

**COMPARACIÓN DE LA MEZCLA ASFÁLTICA SIN ADICIONES Y MEZCLA
ASFÁLTICA CON GCR (GRANO DE CAUCHO RECICLADO) EMPLEANDO EL
ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA.**

**YINI ZAYDITH GARCÍA FIGUEROA
SERGIO ANDRÉS LONDOÑO MENJURA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-MECANICAS
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
BUCARAMANGA**

2018

**COMPARACIÓN DE LA MEZCLA ASFÁLTICA SIN ADICIONES Y MEZCLA
ASFÁLTICA CON GCR (GRANO DE CAUCHO RECICLADO) EMPLEANDO EL
ENSAYO DE TRACCION INDIRECTA.**

**YINI ZAYDITH GARCÍA FIGUEROA
SERGIO ANDRÉS LONDOÑO MENJURA**

Proyecto de grado para optar al título de Ingeniero Civil

Director

**LUDWING PÉREZ BUSTOS
M. SC. en Ingeniería Civil**

Codirectora

**SANDRA MILENA COTE VARGAS
M. SC. en Ingeniería Civil**

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

2018

DEDICATORIA

En primera instancia quisiera agradecer a Dios por estar conmigo en cada paso que doy, por darme sabiduría, salud y fortaleza a lo largo de mi carrera y por haber puesto en mi camino aquellas personas que me acompañaron en este proceso.

A una mujer maravillosa, a mi amada madre María Ofelma Figueroa Ribero que ha luchado incansablemente por sus hijos para que nunca nos falte nada y ha sido ejemplo de firmeza enseñándome humildad, valentía y esfuerzo. Ha sido mi motor de arranque, gracias por estar a mi lado en cada momento de mi vida y por brindarme todo su apoyo, a ella y para ella es mi triunfo.

A mi padre Gerardo García Arguello quien me brindó todo su apoyo siendo parte fundamental de esta meta, gracias a su esfuerzo. Me enseñó a tener fortaleza, criterio y decisión, partes fundamentales para lograr mis objetivos esto es para usted.

A mi abuela María de Jesús Ribero, quien me educó con mucho cariño y disciplina inculcándome valores siendo así una persona especial. Quien pacientemente esperó y fue mi motivación en este recorrido, gracias por confiar en mis capacidades.

A mis pequeños hermanos Zarick, Davinson y Yuleni quienes me ven como un ejemplo a seguir y son parte importante de mi vida, con mucho cariño esto también es para ustedes.

A mi pequeño Zoe que es el rayo de luz que alumbró mis días dándome todo su cariño y atención, siendo parte importante en mi vida.

A mis amigas Catalina Bonilla y Génesis Quiroga, mis confidentes quienes estuvieron siempre a mi lado dándome fuerza y apoyo, viviendo momentos especiales riendo llorando pero nunca nos dimos por vencidas, gracias por ser mi apoyo en este recorrido que no fue fácil pero gracias a sus palabras puedo decir hoy que lo logré!

YINI ZAYDITH GARCIA FIGUEROA

DEDICATORIA

Este proyecto se lo dedicó a Dios, porque nunca me ha dejado solo, porque sin él no soy nada, porque gracias a él obtuve la orientación, fortaleza, perseverancia, coraje e inteligencia necesaria para superar las adversidades, temores, retos y decisiones que enfrente a lo largo de mi carrera.

Se lo dedico muy especialmente a mi amada familia, porque me han dado un gran regalo, uno que supera los límites del dinero y con el cuál viviré sin que nadie pueda arrebatármelo...

A mi papá, mi modelo a seguir y mi admirado mentor Sergio Londoño Valencia, quien, en su forma de ser, cariño, profesionalismo y amor, me ha aconsejado y guiado para afrontar los problemas con altura, consintiendo el sentido de la humildad y solidaridad, porque me ha brindado, con experiencias lecciones importantes, porque es un héroe para mí...

A mi mama, Luz Azucena Menjura Gonzales, quien me ha dado fortaleza y apoyo en momentos difíciles, porque su amor, cariño y comprensión me han permitido perseverar en los obstáculos, porque más que una madre es una amiga, porque es un ángel en mi vida...

A mi hermano y futuro colega Juan David Londoño Menjura, quien ha sido inspiración para seguir adelante brindándome su apoyo, por su amistad y comprensión, porque me simboliza para mí una persona con cualidades importantes que me motivan para ser mejor...

A mis queridos familiares, que con su preocupación y consejos demuestran el amor que me tienen, un amor que me dio fuerzas en cada paso y lucha que afronte a lo largo de este camino.

A Yuliana Paola Ortiz Patiño, quien ha vivido junto a mí diversidad de situaciones, porque ha permanecido conmigo en las situaciones buenas y malas, porque representa un gran espacio en mi corazón, porque siempre me ha brindado la mano, dándome impulso para seguir cada vez más alto.

A mis amigos, profesores y compañeros, que han aportado en mi carrera, quienes me enseñaron diversas virtudes necesarias para el ambiente laboral, abriéndome el panorama y brindándome experiencias con las cuales crecí como ingeniero y como persona.

SERGIO ANDRÉS LONDOÑO MENJURA

“Si un hombre es perseverante, aunque sea duro de entendimiento, se hará inteligente; y aunque sea débil se transformará en fuerte”.
Leonardo Davinci.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento a:

En primera instancia a Dios que nos dio sabiduría, perseverancia, fortaleza y capacidad para alcanzar nuestras metas.

A nuestros padres, familiares y amigos que siempre estuvieron con nosotros, apoyándonos en los momentos más difíciles y brindándonos palabras de aliento.

Ing. Ludwing Pérez Bustos, director de este proyecto, y a la Ing. Sandra Cote Vargas, quienes con su apoyo y dedicación nos guiaron y corrigieron impartiendo sus conocimientos siendo parte importante en la estructuración del proyecto.

MPI. Ltda. Por permitirnos hacer uso de su laboratorio y por su constante acompañamiento en las etapas experimentales de este proyecto.

Ing. Jairo Torres Jácome, por su amistad, tiempo y disposición, orientándonos en el transcurso de la realización de los ensayos.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	18
1. JUSTIFICACIÓN.....	20
2. OBJETIVOS.....	21
2.1 OBJETIVO GENERAL	21
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	21
3. MARCO TEÓRICO	22
3.1 ASFALTO.....	22
3.1.1 Refinación del petróleo	22
3.1.2 Reacción del asfalto ante altas temperaturas	23
3.1.3 Reacción del asfalto ante bajas temperaturas	24
3.1.4 Reacción del asfalto a temperatura ambiente.....	24
3.2 ASFALTOS MODIFICADOS	24
3.3 MEZCLAS ASFÁLTICAS	25
3.3.1 Clasificación.....	27
3.3.1.1 Por el árido empleado	27
3.3.1.2 Por la temperatura puesta en obra	27
3.3.1.3 Por el porcentaje de huecos en la mezcla	28
3.3.1.4 Por el tamaño máximo de los áridos	28
3.3.1.5 Por la granulometría de los áridos	29
3.2 MEZCLA ASFÁLTICA CONVENCIONAL	29
3.3 MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA CON GCR.....	30
3.4. GRANO DE CAUCHO RECICLADO (GCR)	30
3.5 MÉTODOS DE INCORPORACION DEL GCR	31
3.5.1 Proceso por vía seca	31
3.5.2 Proceso por vía húmeda.....	33

3.6 METODO MARSHALL	35
3.7 PARÁMETROS VOLUMÉTRICOS	36
3.7.1 Gravedad específica bulk del agregado (Gsb)	36
3.7.2 Gravedad específica de bulk (Gmb)	37
3.7.3 Gravedad Máxima de la Mezcla o Gravedad específica teórica (Gmm)	37
3.7.5 Gravedad específica efectiva del agregado (Gse)	38
3.7.6 Absorción del asfalto (Pba)	38
3.7.7 Volumen de asfalto absorbido (Vba)	39
3.7.8 Contenido efectivo de asfalto (Pbe)	39
3.7.9 Vacíos en el agregado mineral (VAM)	40
3.7.10 Vacíos de aire (Va)	40
3.7.11 Vacíos llenos de asfalto (VFA)	41
3.7.12 Relación de polvo o relación llenante efectivo (P(0.075)/Pbe)	41
3.8 ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA	42
3.9 MÓDULO DE RIGIDEZ	43
4. REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE	46
5- METODOLOGÍA	60
5.1 CARACTERIZACIÓN DE LOS AGREGADOS PÉTREOS	60
5.2 CARACTERIZACIÓN DE GRANO DE CAUCHO RECICLADO (GCR)	61
5.3 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO	62
5.4 CARACTERIZACIÓN DEL LIGANTE ASFÁLTICO	69
5.5 DISEÑO DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS	72
5.5.1 Diseño de Mezcla Convencional	73
5.5.1.1 Contenido Óptimo de Asfalto	75
5.5.1.2 Gravedades Especificas	75
5.5.1.3 Estabilidad y Flujo	76
5.5.1.4 Parámetros Volumétricos	77
5.5.2 Diseño de Mezcla con GCR	77
5.5.3 Parámetros Volumétricos, Estabilidad y Flujo	78
5.6 ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA	78

5.6.1 Fase de Diseño del Espécimen	79
5.6.2 Fase de Ensayo de Tracción Indirecta.....	80
6. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	86
6.1 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO.....	86
6.2 DISEÑO DE LAS MEZCLAS.....	86
6.2.1 Contenido óptimo de asfalto	86
6.2.1 Porcentaje óptimo de GCR	91
6.3 ENSAYO DE AHUELLAMIENTO.....	93
6.4 ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA	94
7. CONCLUSIONES	99
8. RECOMENDACIONES.....	101
BIBLIOGRAFÍA.....	103
ANEXOS	111

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Productos y temperaturas típicas de destilación.....	23
Figura 2. Proceso adición del GCR al asfalto por vía seca.....	32
Figura 3. Proceso adición del GCR al asfalto por vía húmeda.	34
Figura 4. Aparato estabilidad de Marshall.....	35
Figura 5. Ilustración de los parámetros volumétricos.....	41
Figura 6. Estado de esfuerzos a tensión que experimenta un pavimento para cargas simples.....	43
Figura 7. Ley de fatiga de mezclas asfálticas con GCR por vía seca.	48
Figura 8. Resistencia a la deformación permanente.....	51
Figura 9. Profundidad de la huella vs Porcentaje de RAP.	51
Figura 10. Profundidad de la huella vs tamaño del GCR.	52
Figura 11. Profundidad de la huella vs Porcentaje de GCR.....	53
Figura 12. Profundidad de la huella vs Porcentaje de vacíos de aire.	53
Figura 13. Polímeros modificadores de asfalto.....	55
Figura 14. Comparación de curvas maestras de módulos dinámicos.....	59
Figura 15. Caracterización físico-mecánica de agregados.	61
Figura 16. Grafica distribución granulométrica de agregados.....	63
Figura 17. Grafica de distribución granulométrica de mezcla convencional.	64
Figura 18. Grafica distribución granulométrica de mezcla con 1% de GCR.	65
Figura 19. Grafica distribución granulométrica de mezcla con 1.5% de GCR.	66
Figura 20. Grafica distribución granulométrica de mezcla con 2% de GCR.	67
Figura 21. Grafica distribución granulométrica de mezcla con 4% de GCR.	68
Figura 22. Curva reológica del asfalto 60/70.	69
Figura 23. Calentamiento del ligante para el mezclado.	73
Figura 24. (a) Mezclador mecánico con materiales; (b) Mezcla homogénea.....	74

Figura 25. Compactación de mezcla con Martillo compactador.....	74
Figura 26. (a) Extractor de núcleos; (b)Mezclas compactadas y extraídas.....	74
Figura 27. Probetas sumergidas para obtención de su gravedad especifica.....	75
Figura 28. (a) Picnómetro de vacío; (b) Dispositivo de agitación.....	76
Figura 29. Material granular con GCR fino.	77
Figura 30. Equipo NAT HYD25-II (MPI) empleado en tracción indirecta.	79
Figura 31. Elaboración de mezcla homogénea y mezcla de agregados con GCR.....	80
Figura 32. Forma del impulso de carga.	81
Figura 33. Amplitud de deformación.	82
Figura 34. Probeta dispuesta para el ensayo.	83
Figura 35. Posicionamiento de palancas del soporte de alineación LVDT.	84
Figura 36. Peso específico vs. % Asfalto.....	87
Figura 37. % Vacíos con aire vs. % Asfalto.	88
Figura 38. % Vacíos en el agregado mineral vs. % Asfalto.	88
Figura 39. % Vacíos llenos de asfalto vs. % Asfalto.	89
Figura 40. Estabilidad vs. % Asfalto.....	89
Figura 41. Flujo vs. % Asfalto.	90
Figura 42. Efecto de temperaturas a frecuencias constantes en las mezclas.	95
Figura 43. Efecto de frecuencias a temperaturas constantes en las mezclas.	96
Figura 44. Efecto de frecuencias a temperaturas constantes en las mezclas.	97
Figura 45. Efecto de frecuencias a temperaturas constantes en las mezclas.	97

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Variación de tamaños en los agregados pétreos.	60
Tabla 2. Distribución granulométrica de materiales	62
Tabla 3. Proporciones de los agregados	63
Tabla 4. Gradación de mezcla Convencional.....	64
Tabla 5. Gradación de mezcla modificada con 1% de GCR.	65
Tabla 6. Gradación de mezcla modificada con 1.5% de GCR.	66
Tabla 7. Gradación de mezcla modificada con 2% de GCR.	67
Tabla 8. Gradación de mezcla modificada con 4% de GCR.	68
Tabla 9. Temperaturas utilizadas en los ensayos.	69
Tabla 10. Caracterización del ligante asfáltico.....	70
Tabla 11. Criterios para el diseño preliminar de la mezcla asfáltica.	72
Tabla 12. Gradación para cada tipo de mezcla.....	86
Tabla 13. Parámetros fundamentales del diseño Marshall.	87
Tabla 14. Verificación de los parámetros para el porcentaje óptimo de asfalto.	91
Tabla 15. Resultados de los parámetros de las mezclas para diferentes porcentajes de caucho.	91
Tabla 16. Tabla comparativa de parámetros entre la mezcla convencional y la modificada con GCR.	92
Tabla 17. Resultados de módulos en la mezcla convencional según frecuencia y temperatura.....	95
Tabla 18. Resultados de módulos en la mezcla con 1.5% de GCR según frecuencia y temperatura.	96

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. Caracterización físico-mecánica de agregados. (Fuente: MPI. Ltda.)	111
ANEXO B. Caracterización del ligante asfáltico. (Fuente: MPI. Ltda.)	112
ANEXO C. Curva reológica del asfalto 60/70. (Fuente: MPI Ltda.).....	114
ANEXO D. Verificación de los parámetros para el porcentaje óptimo de asfalto.	115
ANEXO E. Resultados de los parámetros de las mezclas para diferentes porcentajes de caucho.	116
ANEXO F. Informe del módulo resiliente por compresión diametral. ESPECIMEN (CONVENCIONAL).....	117
ANEXO G. Informe del módulo resiliente por compresión diametral. ESPECIMEN (CON GCR AL 1.5%).....	178
ANEXO H. Efecto de temperaturas a frecuencias constantes en las mezclas. ...	241
ANEXO I. Efecto de frecuencias a temperaturas constantes en las mezclas.	242
ANEXO J. Efecto de frecuencias a temperaturas constantes en las mezclas.	243
ANEXO K. Efecto de frecuencias a temperaturas constantes en las mezclas.....	244
ANEXO L. Resultados de deformaciones para una mezcla convencional MDC- 19.....	245
ANEXO M. Resultados de deformación total de una mezcla convencional MDC- 19.....	246
ANEXO N. Resultados velocidades de deformación MDC-19.	247
ANEXO O. Resultados de deformaciones para una mezcla MDC-19 con GCR al 1.5% de reemplazo.	248
ANEXO P. Resultados de deformación total de una mezcla MDC-19 con 1.5% de reemplazo.	249
ANEXO Q. Resultados velocidades de deformación de una mezcla MDC-19 con 1.5% de reemplazo.	250

RESUMEN

TITULO: COMPARACIÓN DE LA MEZCLA ASFÁLTICA SIN ADICIONES Y MEZCLA ASFÁLTICA CON GCR (GRANO DE CAUCHO RECICLADO) EMPLEANDO EL ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA.*

AUTOR(ES): Y INI ZAYDITH GARCÍA FIGUEROA
SERGIO ANDRÉS LONDOÑO MENJURA**

PALABRAS CLAVE: MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA, VÍA SECA, GRANO DE CAUCHO RECICLADO, AGREGADO FINO, RIGIDEZ, TRACCIÓN INDIRECTA

DESCRIPCIÓN:

Actualmente el caucho de llanta es desechado en grandes cantidades generando problemáticas sociales y ambientales que afectan negativamente a la sociedad, sin embargo, posee características que permiten mejorar las propiedades de las mezclas asfálticas gracias a su resistencia al envejecimiento y elasticidad. La aplicación del caucho es una alternativa para la elaboración, el mantenimiento, la rehabilitación de carreteras y la disminución de la contaminación ambiental. Debido a las características del caucho es importante considerar los efectos que tiene la inclusión de este en las mezclas asfálticas, especialmente en términos de su rigidez, puesto que su relación con las componentes elásticas puede variar el comportamiento viscoso de las mezclas una vez puesta en servicio. En el presente proyecto se compara el comportamiento de una mezcla asfáltica sin adiciones y una mezcla asfáltica con grano de caucho reciclado (GCR) reemplazando el 1, 1.5, 2 y 4% en peso del agregado fino; estudio que comprende una etapa de diseño y una etapa de ensayo por tracción indirecta. En la primera etapa se diseñaron dos tipos de mezclas, una convencional y otra con GCR, desarrollándose mediante el método Marshall para hallar los porcentajes óptimos tanto de asfalto como caucho en cada una de las mezclas. Por último, las mezclas fueron sometidas al ensayo de tracción indirecta aplicando frecuencias de 2.5, 5 y 10 Hz con temperaturas de 5, 20 y 40°, con el fin de hallar su rigidez en diferentes escenarios y comparar los resultados entre los especímenes.

* Proyecto de grado

** Facultad de ingenierías fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director MSc Ludwing Perez Buscots, Codirectora: MSc Sandra Milena Cote Vargas

ABSTRACT

TITULO: COMPARISON OF ASPHALT MIX WITHOUT ADDITIONS AND ASPHALTIC MIX WITH GCR (RECYCLED RUBBER GRAIN) USING THE INDIRECT TRACTION TEST*.

AUTOR(ES): YINI ZAYDITH GARCÍA FIGUEROA
SERGIO ANDRÉS LONDOÑO MENJURA**

KEYWORDS: MODIFIED ASPHALTIC MIX, DRY WAY, RECYCLED RUBBER GRAIN, FINE AGGREGATE, RIGIDNESS, INDIRECT TRACTION.

DESCRIPTION:

Currently, rubber tires are discarded in large quantities, generating social and environmental problems that negatively affect society, however, they have properties that allow improving the properties of chemical mixtures thanks to their resistance to aging and elasticity. The application of rubber is an alternative for the preparation, maintenance, rehabilitation and reduction of environmental pollution. Due to the characteristics of rubber it is important to consider the effects of the inclusion of this in chemical mixtures, especially in terms of its rigidity, that its relationship with the elastic components can vary the viscous behavior of the mixtures once put into service. In the present project, the behavior of an asphalt mixture without additions and an asphalt mixture with recycled rubber grain (GCR) is compared, replacing 1, 1.5, 2 and 4% by weight of the fine aggregate; study comprising a design stage and an indirect tensile test stage. In the first stage two types of mixtures were designed, one conventional and the other with GCR, developed by the Marshall method to find the optimal percentages of both asphalt and rubber in each of the mixtures. Finally, the mixtures were subjected to the indirect tensile test applying frequencies of 2.5, 5 and 10 Hz with temperatures of 5, 20 and 40°, in order to find their rigidity in different scenarios and compare the results between the specimens.

* Proyecto de grado

** Facultad de ingenierias fisicomecanicas. Esucela de Ingenieria Civil. Director MSc Ludwing Perez Buscots, Codirectora: MSc Sandra Milena Cote Vargas

INTRODUCCIÓN

Con el transcurrir del tiempo, las ciudades y diferentes regiones del mundo han abierto paso al desarrollo aumentando su población y la necesidad de desplazarse rápidamente, situación que conlleva a la gran demanda de vías y por lo tanto al desmesurado uso vehicular convirtiéndose en un problema para el entorno provocado por los desechos generados por el mercado automotor, para este caso en las llantas y su desuso. Ante este contexto, varias entidades como Mundo Limpio y Rueda Verde se han direccionado por el camino de la trituración y procesamiento de llantas, pues dado al auge en la construcción de vías y al elevado número de llantas fuera de uso se ha incentivado la búsqueda de alternativas que ofrezcan una solución a ambas situaciones; en diferentes partes del mundo, se han realizado estudios sobre la aplicación que se da al residuo neumático para contribuir a la sociedad, llevándose a cabo desde la creación de arrecifes superficiales hasta la elaboración de vías.

Dentro de los posibles usos del caucho, se ha descubierto un gran aprovechamiento en el área de la elaboración de pavimentos puesto que este material al combinarse con ligante y agregados pétreos forma una mezcla asfáltica con propiedades iguales o mejores, pero en muchos casos, más económicas que las que ofrece una mezcla sin ningún tipo de adiciones.

Los pavimentos en su estado de servicio son expuestos constantemente a la temperatura y a la aplicación de cargas que alteran el comportamiento elástico de la mezcla asfáltica, provocando diferentes reacciones en cuanto a su rigidez y viscosidad, aspectos que resultan apropiados estudiar para la verificación del diseño de un pavimento [1].

El presente proyecto busca comparar el comportamiento en las mezclas convencionales y con grano de caucho reciclado (GCR) por vía seca debido a la poca profundización que se ha llevado en este proceso y el potencial que tiene la aplicación de este material, con el fin de promover la investigación sobre la aplicabilidad que tiene el GCR para la construcción y mejoramiento de vías. Se pondrán a prueba las mezclas asfálticas por medio del ensayo de tracción indirecta permitiendo simular el efecto que aplican las distintas frecuencias de cargas y temperaturas a las que se ve sometido un pavimento en su estado de servicio, presentando la comparación resultante de sus propiedades volumétricas y el módulo de rigidez.

1. JUSTIFICACIÓN

En la actualidad, se presenta un problema ambiental que muy poco se ha tratado y es generado por las llantas en desuso de los vehículos, las cuales son expuestas al medio ambiente causando enfermedades y demás problemas para las personas. Las llantas fuera de uso son desechadas en sitios inapropiados que no cumplen con las normas, convirtiendo las zonas donde se depositan en lugares poco higiénicos y ocupando grandes espacios, los cuales podrían tener otro uso que no fuese el de almacenamiento, por otro lado, gran parte de estas son desechadas en los ríos causando contaminación en el agua, agravando más la problemática. Ante esta situación varias organizaciones, entre ellas la Organización Nacional de Industriales (Andi), han propuesto soluciones como la transformación de este producto en subproductos como acero, cauchos, fibras, entre otros.

Tomando como referencia la entidad Mundo Limpio, empresa recicladora de neumáticos, al año se consume un promedio de entre 4,5 y 5,5 millones de llantas en el país, de las cuales se recicla por incineración y en rellenos sanitarios un 72 por ciento, se reencaucha un 17 por ciento, el 6 por ciento tiene un destino artesanal y a un 5 por ciento se le dan otros usos [2]. Ante esta magnitud, varias entidades se han enrutado por el camino de la trituración y procesamiento de llantas, convirtiéndolas en uno de los materiales utilizados para la construcción de vías.

