba de igualdad de varianzas: IRT; IRT3cm

Método

Hipótesis nula Todas las varianzas son iguales

Hipótesis alterna Por lo menos una varianza es diferente

Nivel de significancia $\alpha = 0,05$

Se utiliza el método F. Este método es exacto sólo para datos normales.

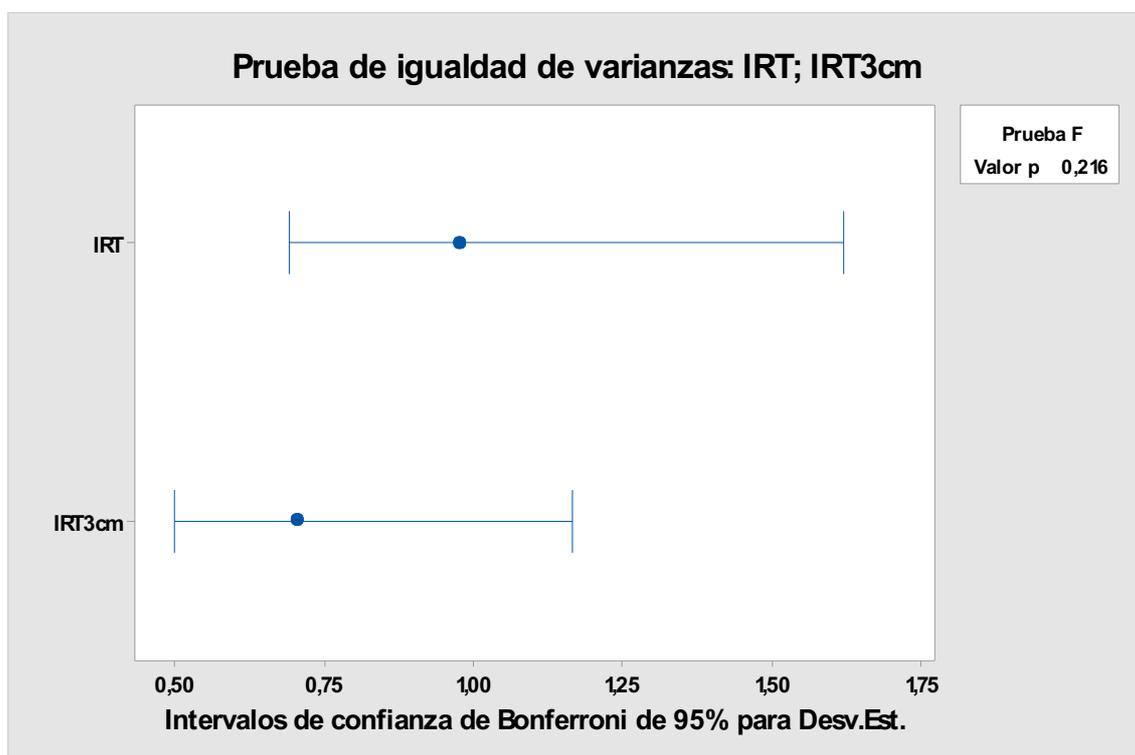
Intervalos de confianza de Bonferroni de 95% para desviaciones estándar

Muestra	N	Desv.Est.	IC
IRT	16	0,977582	(0,693070; 1,62079)
IRT3cm	16	0,704663	(0,499580; 1,16830)

Nivel de confianza individual = 97,5%

Pruebas

Método	Estadística de prueba	Valor p
F	1,92	0,216



Prueba de igualdad de varianzas: GF; GF3cm

Método

Hipótesis nula Todas las varianzas son iguales

Hipótesis alterna Por lo menos una varianza es diferente

Nivel de significancia $\alpha = 0,05$

Se utiliza el método F. Este método es exacto sólo para datos normales.

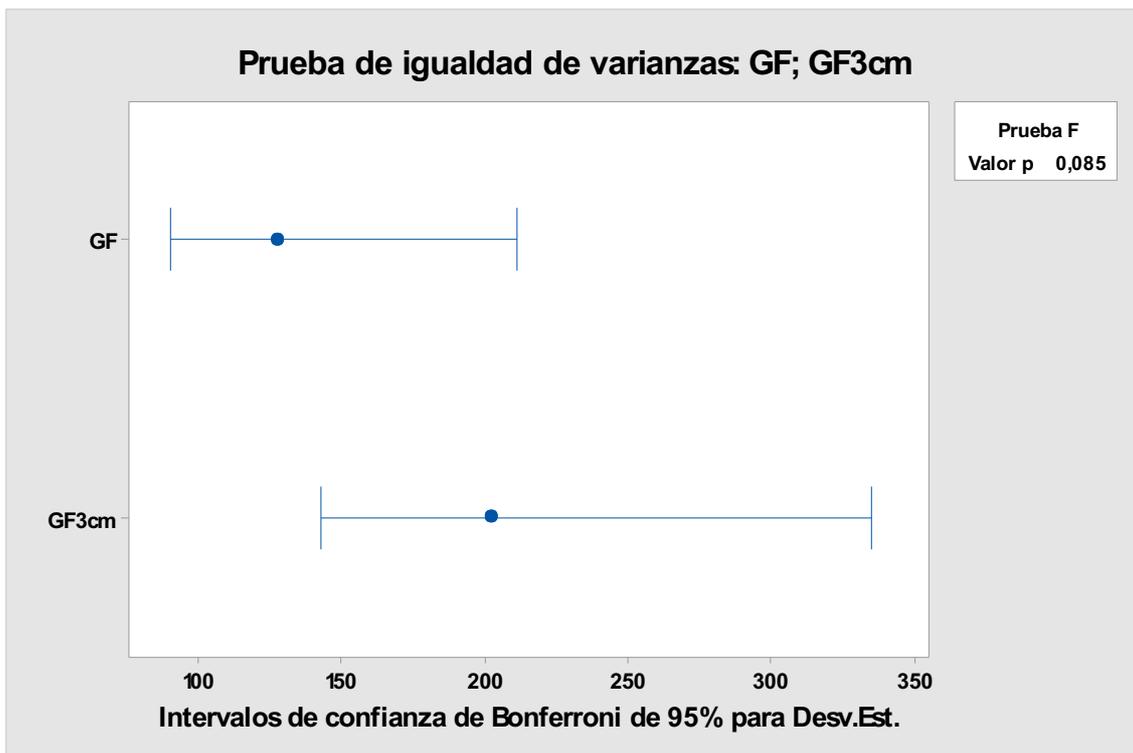
Intervalos de confianza de Bonferroni de 95% para desviaciones estándar

Muestra	N	Desv.Est.	IC
GF	16	127,694	(90,530; 211,710)
GF3cm	16	202,093	(143,277; 335,061)

Nivel de confianza individual = 97,5%

Pruebas

Método	Estadística de prueba	Valor p
F	0,40	0,085



Prueba de igualdad de varianzas: d0,5Pm; d0,5Pm3cm Método

Hipótesis nula Todas las varianzas son iguales
 Hipótesis alterna Por lo menos una varianza es diferente
 Nivel de significancia $\alpha = 0,05$

Se utiliza el método F. Este método es exacto sólo para datos normales.

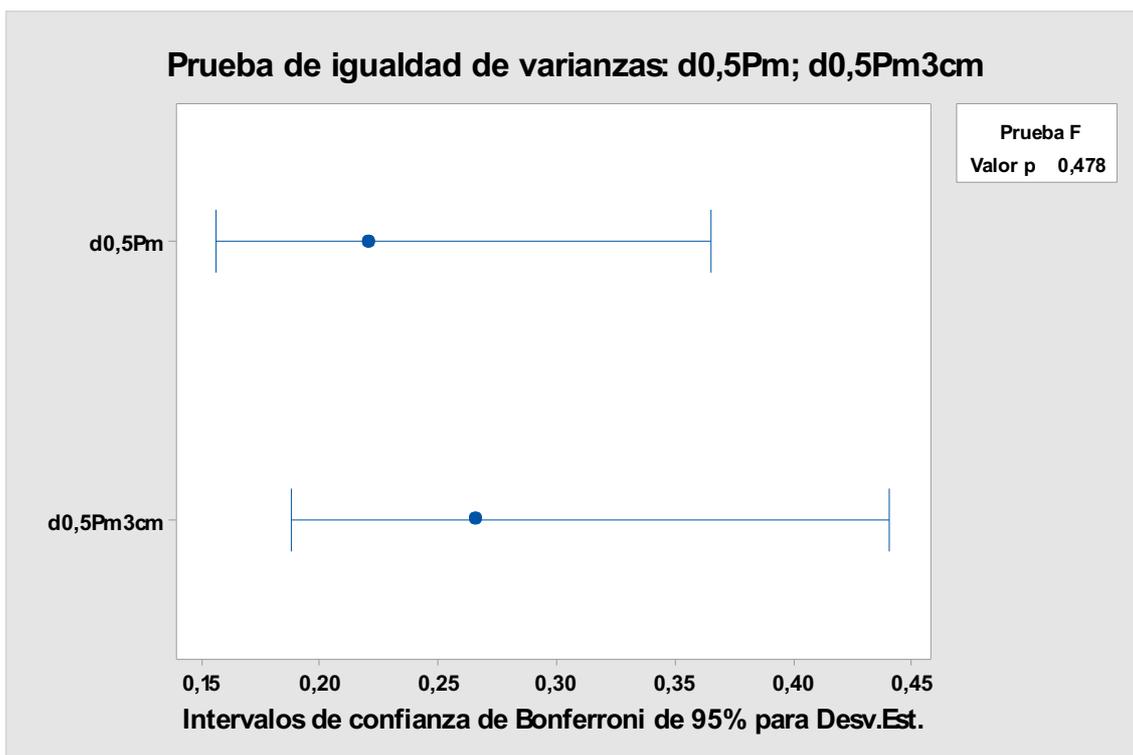
Intervalos de confianza de Bonferroni de 95% para desviaciones estándar

Muestra	N	Desv.Est.	IC
d0,5Pm	16	0,220607	(0,156402; 0,365756)
d0,5Pm3cm	16	0,265901	(0,188514; 0,440850)

Nivel de confianza individual = 97,5%

Pruebas

Método	Estadística de prueba	Valor p
F	0,69	0,478



IGUALDAD DE VARIANZAS 11B 5-3cm 20º

Prueba de igualdad de varianzas: IRT; IRT3cm

Método

Hipótesis nula Todas las varianzas son iguales

Hipótesis alterna Por lo menos una varianza es diferente

Nivel de significancia $\alpha = 0,05$

Se utiliza el método F. Este método es exacto sólo para datos normales.