En el presente proyecto, apoyando el uso de llantas recicladas, se busca una mezcla asfáltica con grano de caucho reciclado, comparándola con una mezcla de asfalto convencional mediante el ensayo de la tracción indirecta, con el fin de contribuir a la reutilización del caucho componente de las llantas y aportar a la industria de la construcción de pavimentos resultados que sirvan de guía para la elaboración de mezclas asfálticas.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

- Comparar la mezcla asfáltica sin adiciones y la mezcla asfáltica con G.C.R (Grano de Caucho Reciclado) empleando el ensayo de tracción indirecta.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Documentar el procedimiento del ensayo de tracción indirecta con base en la norma europea UNE en una mezcla asfáltica.
- Diseñar la mezcla asfáltica de control por vía seca.
- Diseñar la mezcla asfáltica aplicando una dosificación entre el 1% al 4% de G.C.R por vía seca.
- Evaluar la rigidez de la mezcla asfáltica con G.C.R, con base en la norma UNE.
- Comparar y registrar los resultados entre la mezcla asfáltica con G.C.R y la mezcla asfáltica de control.

3. MARCO TEÓRICO

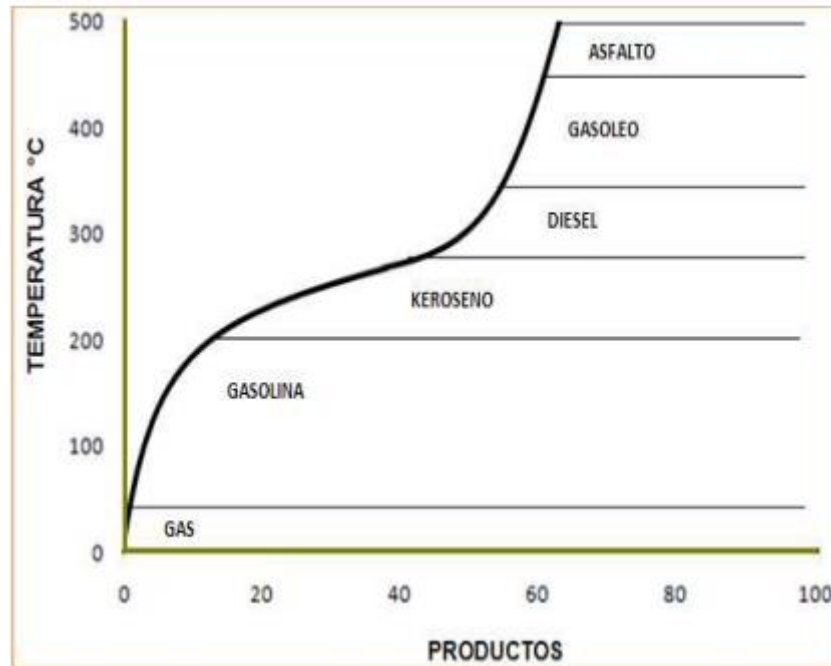
3.1 ASFALTO

El asfalto también llamado cemento asfáltico es un material de color oscuro derivado del petróleo con una composición viscosa y pegajosa, característica que favorece la fácil adhesión entre las partículas de agregados en los pavimentos. El cemento asfáltico es un material muy aplicable debido a su grado de impermeabilización y a su poca afectación por los ácidos, álcalis o sales (ATENCIA, 2011).

El asfalto, posee propiedades visco-elásticas, es decir que exhibe simultáneamente características viscosas, y se rige constantemente por la propiedad de susceptibilidad térmica, la cual genera un cambio constante en su comportamiento a diferentes temperaturas (NARANJO y RUEDA, 2011).

3.1.1 Refinación del petróleo La refinación del petróleo se hace por destilación, es un proceso en el cual las diferentes fracciones son separados fuera del crudo por medio de un aumento de la temperatura. En la Figura 1 se puede observar la separación de las fracciones a diferentes temperaturas.

Figura 1. Productos y temperaturas típicas de destilación.



Fuente: Trabajo de grado “Diseño de mezclas asfálticas densas en frío basado en el método Marshall modificado de la Universidad de Illinois”.

En la Figura 1 se puede observar que el asfalto es producido usando destilación por vacío a una temperatura de 480°C aproximadamente. La temperatura puede variar dependiendo del crudo del petróleo o del asfalto que se esté produciendo.

3.1.2 Reacción del asfalto ante altas temperaturas El cemento asfáltico al exponerse a altas temperaturas o a condiciones de velocidad y cargas sostenidas, se puede comportar como un líquido viscoso, razón por la cual se le considera un fluido Newtoniano, puesto que hay una conducta lineal entre la fuerza de resistencia y la velocidad relativa, por otro lado, el cemento asfáltico también es conocido como un material plástico, debido a que cuando empieza a fluir por sus factores detonantes este, pierde su forma y no la recupera.

3.1.3 Reacción del asfalto ante bajas temperaturas Debido a que el factor de la temperatura es variable, el asfalto tiende a sufrir como ya se hizo mención, por el aumento de la misma, afectando el comportamiento del cemento asfáltico, sin embargo al disminuirle la temperatura o al ser expuesto al tráfico pesado con altas velocidades este tiende a comportarse como un sólido elástico, el cual mediante la presencia de deformación tiene la capacidad de recuperar su forma original, sin embargo no podrá volverse a recuperar si se excede su capacidad de carga, en este caso ya no se expandirá sino que simplemente se fracturará. Debido a su comportamiento, ante la presencia de variaciones térmicas y a la respuesta en forma de hendidura de esta situación, esta mezcla se considera frágil.

3.1.4 Reacción del asfalto a temperatura ambiente Cuando el cemento asfáltico se encuentra a temperatura ambiente, la capa asfáltica tiende a comportarse de las dos formas descritas anteriormente, líquida plástica y sólida elástica lo cual permite que el asfalto tenga una buena adherencia con el agregado. Por otro lado, esta característica explica el buen funcionamiento de éste al implementarse en los pavimentos, ya que utiliza las ventajas de ambos estados, por un lado, al calentarse fluye y cubre el agregado formando así la mezcla. Después de que el asfalto se enfría este trabaja como ligante y une el agregado, formando una mezcla más sólida, la cual, en su estado final se comporta de manera visco-elástica.

3.2 ASFALTOS MODIFICADOS

Cuando al asfalto se le ha añadido de manera homogénea y estable, en un cierto porcentaje, algún tipo de aditivo para mejorar sus propiedades reológicas se le denomina asfalto modificado. El asfalto es un material muy delicado a los cambios de temperatura, sufre envejecimiento por intemperismo, se afecta por la oxidación y sus propiedades mecánicas son muy pobres: es quebradizo a bajas temperaturas y fluye un poco arriba de la temperatura del medioambiente, además de tener una

baja recuperación elástica, lo que limita ampliamente su rango de utilidad. Por estas razones el material asfáltico en ocasiones tiene que ser modificado mediante la adición de un agente químico para mejorar sustancialmente sus propiedades reológicas, es decir, que mejoren su comportamiento para una amplia gama de condiciones de temperatura o de aplicación de las cargas (PADILLA,2004).

Los aditivos modificadores pueden ser utilizados para incrementar la rigidez de las mezclas asfálticas a temperaturas críticas reduciendo la susceptibilidad ante la deformación de ahuellamiento (MARROQUIN y URIBE,2017).

3.3 MEZCLAS ASFÁLTICAS

Las mezclas asfálticas o aglomerados son combinaciones de agregados y ligantes que forman una capa homogénea y visco-elástica las cuales se emplean en la construcción de capas de rodadura o en capas inferiores y su función es proporcionar una superficie de rodamiento cómoda, segura y económica a los usuarios de las vías. Las propiedades de las mezclas bituminosas se determinan en gran parte por los materiales que la componen, ya que dependiendo de las proporciones se obtienen propiedades mecánicas diferentes.

Algunas de las ventajas que se obtienen al aplicar este tipo de mezclas para la elaboración de carreteras consisten en la presencia de resistencia al deslizamiento, su regularidad y homogeneidad superficial, y la facilidad de implementación en obra, sin embargo, se debe tener en cuenta su sensibilidad a la temperatura, ya que, siendo las mezclas bituminosas consideradas como un material visco-elástico tienden a variar su rigidez y viscosidad con el incremento o decremento de temperatura, provocando una posible deformación y reducción de su vida útil.

Según (ASPHALT INSTITUTE, 2014), una mezcla asfáltica tiene como objetivo, cumplir con:

- Suficiente asfalto para asegurar un pavimento durable.
- Suficiente estabilidad en la mezcla para satisfacer las demandas del tráfico sin distorsión.
- Suficientes vacíos de aire en la mezcla final compactada, para permitir una ligera compactación adicional bajo la carga de tráfico y una ligera cantidad de expansión térmica sin pérdida de estabilidad.
- Suficiente trabajabilidad para permitir una eficiente colocación de la mezcla sin segregación y sin sacrificar la estabilidad y el rendimiento.
- Textura agregada y dureza para proporcionar suficiente resistencia al deslizamiento en condiciones climáticas desfavorables.

El ligante bituminoso es uno de los elementos principales que componen una mezcla asfáltica, en base a su cantidad varían las ventajas y su funcionalidad, por ello es indispensable determinar la cantidad óptima para su aplicación en una mezcla asfáltica. Se determina que el ligante es óptimo cuando ofrece un equilibrio entre las propiedades requeridas según su especificación, por lo general estas relacionan el buen comportamiento del pavimento con la durabilidad, impermeabilidad, resistencia, estabilidad, rigidez, flexibilidad, resistencia a la fatiga y trabajabilidad.

Una de las características más importantes del ligante es su susceptibilidad térmica, que define en gran medida junto con las frecuencias de carga el comportamiento de la mezcla ante distintos eventos, tales como el tránsito o los diversos agentes que afectan el pavimento a la intemperie. Debido a que el ligante es un material viscoelástico el diseño y su proporción deben ser cuidadosamente estudiados, ya que dependiendo la situación para la que se diseñe tendrá un comportamiento diferente principalmente ligado a la carga que pretende soportar y la temperatura.

3.3.1 Clasificación Las mezclas asfálticas se pueden clasificar bajo algunos criterios, de la siguiente forma:

3.3.1.1 Por el árido empleado Las mezclas se clasifican en función de los tipos de áridos que se van incorporando de la siguiente manera:

- **Masilla asfáltica:** Formado por una mezcla mineral más el ligante.
- **Mortero asfáltico:** Agregado fino más masilla.
- **Macadam asfáltico:** Se obtiene mezclando árido grueso de granulometría uniforme, más mortero.
- **Concreto asfáltico:** Agregado grueso más ligante, empleado usualmente en la construcción de mezclas asfálticas.

3.3.1.2 Por la temperatura puesta en obra Existen dos temperaturas puesta en obra: Mezcla asfáltica en frío y en caliente.

- **Mezcla asfáltica en frío:** En este tipo de mezclas se emplean ligantes como emulsiones asfálticas debido a su baja viscosidad, la puesta en obra se realiza a temperatura ambiente. A diferencia de las mezclas en caliente, aplicar estas mezclas asfálticas resulta costoso y contaminante, siendo el motivo por el que su uso se da en su mayoría para la construcción de vías secundarias (YEPES, 2012).
- **Mezcla asfáltica en caliente:** Se fabrican con asfaltos a temperaturas elevadas, entre los 150 grados centígrados, según la viscosidad del ligante se calientan también los agregados para que el asfalto no se enfríe al entrar en contacto con ellos. Se realiza a temperaturas muy superiores a la del medio ambiente (PADILLA,2004).

3.3.1.3 Por el porcentaje de huecos en la mezcla Según (YEPES, 2012), el porcentaje de huecos que presenta una mezcla influye en las características mecánicas de esta, existen los siguientes tipos de mezclas:

- **Mezclas densas:** Son llamadas también cerradas por su pequeño porcentaje de huecos que se encuentra entre el 3% y el 6%, haciendo que su impermeabilidad sea muy alta, protegiendo efectivamente a sus capas subyacentes del agua.
- **Mezclas semidensas:** Similares a las mezclas densas, sino que el porcentaje de huecos cambia y es de 6% a 10%. Tienen menor contenido de finos por lo cual es mayor el ahorro económico debido a que permiten menor dosificación del ligante; son las más empleadas en capas de rodadura de pavimentos.
- **Mezclas gruesas:** Su porcentaje de huecos se encuentra entre el 10% a 15%, por lo cual conlleva menor cantidad de ligante. Carece de impermeabilidad.
- **Mezclas abiertas:** Su elevado porcentaje de huecos se encuentra entre el 15 y 20%, lo que hace que carezca de agregados finos, presentan baja impermeabilidad, son muy flexibles y altamente usadas, por lo que se usan en la elaboración de vías de tráfico liviano.
- **Mezclas porosas o drenantes:** La proporción de vacíos es superior al 20%, por su alto porcentaje de vacíos permite que se filtre el agua lluvia con mayor rapidez. El uso de mezclas drenantes o porosas protege los efectos negativos del agua a la capa subyacente (AYALA y JUARREZ, 2010).

3.3.1.4 Por el tamaño máximo de los áridos En el tamaño máximo de los áridos se encuentran los agregados gruesos y finos en las mezclas asfálticas:

- **Mezclas gruesas:** Este tipo de mezclas abarcan áridos con un tamaño que excede los 10 milímetros, estos, además, proporcionan macrotextura al pavimento, usándose como capas intermedias al ofrecer un esqueleto mineral adecuado.
- **Mezclas finas:** Este tipo de mezclas también llamadas microaglomerados o morteros asfálticos se caracterizan por poseer un árido fino con un tamaño máximo inferior a los 10 milímetros. El tamaño del árido determina el espesor mínimo con el que ha de extenderse una mezcla, el cual vendría a ser de un valor desde el doble hasta el triple del tamaño máximo; se usan como tratamiento superficial en zonas urbanas y debido a su textura no se deben usar en carreteras con velocidades altas.

3.3.1.5 Por la granulometría de los áridos

- **Continuas:** En estas mezclas la granulometría tiende a formar una estructura cerrada, además, se caracteriza por abarcar una cantidad de tamaños de agregados diferentemente distribuida entre la curva granulométrica. Dentro de su aplicación son las más usuales.
- **Discontinuas:** En estas mezclas el tamaño de agregados se encuentra entre los 2 y 8 milímetros, a diferencia de las mezclas continuas, presentan una cantidad muy limitada en sus tamaños, sin embargo, son mezclas impermeables y de gran calidad, pero costos y sensibles a deformaciones plásticas.

3.2 MEZCLA ASFÁLTICA CONVENCIONAL

Las mezclas asfálticas están constituidas por un 90% de agregados pétreos grueso y fino, un 5% de polvo mineral (filler) y otro 5% de ligante asfáltico. Los componentes

mencionados anteriormente son de gran importancia para el correcto funcionamiento del pavimento y la falta de calidad en alguno de ellos afecta el conjunto. El ligante asfáltico y el polvo mineral son los dos elementos que más influyen en la calidad de la mezcla (HERNANDEZ y ROSERO, 2014).

3.3 MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA CON GCR

La implementación del GCR (grano de caucho reciclado) a los pavimentos traen beneficios físico-mecánicos. La Sociedad Americana de Pruebas y Materiales (ASTM) por sus siglas en inglés, define el asfalto-caucho como una mezcla de cemento asfáltico, caucho de neumático reciclado y ciertos aditivos, en la que el componente de caucho es de al menos 15% en peso de la mezcla total y ha reaccionado con el cemento asfáltico en caliente (NARANJO y RUEDA, 2011).

Se han realizado estudios de las mezclas asfálticas con GCR en Colombia y en otros países del mundo, además se ha reglamentado su uso, tal es el caso de INVIAS y el IDU. El uso del asfalto-caucho en las mezclas asfálticas al realizarse por vía húmeda mejora con respecto a las mezclas convencionales en su estabilidad, ahuellamiento, relación de vacíos y peso unitario. En una prueba realizada en el Carrusel de Fatiga de la Universidad de Los Andes, se comparó el comportamiento de una mezcla asfáltica con y sin caucho molido, donde se observó que el pavimento que más se deformó fue aquella que no utilizó caucho molido (YUNG, 2013).

3.4. GRANO DE CAUCHO RECICLADO (GCR)

El GCR, es un material que resulta del reciclaje de las llantas, ya sea por medio de la trituración o de diversos métodos; este material es utilizado en varios campos

tales como la pavimentación de vías, la elaboración de pisos y canchas sintéticas, entre otros (TORRES, 2014).

3.5 MÉTODOS DE INCORPORACION DEL GCR

Al modificar el ligante con el GCR se hace la adición ya sea por la vía seca o vía húmeda.

3.5.1 Proceso por vía seca El proceso por vía seca es el método mediante el cual el caucho reciclado o cualquier material con propiedades idóneas para mezclas asfálticas es mezclado con los agregados, antes de adicionar el cemento asfáltico. En este proceso, se usan los granos de caucho como un agregado en la mezcla asfáltica, los cuales pueden sumarse como un árido más o como sustituto de una pequeña parte del agregado fino, siendo aproximadamente del 1 al 3 por ciento del peso total de los agregados. Una de las características de este proceso es que a diferencia del proceso por vía húmeda no requiere de un equipo altamente especializado, sino que, solo se necesita de un sistema de alimentación que proporcione los recursos en las situaciones más convenientes (RAMÍREZ,2006).

Para la ejecución de este proceso, se prepara una mezcla en seco de las materias primas, la cual que se homogeneiza en silos mediante aireación para luego pasar a un horno rotatorio. El calentamiento inicial del crudo alcanza aproximadamente 800 grados centígrados, y se lleva a cabo en un intercambiador de calor.

Haciendo énfasis en la adición del GCR, se emplea el grano de caucho reciclado como sustituto del agregado en la mezcla asfáltica, sin embargo, no se considera un proceso de modificación del bitumen.

Figura 2. Proceso adición del GCR al asfalto por vía seca.



Fuente: LIGANTE ASFALTICO Plantas usadas en pavimentos [en línea] disponible en: <http://ligante-asfaltico.blogspot.com.co/p/llantas-usadas-en-pavimentos.html>

Existen actualmente algunas tecnologías que son comúnmente utilizadas en los procesos por vía seca, las cuales son:

- **TECNOLOGÍA PLUSRIDE:** Esta tecnología fue originalmente desarrollada en Suecia a finales de los años 1960, y registrada en los Estados Unidos bajo el nombre comercial PlusRide por la firma EnviroTire. El caucho reciclado es agregado a la mezcla en proporciones que van de 1 a 3 por ciento del peso total de los agregados. Los granos de caucho utilizados son gruesos para sustituir algunos agregados de la mezcla. Las partículas de caucho van desde 4.2 mm (1/4") a 2.0 mm (tamiz N°10). El contenido de vacíos con aire en la mezcla asfáltica debe estar entre 2 y 4 por ciento, y por lo general son obtenidos con contenidos de ligante entre 7.5 a 9 por ciento (ANGULO y DUARTE, 2005).
- **TECNOLOGÍA GENÉRICA:** Este sistema fue desarrollado por el Dr. Barry Takallou a principios de los años 1990, para producir mezclas asfálticas en calientes con granulometría densa. Este concepto emplea tanto el caucho reciclado grueso como fino para compatibilizar la granulometría de los

agregados, obteniendo una mezcla asfáltica mejorada. En este proceso, la granulometría del caucho es ajustada para acomodar la granulometría de los agregados. El caucho puede llegar a necesitar una pre-reacción o pretratamiento con un catalizador para alcanzar una óptima hinchazón de la partícula. En este sistema, el contenido de caucho reciclado no debe exceder el 2 por ciento del peso total de la mezcla para carpeta de rodadura (RAMÍREZ,2006).

- **TECNOLOGÍA CONVENCIONAL:** Esta tecnología fue desarrollada en España para usar el caucho reciclado en la mejora de mezclas asfálticas empleando granulometrías convencionales que no implican consumos elevados de cemento asfáltico, pero que aportan menor cantidad de caucho, aproximadamente un dos por ciento del peso total de los agregados. El caucho utilizado es generalmente de granulometría fina, con tamaños de los granos no mayor a 0.5 mm. (PEREZ, 2012).

3.5.2 Proceso por vía húmeda En este proceso se mezclan los agregados y aditivos con el ligante, usando equipamiento especial que garanticen un tamaño, textura, proporción, tiempo, temperatura y grado de agitación de la mezcla apropiados para su posterior aplicación. El proceso por vía húmeda es aplicado con GCR, representando aproximadamente desde un 14 a 20% del peso total del ligante modificado (RAMÍREZ y LADINO, 2014). Cuando el GCR y el cemento asfáltico se combinan, el GCR se hincha y se vuelve blando debido a las temperaturas que se manejan.

Figura 3. Proceso adición del GCR al asfalto por vía húmeda.



Fuente: LIGANTE ASFALTICO Plantas usadas en pavimentos [en línea] disponible en: <http://ligante-asfaltico.blogspot.com.co/p/llantas-usadas-en-pavimentos.html>

(UNIVERSIDAD DE LOS ANDES-IDU, 2002), nombra las tecnologías que son utilizadas en los procesos por vía húmeda, las cuales son:

- **TECNOLOGÍA POR BACHADAS:** Esta tecnología fue desarrollada por Charles McDonald a comienzos del año 1960 y patentada en el 1970 por Arizona Refining Company (ARCO). LA metodología consiste en la producción de mezclar el asfalto y caucho por bachadas.
- **TECNOLOGÍA CONTINUA:** La tecnología fue desarrollada en Florida a finales de los años 1980 y es conocida como Florida Wet Process. En este proceso, un tamaño fino 0.18mm (tamiz No. 80) de GCR es mezclado con el cemento asfáltico en un proceso continuo. La tecnología de Florida se diferencia del proceso McDonald en varios aspectos: emplea bajos porcentajes de GCR, entre 8 y 10%. El proceso húmedo de Florida aún no ha sido patentado.
- **TECNOLOGÍA TERMINAL:** Es un proceso húmedo en el cual se mezcla el cemento asfáltico con el GCR y se conserva el producto durante amplios periodos de tiempo. Este producto asfalto-caucho tiene una duración larga de

almacenamiento, además se puede mezclar en la refinería ya sea por la tecnología continua o por batchadas.

3.6 METODO MARSHALL

El método Marshall para el diseño de pavimentos fue expuesto por Bruce Marshall, ingeniero de asfaltos en el estado Mississippi. Luego fue mejorado por el Cuerpo de Ingenieros de Estados Unidos. En el método original se aplica para mezclas asfálticas en caliente que contengan agregados con un tamaño máximo de 25 mm (1"); en el método mejorado los tamaños máximos de agregados son de 38 mm (1.5"). Las probetas en el método Marshall son de 64 mm (2 ½") de alto y 102 mm (4") de diámetro (NARANJO y RUEDA, 2011). En Colombia la norma INVIAS-748-13, especifica el procedimiento que se debe seguir para determinar la resistencia a la deformación plástica empleando el ensayo de Marshall el cual tiene como objetivo conocer en la mezcla asfáltica la relación estabilidad, flujo y el contenido de vacíos de aire permitiendo un posterior diseño de la mezcla.

Figura 4. Aparato estabilidad de Marshall.



Fuente: INVIAS.

3.7 PARÁMETROS VOLUMÉTRICOS

El diseño de mezclas asfálticas depende en gran medida del entorno al que se somete un pavimento, sin embargo, los parámetros volumétricos permiten comprender el comportamiento más probable de este en servicio involucrando las propiedades que aportan los materiales que la componen.

Se debe tener claridad sobre los parámetros volumétricos de la mezcla ya que brindan un indicio acerca de su calidad y comportamiento; para realizar el análisis de los parámetros volumétricos de mezclas asfálticas en caliente se usa la norma colombiana INVIAS 799-13, en la cual se definen las propiedades volumétricas con sus respectivas fórmulas.

3.7.1 Gravedad específica bulk del agregado (Gsb) Se define como la relación entre la masa en estado seco de una unidad de volumen de agregado, incluyendo los vacíos permeables e impermeables, con base en una masa de un igual volumen de agua, ambos a la misma temperatura establecida. Su valor es adimensional. Para determinar la gravedad específica de bulk, se aplica la Ecuación 1.

$$Gsb = \frac{P_1 + P_2 + \dots + P_n}{\frac{P_1}{G_1} + \frac{P_2}{G_2} + \dots + \frac{P_n}{G_n}} \quad (1)$$

Donde:

Gsb= Gravedad específica bulk del agregado.

P1, P2 y Pn= Porcentajes individuales de los agregados.

G1, G2 y Gn= Gravedades específicas bulk de las diferentes fracciones del agregado.

3.7.2 Gravedad específica de bulk (Gmb) Es la relación entre la masa (o peso seco en el aire) de un volumen de mezcla total (teniendo en cuenta los vacíos que quedan entre las partículas recubiertas con asfalto) y la masa de un volumen igual de agua a una temperatura establecida. Su valor es adimensional. Para su cálculo se aplica la Ecuación 2:

$$Gmb = \frac{Pse}{Pss - Pag} \quad (2)$$

Donde:

Gmb= Gravedad específica de bulk de la mezcla compactada.

Pse= Peso seco de la mezcla [gr]

Pss= Peso superficialmente seco de la mezcla [gr]

Pag= Peso de la mezcla sumergida en agua [gr]

Debido a que la gravedad específica es adimensional, para los cálculos que requieran unidades, se debe convertir a términos de densidad, para ello se efectúa el cálculo de la Ecuación 3.

$$Densidad = Gmb * 997.0 \quad (3)$$

Donde el valor de 997.0 corresponde a la densidad del agua a 25° C en kg/m³.

3.7.3 Gravedad Máxima de la Mezcla o Gravedad específica teórica (Gmm) En una mezcla sin compactar es la relación entre la masa seca de un volumen de mezcla sin compactar (sin tener en cuenta los vacíos que quedan entre las partículas recubiertas con asfalto, $V_a=0$) y la masa de un volumen igual de agua a una temperatura establecida. Su valor es adimensional. El “Gmm” se calcula como se indica en la Ecuación 4.

$$G_{mm} = \frac{P_{mm}}{\frac{P_s}{G_{se}} - \frac{P_b}{G_b}} \quad (4)$$

Donde:

G_{mm}= Gravedad específica máxima de la mezcla suelta

G_{se}= Gravedad específica efectiva

P_{mm}= Masa total de la mezcla suelta [%]

P_b= Contenido de asfalto [%]

P_s= Contenido de agregado [%]

G_b= Gravedad específica del asfalto.

3.7.5 Gravedad específica efectiva del agregado (G_{se}) Relación entre la masa en estado seco de una unidad de volumen de agregado, incluyendo los vacíos permeables no llenos de asfalto y los impermeables, o sea excluyendo los vacíos permeables al asfalto, y la masa de un igual volumen de agua, ambos a la misma temperatura establecida. Su valor es adimensional y se calcula tal y como se muestra en la Ecuación 5.

$$G_{se} = \frac{P_{mm} - P_b}{\frac{P_{mm}}{G_{mm}} - \frac{P_b}{G_b}} \quad (5)$$

Donde:

G_{se}= Gravedad específica efectiva del agregado.

P_b= Contenido de asfalto.

G_{mm}= Gravedad específica máxima de la mezcla asfáltica.

G_b= Gravedad específica del asfalto.

3.7.6 Absorción del asfalto (P_{ba}) La absorción se expresa como un porcentaje del total de la masa de la mezcla; la absorción del asfalto se determina mediante la Ecuación 6.

$$Pba = \frac{Gb*(Gse-Gsb)}{Gsb*Gse} * 100 \quad (6)$$

Donde:

Pba= Asfalto absorbido, porcentaje del peso de agregado.

Gb= Gravedad específica del asfalto.

Gse= Gravedad específica efectiva del agregado.

Gsb= Gravedad específica neta del agregado.

3.7.7 Volumen de asfalto absorbido (Vba) Volumen de ligante asfáltico en una mezcla asfáltica en caliente que ha sido absorbido en los poros de las partículas de agregados. Vba es un volumen de ligante asfáltico en la mezcla que permite calcular el contenido de asfalto efectivo.

3.7.8 Contenido efectivo de asfalto (Pbe) Contenido total de asfalto menos la fracción de ligante asfáltico absorbida por las partículas del agregado. Se expresa como porcentaje del peso de la mezcla de pavimento compactada.

$$Pbe = Pb - \frac{Pba*Ps}{100} \quad (7)$$

Donde:

Pbe= Contenido de asfalto efectivo, porcentaje de la masa total de la mezcla.

Pb= Contenido de asfalto, porcentaje de la masa total de la mezcla.

Pba= Asfalto absorbido, porcentaje del peso de agregado.

Ps= Contenido de agregado, porcentaje total de la masa de la mezcla.

3.7.9 Vacíos en el agregado mineral (VAM) Volumen intergranular de vacíos entre partículas del agregado de una mezcla asfáltica en caliente compactada (incluye vacíos de aire y el volumen de asfalto efectivo) con respecto al volumen total del espécimen compactado. Se expresa como porcentaje del volumen total del espécimen.

$$VAM = 100 - \frac{Gmb * Ps}{Gsb} \quad (8)$$

Donde:

VAM= Vacíos en el agregado mineral (porcentaje del volumen neto).

Gmb= Gravedad específica bulk de la mezcla asfáltica compactada.

Ps= Porcentaje de agregado respecto al peso total de la mezcla.

Gsb= Gravedad específica bulk del agregado.

3.7.10 Vacíos de aire (Va) Son las cámaras de aire que se encuentran entre las partículas de agregados cubiertos con asfalto, en una mezcla asfáltica compactada. Se expresa como porcentaje del volumen total del espécimen.

$$Va = \frac{Gmm - Gmb}{Gmm} * 100 \quad (9)$$

Donde:

Va= Porcentaje de vacíos de aire.

Gmm= Gravedad específica máxima de la mezcla asfáltica.

Gmb= Gravedad específica bulk de la mezcla compactada

3.7.11 Vacíos llenos de asfalto (VFA) Es la fracción de los vacíos entre agregados minerales que contiene ligante asfáltico. Se expresa como el porcentaje de los vacíos entre agregados minerales o VAM. Estos representan el volumen de asfalto efectivo presente en la mezcla.

$$VFA = \frac{VAM - Va}{VAM} * 100 \quad (10)$$

Donde:

VFA= Vacíos llenos de asfalto, porcentaje de VAM.

VAM= Vacíos en el agregado mineral, porcentaje del volumen total.

Va= Vacíos de aire en mezclas compactadas, porcentaje del volumen total.

3.7.12 Relación de polvo o relación llenante efectivo (P(0.075)/Pbe) Relación en masa, entre el porcentaje de agregado que pasa el tamiz de 0.075 mm (No. 200), P0.075, y el contenido de asfalto efectivo (Pbe).

$$R.P = \frac{P_{0.075}}{P_{be}} \quad (11)$$

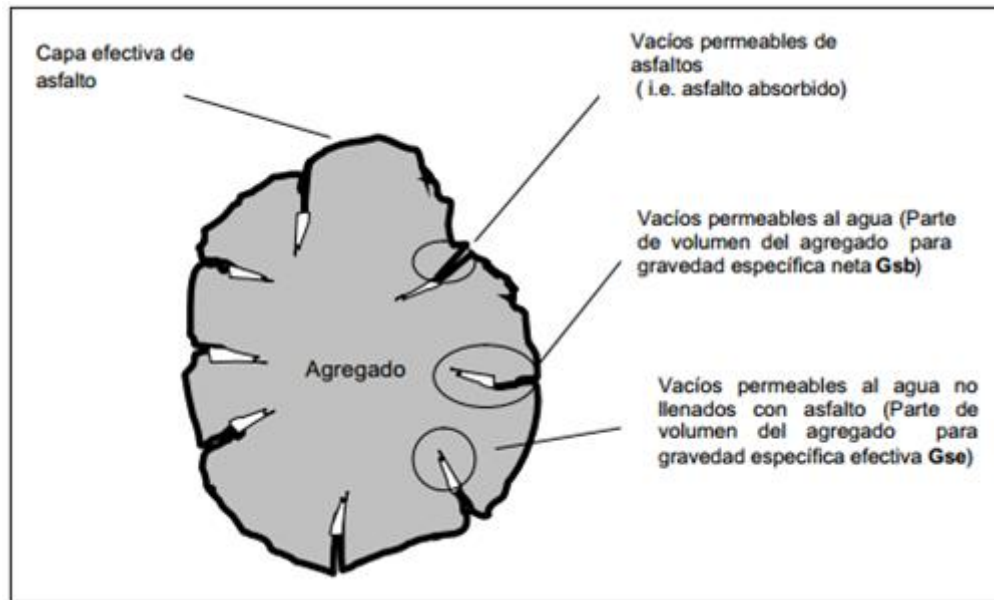
Donde:

R.P= Relación de polvo, relación llenante efectivo.

P0.075= Porcentaje de agregado que pasa por el tamiz No. 200.

Pbe= Contenido de asfalto efectivo, porcentaje de la masa total de la mezcla.

Figura 5. Ilustración de los parámetros volumétricos



Fuente: INVIAS.

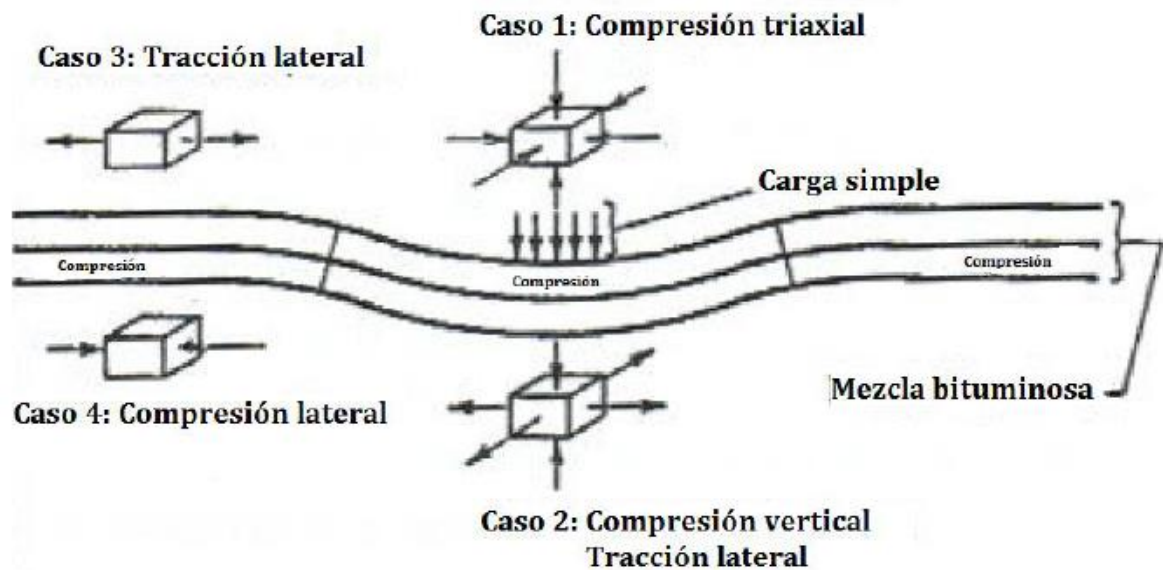
3.8 ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA

Las mezclas asfálticas se diseñan para resistir en conjunto con las demás carpetas del pavimento, las cargas y fallas generadas por el tráfico de vehículos junto con garantizar la comodidad a los conductores de circular por una vía en buen estado, pero, no siempre se logra este cometido, el efecto que tienen factores como la temperatura, las cargas y el tiempo de su aplicación, el terreno, la interacción de los materiales que componen la mezcla, entre muchos otros, afectan el comportamiento de la misma. Gracias al ligante bituminoso la mezcla tiende a actuar como un material viscoelástico según la temperatura y el esfuerzo al que se vea sometida, modificando su conducta que se define por la evolución de elasticidad y por lo tanto de sus propiedades.

El ensayo de tracción indirecta consiste en la aplicación de pulsos de cargas a diferentes frecuencias y temperaturas garantizando una deformación horizontal máxima del 0,005% del diámetro de la probeta para determinar el módulo de rigidez

en las mezclas asfálticas (NORMA UNE -EN 12697-26:2006 Anexo C, 2012); el objetivo principal de este ensayo es simular el estado de tensiones de la parte inferior de la capa asfáltica (Caso 2) cuando la carga que soporta es máxima tal como se muestra en la Figura 6.

Figura 6. Estado de esfuerzos a tensión que experimenta un pavimento para cargas simples.



Fuente: Tesis de grado “Determinación de Módulo de Rigidez y Caracterización de Módulo Dinámico de Mezcla Superpave”

3.9 MÓDULO DE RIGIDEZ

Las mezclas asfálticas presentan un comportamiento mecánico que varía dependiendo de los factores a los que se vea expuesta, tales como frecuencias de cargas, propiedades volumétricas, diferentes temperaturas, entre otros.

Adicionalmente, dentro de las características más importantes de las mezclas, se encuentra la susceptibilidad térmica aportada por el ligante bituminoso, la cual

afecta en primera instancia a su reacción elástica y por lo tanto a su capacidad de responder a diferentes sollicitaciones de carga mediante deformaciones (CORONA, 2017). La relación entre esfuerzo y deformación que presenta un material es conocido como el módulo complejo (E^*), el cual representa el comportamiento de un material viscoelástico sometido a una carga sinusoidal en un periodo de tiempo (t). En este escenario el esfuerzo y la deformación que soporta el material se representa con la Ecuación (12) y (13) respectivamente (NARANJO y RUEDA, 2011).

$$\sigma = \sin(w * t) \tag{12}$$

$$\varepsilon = \sin(w * t - \phi) \tag{13}$$

Debido a que la deformación no siempre se comporta de manera lineal con el esfuerzo, se añade un ángulo de desfase, ya que gracias a su viscosidad la reacción se retrasa. Matemáticamente el módulo complejo se determina según se muestra en la Ecuación (14).

$$E = \left(\frac{\sigma}{\varepsilon}\right) = \frac{\sin(w*t)}{\sin(w*t-\phi)} \tag{14}$$

Otra forma de representar el módulo complejo es mediante su expresión exponencial, la cual corresponde a la Ecuación 15.

$$E = |E| * (\cos(\phi) - \text{sen}(\phi)i) \tag{15}$$

De acuerdo con lo anterior, el módulo, se compone de dos partes, la parte real de la expresión representa el comportamiento elástico, mientras que la parte compleja, representa el componente viscoso. A partir de la Ecuación 15, se obtiene el valor del módulo de rigidez, el cual se define como el valor absoluto de la expresión

mencionada, es decir, a la relación entre el esfuerzo y la deformación en un tiempo de carga (t), para un material sujeto a una carga con una tasa de deformación controlada. De esta forma, para bajas temperaturas (Rango elástico), el módulo complejo es igual al módulo de rigidez. Es común escuchar el término de módulo resiliente, y asemejarlo con el módulo de rigidez, puesto que en ciertas condiciones corresponden al mismo valor, sin embargo, existe una diferencia conceptual. Para determinar el módulo resiliente se tiene en cuenta la deformación recuperable después de aplicar la carga al espécimen, mientras que, para el módulo de rigidez, se toma la deformación producida al momento de aplicar la carga.

El módulo de rigidez representa el grado de cohesión de un material, lo que lo convierte en un indicador de su resistencia. Mediante la rigidez, se comprende la respuesta de una mezcla asfáltica sometida a un esfuerzo cíclico, donde por transividad genera una deformación, la cual puede ser permanente o recuperable (NARANJO y RUEDA, 2011). A nivel experimental, uno de los ensayos no destructivos más utilizados para simular la condición del pavimento ante el paso de un vehículo y determinar el valor del módulo de rigidez, es el de Tracción Indirecta, en el cual se somete un espécimen a un entorno que simule lo que ocurre en el pavimento mientras una rueda de un vehículo se encuentra en el punto donde se genera la tensión máxima.

4. REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE

La utilización de la llanta como parte importante para el avance de las vías fue tomada en cuenta en Estados Unidos alrededor de los años 60 con la patente de Charles Mc Donald utilizada para el tratamiento superficial de bacheos. El mayor interés sobre la utilización de mezclas bituminosas para vías con el neumático reutilizado consistió en ver que tan beneficiosa era su aplicación y cuan económico podría ser, a esto se le añade el aprovechamiento de experimentos realizados en tramos de carreteras con el paso del tiempo observando los resultados obtenidos en su comportamiento y su resistencia en comparación con el asfalto convencional. En dichos estudios se demostró que esta incorporación del neumático fuera de uso, en mezclas bituminosas era más económica que la inclusión de otros modificadores, permitiendo un mayor aprovechamiento de dichas llantas reduciendo de manera eficaz y rápida la cantidad de desperdicio global además de ofrecerle al pavimento mejoras con respecto a las propiedades tradicionales del mismo.

A continuación, se presentan algunos descubrimientos y avances que se han realizado acerca de la inclusión del GCR en las mezclas asfálticas, por medio de vía seca y húmeda.

Segun (JIMENEZ y MEIER, 1985), cuando se adiciona 5% de GCR del peso total de la mezcla asfáltica, se duplica su vida útil y resistencia con respecto a la fatiga en comparación a una mezcla convencional.

Según la revista virtual Argentina: Mercado, en el año de 1990 Ingenieros civiles de la "School of Civil Engineering de Purdue University" en Indiana crearon un tipo de mezcla con arena y llanta vieja la cual tuvo potencial para utilizarse en proyectos de realización de vías, esta implementación dio como resultado un ahorro de más de

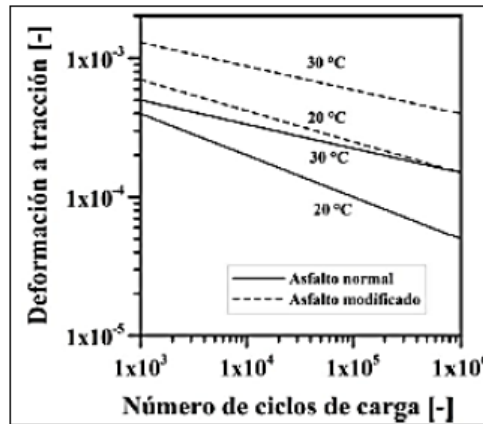
un millón de dólares en sus dos últimos años según el Department of Transportation de Indiana, esto demostró que se ahorra en gastos de materiales al menos un dólar por cada llanta reutilizada. Se han utilizado al menos 1.1 millones de llantas viejas; este proceso se inició utilizando los chips triturados de las llantas mezclados en conjunto con la arena, sin embargo, este método se ha utilizado en solamente nueve proyectos de Indiana. Dicha mezcla es liviana y se puede utilizar para el reforzamiento de laderas o muros de contención.

(BAHIA y DAVIS 1994), afirman que adicionar GCR a una mezcla asfáltica proporciona un incremento en la viscosidad lo que conlleva a un aumento de la temperatura para su fabricación en planta, generando dificultad para construirla in situ.

(LOUGHEED y PAPAGIANNAKIS 1996), realizaron ensayos a mezclas asfálticas con GCR por vía húmeda y seca, con el fin de comprender la viabilidad en los resultados de las mismas. Los resultados arrojaron de forma general, que las propiedades funcionales de la mezcla asfáltica por vía húmeda tienden a un mejor comportamiento que por vía seca, a pesar de que la última presentó resultados entre un rango de aceptable a inválidos.

Por vía seca, (SIBAL, DAS y PANDEY, 2000), ensayo mezclas asfálticas con GCR, obteniendo como conclusión que la resistencia a la fatiga varía a diferentes temperaturas, con una tendencia a ser mayor con respecto a una mezcla convencional, tal y como se muestra en la Figura 7.

Figura 7. Ley de fatiga de mezclas asfálticas con GCR por vía seca.



Fuente: SIBAL, A., DAS, A. and PANDEY, B. B. Flexural Fatigue Characteristics of Asphalt Concrete with Crumb Rubber. Int. J. of Pavement Engineering, Vol. I, No. 2, 119-132, 2000

Otros estudios, se han realizado por parte de (UNIVERSIDAD DE LOS ANDES-IDU, 2002), los cuales han experimentado con mezclas modificadas con GCR por vía húmeda y seca. Dentro de los resultados obtenidos por estas instituciones se encontró un mejor desempeño de las mezclas adicionando un 13% y 15% de caucho con respecto al peso del cemento asfáltico. Se estimó un incremento aproximadamente entre el 26% y 42% en el precio unitario de la mezcla convencional con respecto a la mezcla modificada.

(BOTERO, 2005), en la aplicación de mezclas con GCR, realiza un estimativo acerca de la cantidad de llantas que se requieren por kilómetro, obteniendo que se necesitan aproximadamente 1553 neumáticos por km/carril manejando una capa de 5 centímetros de espesor. En términos de peso, obtuvo que alrededor de 2 a 27 toneladas de caucho son necesarias para modificar un carril de 1 kilómetro de vía, con un ancho de 3,5 metros y un espesor entre 3 y 33 centímetros para la capa de la mezcla asfáltica.

(UNIVERSIDAD DE LOS ANDES-IDU, 2005) realizaron nuevamente estudios acerca del empleo del GCR sobre las mezclas asfálticas, corroborando el incremento de la vida útil con respecto a las mezclas convencionales, además, se concluyó, que por vía seca, manejando una mezcla tipo MDC-2, para una probabilidad de falla del 50%, la vida útil aumenta un 58% con un reemplazo del 1% de GCR, y un incremento del 232% con un reemplazo del 2% de GCR sobre la mezcla.

En una investigación realizada con mezclas asfálticas por vía seca, en Chile (RAMÍREZ, 2006), afirma que la interacción entre el ligante y el GCR, es muy importante para determinar a futuro muchos de los comportamientos que la mezcla puede presentar. El fenómeno observado indicó que cuando el tiempo de curado no es exitoso, el GCR se tiende a comportar como un agregado elástico dificultando la compactación y exponiendo a un deterioro temprano la mezcla. Por otra parte, los resultados arrojaron que cuando se aumenta el contenido de GCR, así mismo se incrementa la cantidad de asfalto necesaria para obtener valores óptimos en la resistencia a la fatiga y reflexión de grietas.

(RAMÍREZ,2006) en su estudio, aplico el GCR en proporciones de 0,5%, 1% y 1,5% con respecto al peso del árido, una granulometría semi-densa y cemento asfáltico 60/80. El desarrollo experimental indicó la necesidad de que el porcentaje del asfalto no fuera menor al 5,6% ya que de lo contrario no cumpliría con los requisitos de estabilidad, alcanzando para este escenario un porcentaje de huecos de 3,5%, saliéndose de los límites permitidos; se experimentó con el 1,5% de GRC y un valor de 5,3% de asfalto, pero los resultados no cumplieron ni estabilidad ni el porcentaje de huecos.