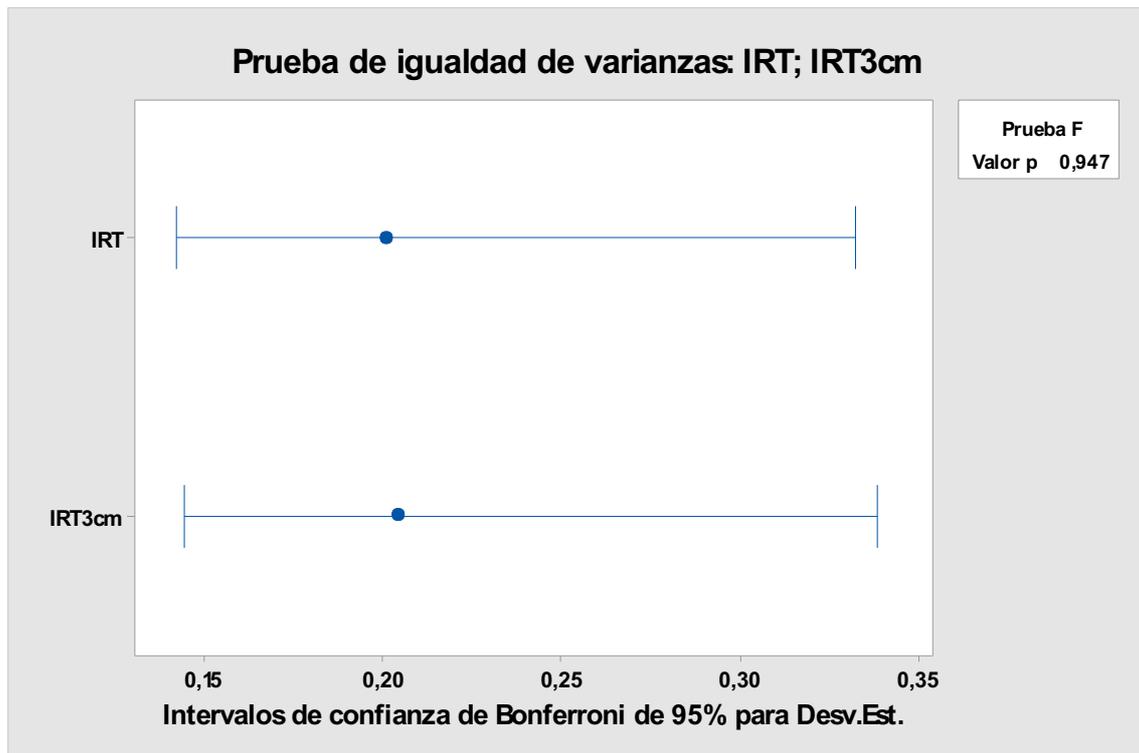
Intervalos de confianza de Bonferroni de 95% para desviaciones estándar

Muestra	N	Desv.Est.	IC
IRT	16	0,200766	(0,142336; 0,332861)
IRT3cm	16	0,204309	(0,144848; 0,338735)

Nivel de confianza individual = 97,5%

Pruebas

Método	Estadística de prueba	Valor p
F	0,97	0,947



Prueba de igualdad de varianzas: GF; GF3cm

Método

Hipótesis nula Todas las varianzas son iguales
Hipótesis alterna Por lo menos una varianza es diferente
Nivel de significancia $\alpha = 0,05$

Se utiliza el método F. Este método es exacto sólo para datos normales.

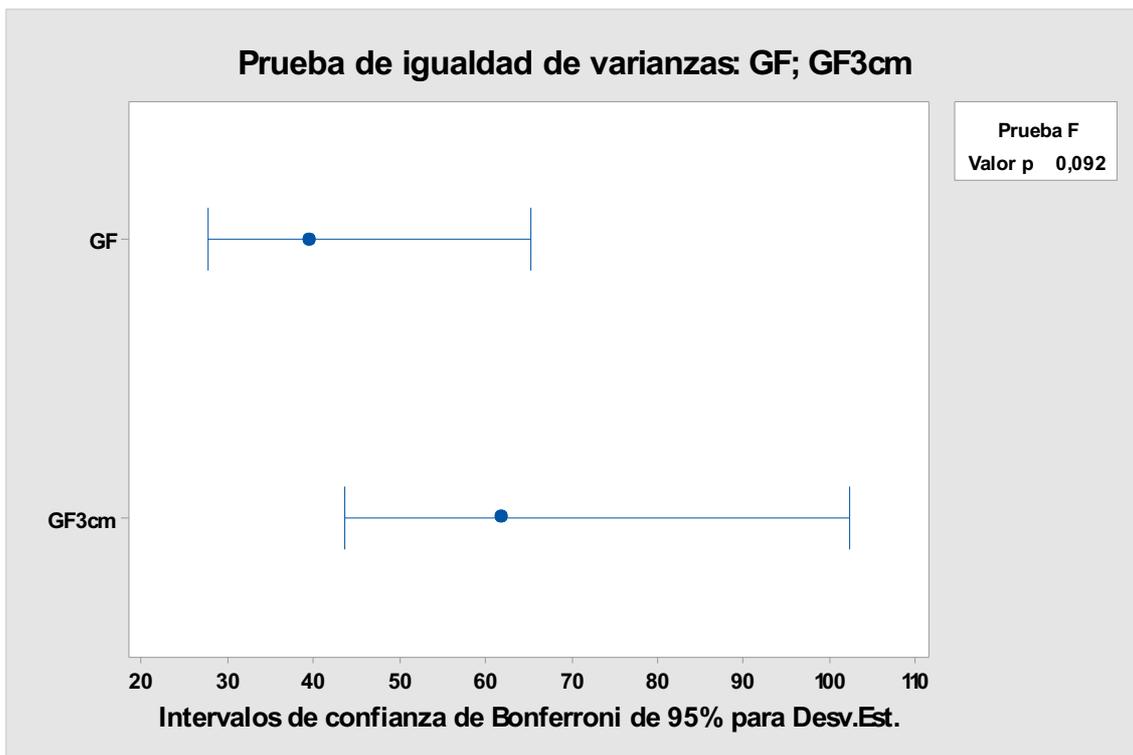
Intervalos de confianza de Bonferroni de 95% para desviaciones estándar

Muestra	N	Desv.Est.	IC
GF	16	39,3726	(27,9138; 65,278)
GF3cm	16	61,7179	(43,7557; 102,325)

Nivel de confianza individual = 97,5%

Pruebas

Método	Estadística de prueba	Valor p
F	0,41	0,092



Prueba de igualdad de varianzas: d0,5Pm; d0,5Pm3cm

Método

Hipótesis nula Todas las varianzas son iguales
Hipótesis alterna Por lo menos una varianza es diferente
Nivel de significancia $\alpha = 0,05$

Intervalos de confianza de Bonferroni de 95% para desviaciones estándar

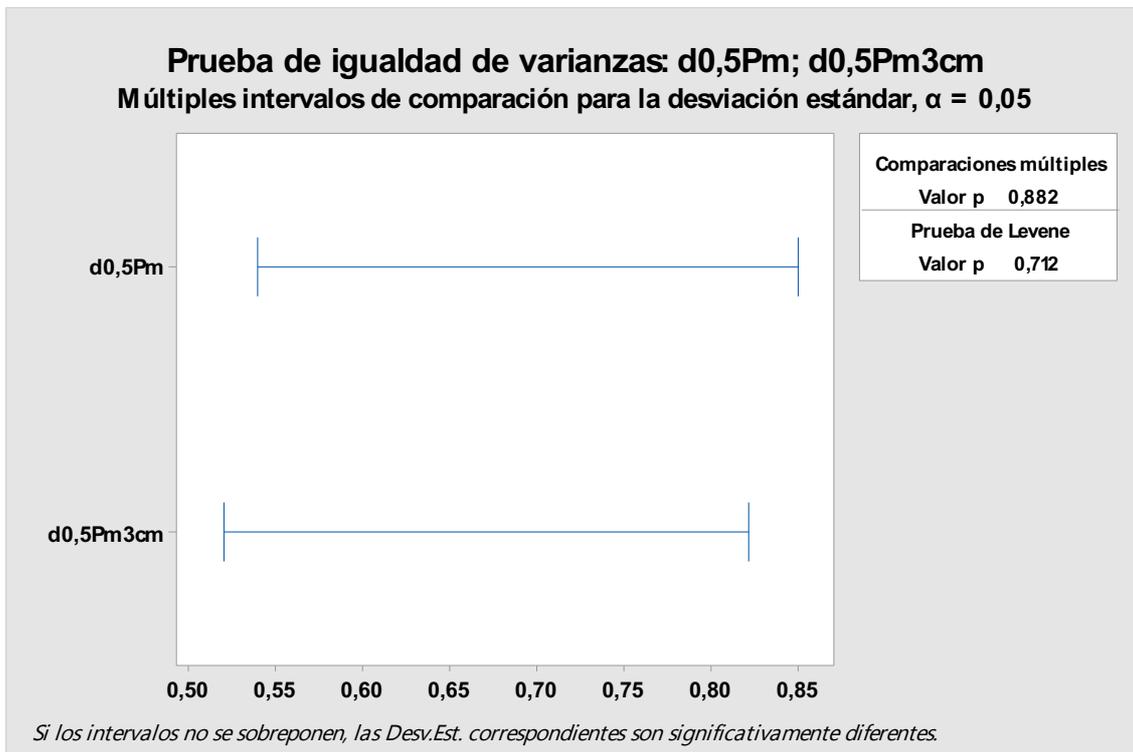
Muestra	N	Desv.Est.	IC
d0,5Pm	16	0,634777	(0,493873; 0,94880)
d0,5Pm3cm	16	0,613334	(0,393844; 1,11075)

Nivel de confianza individual = 97,5%

Pruebas

Método	Estadística de prueba	Valor p
Comparaciones múltiples	0,02	0,882
Levene	0,14	0,712

Prueba de igualdad de varianzas: d0,5Pm; d0,5Pm3cm



IGUALDAD DE VARIANZAS 8B-11B 3cm 5º

Prueba de igualdad de varianzas: IRT; IRT11B

Método

Hipótesis nula Todas las varianzas son iguales

Hipótesis alterna Por lo menos una varianza es diferente

Nivel de significancia $\alpha = 0,05$

Se utiliza el método F. Este método es exacto sólo para datos normales.

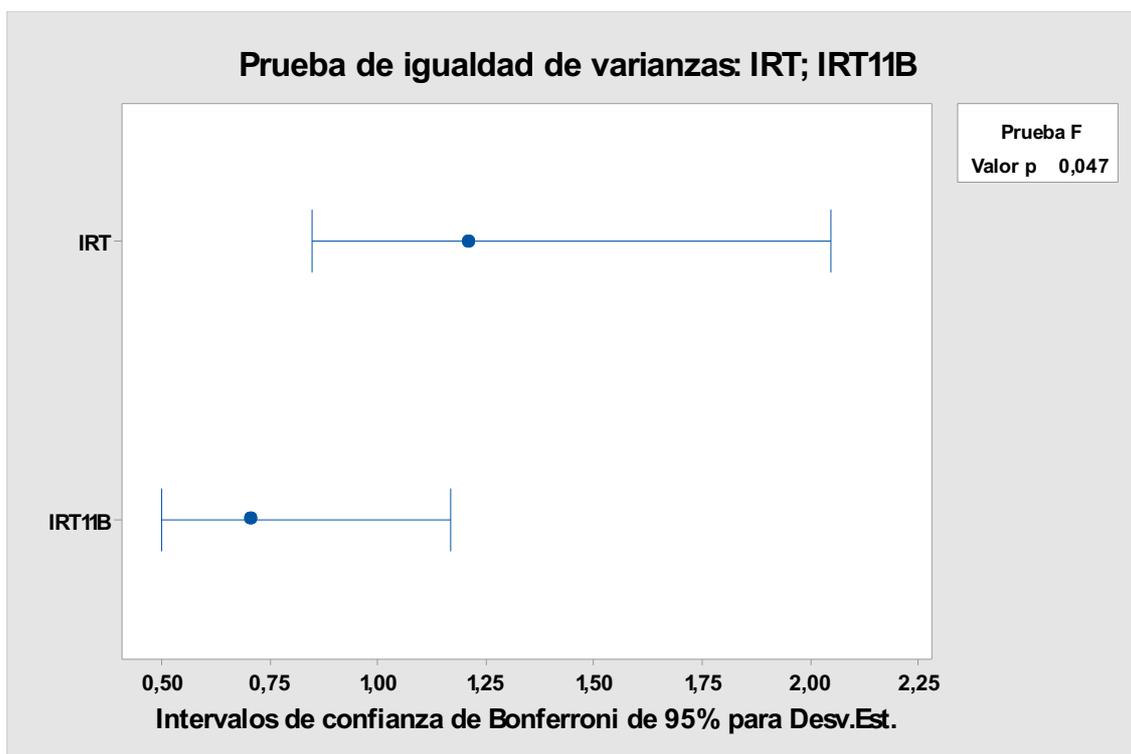
Intervalos de confianza de Bonferroni de 95% para desviaciones estándar

Muestra	N	Desv.Est.	IC
IRT	15	1,20796	(0,847791; 2,04742)
IRT11B	16	0,70466	(0,499580; 1,16830)

Nivel de confianza individual = 97,5%

Pruebas

Método	Estadística de prueba	Valor p
F	2,94	0,047



Prueba de igualdad de varianzas: GF; GF11B

Método

Hipótesis nula Todas las varianzas son iguales
Hipótesis alterna Por lo menos una varianza es diferente

Nivel de significancia $\alpha = 0,05$

Se utiliza el método F. Este método es exacto sólo para datos normales.

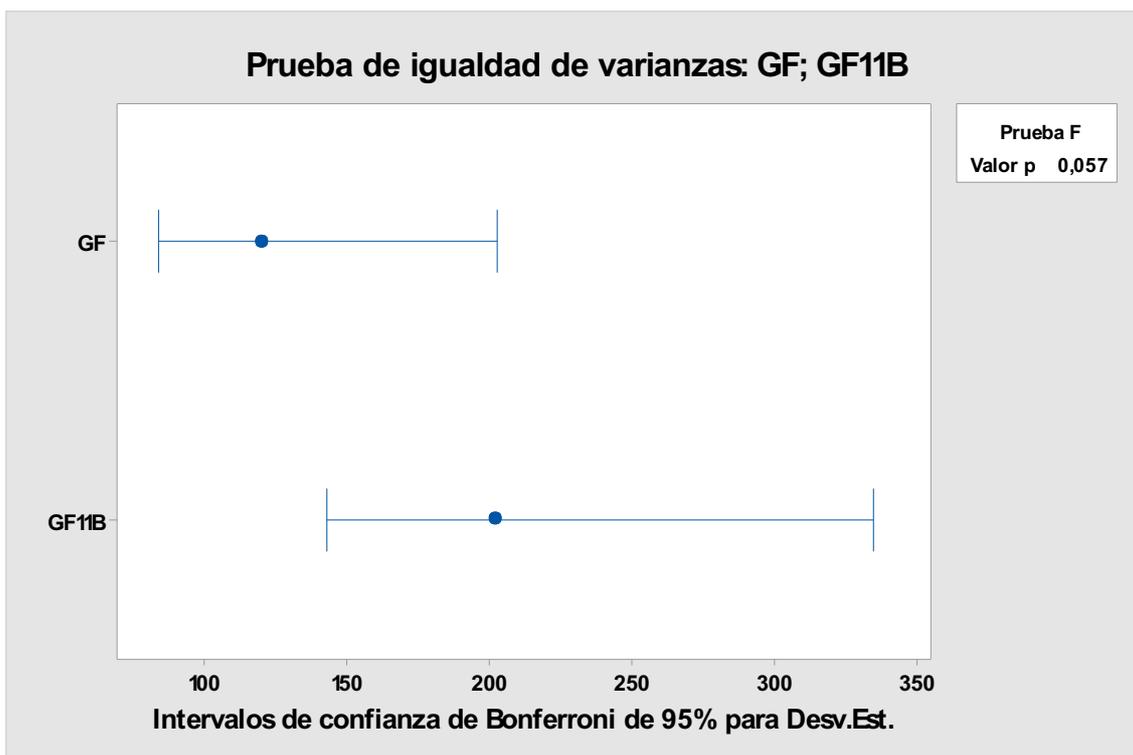
Intervalos de confianza de Bonferroni de 95% para desviaciones estándar

Muestra	N	Desv.Est.	IC
GF	15	119,635	(83,965; 202,776)
GF11B	16	202,093	(143,277; 335,061)

Nivel de confianza individual = 97,5%

Pruebas

Método	Estadística de prueba	Valor p
F	0,35	0,057



Prueba de igualdad de varianzas: d0,5Pm; d0,5Pm11B

Método

Hipótesis nula Todas las varianzas son iguales

Hipótesis alterna Por lo menos una varianza es diferente

Nivel de significancia $\alpha = 0,05$

Se utiliza el método F. Este método es exacto sólo para datos normales.

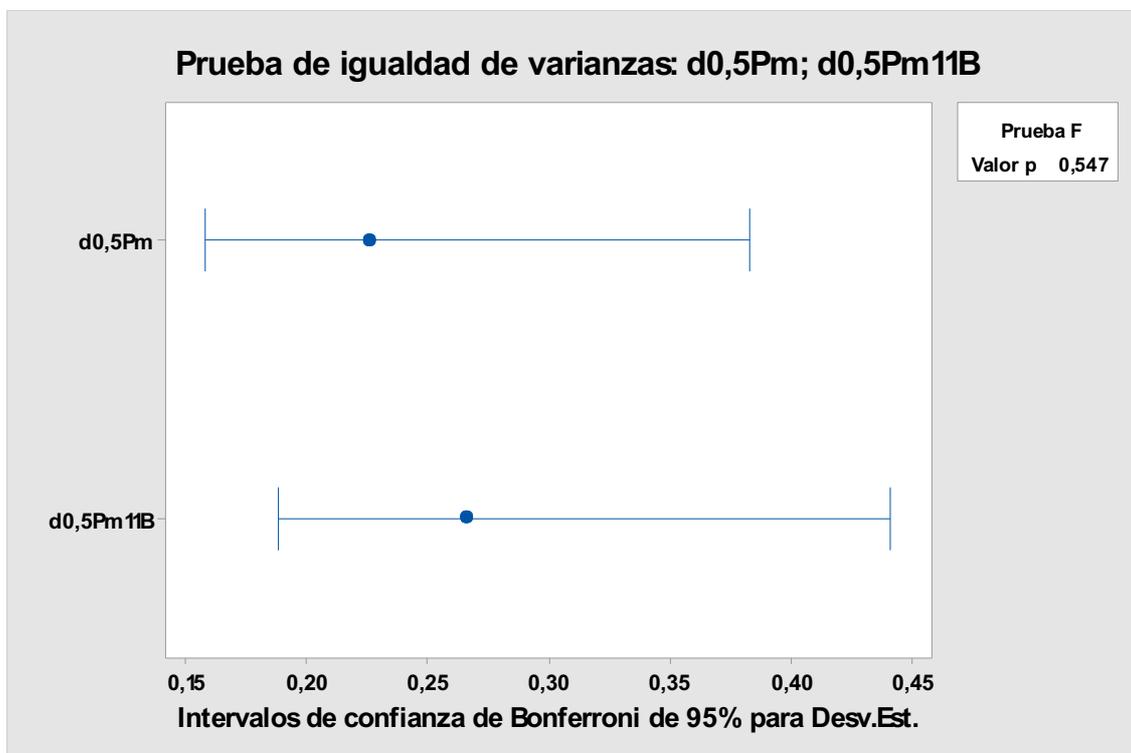
Intervalos de confianza de Bonferroni de 95% para desviaciones estándar

Muestra	N	Desv.Est.	IC
d0,5Pm	15	0,225859	(0,158517; 0,382819)
d0,5Pm11B	16	0,265901	(0,188514; 0,440850)

Nivel de confianza individual = 97,5%

Pruebas

Método	Estadística de prueba	Valor p
F	0,72	0,547



IGUALDAD DE VARIANZA 8B-11B 3cm 20º

Prueba de igualdad de varianzas: IRT; IRT11B

Método

Hipótesis nula Todas las varianzas son iguales

Hipótesis alterna Por lo menos una varianza es diferente

Nivel de significancia $\alpha = 0,05$

Se utiliza el método F. Este método es exacto sólo para datos normales.