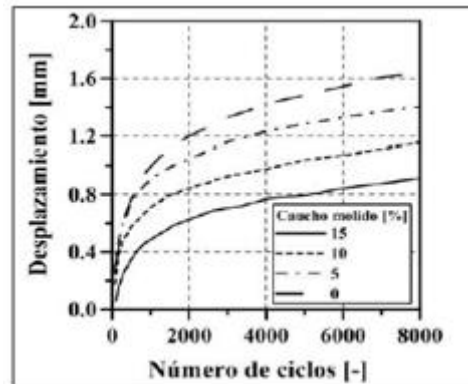
Uno de los parámetros más evaluados fue el módulo resiliente, ya que permite describir el comportamiento de la mezcla ante cargas, en términos de su capacidad a responder a estímulos elásticos. La experiencia de la investigación reveló que las

mezclas con GCR aumentan el valor del módulo resiliente un 37% con temperaturas de 25° centígrados, y un 73% con temperaturas de 40° centígrados, evidenciando que el módulo se ve afectado más por altas temperaturas que por bajas o intermedias. Hablando en términos de inclusión de GCR sobre la mezcla, con base en el trabajo de Ramírez (2006) se pudo concluir:

- Las variaciones del módulo resiliente son bajas entre los porcentajes de sustitución del GCR sobre la mezcla.
- Por vía seca, se sugiere emplear el GCR como agregado fino, incorporándolo a los agregados cuando estos están calientes.
- El valor óptimo de GCR fue de 0,5%, obteniendo como respuesta mejores comportamientos para los ensayos de tracción indirecta, módulos y fatiga.
- Cuando se aumenta el contenido de GCR la estabilidad disminuye.
- En vía seca, el porcentaje de vacíos disminuye.

Según (SHEN, 2006), dentro de sus investigaciones de mezclas asfálticas con GCR encontró en sus resultados un incremento en la resistencia ante la deformación plástica cuando se varía el porcentaje de GCR entre 5% y 15%, tal como se ilustra en la Figura 8, donde se puede apreciar que la deformación tiene a aumentar a medida que se le incorpora menos caucho y más ciclos de carga.

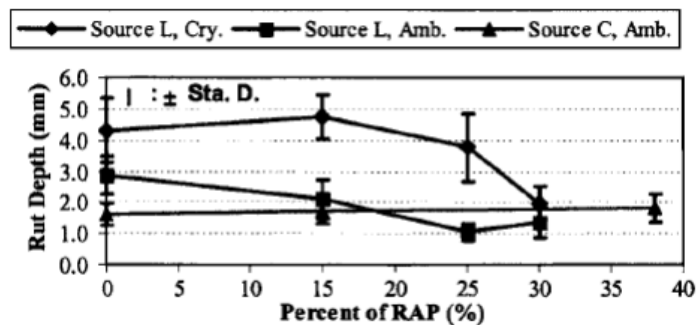
Figura 8. Resistencia a la deformación permanente.



Fuente: SHEN, J., AMIRKHANIAN, S. N. and LEE, S.-J. HP-GPC Characterization of Rejuvenated Aged CRM Binders. Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 19, No. 6, June 1, 515-522, 2007.

De acuerdo con investigaciones y ensayos de laboratorio realizados por (XIAO, AMIRKHANIAN y JUANG, 2007), según el método de obtención del GCR, puede variar la resistencia a la fatiga de la mezcla asfáltica. En sus estudios se comparó el método de obtención del GCR tipo ambiental y criogénico, donde se consiguió una mejora en la capacidad de resistencia a la deformación al emplearse el método ambiental, tal y como se ilustra en la Figura 9, donde se relaciona la magnitud de la deformación de una mezcla contra el porcentaje de asfalto con el 10% de reemplazo del asfalto con GCR.

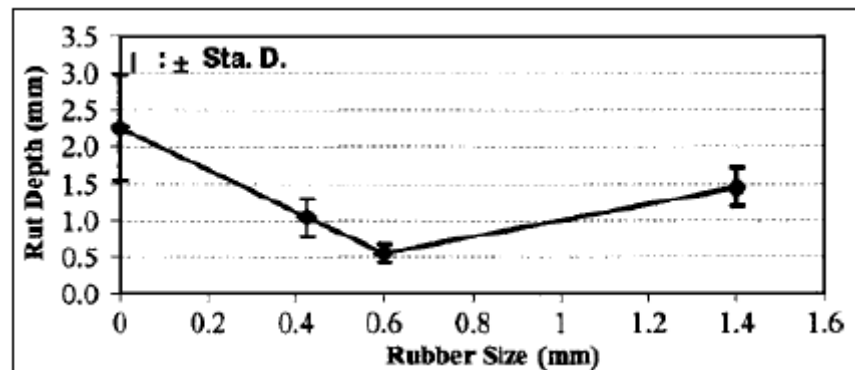
Figura 9. Profundidad de la huella vs Porcentaje de RAP.



Fuente: XIAO F., AMIRKHANIAN S., JUANG and C. H. "Rutting Resistance of Rubberized Asphalt Concrete Pavements Containing Reclaimed Asphalt Pavement Mixtures". American Society of Civil Engineers (ASCE) Journal of Materials in Civil Engineering. 2007.

(Xiao, F y Amirkhanian, 2007) afirman, que cuando se modifica el asfalto con GCR obtenido por el método ambiental, se mejora la resistencia al ahuellamiento, como se indica en la Figura 10, donde se plantea un tamaño de 0,6 milímetros como valor óptimo, con respecto a la menor deformación obtenida en los ensayos.

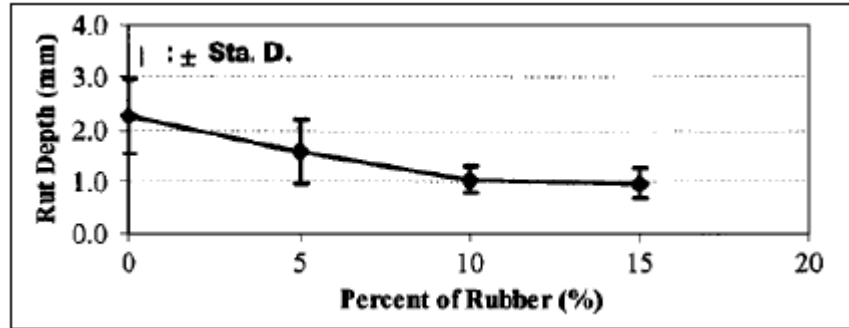
Figura 10. Profundidad de la huella vs tamaño del GCR.



Fuente: XIAO F., AMIRKHANIAN S., JUANG and C. H. "Rutting Resistance of Rubberized Asphalt Concrete Pavements Containing Reclaimed Asphalt Pavement Mixtures". American Society of Civil Engineers (ASCE) Journal of Materials in Civil Engineering. 2007

En la Figura 11, se aprecia un comportamiento decreciente entre la profundidad de la deformación con respecto al aumento del GCR suministrado, tal comportamiento, expresa una mejora en la resistencia que ofrece este material a las mezclas asfálticas.

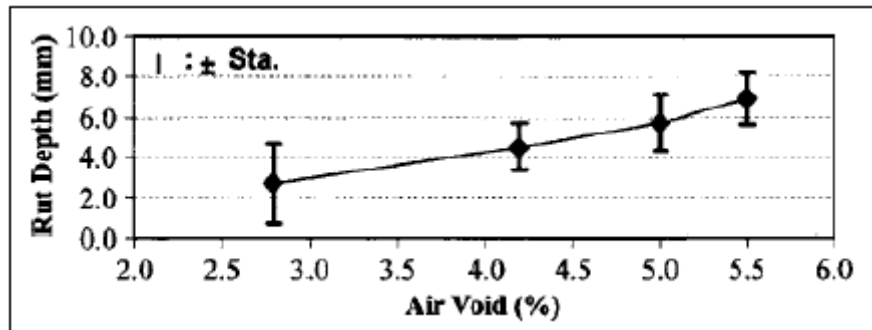
Figura 11. Profundidad de la huella vs Porcentaje de GCR.



Fuente: XIAO F., AMIRKHANIAN S., JUANG and C. H. "Rutting Resistance of Rubberized Asphalt Concrete Pavements Containing Reclaimed Asphalt Pavement Mixtures". American Society of Civil Engineers (ASCE) Journal of Materials in Civil Engineering. 2007.

Partiendo de los resultados, se encontró que agregando 10% de GCR por vía húmeda, con un tamaño equivalente al tamiz N 40, el porcentaje de vacíos y la deformación disminuye con respecto a una mezcla convencional, esta situación se describe gráficamente en la Figura 12.

Figura 12. Profundidad de la huella vs Porcentaje de vacíos de aire.



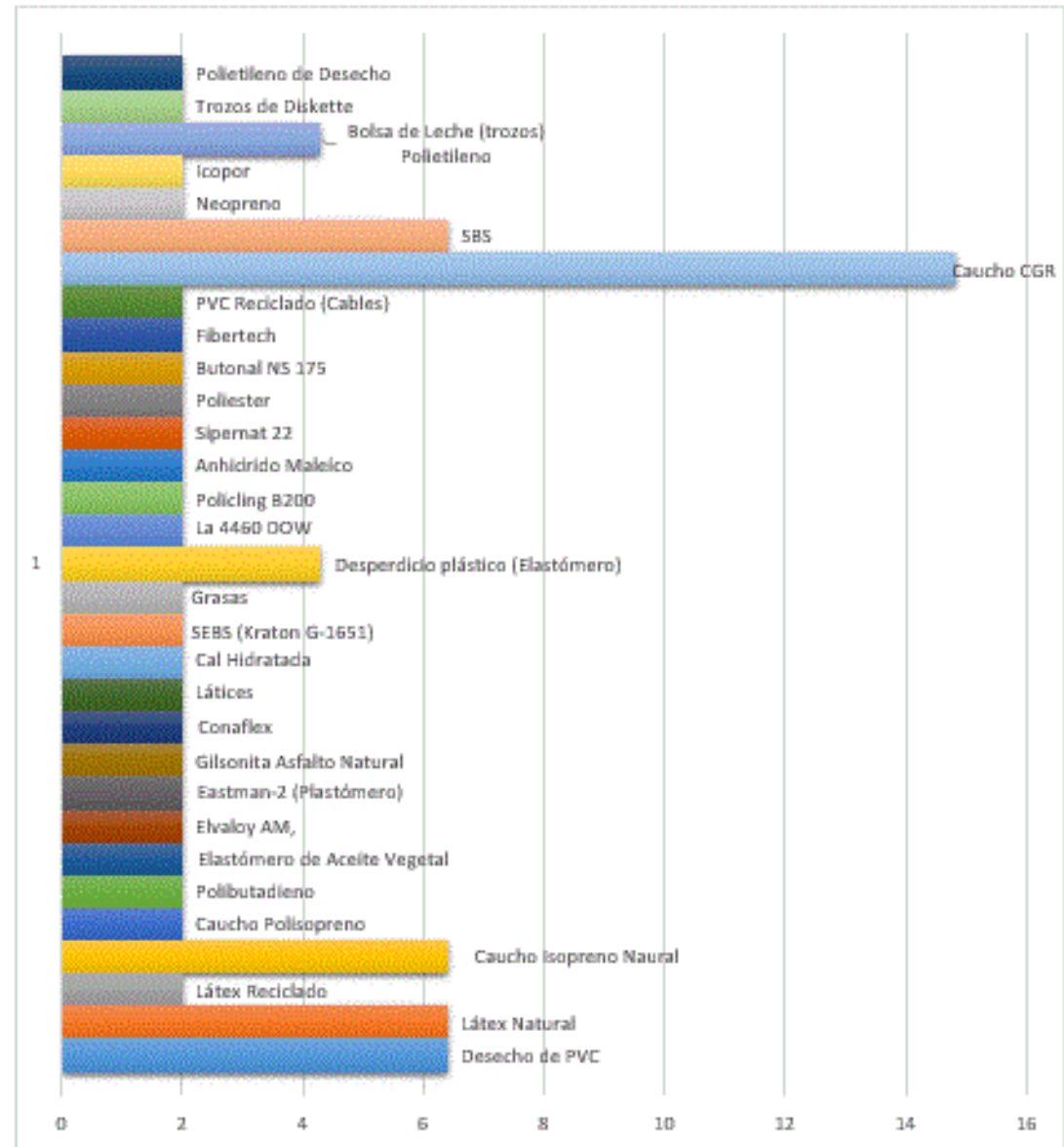
Fuente: XIAO F., AMIRKHANIAN S., JUANG and C. H. "Rutting Resistance of Rubberized Asphalt Concrete Pavements Containing Reclaimed Asphalt Pavement Mixtures". American Society of Civil Engineers (ASCE) Journal of Materials in Civil Engineering. 2007.

El estudio sobre mezclas asfálticas, en Colombia ha crecido gracias a los aportes de diferentes instituciones que se han esforzado por comprender cada vez más el

comportamiento de las mezclas asfálticas ante modificaciones en su dosificación y su entorno, es por ello, que (RONDÓN, RODRÍGUEZ, REAL, MONTEALEGRE, REYES y FIGUEROA, 2008), conformaron un recuento de aquellas investigaciones desarrolladas en Colombia.

Dentro de las temáticas analizadas no solo se encuentran las modificaciones de las mezclas asfálticas con GCR, sino que incluyen más materiales, ampliando el panorama acerca de los diferentes materiales que tienen potencial para ofrecer una mejora en los pavimentos tal y como se ilustra en la Figura 13. La mayoría de los polímeros utilizados son por lo general producto del reciclaje o de desecho industrial. Otros, por el contrario, como la asfaltita y el látex, se fabrican de materiales naturales.

Figura 13. Polímeros modificadores de asfalto.



Fuente: Estado del conocimiento del estudio sobre mezclas asfálticas modificadas en Colombia.

En la recopilación de investigaciones, se encontró, que cuando se adiciona GCR a las mezclas asfálticas, se reduce la estabilidad, aumenta la fluidez y el contenido de vacíos. Para mezclas MDC-2 con GCR, se consiguió un comportamiento muy parecido al que tienen las mezclas convencionales, sin embargo, tienden a mejorar

las propiedades de peso unitario y porcentaje de vacíos. Para vía seca, cuando se hace la inclusión del GCR, el contenido de vacíos aumenta mientras que disminuye la estabilidad y el peso unitario.

Cuando se trata de mezclas drenantes con asfalto-caucho, los estudios presentan un comportamiento parecido con el que poseen las mezclas asfálticas convencionales en un rango de temperatura entre 10° a 20° centígrados. Para este tipo de mezclas, a temperaturas de 30° centígrados, el módulo de rigidez en mezclas con GCR obtenido fue superior en un 32% con respecto a la convencional, dando como veredicto una leve mejora en la susceptibilidad térmica.

Pese a la diversidad de criterios desarrollados en los estudios consultados, se presentaron contradicciones que invitan a continuar con la búsqueda de evidencias que permitan comprender a fondo algunas de las propiedades del asfalto y su interacción con los agregados y modificadores.

(XIAO y AMIRKHANIAN, 2009) en sus proyectos e investigaciones concluyeron que la adición de GCR a la mezcla asfáltica disminuye el impacto que las llantas generan sobre el pavimento, reduciendo el deterioro y aumentando su vida útil.

Según (WANG et al, 2009), el GCR contribuye a la reducción del ruido manteniendo un nivel de 4 a 10 decibeles en la mezcla, aspecto que resulta provechoso para la comodidad del conductor.

Dentro de sus aportes, (KHODARY, 2010), afirma que un asfalto modificado con GCR aumenta la elasticidad del ligante, afectando de manera positiva la viscosidad y resistencia de este.

(PUNITH, 2011), realizó varios aportes en sus investigaciones, él afirma que, si se adiciona 5,3% de GCR a los agregados por vía seca, la mezcla adquiere mayor

resistencia a la fatiga, ahuellamiento, desgaste por abrasión, envejecimiento, oxidación del ligante y a la humedad, además de mejorar las propiedades reológicas del asfalto, otorgándole mayor rigidez a la mezcla y, por lo tanto, un menor comportamiento elástico, en comparación de una mezcla asfáltica tradicional.

(SOUSA, 2012), en sus enfoques por el costo que implica la elaboración de las mezclas asfálticas, expuso un método llamado “Caucho Activado y Reaccionado”, que consistía en agregarle GCR a una mezcla asfáltica convencional y en su proceso de elaboración un estabilizador mineral activado. La inclusión de este elemento provocó que el porcentaje de asfalto requerido fuese menor y disminuyera un 50%, conservando la temperatura de mezclado de una mezcla convencional.

Contemporáneamente, (MORENO, 2012) en sus estudios encontró que al agregar GCR en porcentajes de 0,5% y 1% del peso total de la mezcla, y esperando un tiempo de reacción de 45 minutos, el comportamiento de la mezcla asfáltica mejora ante deformaciones plásticas.

En el proyecto realizado por (YUNG, 2013), se ensayaron mezclas asfálticas de tres tipos, convencionales, modificadas con GCR y con Fibra acrílica Kaltex sobre mezclas drenantes. Con asfalto al 4%, 4,5% y 5%, de tipo 60/70 se manejó un reemplazo para el caucho del 10%, 12%, 15%, 17% y 20%, y, 0,1%, 0,2% y 0,3% para la fibra acrílica. Para el desarrollo y ejecución experimental, se aplicaron ensayos tales como el de rigidez con base en la normativa de INVIAS, consiguiendo como resultados una disminución en la ductilidad y penetración, pero un aumento en su estabilidad. Al manejar varios porcentajes, se determinó como valores óptimos para el caucho un 41,2% mientras que para la fibra un 34,9%. Debido a la composición de la mezcla, en ambos casos, los aditivos aumentaron su módulo resiliente, ofreciendo mejoras conforme aumenta su temperatura. Se concluyó finalmente, que, a mayor temperatura, mayor será su módulo resiliente.

(DÍAS, 2014), postula las ventajas que se obtienen por vía seca, debido a que la resistencia a la fatiga y ahuellamiento aumentan cuando la reacción de la mezcla con GRC no supera los 175° centígrados.

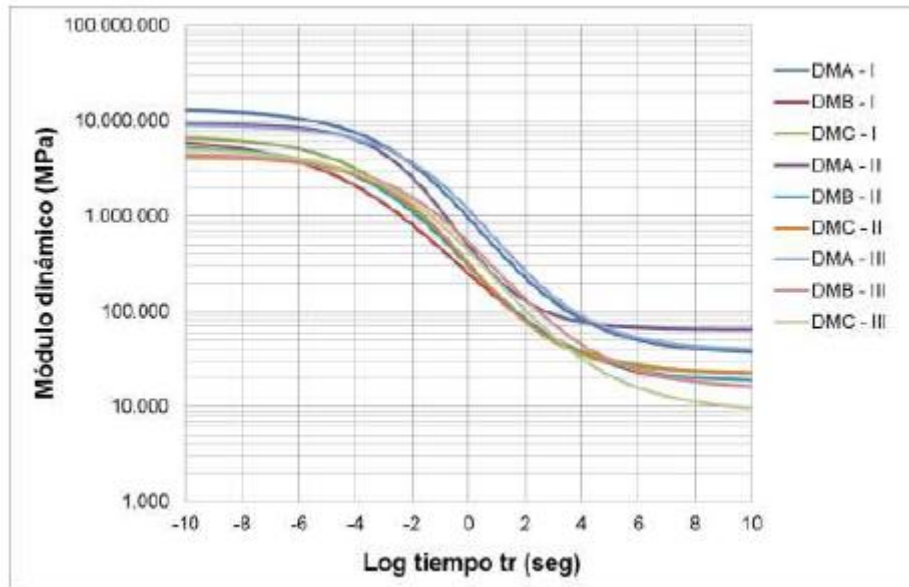
(MURAT, 2015) concluyó que, entre más fina sea la partícula de GCR, mejores resultados se tienden a conseguir, y resalta el potencial que tiene esta aplicación de caucho como modificador para reducir costos y generar mejoras al pavimento con gran flujo vehicular.

Al igual que (MURAT, 2015), (WAY, 2016) coincide en el beneficio que proporciona el GCR sobre la mezcla asfáltica en general, proporcionándole mayor resistencia al agrietamiento, disminución de ligante requerido, y mayor comodidad; específica que cuando el GCR se maneja en un porcentaje de sustitución de asfalto entre 15% y 20% se alcanzan las mejoras anteriores. Recomienda, además, un intervalo de temperatura para el cemento asfáltico entre 163° y 191° centígrados, a su vez, para los agregados una temperatura menor a 177° centígrados.

En un congreso argentino de vialidad y tránsito, (SOLARTE y POLANCO, 2016) expresaron su preocupación por calibrar los modelos de predicción para los módulos, conforme a los materiales y condiciones particulares de cada zona, debido a que en los ensayos se presentaron variaciones en sus resultados.

Se emplearon 9 probetas, 3 para cada tipo de agregado, los cuales fueron obtenidos de fuentes distintas, y se emplearon para ensayar el módulo dinámico. Con base en el procedimiento, se obtuvieron los resultados descritos en la Figura 14.

Figura 14. Comparación de curvas maestras de módulos dinámicos.



Fuente: Influencia de los Agregados Pétreos en el Módulo Dinámico de mezclas Asfálticas en el Departamento de Santander, Colombia (2016).

Se puede apreciar, que, a pesar de manejar un mismo ensayo, ejecutarlo en el mismo lapso de tiempo y aplicar las mismas especificaciones, el comportamiento dinámico en las probetas varían en un rango muy amplio, posiblemente debido a las características del material y la variación de sus fuentes.

5- METODOLOGÍA

En el procedimiento experimental se presenta la elaboración de la mezcla asfáltica convencional y la mezcla con inclusión de grano de caucho reciclado describiendo los materiales utilizados y los criterios necesarios para el diseño de las mezclas teniendo en cuenta porcentajes de GCR del 1%, 1.5%, 2% y 4%, a partir de los cuales se ha de establecer un valor óptimo para posteriormente realizar el ensayo de tracción indirecta obteniendo el módulo de rigidez.

Teniendo en cuenta algunas experiencias, (SOLARTE y POLANCO, 2016), se orientó la investigación en la región de Santander para un nivel de tránsito NT3, simulando un flujo vehicular agresivo con temperaturas y frecuencias de carga diferentes, representando un escenario que afecta al pavimento en su estado operativo.

5.1 CARACTERIZACIÓN DE LOS AGREGADOS PÉTREOS

Los agregados pétreos fueron suministrados por la empresa JJ materiales ubicada en la ciudad de Barrancabermeja, Santander, con una variación de tamaños y cantidades como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Variación de tamaños en los agregados pétreos.

Referencia	Cantidad [Kg]
Triturado 1"	80
Triturado 3/4"	80
Arena triturada	60

La caracterización físico-mecánica de los áridos se llevó a cabo por parte de la empresa MPI Ltda, cumpliendo con los estándares exigidos por la norma INVIAS.

Figura 15. Caracterización físico-mecánica de agregados.

PROPIEDAD	NORMAS INVIAS	VALOR
DUREZA AGREGADO GRUESO		
<i>Desgaste en máquina de los ángeles, 500 Revoluciones (%)</i>	E-218	25
<i>Degradación por abrasión en el equipo Microdeval (%)</i>	E-238	15
<i>Resistencia Mecánica por el método del 10% de finos, (kN)</i>	E-224	175
<i>Relación húmedo / seco, mínima (%)</i>		88
DURABILIDAD		
<i>Perdida en ensayo de solidez en sulfato de magnesio, (%)</i>	E-220	1,9
LIMPIEZA GRADACION COMBINADA		
<i>Índice de plasticidad, (%)</i>	E-126	N.P
<i>Equivalente de arena (%)</i>	E-133	72
<i>Valor de azul de metileno (mg/g)</i>	E-245	5
<i>Impurezas del agregado grueso (%)</i>	E-237	0,4
GEOMETRÍA DE LAS PARTICULAS		
<i>Partículas Planas y Alargadas relación 5:1, (%)</i>	E-240	3,2
<i>% Caras fracturadas (1cara/ 2 caras)</i>	E-227	95 / 91
<i>Angularidad del agregado fino (%)</i>	E-239	46
VOLUMETRÍA		
<i>Densidad Bulk del Llenante Mineral en Kerosene, (g/cm³)</i>	E-225	0,8
ADHESIVIDAD		
<i>Efecto del agua sobre mezclas asfálticas sueltas, cubrimiento (%)</i>	E-757	100
<i>Adhesividad del ligante a los agregados finos – Riedel Weber</i>	E-774	4 - 7

Fuente: MPI. Ltda.