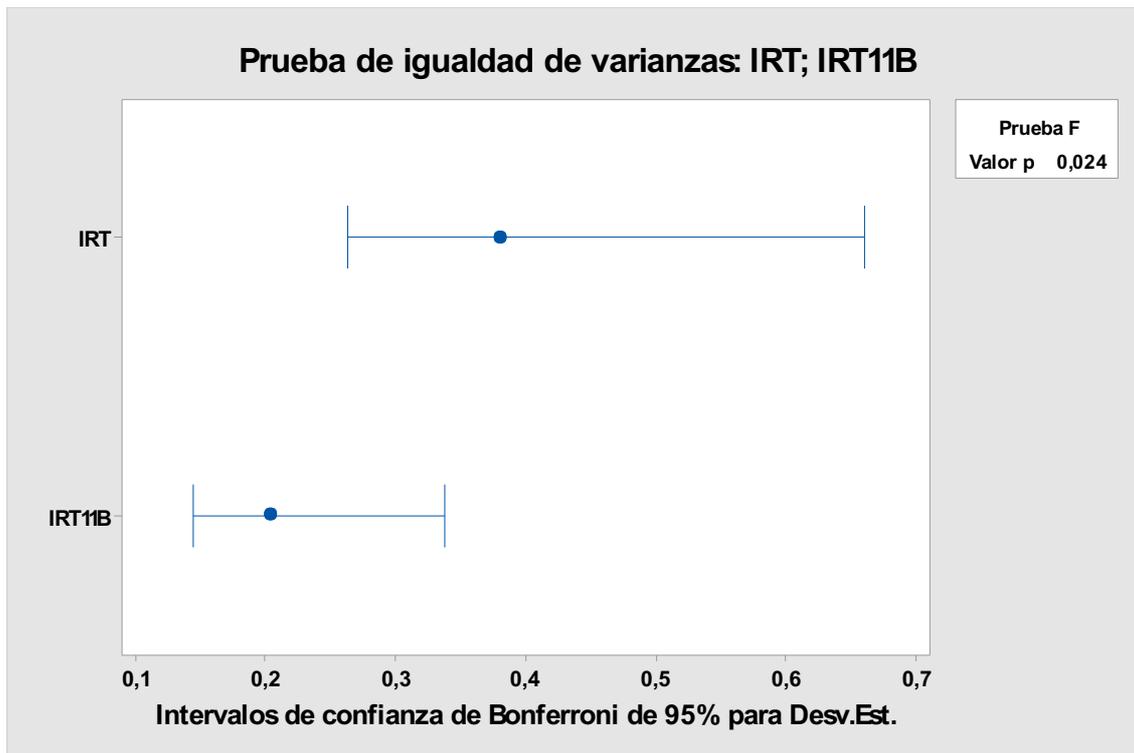
Intervalos de confianza de Bonferroni de 95% para desviaciones estándar

Muestra	N	Desv.Est.	IC
IRT	14	0,379879	(0,263667; 0,660170)
IRT11B	16	0,204309	(0,144848; 0,338735)

Nivel de confianza individual = 97,5%

Pruebas

Método	Estadística de prueba	Valor p
F	3,46	0,024



Prueba de igualdad de varianzas: GF; GF11B

Método

Hipótesis nula Todas las varianzas son iguales
Hipótesis alterna Por lo menos una varianza es diferente
Nivel de significancia $\alpha = 0,05$

Se utiliza el método F. Este método es exacto sólo para datos normales.

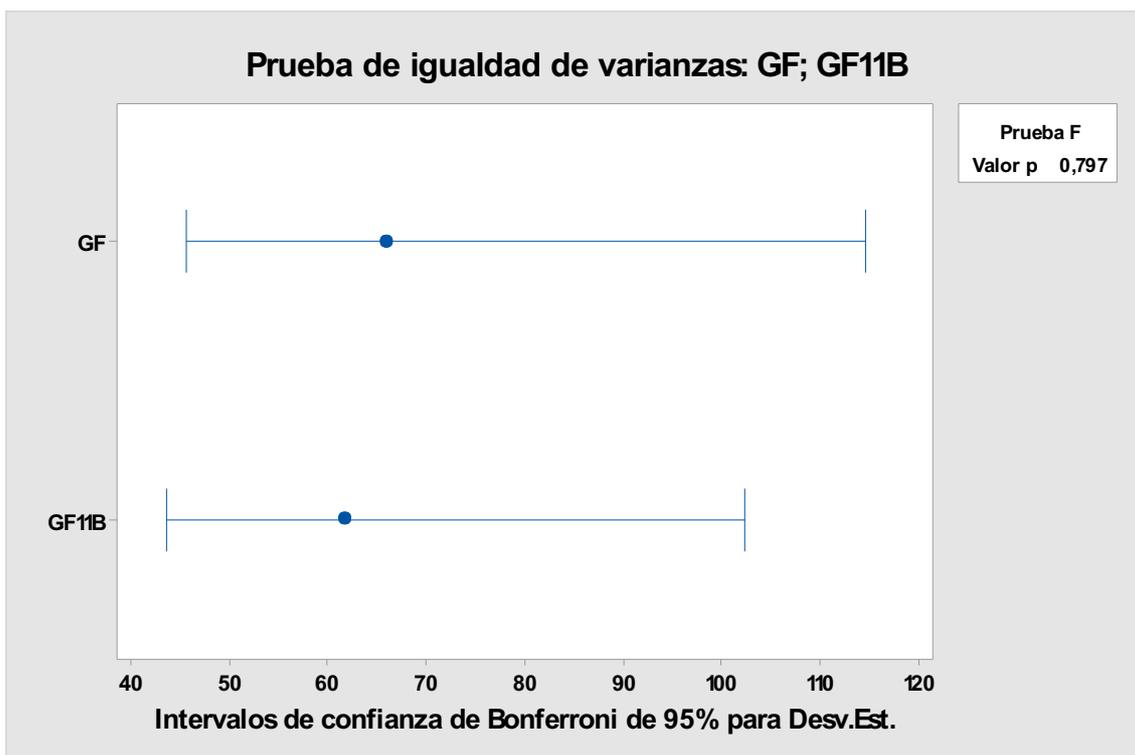
Intervalos de confianza de Bonferroni de 95% para desviaciones estándar

Muestra	N	Desv.Est.	IC
GF	14	65,9552	(45,7783; 114,620)
GF11B	16	61,7179	(43,7557; 102,325)

Nivel de confianza individual = 97,5%

Pruebas

Método	Estadística de prueba	Valor p
F	1,14	0,797



Prueba de igualdad de varianzas: d0,5Pm; d0,5Pm11B

Método

Hipótesis nula Todas las varianzas son iguales
 Hipótesis alterna Por lo menos una varianza es diferente
 Nivel de significancia $\alpha = 0,05$

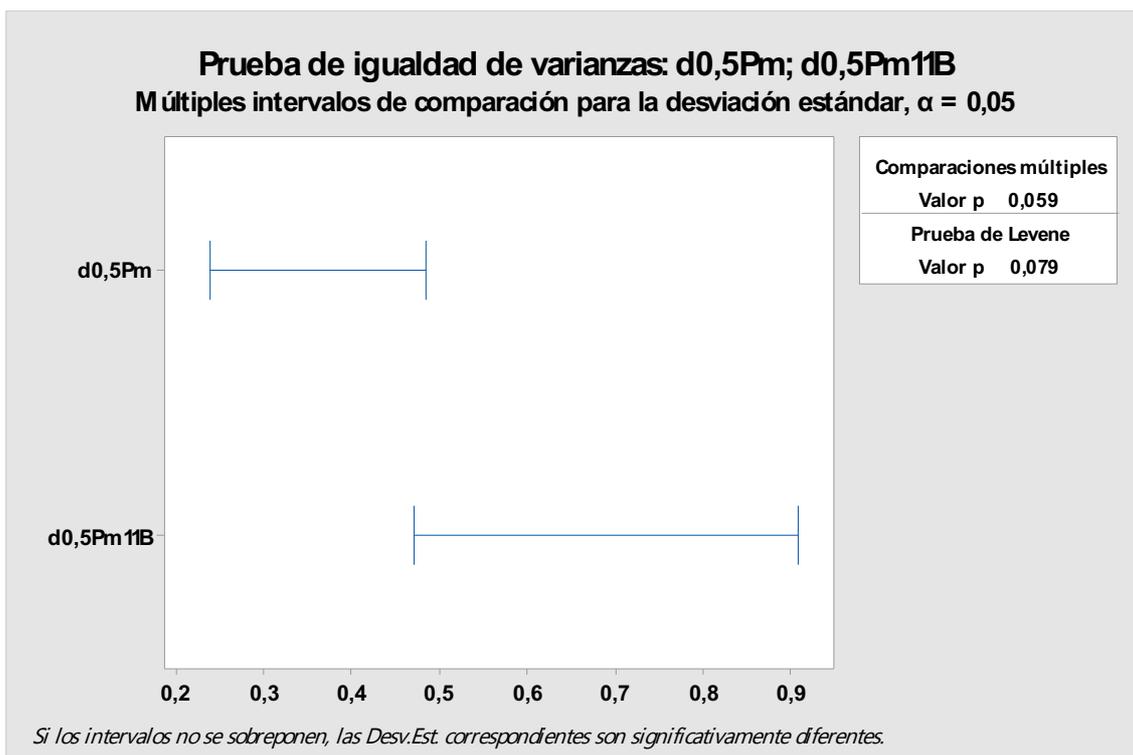
Intervalos de confianza de Bonferroni de 95% para desviaciones estándar

Muestra	N	Desv.Est.	IC
d0,5Pm	14	0,316224	(0,212998; 0,55897)
d0,5Pm11B	16	0,613334	(0,393844; 1,11075)

Nivel de confianza individual = 97,5%

Pruebas

Método	Estadística de prueba	Valor p
Comparaciones múltiples	—	0,059
Levene	3,32	0,079



IGUALDAD DE VARIANZAS 8B-11B 5cm 5º

Prueba de igualdad de varianzas: IRT; IRT11B

Método

Hipótesis nula Todas las varianzas son iguales

Hipótesis alterna Por lo menos una varianza es diferente

Nivel de significancia $\alpha = 0,05$

Se utiliza el método F. Este método es exacto sólo para datos normales.

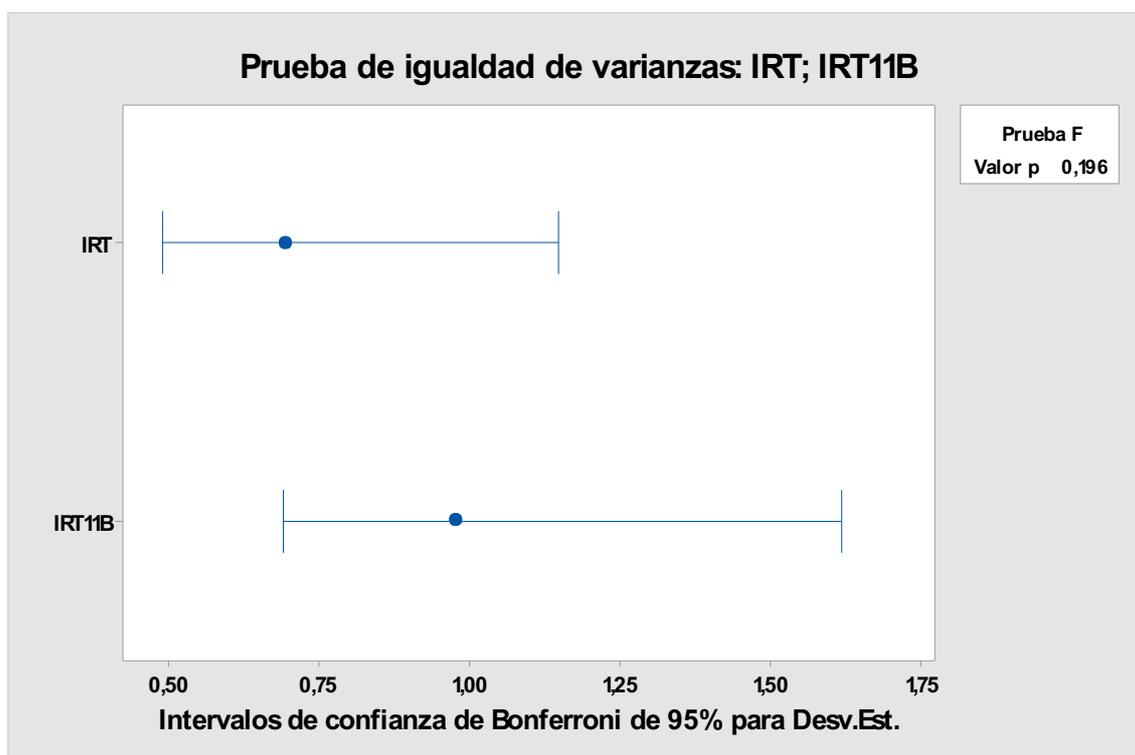
Intervalos de confianza de Bonferroni de 95% para desviaciones estándar

Muestra	N	Desv.Est.	IC
IRT	16	0,693962	(0,491993; 1,15056)
IRT11B	16	0,977582	(0,693070; 1,62079)

Nivel de confianza individual = 97,5%

Pruebas

Método	Estadística de prueba	Valor p
F	0,50	0,196



Prueba de igualdad de varianzas: GF; GF11B

Método

Hipótesis nula Todas las varianzas son iguales

Hipótesis alterna Por lo menos una varianza es diferente

Nivel de significancia $\alpha = 0,05$

Se utiliza el método F. Este método es exacto sólo para datos normales.

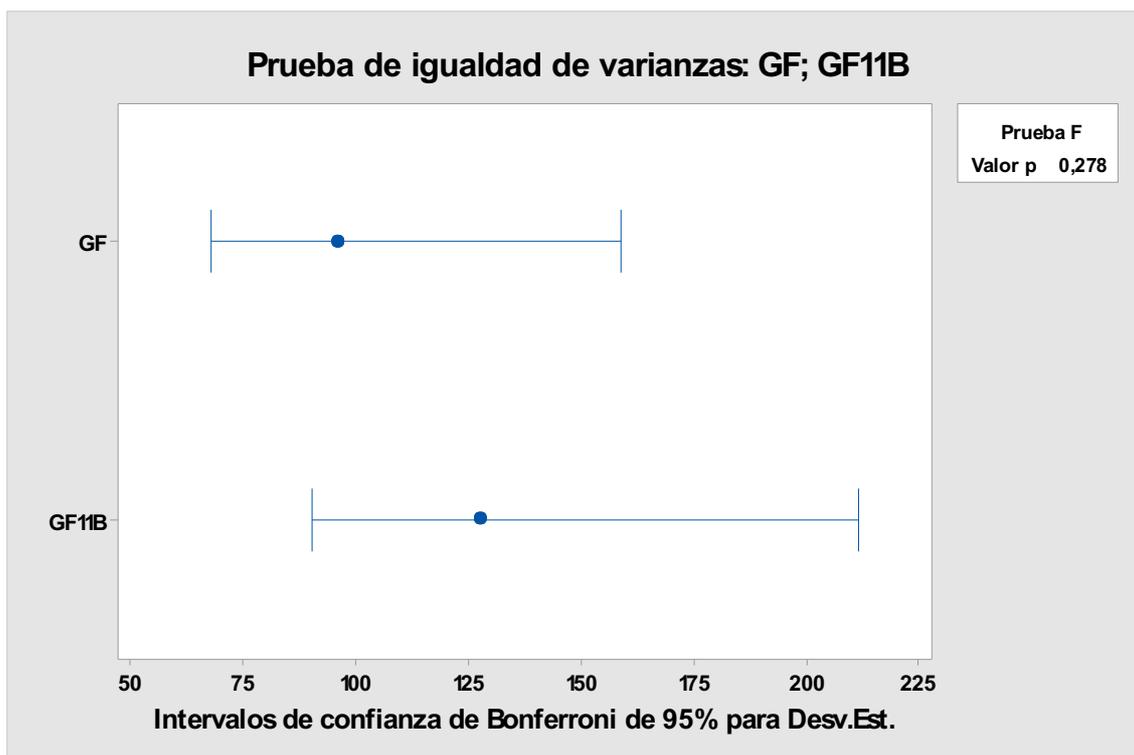
Intervalos de confianza de Bonferroni de 95% para desviaciones estándar

Muestra	N	Desv.Est.	IC
GF	16	95,871	(67,9687; 158,949)
GF11B	16	127,694	(90,5302; 211,710)

Nivel de confianza individual = 97,5%

Pruebas

Método	Estadística de prueba	Valor p
F	0,56	0,278



Prueba de igualdad de varianzas: d0,5Pm; d0,5Pm11B

Método

Hipótesis nula Todas las varianzas son iguales
 Hipótesis alterna Por lo menos una varianza es diferente
 Nivel de significancia $\alpha = 0,05$

Se utiliza el método F. Este método es exacto sólo para datos normales.

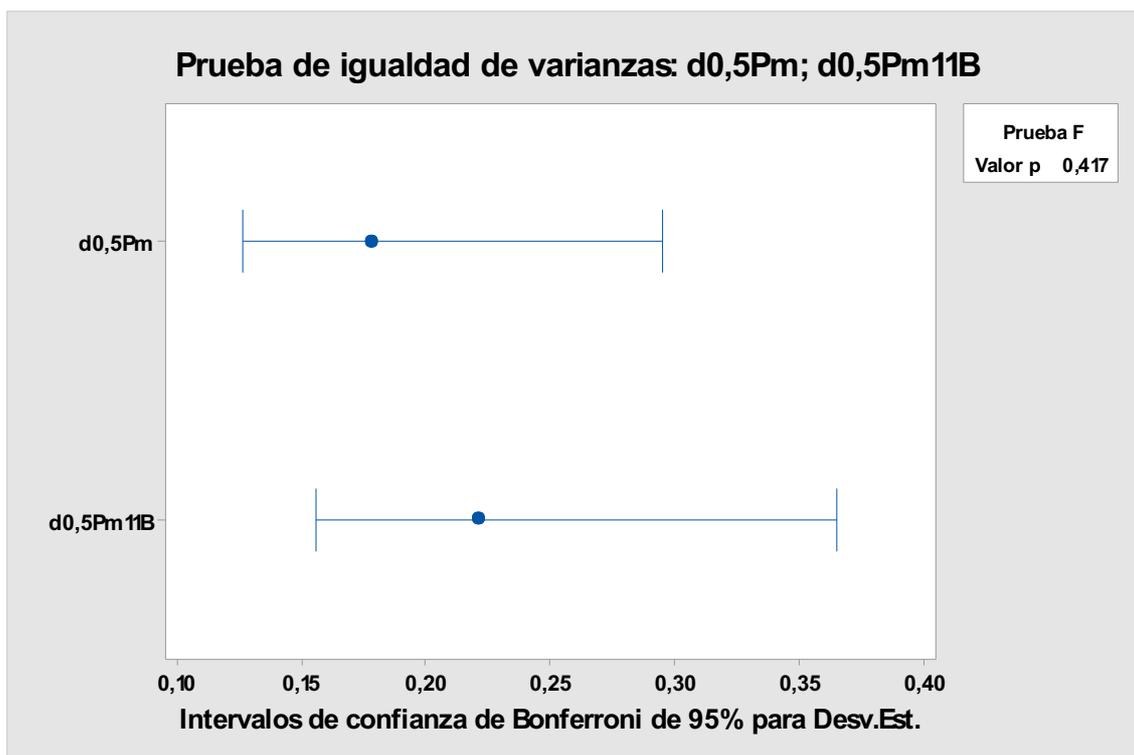
Intervalos de confianza de Bonferroni de 95% para desviaciones estándar