5.2 CARACTERIZACIÓN DE GRANO DE CAUCHO RECICLADO (GCR)

El grano de caucho reciclado fue suministrado por la entidad Mundo Limpio ubicada en Rionegro - El Carmen de Viboral, Antioquia, con las siguientes características:

- El caucho es pulverizado.

- No presenta impurezas (fibras metálicas, textiles, entre otros) y se encuentra libre de cualquier tipo de aditivo.
- Las partículas son finas y homogéneas en calidad.

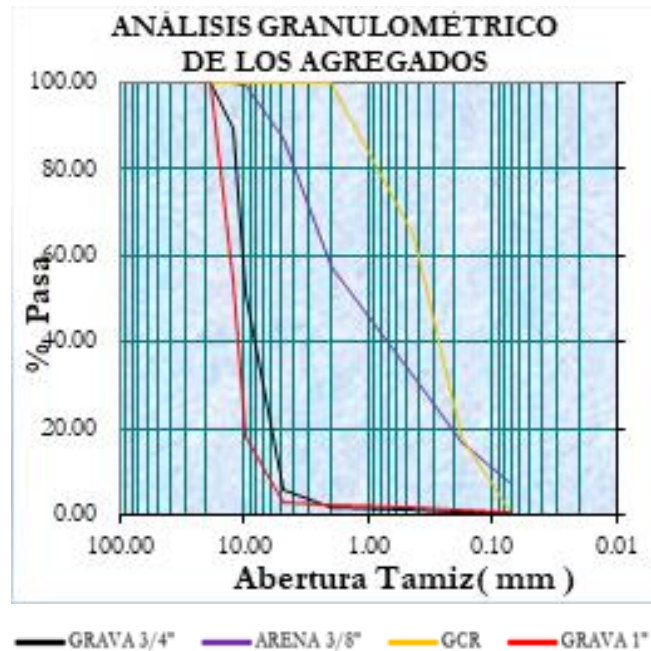
5.3 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

El análisis granulométrico se aplicó teniendo en cuenta la gradación compuesta y el intervalo granulométrico de aceptación para una mezcla MDC-19, según indica la norma INVIAS E-824-13 y el artículo 450 de las especificaciones técnicas del Instituto Nacional de Vías respectivamente, contemplando el procedimiento de la norma INV E-213-13. Inicialmente se seleccionó una muestra de 1150 [gr] de cada material incluyendo el GCR; se realiza la distribución granulométrica a cada tamaño del agregado pétreo como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Distribución granulométrica de materiales

TAMIZ		PORCENTAJE QUE PASA, %				
(mm)	(in)	MDC-19	Triturado 1"	Triturado 3/4"	Arena	GCR
19	3/4"	100	100	100	100	100
12,5	1/2"	80 - 95	53,9	89,7	100	100
9,5	3/8"	70 - 88	18,2	51	99,6	100
4,75	No. 4	49 - 65	3	5,5	87,3	100
2	No. 10	29 - 45	2	1,8	57,6	100
0,425	No. 40	14 - 25	1,6	1	31,7	64,4
0,18	No. 80	8-17	1,2	0,6	16,6	18,1
0,075	No. 200	4-8	0,5	0,3	7,6	1

Figura 16. Grafica distribución granulométrica de agregados.



Se realizó el tamizado para el cuarteo de cada árido configurando la granulometría, con el fin de cumplir la gradación dentro del intervalo permitido para las mezclas, obteniendo las proporciones descritas en la Tabla 3, a partir de las cuales se desarrollan las gradaciones para la mezcla convencional y con 1%, 1.5%, 2% y 4% de GCR. Se presentan las distribuciones granulométricas las mezclas con porcentajes de GCR.

Tabla 3. Proporciones de los agregados

Material	Proporciones [%]
Grava 1"	15
Grava 3/4"	20
Arena Triturada	65

Figura 17. Grafica de distribución granulométrica de mezcla convencional.

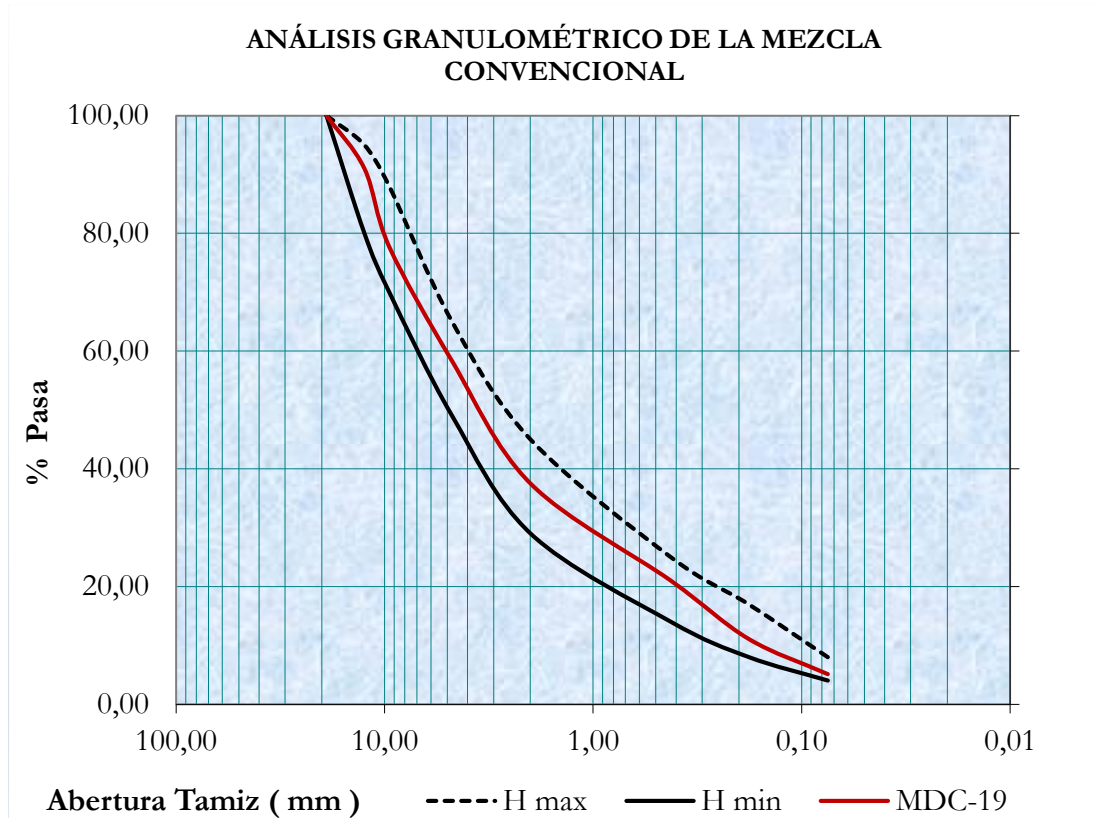


Tabla 4. Gradación de mezcla Convencional.

Tamiz (in)	Abertura (mm)	Porcentaje-Pasa (%)		
		H max	H min	CONVENCIONAL
3/4	19.000	100.00	100.00	100.00
1/2	12.500	95.00	80.00	91.00
3/8	9.500	88.00	70.00	77.70
No. 4	4.750	65.00	49.00	58.30
No. 10	2.000	45.00	29.00	37.50
No.40	0.425	25.00	14.00	21.00
No. 80	0.180	17.00	8.00	11.10
No. 200	0.075	8.00	4.00	5.10

Figura 18. Grafica distribución granulométrica de mezcla con 1% de GCR.

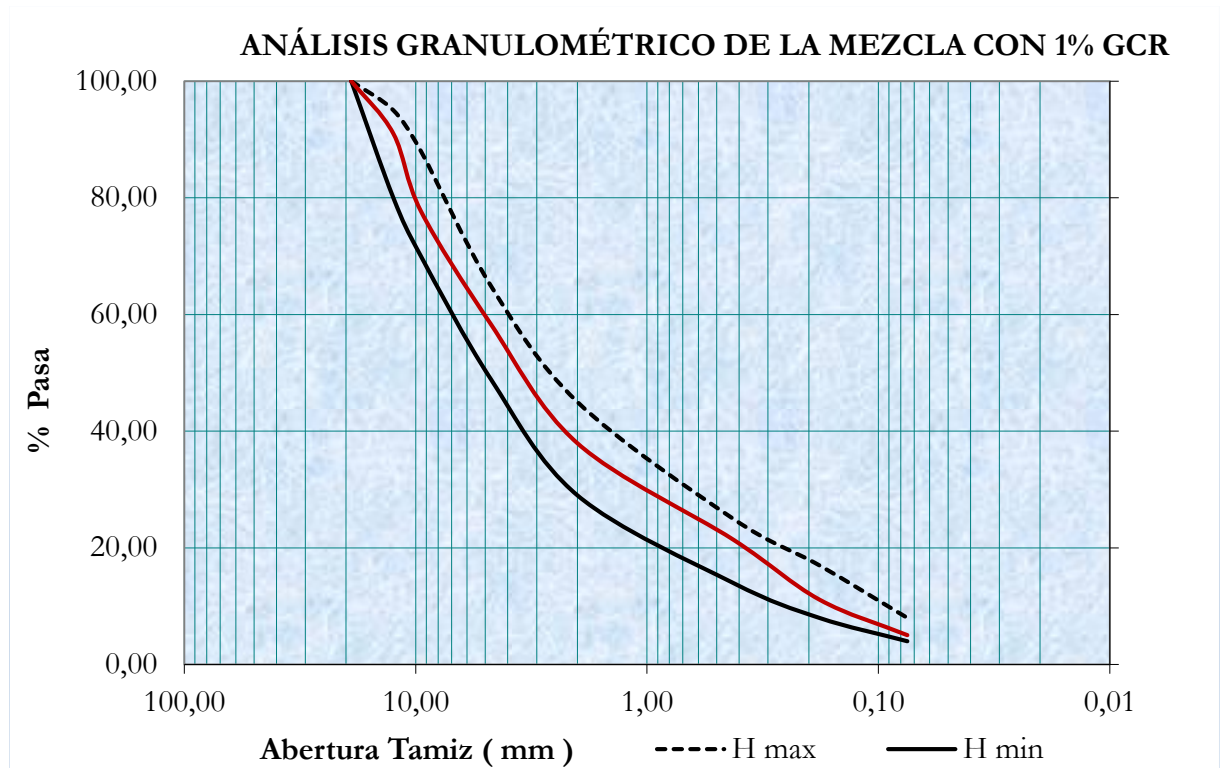


Tabla 5. Gradación de mezcla modificada con 1% de GCR.

Tamiz (in)	Abertura (mm)	Porcentaje-Pasa (%)		
		H max	H min	1% GCR
3/4	19.000	100.00	100.00	100.00
1/2	12.500	95.00	80.00	91.00
3/8	9.500	88.00	70.00	77.70
No. 4	4.750	65.00	49.00	58.40
No. 10	2.000	45.00	29.00	37.90
No.40	0.425	25.00	14.00	21.40
No. 80	0.180	17.00	8.00	11.10
No. 200	0.075	8.00	4.00	5.00

Figura 19. Grafica distribución granulométrica de mezcla con 1.5% de GCR.

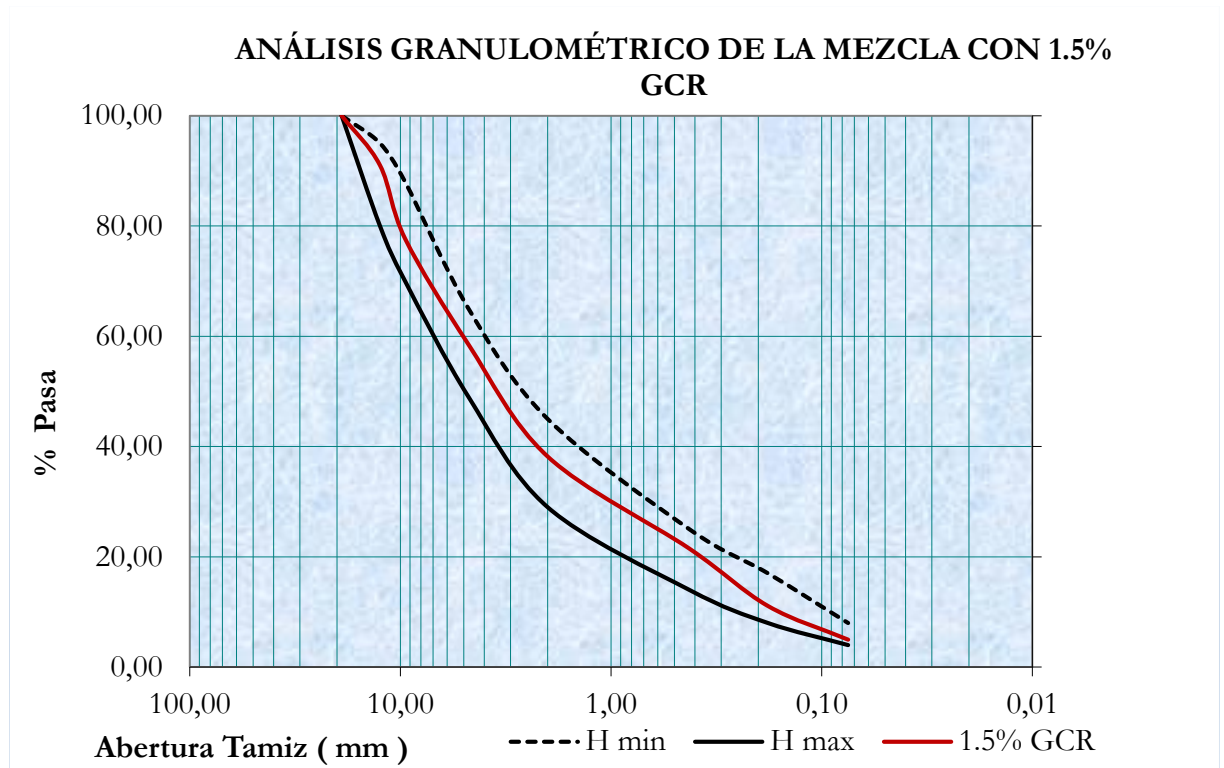


Tabla 6. Gradación de mezcla modificada con 1.5% de GCR.

Tamiz (in)	Abertura (mm)	Porcentaje-Pasa (%)		
		H max	H min	1.5% GCR
3/4	19.000	100.00	100.00	100.00
1/2	12.500	95.00	80.00	91.00
3/8	9.500	88.00	70.00	77.70
No. 4	4.750	65.00	49.00	58.50
No. 10	2.000	45.00	29.00	38.20
No.40	0.425	25.00	14.00	21.50
No. 80	0.180	17.00	8.00	11.10
No. 200	0.075	8.00	4.00	5.00

Figura 20. Grafica distribución granulométrica de mezcla con 2% de GCR.

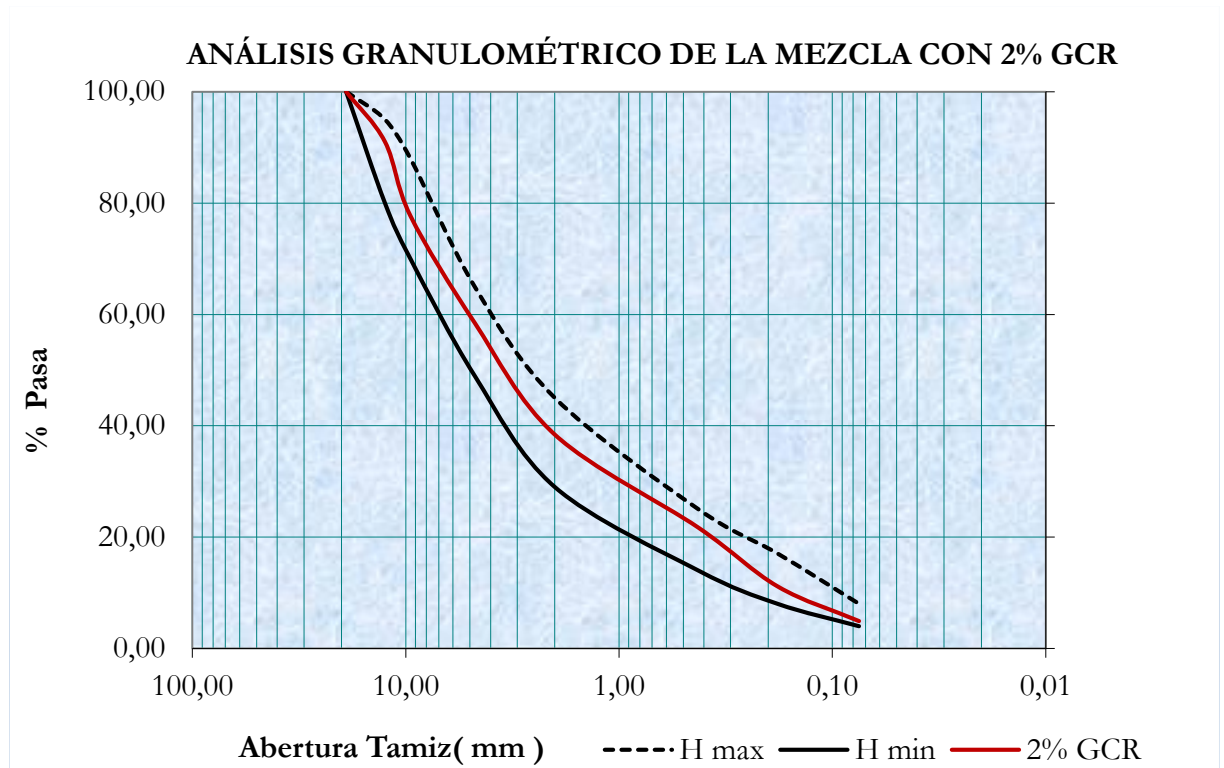


Tabla 7. Gradación de mezcla modificada con 2% de GCR.

Tamiz (in)	Abertura (mm)	Porcentaje-Pasa (%)		
		H max	H min	2% GCR
3/4	19.000	100.00	100.00	100.00
1/2	12.500	95.00	80.00	91.00
3/8	9.500	88.00	70.00	77.70
No. 4	4.750	65.00	49.00	58.50
No. 10	2.000	45.00	29.00	38.40
No.40	0.425	25.00	14.00	21.70
No. 80	0.180	17.00	8.00	11.10
No. 200	0.075	8.00	4.00	4.90

Figura 21. Grafica distribución granulométrica de mezcla con 4% de GCR.

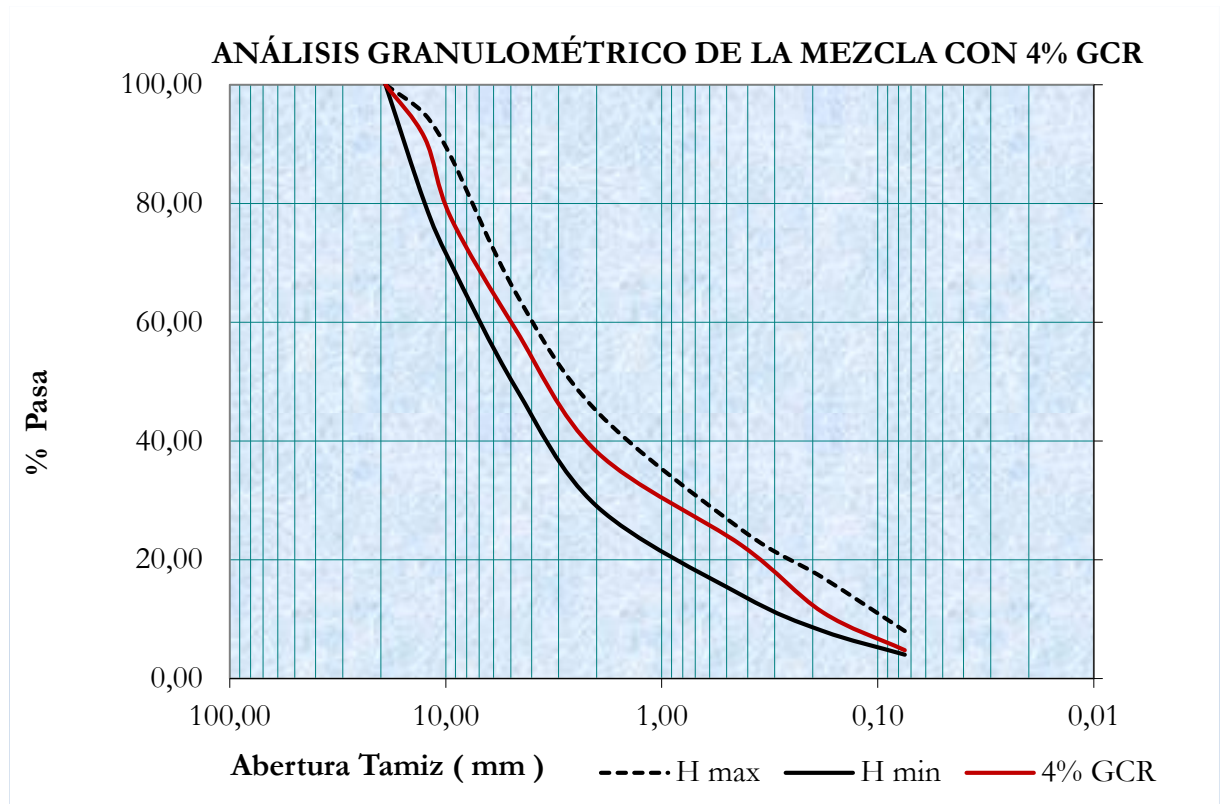


Tabla 8. Gradación de mezcla modificada con 4% de GCR.

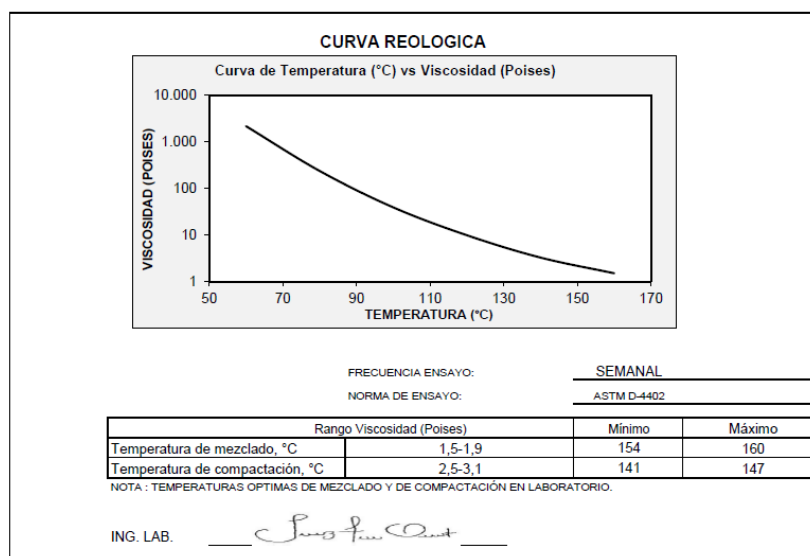
Tamiz	Abertura	Porcentaje-Pasa (%)		
		H max	H min	4% GCR
3/4	19.000	100.00	100.00	100.00
1/2	12.500	95.00	80.00	91.00
3/8	9.500	88.00	70.00	77.70
No. 4	4.750	65.00	49.00	58.80
No. 10	2.000	45.00	29.00	38.20
No.40	0.425	25.00	14.00	22.40
No. 80	0.180	17.00	8.00	11.20
No. 200	0.075	8.00	4.00	4.80

5.4 CARACTERIZACIÓN DEL LIGANTE ASFÁLTICO

Para la elaboración de las mezclas se utilizó un asfalto normalizado con grado de penetración 60/70. La caracterización y suministro del asfalto se llevó a cabo por medio de la empresa MPI. Ltda.