Muestra	N	Desv.Est.	IC
d0,5Pm	16	0,178133	(0,126290; 0,295336)
d0,5Pm11B	16	0,220607	(0,156402; 0,365756)

Nivel de confianza individual = 97,5%

Pruebas

Método	Estadística de prueba	Valor p
F	0,65	0,417



IGUALDAD DE VARIANZAS 8B-11B 5cm 20º

Prueba de igualdad de varianzas: IRT; IRT11B

Método

Hipótesis nula Todas las varianzas son iguales

Hipótesis alterna Por lo menos una varianza es diferente

Nivel de significancia $\alpha = 0,05$

Se utiliza el método F. Este método es exacto sólo para datos normales.

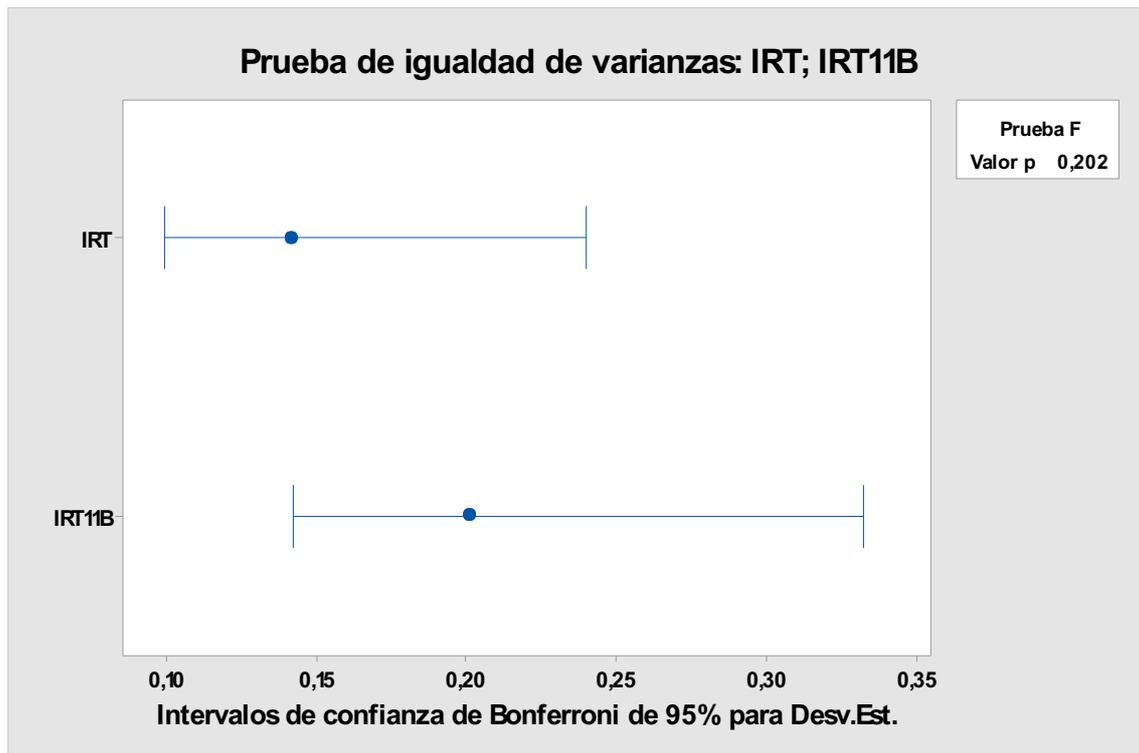
Intervalos de confianza de Bonferroni de 95% para desviaciones estándar

Muestra	N	Desv.Est.	IC
IRT	15	0,141794	(0,099517; 0,240334)
IRT11B	16	0,200766	(0,142336; 0,332861)

Nivel de confianza individual = 97,5%

Pruebas

Método	Estadística de prueba	Valor p
F	0,50	0,202



Prueba de igualdad de varianzas: GF; GF5cm

Método

Hipótesis nula Todas las varianzas son iguales
Hipótesis alterna Por lo menos una varianza es diferente
Nivel de significancia $\alpha = 0,05$

Se utiliza el método F. Este método es exacto sólo para datos normales.

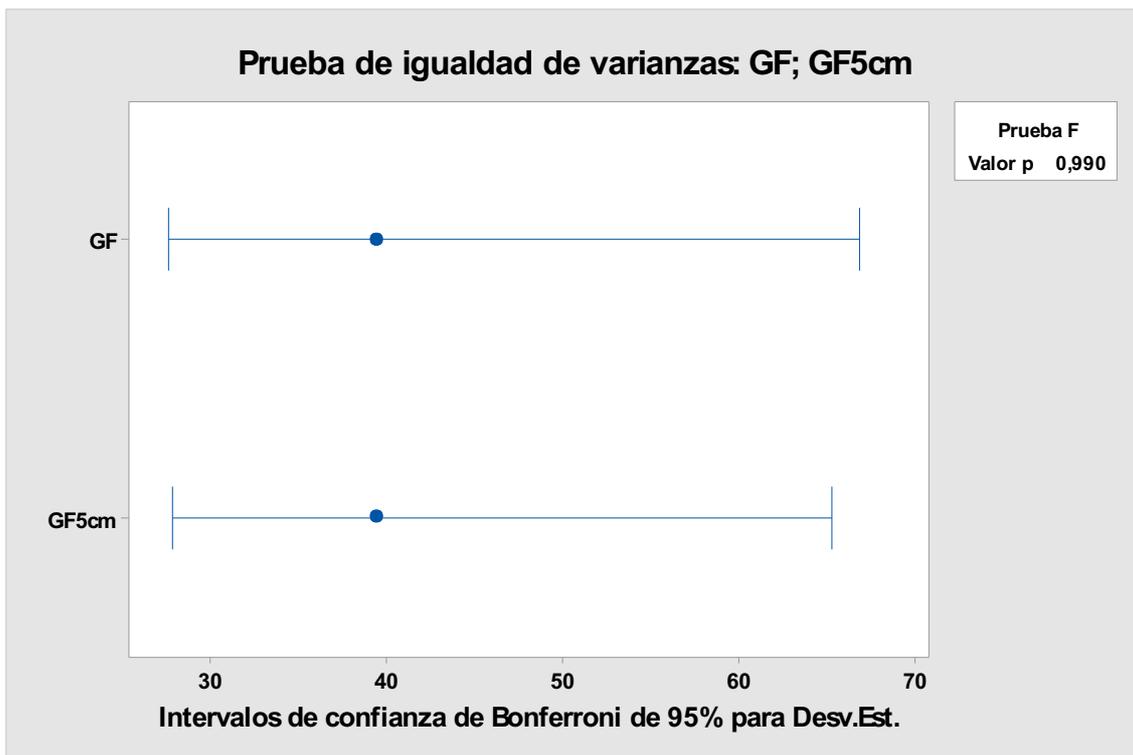
Intervalos de confianza de Bonferroni de 95% para desviaciones estándar

Muestra	N	Desv.Est.	IC
GF	15	39,4452	(27,6842; 66,8576)
GF5cm	16	39,3726	(27,9138; 65,2780)

Nivel de confianza individual = 97,5%

Pruebas

Método	Estadística de prueba	Valor p
F	1,00	0,990



Prueba de igualdad de varianzas: d0,5Pm; d0,5Pm5cm

Método

Hipótesis nula Todas las varianzas son iguales
 Hipótesis alterna Por lo menos una varianza es diferente
 Nivel de significancia $\alpha = 0,05$

Se utiliza el método F. Este método es exacto sólo para datos normales.

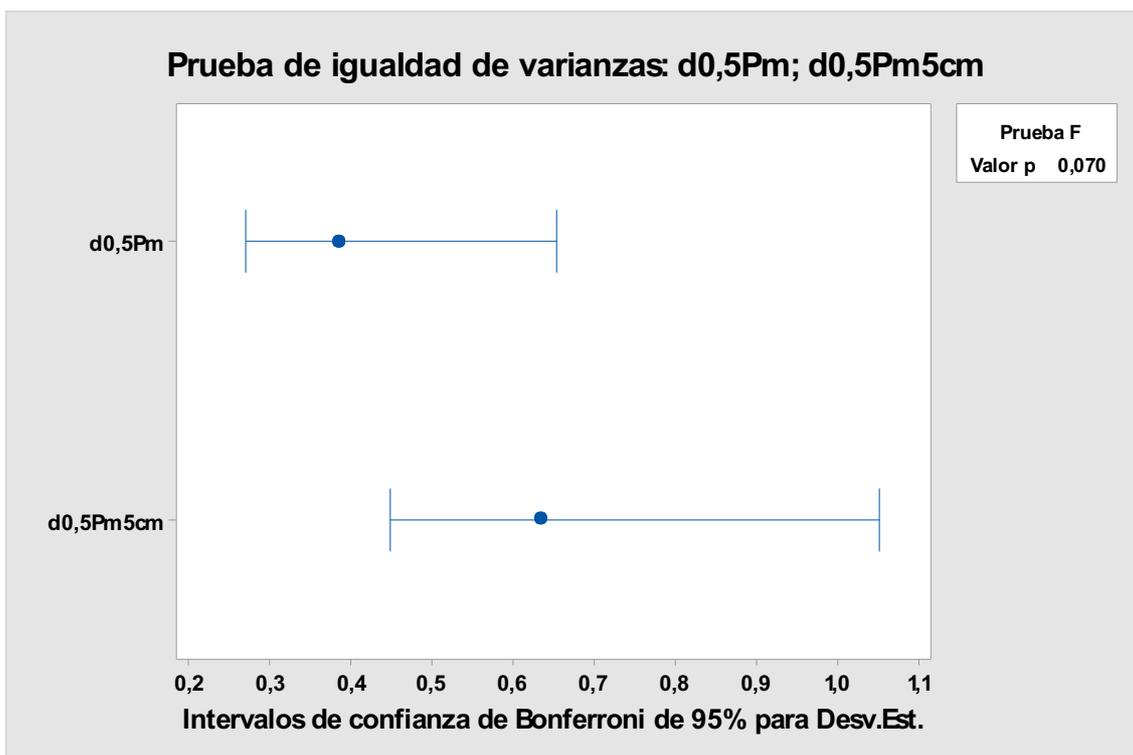
Intervalos de confianza de Bonferroni de 95% para desviaciones estándar

Muestra	N	Desv.Est.	IC
d0,5Pm	15	0,385980	(0,270896; 0,65422)
d0,5Pm5cm	16	0,634777	(0,450034; 1,05243)

Nivel de confianza individual = 97,5%

Pruebas

Método	Estadística de prueba	Valor p
F	0,37	0,070



ANEJO 6

Test de T-STUDENT

En el anejo 6, se muestran los resultados obtenidos al aplicar el test T-Student entre los respectivos grupos de muestras.

T STUDENT 8B 5-3cm 5º

Prueba T e IC de dos muestras: IRT; IRT 3cm

Método

μ_1 : media de IRT

μ_2 : media de IRT 3cm

Diferencia: $\mu_1 - \mu_2$

No se presupuso igualdad de varianzas para este análisis.

Estadísticas descriptivas

Muestra	N	Media	Desv.Est.	Error estándar de la media
IRT	16	3,851	0,694	0,17
IRT 3cm	15	3,53	1,21	0,31

Estimación de la diferencia

Diferencia	IC de 95% para la diferencia
0,324	(-0,416; 1,065)

Prueba

Hipótesis nula $H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$

Hipótesis alterna $H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$

Valor T	GL	Valor p
0,91	22	0,373

Prueba T e IC de dos muestras: GF; GF 3cm

Método

μ_1 : media de GF

μ_2 : media de GF 3cm

Diferencia: $\mu_1 - \mu_2$

Se presupuso igualdad de varianzas para este análisis.

Estadísticas descriptivas

Muestra	N	Media	Desv.Est.	Error estándar de la media
GF	16	694,0	95,9	24
GF 3cm	15	733	120	31

Estimación de la diferencia

Diferencia	Desv.Est. agrupada	IC de 95% para la diferencia
-38,7	108,0	(-118,1; 40,7)

Prueba

Hipótesis nula $H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$

Hipótesis alterna $H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$

Valor T	GL	Valor p
-1,00	29	0,327

Prueba T e IC de dos muestras: d0,5Pm; d0,5Pm 3cm

Método

μ_1 : media de d0,5Pm

μ_2 : media de d0,5Pm 3cm

Diferencia: $\mu_1 - \mu_2$

Se presupuso igualdad de varianzas para este análisis.

Estadísticas descriptivas

Muestra	N	Media	Desv.Est.	Error estándar de la media
d0,5Pm	16	0,955	0,178	0,045
d0,5Pm 3cm	15	1,075	0,226	0,058

Estimación de la diferencia

Diferencia	Desv.Est. agrupada	IC de 95% para la diferencia
-0,1200	0,2026	(-0,2689; 0,0289)

Prueba

Hipótesis nula $H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$

Hipótesis alterna $H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$

Valor T	GL	Valor p
-1,65	29	0,110

T STUDENT 8B 5-3cm 20º

Prueba T e IC de dos muestras: IRT; IRT3cm

Método

μ_1 : media de IRT

μ_2 : media de IRT3cm

Diferencia: $\mu_1 - \mu_2$

No se presupuso igualdad de varianzas para este análisis.

Estadísticas descriptivas

Muestra	N	Media	Desv.Est.	Error estándar de la media
IRT	15	0,827	0,142	0,037
IRT3cm	14	0,962	0,380	0,10

Estimación de la diferencia

Diferencia	IC de 95% para la diferencia
-0,135	(-0,363; 0,094)

Prueba

Hipótesis nula $H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$

Hipótesis alterna $H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$

Valor T	GL	Valor p
-1,25	16	0,230

Prueba T e IC de dos muestras: GF; GF3cm

Método

μ_1 : media de GF

μ_2 : media de GF3cm

Diferencia: $\mu_1 - \mu_2$

Se presupuso igualdad de varianzas para este análisis.

Estadísticas descriptivas

Muestra	N	Media	Desv.Est.	Error estándar de la media
GF	15	367,5	39,4	10
GF3cm	14	230,6	66,0	18

Estimación de la diferencia

Diferencia	Desv.Est. agrupada	IC de 95% para la diferencia
136,9	53,9	(95,8; 177,9)

Prueba

Hipótesis nula $H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$

Hipótesis alterna $H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$

Valor T	GL	Valor p
6,84	27	0,000

Prueba T e IC de dos muestras: d0,5Pm; d0,5Pm3cm

Método

μ_1 : media de d0,5Pm

μ_2 : media de d0,5Pm3cm

Diferencia: $\mu_1 - \mu_2$

Se presupuso igualdad de varianzas para este análisis.

Estadísticas descriptivas

Muestra	N	Media	Desv.Est.	Error estándar de la media
d0,5Pm	15	2,875	0,386	0,10
d0,5Pm3cm	14	2,459	0,316	0,085

Estimación de la diferencia

Diferencia	Desv.Est. agrupada	IC de 95% para la diferencia
0,416	0,354	(0,146; 0,686)

Prueba

Hipótesis nula $H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$

Hipótesis alterna $H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$

Valor T	GL	Valor p
3,16	27	0,004

T STUDENT 11B 5-3cm 5º

Prueba T e IC de dos muestras: IRT; IRT3cm

Método

μ_1 : media de IRT

μ_2 : media de IRT3cm

Diferencia: $\mu_1 - \mu_2$

Se presupuso igualdad de varianzas para este análisis.

Estadísticas descriptivas

Muestra	N	Media	Desv.Est.	Error estándar de la media
IRT	16	3,754	0,978	0,24
IRT3cm	16	4,394	0,705	0,18

Estimación de la diferencia

Diferencia	Desv.Est. agrupada	IC de 95% para la diferencia
-0,640	0,852	(-1,255; -0,024)

Prueba

Hipótesis nula $H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$

Hipótesis alterna $H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$

Valor T	GL	Valor p
-2,12	30	0,042

Prueba T e IC de dos muestras: GF; GF3cm

Método

μ_1 : media de GF

μ_2 : media de GF3cm

Diferencia: $\mu_1 - \mu_2$

Se presupuso igualdad de varianzas para este análisis.

Estadísticas descriptivas

Muestra	N	Media	Desv.Est.	Error estándar de la media
GF	16	884	128	32
GF3cm	16	825	202	51

Estimación de la diferencia

Diferencia	Desv.Est. agrupada	IC de 95% para la diferencia
59,2	169,0	(-62,9; 181,2)

Prueba

Hipótesis nula $H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$

Hipótesis alterna $H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$

Valor T	GL	Valor p
0,99	30	0,330

Prueba T e IC de dos muestras: d0,5Pm; d0,5Pm3cm

Método

μ_1 : media de d0,5Pm

μ_2 : media de d0,5Pm3cm

Diferencia: $\mu_1 - \mu_2$

Se presupuso igualdad de varianzas para este análisis.

Estadísticas descriptivas

Muestra	N	Media	Desv.Est.	Error estándar de la media
d0,5Pm	16	1,126	0,221	0,055
d0,5Pm3cm	16	1,084	0,266	0,066

Estimación de la diferencia

Diferencia	Desv.Est. agrupada	IC de 95% para la diferencia
0,0420	0,2443	(-0,1344; 0,2184)

Prueba

Hipótesis nula $H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$

Hipótesis alterna $H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$

Valor T	GL	Valor p
0,49	30	0,630

T STUDENT 11B 5-3cm 20º

Prueba T e IC de dos muestras: IRT; IRT3cm

Método

μ_1 : media de IRT

μ_2 : media de IRT3cm

Diferencia: $\mu_1 - \mu_2$

Se presupuso igualdad de varianzas para este análisis.

Estadísticas descriptivas

Muestra	N	Media	Desv.Est.	Error estándar de la media
IRT	16	0,808	0,201	0,050
IRT3cm	16	0,560	0,204	0,051

Estimación de la diferencia

Diferencia	Desv.Est. agrupada	IC de 95% para la diferencia
0,2478	0,2025	(0,1016; 0,3941)

Prueba

Hipótesis nula $H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$

Hipótesis alterna $H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$

Valor T	GL	Valor p
3,46	30	0,002

Prueba T e IC de dos muestras: GF; GF3cm

Método

μ_1 : media de GF

μ_2 : media de GF3cm

Diferencia: $\mu_1 - \mu_2$

Se presupuso igualdad de varianzas para este análisis.