El asfalto se evaluó respecto al comportamiento de su viscosidad mediante la curva reológica de la Figura 24, se hallaron las diferentes temperaturas para la elaboración de las mezclas asfálticas, las cuales se representan en la Tabla 9.

Figura 22. Curva reológica del asfalto 60/70.



Fuente: MPI Ltda.

Tabla 9. Temperaturas utilizadas en los ensayos.

	CONVENCIONAL	GCR
Ligante	150°C	160°C
Material	170°C	175°C
Mezclado	155°C	160°C
Compactación	141°C	141°C

Fuente: MPI Ltda.

Tabla 10. Caracterización del ligante asfáltico.

PROPIEDAD	NORMA DE REFERENCIA I.N.V.	ESPECIFICACIÓN		REPORTE DE CONTROL DE CALIDAD	FRECUENCIA DE ENSAYO
		MIN	MAX		
Penetración a 25°C, 100 gr, 5 seg (mm/10)	E-706	60	70	66	LOTE
Punto de ablandamiento, (°C)	E-712	48	54	49,6	LOTE
Índice de penetración (IP)	E-724	-1,2	0,6	-0,63	LOTE
Viscosidad absoluta a 60°C (P)	E-716	1500	-----	2318	LOTE
Viscosidad Brookfield a 60°C (P) Aguja 27, Torque > 90%	E-717	1500	-----	2159	LOTE
Pérdida por Calentamiento Película Delgada en mov. A 163°C, 85 min (%)	E-720	-----	0,8	0,22	SEMANAL
Ductilidad a 25°C, 5 cm/min, (cm)	E-702	100	-----	134	QUINCENAL
Peso Específico	E-707	-----	-----	1,012	MENSUAL
Punto de Chispa, (°C)	E-709	230	-----	304	LOTE
Solubilidad en Tricloroetileno, (%)	E-713	99	-----	99,29	SEMESTRAL

PROPIEDAD	NORMA DE REFERENCIA I.N.V.	ESPECIFICACIÓN		REPORTE DE CONTROL DE CALIDAD	FRECUENCIA DE ENSAYO
		MIN	MAX		
Contenido de agua, (%)	E-704	-----	0,2	0	TRIMESTRAL
Contenido de Parafinas, (%)	E-718	-----	3	2,14	MENSUAL
Penetración del residuo después de la pérdida por calentamiento, % de la penetración original	E-706	50	-----	59	SEMANTAL
Incremento en el Punto de Ablando después de pérdida por calentamiento en película delgada, °C	E-712	-----	9	6,2	SEMANTAL
Índice de envejecimiento relación de viscosidades a 60°C del asfalto residual y el asfalto original (%)	E-717	-----	4	2,7	SEMANTAL

Fuente: MPI Ltda.

5.5 DISEÑO DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS

El proceso de diseño de las mezclas asfálticas se definió según el método Marshall, donde se emplean especímenes de forma cilíndrica con 102 (mm) de diámetro y 63.5 (mm) de alto, permitiendo posteriormente el cálculo de las propiedades volumétricas, la estabilidad y el flujo de cada mezcla. Para asegurar la calidad de la mezcla se establecen criterios de aceptación para cada parámetro a evaluar, tal como se presenta en la Tabla 11.

Tabla 11. Criterios para el diseño preliminar de la mezcla asfáltica.

CARACTERÍSTICA		Norma de Ensayo I.N.V.	MDC
			Tránsito NT3
Compactación [Golpes/cara]		E-748	75
Estabilidad mínima [N]			9000
Flujo [mm]			2.0-3.5
Relación Estabilidad/Flujo [kN/mm]			3.0-6.0
Vacíos con aire (Va%)	Rodadura	E-736 o E-799	4.0-6.0
Vacíos en los agregados minerales (VAM%) mínimo	T Max. 19 mm	E-799	15
Vacíos llenos de asfalto (VFA%)			65 a 75
Relación Llenante/Ligante efectivo, en peso			0.8 a 1.2
Concentración de llenante, valor máximo		E-745	Valor Crítico
Espesor promedio de película de asfalto, mínimo μm		E-741	7,5

Fuente: Artículo 450 de la normativa INVIAS.

5.5.1 Diseño de Mezcla Convencional Para determinar las proporciones de los materiales de la mezcla convencional se elaboraron 3 probetas con ligante al 4.5%, 5%, 5.5%, 6% y 6.5% de la masa total de la mezcla. El procedimiento de elaboración de los especímenes se describe a continuación, registrando el peso de la mezcla y cada material que la compone.

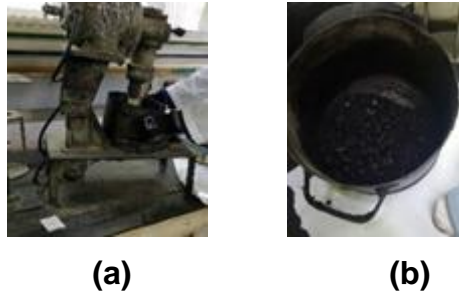
1. Se calienta en horno el material pétreo a una temperatura de 170°C durante aproximadamente 5 minutos.
2. El ligante es llevado a una temperatura de 150°C, se debe tener un control riguroso en su temperatura y revolver cuidadosamente.

Figura 23. Calentamiento del ligante para el mezclado.



3. Los moldes donde se dispondrán las mezclas se calientan a la temperatura de compactación de 141°C.
4. Se efectúa el mezclado de los materiales a una temperatura de 155°C durante aproximadamente un minuto y medio o hasta que la mezcla quede homogénea.

Figura 24. (a) Mezclador mecánico con materiales; (b) Mezcla homogénea.



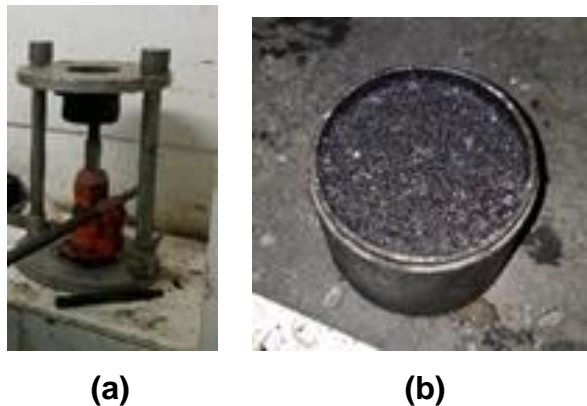
5. La mezcla es depositada en los moldes para su compactación a temperatura de 141°C; se aplica una energía de compactación de 75 golpes por cara mediante el Martillo manual de compactación.

Figura 25. Compactación de mezcla con Martillo compactador.



6. Se extrae el espécimen mediante un extractor de núcleos, teniendo precaución de no fracturar la mezcla.

Figura 26. (a) Extractor de núcleos; (b) Mezclas compactadas y extraídas.



5.5.1.1 Contenido Óptimo de Asfalto Se determina el porcentaje óptimo de asfalto comparando el comportamiento de la estabilidad, flujo, densidad, porcentaje de vacíos con aire, porcentaje de vacíos llenos de asfalto y porcentaje de vacíos en los agregados minerales variando el porcentaje de asfalto en 4.5%, 5%, 5.5%, 6% y 6.5% de cada probeta. Se presenta el procedimiento mediante el cual, se obtiene cada parámetro.

5.5.1.2 Gravedades Específicas La obtención de las gravedades específicas y los parámetros volumétricos requeridas para el diseño, se obtienen según la norma INV E-733 e INV E-799.

- Se registran los pesos de las probetas secas, sumergidas a temperatura de 25°C y superficialmente secas.
- Los especímenes son secados a masa constante y dispuestos para el ensayo de estabilidad y flujo, a fin de obtener la Gravedad Máxima de la Mezcla (GMM), datos importantes establecer los parámetros volumétricos.

Figura 27. Probetas sumergidas para obtención de su gravedad específica.



5.5.1.3 Estabilidad y Flujo Mediante la prensa de compresión Marshall se fallan las probetas registrando el valor de Estabilidad y Flujo, que corresponde a la carga máxima que soporta y a la deformación causada por la carga actuante sobre la mezcla, respectivamente. Se presenta la preparación previa de los especímenes.

1. Las probetas se someten a un baño termostático con una temperatura de 60°C durante 30 minutos aproximadamente.
2. Inmediatamente, se ubican las probetas en la prensa de compresión Marshall, se estabiliza el equipo para la carga y se comprime el espécimen.
3. Las briquetas falladas, son llevadas al horno a una temperatura de 110°C aproximadamente, con el fin de disgregar las probetas.
4. La mezcla suelta, se enfría a temperatura ambiente, y es llevada a un dispositivo de agitación en un picnómetro de vacío con el fin de calcular la gravedad máxima del material, dato necesario para el cálculo de los parámetros volumétricos.

Figura 28. (a) Picnómetro de vacío; (b) Dispositivo de agitación.



(a)

(b)

Fuente: INVIAS.

5.5.1.4 Parámetros Volumétricos Los resultados obtenidos de gravedades específicas y Gravedad Máxima del Mezcla (GMM) son procesados mediante las fórmulas descritas en la norma INV E- 799, donde se obtienen los parámetros volumétricos, que corresponden a los porcentajes de vacíos llenos de aire, de ligante, y la relación llenante/ligante.

5.5.2 Diseño de Mezcla con GCR Las mezclas asfálticas modificadas con caucho se elaboraron siguiendo la metodología de diseño Marshall, se aplicó los porcentajes de GCR en proporciones del 2% y 4%, posteriormente incluyendo el 1% y 1.5% dentro del estudio para hacer énfasis en el mejor comportamiento que presenta la mezcla.

El procedimiento de elaboración de los especímenes fue similar al de la mezcla convencional, variando la inclusión del GCR y las temperaturas.

1. Inicialmente se pesa con una báscula el material pétreo y calienta en horno a una temperatura de 175°C durante aproximadamente 5 minutos.

Figura 29. Material granular con GCR fino.



2. El ligante es llevado a una temperatura de 160°C, se debe tener un control riguroso en su temperatura y revolver cuidadosamente.
3. Los moldes donde se dispondrán las mezclas se calientan a la temperatura de compactación de 141°C.

4. Se efectúa el mezclado de los materiales a una temperatura de 160°C durante aproximadamente un minuto y medio o hasta que la mezcla quede homogénea.
5. La mezcla es depositada en los moldes para su compactación a temperatura de 141°C; se aplica una energía de compactación de 75 golpes por cara mediante el Martillo manual de compactación.
6. Se extrae el espécimen mediante un extractor de núcleos, teniendo precaución de no fracturar la mezcla.

5.5.3 Parámetros Volumétricos, Estabilidad y Flujo El porcentaje óptimo de asfalto obtenido para la mezcla convencional es aplicado igualmente para la mezcla con GCR y se evalúan los parámetros volumétricos, la estabilidad y el flujo de la misma manera que se efectuó para la mezcla sin adiciones.

5.6 ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA

Para verificar el diseño y determinar el valor del módulo de rigidez de las mezclas se emplea el ensayo de tracción indirecta que consiste en someter el espécimen de la mezcla a condiciones de temperaturas y frecuencias de cargas diferentes de una forma simultánea evaluando el efecto que conlleva el paso de una llanta inmediatamente sobre el punto de carga máxima. El ensayo es aplicado para la mezcla convencional y la mezcla modificada con GCR, siguiendo la metodología especificada en la norma “UNE-EN 12697-26:2006 Anexo C”.

La disposición del equipo para el ensayo de las probetas está conformada por el uso simultáneo de una cámara de temperatura, dotada internamente con un mecanismo de control de deformaciones (deformímetros de alambre), de aplicación

de cargas (pistón hidráulico), y un equipo de registro especializado en el proceso y tratamiento de los datos recopilados.

Figura 30. Equipo NAT HYD25-II (MPI) empleado en tracción indirecta.



Se siguió una metodología de 2 fases para la ejecución del ensayo:

1. Fase de diseño del espécimen
2. Fase de ensayo de tracción indirecta

5.6.1 Fase de Diseño del Espécimen La elaboración de las probetas para la obtención del módulo de rigidez se basa en el diseño establecido para el ensayo Marshall. A partir de la distribución granulométrica y el porcentaje de asfalto, se realiza el mezclado a una temperatura de 165°C, hasta conseguir que esta quede homogénea, tal y como se presentan en la Figura 31.

Figura 31. Elaboración de mezcla homogénea y mezcla de agregados con GCR.

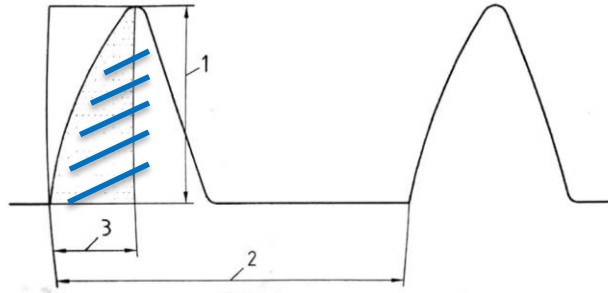


La compactación de la mezcla en laboratorio se hace a temperatura de 150°C por medio del Compactador Giratorio Superpave (Superpave Gyrotory Compactor, SGC), donde su principal función es compactar las probetas de ensayo del diseño. El comportamiento de la mezcla después de su elaboración es afectada por las propiedades resultantes del mezclado en caliente y de la compactación, por lo tanto, se somete la mezcla suelta a envejecimiento durante aproximadamente 4 horas antes de ser compactada por el SGC.

5.6.2 Fase de Ensayo de Tracción Indirecta Para determinar el módulo de rigidez de la mezcla asfáltica, se realizó el ensayo de tracción indirecta utilizando el software ISTM el cual se encuentra vinculado con el equipo NAT HYD25-II de Laboratorios MPI Ltda.

El método del ensayo consiste en la aplicación de una carga mayor a 0.5 [KN] distribuida de manera ortogonal al eje cilíndrico de la probeta, a frecuencias de 2.5 Hz, 5Hz y 10 Hz, en un entorno con temperaturas de 5°C, 20°C y 40°C, generando esfuerzos uniformes para deformaciones de aproximadamente 5 [µm], las cuales son medidas desde los ejes de su diámetro, es decir de dos diámetros trazados a 90°. El fenómeno que proyecta el ensayo en la mezcla se describe en la Figura 32 donde se representa la carga de forma similar a medio seno contemplando las variables de frecuencia y tiempo de aplicación de la carga.

Figura 32. Forma del impulso de carga.



Fuente: NORMA UNE; Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 26: Rigidez; España; UNE-EN 12697-26:2006 Anexo C; 2012.

Donde:

- 1:** Carga máxima.
- 2:** Periodo de repetición de los impulsos.
- 3:** Tiempo de subida.

El ensayo de tracción indirecta determina la rigidez de la mezcla asfáltica haciendo uso de las Ecuaciones (16) y (17), y la representación mostrada en la Figura 33.

$$S_m = \frac{F*(\nu+0.27)}{z*h} \quad (16)$$

Donde:

- S_m:** Módulo de Rigidez medido [Mpa].
- F:** Valor máximo de la carga vertical aplicada [N].
- z:** Amplitud de la deformación horizontal obtenida durante el ciclo de carga [mm].
- h:** Espesor medio de la probeta [mm].
- ν:** Coeficiente de poisson. (Si el coeficiente de poisson no está determinado se asume un valor de 0.35).

El valor del módulo de rigidez obtenido se debe ajustar a un factor de superficie de carga de 0.6, aplicando la Ecuación (16).

$$S'm = Sm * (1 - 0.322 * \text{Log}(Sm) - 1.82) * (0.6 - k) \quad (17)$$

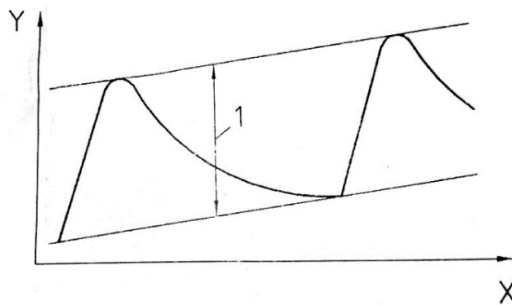
Donde:

S'm: Módulo de Rigidez para un factor de superficie de carga de 0.6 [MPa].

k: Factor de superficie de carga medido.

Sm: Módulo de Rigidez medido para un factor de carga "k", expresado en grados Celsius. [Mpa].

Figura 33. Amplitud de deformación.



Fuente: NORMA UNE; Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 26: Rigidez; España; UNE-EN 12697-26:2006 Anexo C; 2012.

Donde:

X: Tiempo.

Y: Deformación.

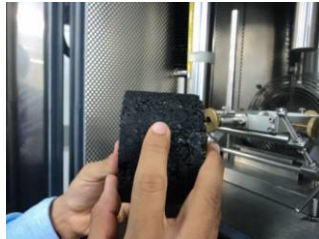
1: Amplitud de la deformación.

El ensayo se llevó a cabo el siguiente procedimiento:

1. Se elaboran 3 probetas con base en las dosificaciones obtenidas en la fase de diseño, tanto para la convencional como para la mezcla con inclusión de GCR.

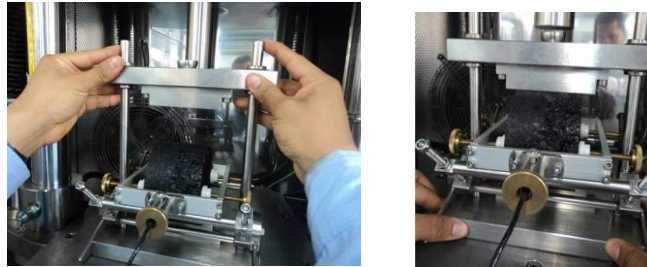
2. Se realiza el mezclado y la compactación de las probetas con base en la norma INV E-748 dejándolas en reposo durante un periodo de 24 horas a temperatura ambiente.
3. Antes de someter las probetas al ensayo se deben tomar las dimensiones de cada espécimen en el orden respectivo en que se iban a falla.
4. Se introducen las probetas en la cámara, centrándolas exactamente entre las marcas finales de las bandas de carga en la base sujeta con el marco.

Figura 34. Probeta dispuesta para el ensayo.



5. Se posiciona el espécimen con respecto al pistón a fin de proyectar la carga con la que falla la probeta.
6. Posteriormente, se ingresan los datos que se evaluarán, los cuales corresponden a la Temperatura de ensayo ($^{\circ}\text{C}$), Diámetro de la probeta (mm), Espesor de la probeta (mm), Coeficiente de Poisson, Tiempo de subida deseado (ms), Deformación horizontal deseado (μm) y Numero de pulsos de preparación.
7. Se ajusta el bastidor de montaje y las mordazas sin generar un apriete exagerado, de tal manera que en la interfaz no señale desnivel entre sensores.

Figura 35. Posicionamiento de palancas del soporte de alineación LVDT.



8. Debido a que la temperatura de la cámara y el laboratorio son diferentes, se debe dejar aclimatar el espécimen a ensayar dentro de la cámara hasta alcanzar la misma temperatura.
9. Una vez alcanzada la temperatura para el ensayo, se ejercen las cargas sobre el espécimen generando 5 impulsos de acondicionamiento, como se establece en la norma UNE-EN 12697-26. Los impulsos se generan para permitir que el equipo se ajuste a la carga y a las frecuencias que se soliciten desde el sistema para el ensayo.
10. Al finalizar los impulsos, se continua con la ejecución del ensayo para la simulación de cargas-temperaturas al espécimen obteniendo como resultado los valores de Fuerza vertical (kN), Esfuerzo horizontal (kPa), Tiempo de subida (ms), Deformación horizontal (μm), Factor de área de carga, y módulo resiliente (MPa).
11. Seguidamente, se gira la probeta 90 grados, desde su eje cilíndrico, con el fin de realizar el ensayo con el segundo diámetro tal y como se describe en la norma UNE.
12. Cuando se realiza el giro y se verifica que la temperatura dentro de la cámara se encuentre en el valor que corresponde, se repiten nuevamente los incisos

desde el 4 hasta el 11, para generar un informe final con los resultados del ensayo.

6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

6.1 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

Las distribuciones granulométricas realizadas inicialmente para el diseño de las mezclas fueron definidas para la mezcla convencional y con los porcentajes de GCR de modo que se ajustaran a los intervalos especificados en el artículo 450 de la norma INVIAS. Las gradaciones solamente presentaron diferencias a partir del tamiz N°40, desde el cual se incluyó como agregado fino al caucho, como se expone en la Tabla 12.

Tabla 12. Gradación para cada tipo de mezcla.

MEZCLA/TAMIZ	3/4"	1/2"	3/8"	N°4	N°10	N°40	N°80	N°200
CONVENCIONAL	100	91	77,7	58,3	37,5	21,0	11,1	5,1
1% GCR	100	91	77,7	58,4	37,9	21,4	11,1	5,0
1.5% GCR	100	91	77,7	58,5	38,2	21,5	11,1	5,0
2% GCR	100	91	77,7	58,5	38,4	21,7	11,1	4,9
4% GCR	100	91	77,7	58,8	38,2	22,4	11,2	4,8

6.2 DISEÑO DE LAS MEZCLAS

6.2.1 Contenido óptimo de asfalto Se compactaron especímenes por el método Marshall con diferentes contenidos de asfalto, las propiedades de las mezclas se evaluaron luego para determinar el contenido óptimo del ligante asfáltico de diseño mediante los resultados del ensayo que permitieron ilustrar las curvas de los parámetros volumétricos, estabilidad y flujo para determinar el porcentaje de asfalto. Los parámetros volumétricos, la estabilidad y el flujo se muestran en la Tabla 13 en función del ligante.

Tabla 13. Parámetros fundamentales del diseño Marshall.

% Asfalto	Densidad Bulk	% VACÍOS	% VAM	% VFA	Estabilidad	Flujo
4,5	2,261	7,2	15,8	54,5	12248	2,27
5	2,29	5,3	15,2	65,1	13115	2,61
5,5	2,297	4,3	15,3	71,8	14295	2,76
6	2,305	3,3	15,5	78,9	13083	3,33
6,5	2,323	1,8	15,3	88,2	11494	3,76

A partir de estos datos se generaron gráficos de la densidad de bulk, contenidos de vacíos con aire, vacíos en los agregados minerales, vacíos llenos de asfalto, estabilidad y flujo en función del contenido de ligante, los gráficos se pueden apreciar en las comprendidas entre la Figura 36 a la Figura 41.

Figura 36. Peso específico vs. % Asfalto.

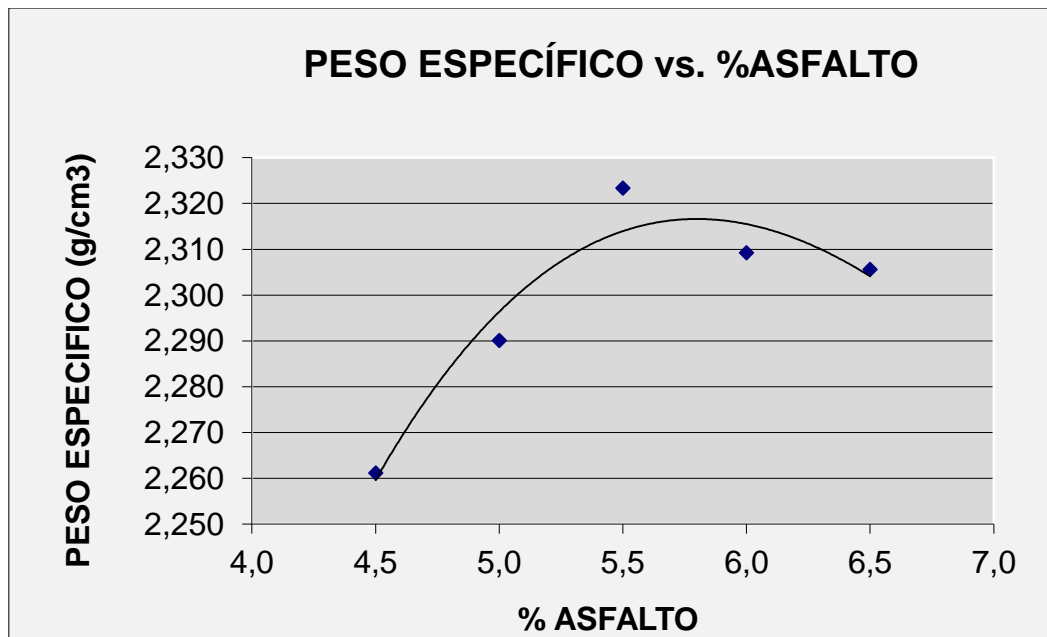


Figura 37. % Vacíos con aire vs. % Asfalto.