Estadísticas descriptivas

Muestra	N	Media	Desv.Est.	Error estándar de la media
GF	16	361,5	39,4	9,8
GF3cm	16	314,4	61,7	15

Estimación de la diferencia

Diferencia	Desv.Est. agrupada	IC de 95% para la diferencia
47,2	51,8	(9,8; 84,6)

Prueba

Hipótesis nula $H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$

Hipótesis alterna $H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$

Valor T	GL	Valor p
2,58	30	0,015

Prueba T e IC de dos muestras: d0,5Pm; d0,5Pm3cm

Método

μ_1 : media de d0,5Pm

μ_2 : media de d0,5Pm3cm

Diferencia: $\mu_1 - \mu_2$

Se presupuso igualdad de varianzas para este análisis.

Estadísticas descriptivas

Muestra	N	Media	Desv.Est.	Error estándar de la media
d0,5Pm	16	3,241	0,635	0,16
d0,5Pm3cm	16	3,029	0,613	0,15

Estimación de la diferencia

Diferencia	Desv.Est. agrupada	IC de 95% para la diferencia
0,212	0,624	(-0,239; 0,662)

Prueba

Hipótesis nula $H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$

Hipótesis alterna $H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$

Valor T	GL	Valor p
0,96	30	0,345

T STUDENT 8B-11B 3cm. 5º

Prueba T e IC de dos muestras: IRT; IRT11B Método

μ_1 : media de IRT

μ_2 : media de IRT11B

Diferencia: $\mu_1 - \mu_2$

No se presupuso igualdad de varianzas para este análisis.

Estadísticas descriptivas

Muestra	N	Media	Desv.Est.	Error estándar de la media
IRT	15	3,53	1,21	0,31
IRT11B	16	4,394	0,705	0,18

Estimación de la diferencia

Diferencia	IC de 95% para la diferencia
-0,867	(-1,610; -0,124)

Prueba

Hipótesis nula $H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$

Hipótesis alterna $H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$

Valor T	GL	Valor p
-2,42	22	0,024

Prueba T e IC de dos muestras: GF; GF11B

Método

μ_1 : media de GF

μ_2 : media de GF11B

Diferencia: $\mu_1 - \mu_2$

Se presupuso igualdad de varianzas para este análisis.

Estadísticas descriptivas

Muestra	N	Media	Desv.Est.	Error estándar de la media
GF	15	733	120	31
GF11B	16	825	202	51

Estimación de la diferencia

Diferencia	Desv.Est. agrupada	IC de 95% para la diferencia
-92,4	167,4	(-215,4; 30,7)

Prueba

Hipótesis nula $H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$

Hipótesis alterna $H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$

Valor T	GL	Valor p
-1,53	29	0,136

Prueba T e IC de dos muestras: d0,5Pm; d0,5Pm11B

Método

μ_1 : media de d0,5Pm

μ_2 : media de d0,5Pm11B

Diferencia: $\mu_1 - \mu_2$

Se presupuso igualdad de varianzas para este análisis.

Estadísticas descriptivas

Muestra	N	Media	Desv.Est.	Error estándar de la media
d0,5Pm	15	1,075	0,226	0,058
d0,5Pm11B	16	1,084	0,266	0,066

Estimación de la diferencia

Diferencia	Desv.Est. agrupada	IC de 95% para la diferencia
-0,0090	0,2474	(-0,1909; 0,1728)

Prueba

Hipótesis nula $H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$

Hipótesis alterna $H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$

Valor T	GL	Valor p
-0,10	29	0,920

T STUDENT 8B-11B 3cm 20º

Prueba T e IC de dos muestras: IRT; IRT11B

Método

μ_1 : media de IRT

μ_2 : media de IRT11B

Diferencia: $\mu_1 - \mu_2$

No se presupuso igualdad de varianzas para este análisis.

Estadísticas descriptivas

Muestra	N	Media	Desv.Est.	Error estándar de la media
IRT	14	0,962	0,380	0,10
IRT11B	16	0,560	0,204	0,051

Estimación de la diferencia

Diferencia	IC de 95% para la diferencia
0,402	(0,164; 0,640)

Prueba

Hipótesis nula $H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$

Hipótesis alterna $H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$

Valor T	GL	Valor p
3,54	19	0,002

Prueba T e IC de dos muestras: GF; GF11B

Método

μ_1 : media de GF

μ_2 : media de GF11B

Diferencia: $\mu_1 - \mu_2$

Se presupuso igualdad de varianzas para este análisis.

Estadísticas descriptivas

Muestra	N	Media	Desv.Est.	Error estándar de la media
GF	14	230,6	66,0	18
GF11B	16	314,4	61,7	15

Estimación de la diferencia

Diferencia	Desv.Est. agrupada	IC de 95% para la diferencia
-83,7	63,7	(-131,5; -36,0)

Prueba

Hipótesis nula $H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$

Hipótesis alterna $H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$

Valor T	GL	Valor p
-3,59	28	0,001

Prueba T e IC de dos muestras: d0,5Pm; d0,5Pm11B

Método

μ_1 : media de d0,5Pm

μ_2 : media de d0,5Pm11B

Diferencia: $\mu_1 - \mu_2$

Se presupuso igualdad de varianzas para este análisis.

Estadísticas descriptivas

Muestra	N	Media	Desv.Est.	Error estándar de la media
d0,5Pm	14	2,459	0,316	0,085
d0,5Pm11B	16	3,029	0,613	0,15

Estimación de la diferencia

Diferencia	Desv.Est. agrupada	IC de 95% para la diferencia
-0,571	0,498	(-0,944; -0,198)

Prueba

Hipótesis nula $H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$

Hipótesis alterna $H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$

Valor T	GL	Valor p
-3,13	28	0,004

T STUDENT 8B-11B 5cm 5º

Prueba T e IC de dos muestras: IRT; IRT11B

Método

μ_1 : media de IRT

μ_2 : media de IRT11B

Diferencia: $\mu_1 - \mu_2$

Se presupuso igualdad de varianzas para este análisis.

Estadísticas descriptivas

Muestra	N	Media	Desv.Est.	Error estándar de la media
IRT	16	3,851	0,694	0,17
IRT11B	16	3,754	0,978	0,24

Estimación de la diferencia

Diferencia	Desv.Est. agrupada	IC de 95% para la diferencia
0,097	0,848	(-0,515; 0,710)

Prueba

Hipótesis nula $H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$

Hipótesis alterna $H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$

Valor T	GL	Valor p
0,33	30	0,747

Prueba T e IC de dos muestras: GF; GF11B

Método

μ_1 : media de GF

μ_2 : media de GF11B

Diferencia: $\mu_1 - \mu_2$

Se presupuso igualdad de varianzas para este análisis.

Estadísticas descriptivas

Muestra	N	Media	Desv.Est.	Error estándar de la media
GF	16	694,0	95,9	24
GF11B	16	884	128	32

Estimación de la diferencia

Diferencia	Desv.Est. agrupada	IC de 95% para la diferencia
-190,2	112,9	(-271,8; -108,7)

Prueba

Hipótesis nula $H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$

Hipótesis alterna $H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$

Valor T	GL	Valor p
-4,77	30	0,000

Prueba T e IC de dos muestras: d0,5Pm; d0,5Pm11B

Método

μ_1 : media de d0,5Pm

μ_2 : media de d0,5Pm11B

Diferencia: $\mu_1 - \mu_2$

Se presupuso igualdad de varianzas para este análisis.

Estadísticas descriptivas

Muestra	N	Media	Desv.Est.	Error estándar de la media
d0,5Pm	16	0,955	0,178	0,045
d0,5Pm11B	16	1,126	0,221	0,055

Estimación de la diferencia

Diferencia	Desv.Est. agrupada	IC de 95% para la diferencia
-0,1710	0,2005	(-0,3158; -0,0263)

Prueba

Hipótesis nula $H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$

Hipótesis alterna $H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$

Valor T	GL	Valor p
-2,41	30	0,022

T STUDENT 8B 5cm 20º

Prueba T e IC de dos muestras: IRT; IRT11B

Método

μ_1 : media de IRT

μ_2 : media de IRT11B

Diferencia: $\mu_1 - \mu_2$

Se presupuso igualdad de varianzas para este análisis.

Estadísticas descriptivas

Muestra	N	Media	Desv.Est.	Error estándar de la media
IRT	15	0,827	0,142	0,037
IRT11B	16	0,808	0,201	0,050

Estimación de la diferencia

Diferencia	Desv.Est. agrupada	IC de 95% para la diferencia
0,0196	0,1748	(-0,1088; 0,1481)

Prueba

Hipótesis nula $H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$

Hipótesis alterna $H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$

Valor T	GL	Valor p
0,31	29	0,757

Prueba T e IC de dos muestras: GF; GF11B

Método

μ_1 : media de GF

μ_2 : media de GF11B

Diferencia: $\mu_1 - \mu_2$

Se presupuso igualdad de varianzas para este análisis.

Estadísticas descriptivas

Muestra	N	Media	Desv.Est.	Error estándar de la media
GF	15	367,5	39,4	10
GF11B	16	361,5	39,4	9,8

Estimación de la diferencia

Diferencia	Desv.Est. agrupada	IC de 95% para la diferencia
6,0	39,4	(-23,0; 34,9)

Prueba

Hipótesis nula $H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$

Hipótesis alterna $H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$

Valor T	GL	Valor p
0,42	29	0,677

Prueba T e IC de dos muestras: d0,5Pm; d0,5Pm11B

Método

μ_1 : media de d0,5Pm

μ_2 : media de d0,5Pm11B

Diferencia: $\mu_1 - \mu_2$

Se presupuso igualdad de varianzas para este análisis.

Estadísticas descriptivas

Muestra	N	Media	Desv.Est.	Error estándar de la media
d0,5Pm	15	2,875	0,386	0,10
d0,5Pm11B	16	3,241	0,635	0,16

Estimación de la diferencia

Diferencia	Desv.Est. agrupada	IC de 95% para la diferencia
-0,367	0,529	(-0,756; 0,023)

Prueba

Hipótesis nula $H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$

Hipótesis alterna $H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$

Valor T	GL	Valor p
-1,93	29	0,064