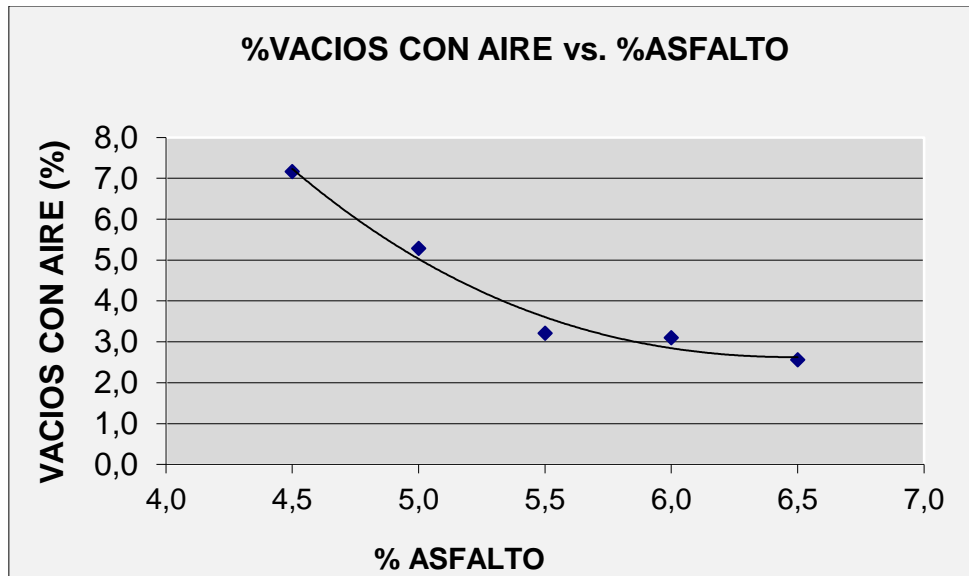


Figura 38. % Vacíos en el agregado mineral vs. % Asfalto.

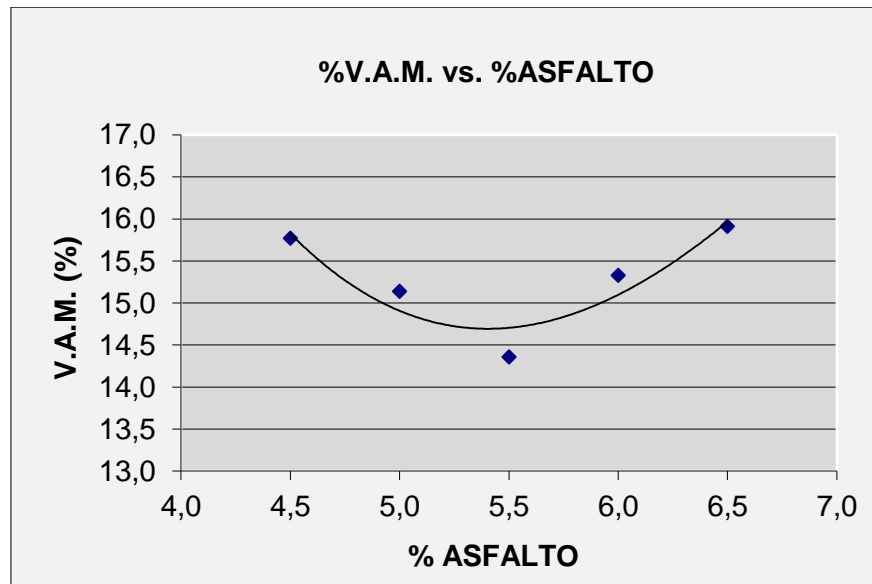


Figura 39. % Vacíos llenos de asfalto vs. % Asfalto.

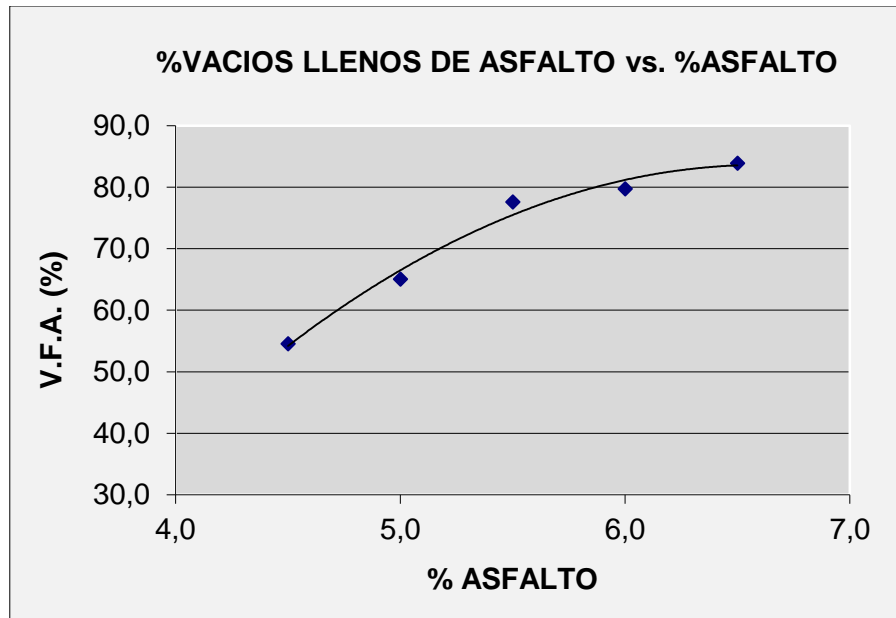


Figura 40. Estabilidad vs. % Asfalto.

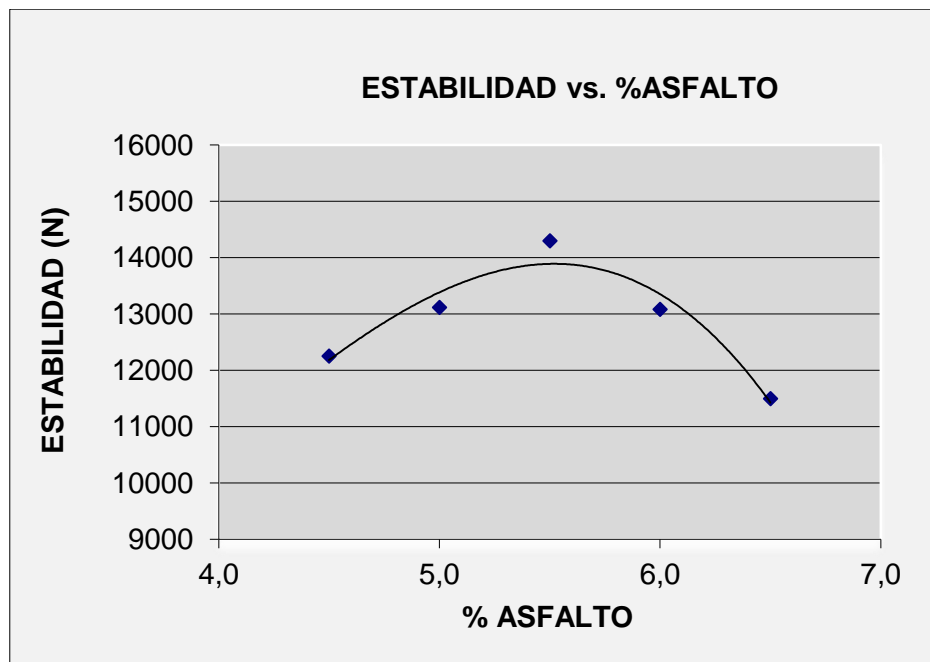
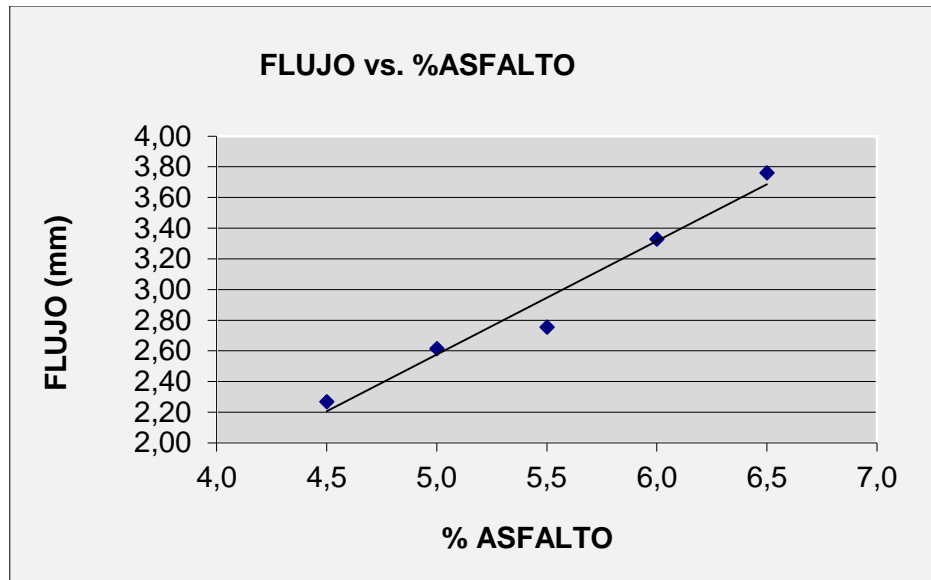


Figura 41. Flujo vs. % Asfalto.



En la Tabla 13 los contenidos de asfalto del 4.5%, 6% y 6.5% no cumplen con los porcentajes de vacíos establecidos en las especificaciones del Instituto Nacional de Vías. Con base en lo anterior, se descartaron esos tres porcentajes de asfalto.

Una vez se tienen las gráficas de las curvas se realizó el siguiente procedimiento para hallar el valor óptimo:

- En la curva de estabilidad se seleccionó el porcentaje de asfalto de 5.5% el cual correspondió a la máxima estabilidad con un valor 14295 [N].
- En la curva de vacíos se seleccionó el porcentaje de asfalto del 5.1% el cual correspondió al punto medio en las especificaciones de vacíos del INVIAS, el cual fue del 5% en vacíos con aire.
- Se promediaron aritméticamente los dos valores de asfalto mencionados anteriormente consiguiendo que el valor óptimo de asfalto era el 5.3%.

Se verificó para este contenido de asfalto los parámetros volumétricos, los valores de estabilidad y flujo mediante las ecuaciones descritas en la Figura 36 a la Figura 41. Los valores de diseño para la mezcla asfáltica con el 5.3% de asfalto se presentan en la Tabla 14.

Tabla 14. Verificación de los parámetros para el porcentaje óptimo de asfalto.

ASFALTO 5.3%			
PARÁMETRO EVALUADO	VALOR	ESPECIFICACIÓN	VERIFICACIÓN
Estabilidad (N)	13797	≥ 9000	Cumple
Flujo (mm)	2,8	2,0-3,5	Cumple
Relación Estabilidad/Flujo (kN/mm)	4,9	3,0-6,0	Cumple
Vacíos del agregado mineral (%)	15,2	≥ 15	Cumple
Vacíos con aire (%)	4,6	4,0-6,0	Cumple
Vacíos con asfalto (%)	6,9	6,5-7,5	Cumple
Relación llenante/ligante	1,1	0,8-1,2	Cumple

6.2.1 Porcentaje óptimo de GCR A partir del porcentaje óptimo de asfalto obtenido se realizó nuevamente el diseño para las mezclas asfálticas con GCR, únicamente variando la proporción del agregado fino y el porcentaje de inclusión del caucho, conforme a lo anterior, en la Tabla 15 se muestran los resultados obtenidos de los parámetros para las diferentes mezclas con sus respectivos porcentajes de caucho.

Tabla 15. Resultados de los parámetros de las mezclas para diferentes porcentajes de caucho.

% GCR	Gmm	Densidad (T/m³)	Vacíos %	Estabilidad (N)	Flujo (mm)	Relación Estabilidad/Flujo (KN/mm)
Reportar	-	Reportar	4-6	≥ 9000	2-3.5	3.0-6.0
1	2,387	2,282	4,4	13250	2,7	4,9
1,5	2,383	2,263	5	12440	3	3,8
2	2,382	2,243	5,8	11010	3,5	4,6

% GCR	Gmm	Densidad (T/m ³)	Vacíos %	Estabilidad (N)	Flujo (mm)	Relación Estabilidad/Flujo (KN/mm)
4	2,351	2,193	6,7	10500	4,2	2,5

Todas las mezclas consiguieron valores aceptables dentro de los criterios de estabilidad y flujo, sin embargo, se descartó la mezcla con 4% de GCR, debido a que el parámetro volumétrico de vacíos con aire no estaba contenido dentro de la franja estipulada por la especificación. Por otra parte, la mezcla del 2% de GCR no se consideró aplicable al estudio, a causa del resultado en su flujo, principalmente por estar en el extremo del intervalo permitido y presentar una condición dudosa en calidad.

Según la tendencia entre las mezclas de GCR, los porcentajes más bajos con 1% y 1.5% presentan mayor estabilidad, a partir de esto, el contenido óptimo de GCR con el cual se obtuvo los mejores porcentajes de vacíos fue del 1.5%, debido a que se acercaba al valor promedio de vacíos especificados en la tabla 450-10 del artículo normativo del Instituto Nacional de Vías.

Tabla 16. Tabla comparativa de parámetros entre la mezcla convencional y la modificada con GCR.

Tipo de Mezcla	Estabilidad (N)	Flujo (mm)	Relación Estabilidad/Flujo (N/mm)	% Vacíos
Convencional	13797	2,8	4,9	4,6
1.5% GCR	12440	3	3,8	5

A partir de los parámetros obtenidos en la Tabla 16, se determinó que la mezcla convencional posee valores superiores en estabilidad de aproximadamente un 9.8% con respecto a la mezcla de GCR.

- El flujo en la mezcla convencional es 7.1% menor que en la mezcla con GCR.
- La relación Estabilidad/Flujo de la mezcla convencional da como resultado mayor optimización con respecto a la mezcla con GCR, el valor de la relación es mayor, lo cual consiste en que a mayor carga presenta menos deformación.
- Con respecto al porcentaje de vacíos, la mezcla con GCR fue 8.7% mayor que en la mezcla convencional, esta diferencia se debe a la presencia del caucho en la mezcla asfáltica, por las propiedades elásticas que lo rigen obligando a la mezcla a recuperar parte de la deformación en el momento de su compactación, evitando que todos los espacios llenos de aire se cubran completamente del ligante.
- La interacción del caucho con los agregados y el ligante, puede ser la causa de resultados inferiores en los parámetros evaluados, ya que la elasticidad del caucho y la visco-elasticidad del ligante pueden generar un desfase en su reacción, provocando que la mezcla sufra efectos internos, como expansiones y contracciones causando reacomodamientos en la estructura mineral y molecular de la mezcla.

6.3 ENSAYO DE AHUELLAMIENTO

El diseño planteado para la mezcla convencional y con 1.5% de GCR desarrollado en este proyecto fue implementado simultáneamente con Ingrid Natalia Melo Rojas y María Fernanda Jiménez Fletcher en la elaboración de su proyecto *“COMPARACIÓN DE LA MEZCLA ASFALTICA SIN ADICIONES Y MEZCLA ASFALTICA CON GCR (GRANO DE CAUCHO RECICLADO) EMPLEANDO EL ENSAYO DE AHUELLAMIENTO REEMPLAZANDO ENTRE EL 1% Y 4% DEL*

AGREGADO FINO” en el cual se emplea el ensayo de ahuellamiento para evaluar la resistencia a la deformación plástica en las mezclas mencionadas.

Los resultados de este ensayo (Ver Anexos L, M, N, O, P y Q) indican un mejor comportamiento en la mezcla con GCR debido a la presencia del grano de caucho, el cual, ofrece una mejoría en la recuperación elástica, mientras que la deformación total de la mezcla con inclusión de caucho es menor a la obtenida en la mezcla convencional.

6.4 ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA

Las mezclas asfálticas se evaluaron teniendo en cuenta 3 factores: El tipo de composición de la mezcla, la temperatura del ensayo y la frecuencia de la carga.

Los especímenes, según los resultados obtenidos en el ensayo (Ver Anexos), se agruparon de tal forma que se pudiera apreciar el contraste en un escenario de temperaturas y frecuencias, como se presenta en las Figuras 42 y 43 para los ejemplares convencionales y en las Figuras 44 y 45 para las mezclas con 1,5% de GCR. Los datos presentaron una tendencia ascendente en cuanto al valor de la rigidez de ambas mezclas a medida que se aumentó la magnitud de la frecuencia de carga. Así mismo, cuando las mezclas se exponen a temperaturas elevadas, su rigidez disminuye, debido a que la muestra se vuelve más viscosa, es decir pierde cohesión por la expansión que se genera en las moléculas del ligante, disminuyendo su módulo de rigidez.

Tabla 17. Resultados de módulos en la mezcla convencional según frecuencia y temperatura.

MEZCLA CONVENCIONAL		
MÓDULO DE RIGIDEZ [MPa]	FRECUENCIA [Hz]	TEMPERATURA [°C]
9524	2.5	5
2632		20
334		40
10684	5	5
3271		20
422		40
11675	10	5
4065		20
550		40

Figura 42. Efecto de temperaturas a frecuencias constantes en las mezclas.

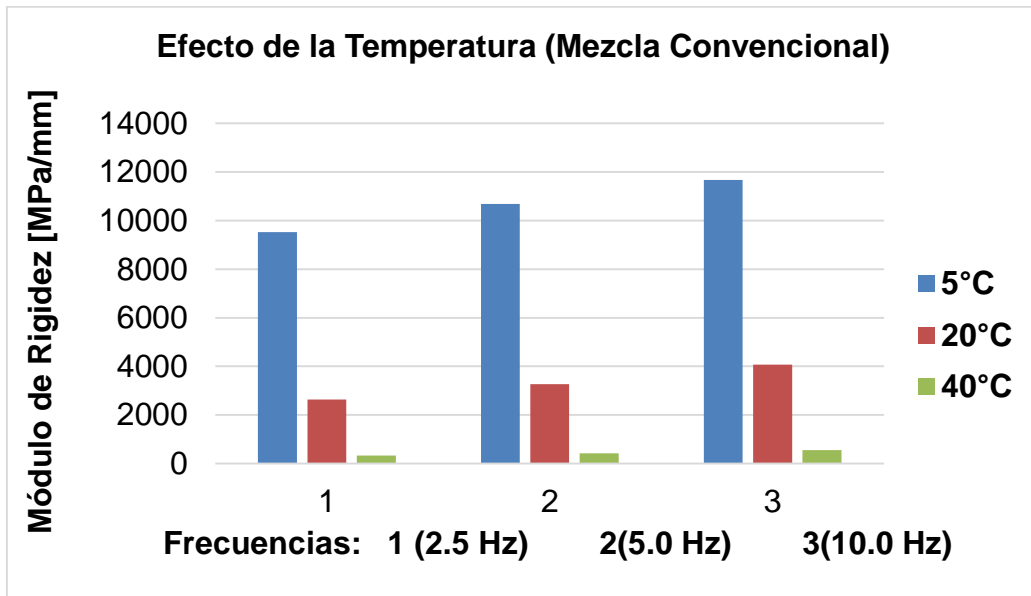


Figura 43. Efecto de frecuencias a temperaturas constantes en las mezclas.

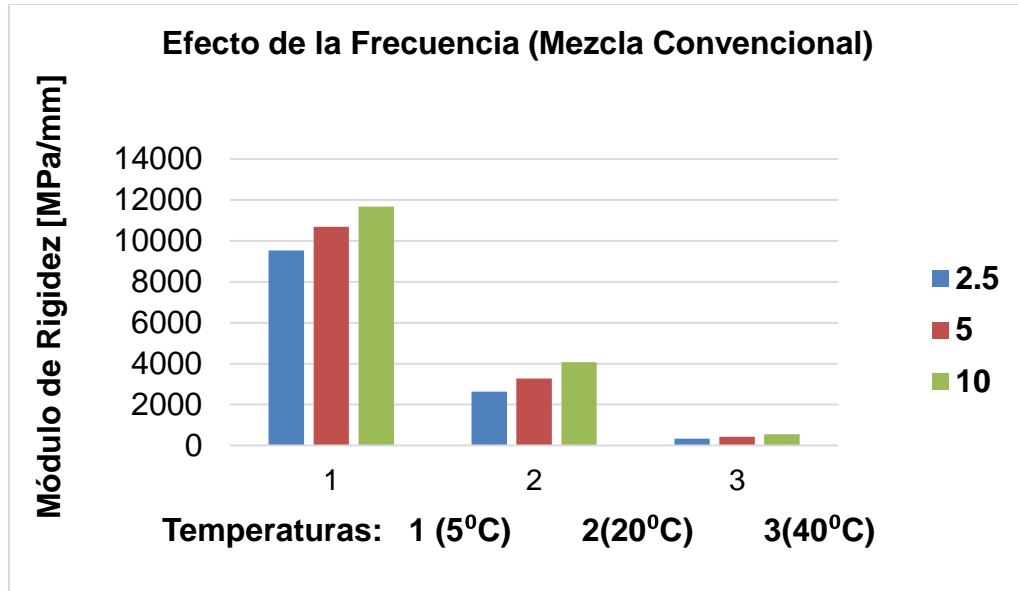


Tabla 18. Resultados de módulos en la mezcla con 1.5% de GCR según frecuencia y temperatura.

MEZCLA CON GCR 1.5%		
MÓDULO DE RIGIDEZ [MPa]	FRECUENCIA [Hz]	TEMPERATURA [°C]
6278	2.5	5
1836		20
302		40
7075	5	5
2247		20
379		40
7790	10	5
2726		20
481		40

Figura 44. Efecto de frecuencias a temperaturas constantes en las mezclas.

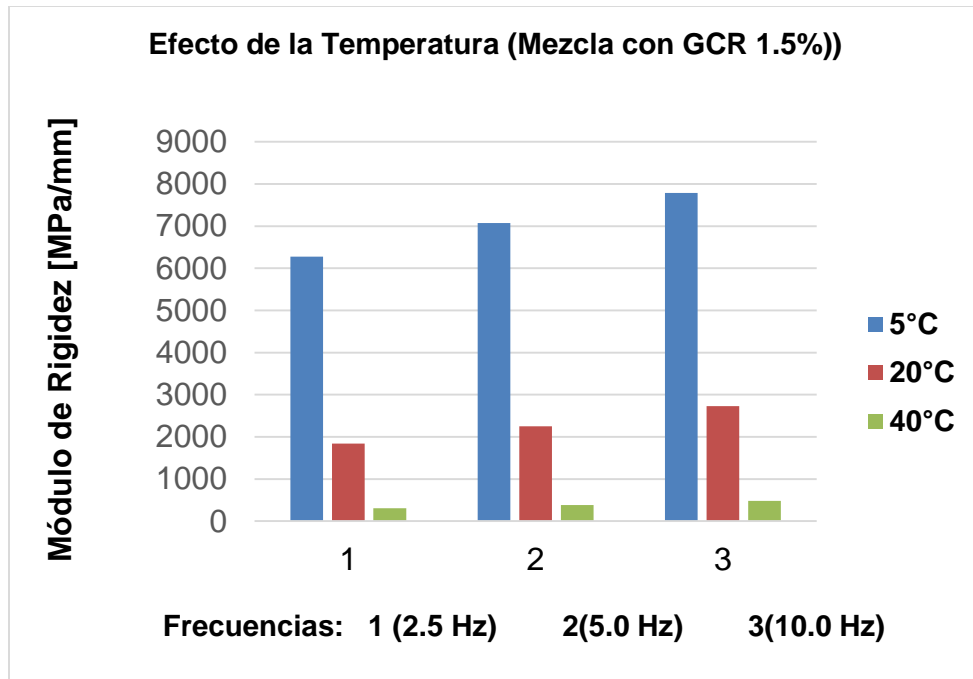
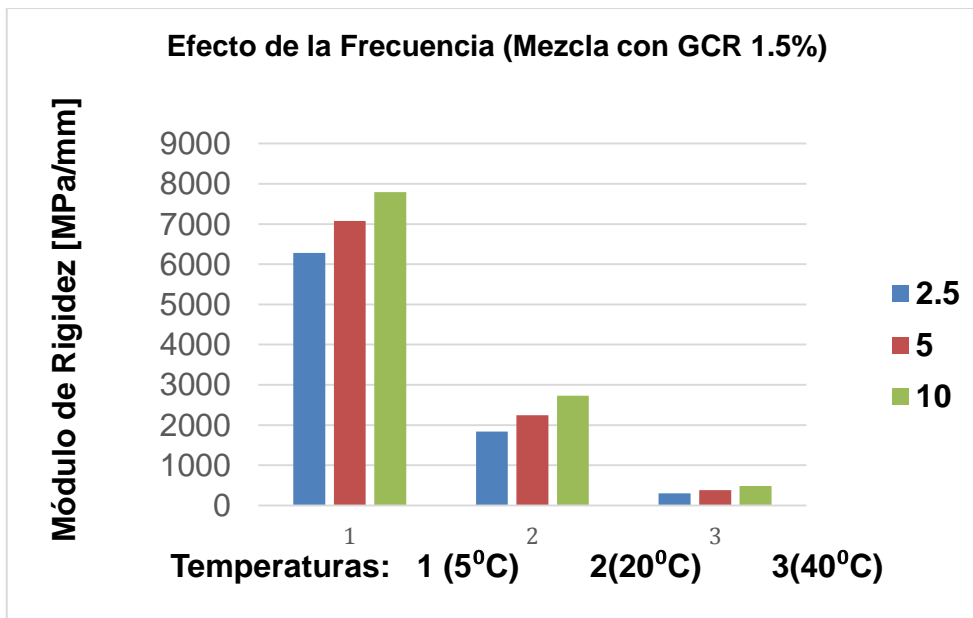


Figura 45. Efecto de frecuencias a temperaturas constantes en las mezclas.



Los resultados obtenidos en el ensayo describen una reacción diferente por parte de las mezclas cuando el estímulo lo proporciona la temperatura o la frecuencia de carga.

A medida que la frecuencia aumenta, el módulo de rigidez lo hace de igual forma, permitiendo comprender, que a medida que el flujo vehicular es rápido y liviano, la cohesión y resistencia de la mezcla se afecta menos en comparación con el escenario que representa una frecuencia de baja magnitud.

A pesar de que la mezcla convencional y la mezcla con 1.5% de GCR presentaron el mismo comportamiento ante las frecuencias y temperaturas, los datos recopilados apuntan que la mezcla convencional presenta una tendencia de mayor rigidez del 17.5% en cuanto a la mezcla con 1.5% de GCR.

7. CONCLUSIONES

Considerando las propiedades volumétricas las mezclas con el 2% y 4% de GCR requieren aumentar o modificar el porcentaje de asfalto aspecto que implica mayor costo en la elaboración de la mezcla.

Según el proyecto “COMPARACIÓN DE LA MEZCLA ASFALTICA SIN ADICIONES Y MEZCLA ASFALTICA CON GCR (GRANO DE CAUCHO RECICLADO) EMPLEANDO EL ENSAYO DE AHUELLAMIENTO REEMPLAZANDO ENTRE EL 1% Y 4% DEL AGREGADO FINO” se concluyó: Las mezclas asfálticas con porcentaje de 1.5% de GCR sometidas al ensayo de ahuellamiento, presentan mejor comportamiento que las mezclas asfálticas sin adiciones, esta mejora se da en un 68% equivalente a la disminución de la deformación total al final del ensayo. Por tanto, se observa que, al sustituir porcentaje de agregado fino por grano de caucho reciclado, mejora la resistencia de las mezclas al ahuellamiento. Mientras que la mezcla asfáltica convencional sometida al ensayo de tracción indirecta presenta mayor rigidez que la mezcla con inclusión del 1.5% de GCR.

Mezclas convencionales y con inclusión de GCR al 1.5% de reemplazo fueron desarrolladas por Ingrid Natalia Melo Rojas y María Fernanda Jiménez Fletcher con las mismas dosificaciones aplicando el ensayo de ahuellamiento; los resultados presentaron un aumento en el flujo pese a que el ahuellamiento disminuyó, por lo tanto, el flujo no debe considerarse como parámetro para evaluar la calidad de este tipo de mezclas y su resistencia al ahuellamiento.

La estabilidad alcanzada por la mezcla con GCR presentó una disminución con respecto a la mezcla convencional pese a la presencia del caucho y sus

propiedades elásticas, por esta razón la estabilidad no debe considerarse como parámetro para caracterizar la rigidez de la mezcla.

La mezcla con GCR presentó menores valores de rigidez, sin embargo, no significa que sea de comportamiento inferior con respecto a la mezcla convencional.

Las mezclas con GCR son de menor ahuellamiento con respecto a la mezcla convencional a pesar de que la estabilidad y la rigidez presentaron una disminución, por ello no deben ser parámetros para calificar el comportamiento de estas mezclas.

8. RECOMENDACIONES

Los porcentajes altos de GCR en la mezcla asfáltica, según los resultados obtenidos no ofrecen una mejoría en los parámetros de estabilidad, flujo y porcentaje de vacíos, por lo que se aconseja incluir porcentajes de GCR menores a los abordados en este proyecto para obtener mejores resultados.

Las dosificaciones de las partículas de caucho con tamaños inferiores al tamiz N° 40 (0.425 mm) pueden influir en el resultado del diseño de la mezcla y su rigidez, debido a la mayor interacción que se presenta entre el asfalto y el caucho ofreciendo resultados diferentes a los obtenidos en esta investigación, por lo que se sugiere evaluar la incidencia que tiene el tamaño del GCR en los parámetros volumétricos de la mezcla asfáltica.

Debido a que la diferencia entre los módulos de rigidez de la mezcla asfáltica convencional y con 1.5% de GCR fue inferior, se recomienda evaluar y comparar el módulo de rigidez para diferentes porcentajes de GCR con la mezcla convencional.

Siguiendo la experiencia en laboratorio, se estima que factores como el tiempo y temperatura de reacción entre el ligante y el caucho hacen parte de los elementos que permiten plantear la tendencia que describe la rigidez de las mezclas asfálticas. La interacción de estos define la resistencia y el comportamiento elástico que puede ofrecer la mezcla; según lo anterior, se sugiere tener en cuenta para futuros estudios con respecto a la inclusión de GCR en mezclas asfálticas por vía seca profundizar en los cambios de los parámetros volumétricos y rigidez que se consiguen variando los tiempos de interacción entre el ligante y el caucho, estudiando los tiempos y temperaturas.

La implementación del caucho reciclado en las mezclas asfálticas contribuye en la reducción del impacto ambiental que genera el desecho neumático, por ello es importante ampliar los estudios sobre la aplicación y efectos que el GCR puede generar en el diseño de las mezclas asfálticas.

Se recomienda estudiar los factores que inciden sobre la compactación de las probetas en la obtención de resultados en el módulo de rigidez, debido a que la elasticidad que ofrece el GCR al momento de resistir una carga tiende a recuperar una parte de la deformación provocada por esta.

La disposición de equipos y maquinaria en el laboratorio de materiales genera la oportunidad de realizar estudios y grandes aportes científicos para el área de pavimentos, permitiendo llevar a cabo las diferentes investigaciones que complementan cada vez más el estado de conocimiento que existe sobre el comportamiento de las mezclas asfálticas, es por ello, que se recomienda incorporar nuevas herramientas en los laboratorios de la Universidad Industrial de Santander que brinden el paso a estudios más detallados y precisos para futuras investigaciones.

BIBLIOGRAFÍA

ANGULO, Ricardo y DUARTE, José. Modificación de un asfalto con caucho reciclado de llanta para su aplicación en pavimentos; Tesis de pregrado; Bucaramanga; Universidad Industrial de Santander; 2005.

ASFALTO EN LA INGENIERIA CIVIL. Blog dedicado a el asfalto, características, propiedades, ensayos y aplicación. [En línea], 16 de noviembre de 2012, [Revisado 1-05-2017] [Disponible en internet: <http://asfaltoingenieriacivil.blogspot.com.co/2012/11/comportamiento-fisico-mecanico-del.html>]

ASPHALT INSTITUTE, MS-2 Asphalt Mix Design Methods, 7 ed.; Design manual; Asphalt Institute; 2014.

ATENCIA, Olga. Análisis De Los Procesos De Oxidación De Asfaltos Colombianos En Inmersión Bajo Agua; Tesis de pregrado; Bogotá D.C; Pontifica Universidad Javeriana; 2011.

AYALA, Marvin y JUARREZ, Ivy; Diseño de mezcla drenante con asfalto modificado disponible en el salvador; Tesis de pregrado; Ciudad Universitaria; Universidad de el Salvador; 2010.

BAHIA, H.U., DAVIS, R.. Effect of crumb rubber modifiers (CRM) on performance related properties of asphalt binders. J. Assoc. Asphalt Paving Technol. 63,414-449. 1994

BOTERO, J. H., VALENTÍN, M. O., SUÁREZ, O. M., SANTOS, J., ACOSTA, F. J., CÁCERES, A. y PANDO, M. A. Gomas Trituradas: Estado del Arte, Situación Actual y Posibles Usos como Materia Prima en Puerto Rico. Rev. Int. de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil. Vol. 5, No. 1, 69-86, 2005.

CONSTRUMATICA. Clasificación de las Mezclas Asfálticas; Metaportal. [En línea] [Revisado 10-06-2017] [Disponible en internet: http://www.construmatica.com/construpedia/Clasificaci%C3%B3n_de_las_Mezclas_Asf%C3%A1lticas]

CORONA, Camila. Determinación de módulo de rigidez y caracterización de módulo dinámico de mezcla superpave; Tesis de pregrado; Valparaíso; Universidad Técnica Federico Santa María; 2017.

ESCUDERO GRUPO EMPRESARIAL. Tipos de mezcla asfáltica que encontramos en construcción. [En línea] [Revisado 10-05-2017] [Disponible en internet: <http://escudero.com.mx/tipos-de-mezcla-asfaltica-que-encontramos-en-construccion/>]

ESPECIFICACIONES GENERALES DE CONSTRUCCION DE CARRETERAS INVIAS; Mezclas Asfálticas En Caliente De Gradación Continua (Concrcto Asfáltico); art 450-6; Instituto Nacional de Vias; Colombia; 2013

FEITEIRA DIAS, JL, PICADO SANTOS, LG , CAPITÃO, SD, Mechanical performance of dry process fine crumb rubber asphalt mixtures placed on the Portuguese road network, Volume 73, 30 December 2014, Pages 247–254.2014.

GARNICA. P. DELGADO. H. y SANDOVAL. C. D. Análisis Comparativo De Los Métodos Marshall Y Superpave Para Compactación De Mezclas Asfálticas,

Publicación Técnica No 271; Secretaria de Comunicaciones y Transportes (Instituto Mexicano del Transporte); Sanfandila, Qro, 2005.

GARNICA. P. FLORES. M. GÓMEZ. J. A y DELGADO. H. Caracterización Geomecánica de Mezclas Asfálticas; Publicación Técnica No 267; Secretaria de Comunicaciones y Transportes (Instituto Mexicano del Transporte); Sanfandila, Qro, 2005.

HERNANDEZ, Juan y ROSERO, Darwin. Rehabilitación de pavimentos con mezclas asfálticas convencionales y modificadas con polímeros en la malla vial del municipio de Itagüí. Tesis de posgrado; Medellin; Universidad de Medellin; 2014.

JARAMILLO, A. Catorce6: Llantas y bombillos, ¡contaminación en aumento!. [Recuperado de: <https://www.catorce6.com/opinion/publicaciones/982-llantas-y-bombillos-un-problema-de-contaminaci%C3%B3n-en-aumento>]

JIMENEZ, R. A. and MEIER, W. R. Laboratory Evaluation of an Asphalt-Rubber SAL. Transportation Research Record, TRB, 1034, 86-96, 1985.

KHODARY, M. H. F. Evaluation of Fatigue Resistance for Modified Asphalt Concrete Mixtures Based on Dissipated Energy Concept. Technische Universität Darmstadt, 2010.

LOUGHEED, T. J. and PAPAGIANNAKIS, A. T. Viscosity Characteristics of Rubber-Modified Asphalts. Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 8, No.3, 153-156, 1996.

MARROQUIN, Jose y URIBE, Dario. Estudio de la susceptibilidad al ahuellamiento en mezclas asfálticas semidensas; Tesis de grado; Bucaramanga; Universidad Industrial de Santander; 2017.

MORENO, F., RUBIO, MC, MARTÍNEZ-ECHEVARRÍA, MJ, El comportamiento mecánico de polvo de neumático por vía seca modificado mezclas bituminosas en caliente: La influencia del tiempo de digestión y el porcentaje de polvo de neumáticos, Volumen 26, Número 1 , páginas 466-474. 2012.

MURAT Karacasu, VOLKAN Okur, AND ARZU ER, "A Study on the Rheological Properties of Recycled Rubber-Modified Asphalt Mixtures, "The Scientific World Journal, vol. 2015, Article ID 258586, 9 pages, 2015.

NARANJO, Fabio y RUEDA, Javier. Implementación de un ensayo para medir el módulo de rigidez complejo en mezclas asfálticas; Tesis de pregrado; Bucaramanga; Universidad Industrial de Santander; 2011.

NORMA IDU SECCIÓN 200-05, CEMENTO ASFALTICO, Especificaciones técnicas generales de materiales y construcción para proyectos de infraestructura vial y de espacio público (IDU), 2006.

NORMA INVIAS; Análisis granulométrico de los agregados grueso y fino; INV E-213-13; Instituto Nacional de Vias; Colombia; 2013

NORMA INVIAS; Analisis volumétrico de mezclas asfálticas compactadas en caliente; INV E-799-13; Colombia; Instituto Nacional de Vias; 2013.

NORMA Invias; Diseño de mezclas de concreto asfáltico elaboradas con asfalto-caucho; INV E-824-13; Instituto Nacional de Vias; Colombia; 2013.

NORMA INVIAS; Estabilidad y flujo de mezclas asfálticas en caliente empleando el equipo Marshall; INV E-748-13; Colombia; Instituto Nacional de Vias; 2013.

NORMA UNE; Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 26: Rigidez; España; UNE-EN 12697-26:2006 Anexo C; 2012.

PADILLA, Alejandro. Análisis de la resistencia a las deformaciones plásticas de mezclas bituminosas densas de la normativa mexicana mediante el ensayo de pista; Tesis de grado; Barcelona; Universitat Politècnica de Catalunya, BARCELONATECH; 2004, 5-38p; [Disponible en: <https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/3334>]

PEREZ, Viviana. Evaluación del efecto del agua en vigas de concreto asfáltico bajo condiciones inducidas de humedad; Tesis de posgrado; Bucaramanga; Universidad Industrial de Santander; 2012.

PINTO A, SOUSA J, The first brazilian experience with in situ field blend rubber asphalt. Munich: s.n. Asphalt Rubber 2012; 2012.

PUNITH, V.S., SURESHA S. N., SRIDHAR Raju, SUNIL Bose and VEERARAGAVAN, A. Laboratory Investigation of Open-Graded Friction Course Mixtures Containing Polymers and Cellulose Fibers. Journal of Transportation Engineering, Accepted to publish, 2011.

RAMÍREZ, Armando y LADINO, Ingrid. Diseño de mezcla asfáltica con asfalto caucho tecnología Gap Graded para la ciudad de Bogotá; Tesis de posgrado; Bogotá D.C; Universidad Católica de Colombia; 2014.

RAMÍREZ, Palma. Estudio de la utilización de caucho de neumáticos en mezclas asfálticas en caliente mediante proceso seco; Tesis de pregrado; Santiago de Chile; Universidad de Chile; 2006.

REYES LIZCANO, Fredy; RONDÓN QUINTANA, Hugo. (2015). Pavimentos: Materiales, construcción y diseño. Bogotá D.c. Editorial: ECOED EDICIONES, 1ra edición.

RONDÓN, Hugo. RODRÍGUEZ, Edgar. REAL, Claudia. MONTEALEGRE, Tito. REYES, Fredy y FIGUEROA, Ana. Estado del conocimiento del estudio sobre mezclas asfálticas modificadas en Colombia; Colombia; Participación de: Universidad Católica de Colombia, Universidad Javeriana, Colombia y Universidad de La Salle, Colombia. 2008.

SHEN, J., AMIRKHANIAN, S. N. and LEE, S.-J. HP-GPC Characterization of Rejuvenated Aged CRM Binders. Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 19, No. 6, June 1, 515-522, 2007.

SIBAL, A., DAS, A. and PANDEY, B. B. Flexural Fatigue Characteristics of Asphalt Concrete with Crumb Rubber. Int. J. of Pavement Engineering, Vol. I, No. 2, 119-132, 2000.

SOLARTE, Cristina y POLANCO, Lina. Influencia de los Agregados Pétreos en el Módulo Dinámico de mezclas Asfálticas en el Departamento de Santander, Colombia; XVII CONGRESO ARGENTINO DE VIALIDAD Y TRANSITO; Argentina; Participación de: Universidad Pontificia Bolivariana, Bucaramanga, Colombia; 2016.

TORRES, Hermes. Valoración de propiedades mecánicas y de durabilidad de concreto adicionado con residuos de llantas de caucho; Tesis de posgrado; Bogotá D.C; Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito; 2014.

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES, ESTUDIO DE LAS MEJORAS MECÁNICAS DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS CON DESECHOS DE LLANTAS., CONTRATO IDU-366-01, BOGOTÁ D.C., 2002.

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES, Segunda fase del estudio de las mejoras mecánicas de las mezclas asfálticas con desechos de llantas- pista de prueba, CONTRATO IDU-306-003, BOGOTÁ D.C., 2005.

VÁSQUEZ, María. El Tiempo: Las llantas viejas con un problema ambiental "radial". [En línea], 13 de mayo 2011 [Revisado 28-04-2017] [Disponible en internet: <http://www.eltiempo.com/archivo/documento/CMS-9343605>]

VERA SILVA, J. Caracterización de Mezclas Asfálticas por su Resistencia a Fatiga por Reflexión; Proyecto de grado, Maestría; Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá D.C, Cundinamarca, Colombia. 2012.

WANG, J. C. and ZENG, X. Influence of Temperature and Pressure on the Dynamic Properties of Rubber-Modified Asphalt Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 18, No. 1, 125-131, 2006.

WAY, George, Construction, Testing and Evaluation of HMA Materials: Sustainability, Recycling, Rubberized Asphalt, Congreso interacional- Pavimentos de Hormigon y asfalto, Agosto 2016.

XIAO F., AMIRKHANIAN S., JUANG and C. H. "Rutting Resistance of Rubberized Asphalt Concrete Pavements Containing Reclaimed Asphalt Pavement Mixtures". *American Society of Civil Engineers (ASCE) Journal of Materials in Civil Engineering*. (2007).

XIAO, F. and AMIRKHANIAN, S. N. HP-GPC Approach to Evaluating Laboratory Prepared Long-Term Aged Rubberized Asphalt Binders. In: *GeoHunan International Conference 2009*, Geotechnical Special Publication No. 191, 42-48, 2009.

YEPES, Victor. Tipos de mezclas; Politècnica de Valencia; [En línea], 16 de noviembre de 2012, Universitat [Revisado 1-05-2017] [Disponible en internet: <http://victoryepes.blogs.upv.es/2014/04/18/tipos-de-mezclas-bituminosas/>]

YUNG, Yee. Caracterización, diseño y verificación de una mezcla asfáltica drenante en caliente modificada con grano de llanta triturado y fibra Kaltex. Tesis de posgrado; Medellin; Universidad Nacional de Colombia; 2013.

ANEXOS

ANEXO A. Caracterización físico-mecánica de agregados. (Fuente: MPI. Ltda.)

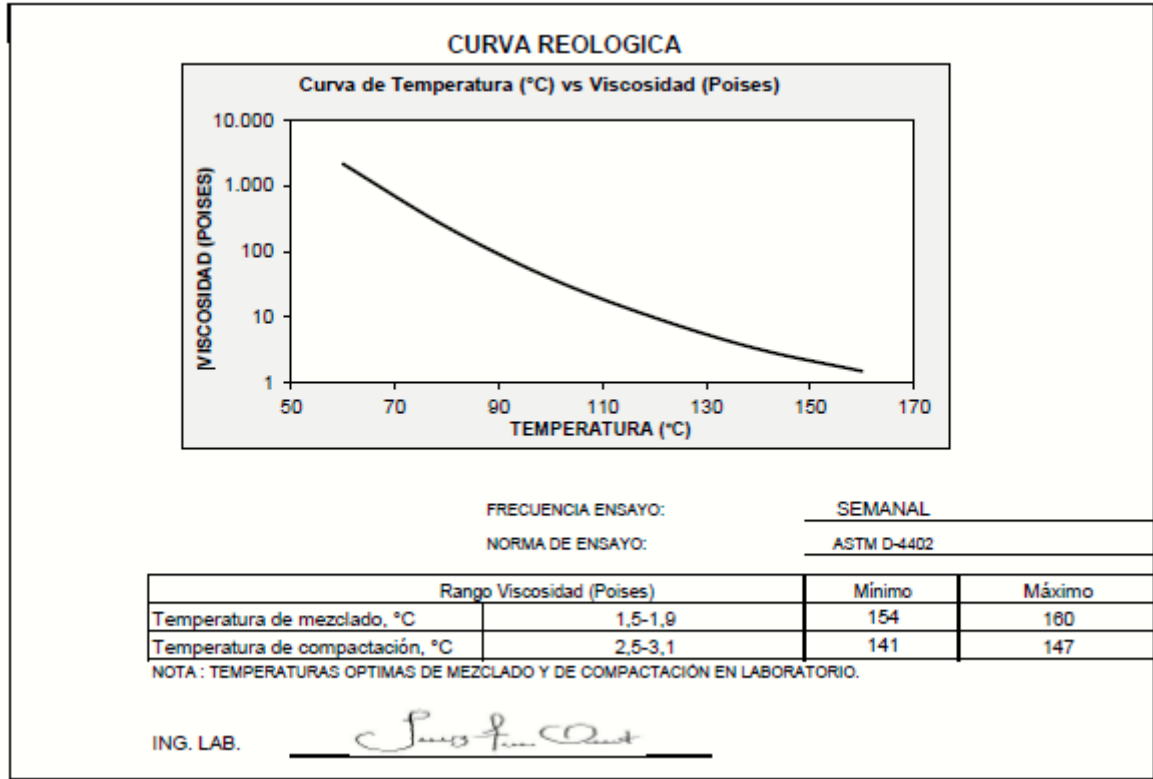
PROPIEDAD	NORMA INVIAS	VALOR
DUREZA AGREGADO GRUESO		
Desgaste en máquina de los ángeles, 500 revoluciones (%)	E-218	25
Degradación por abrasión en el equipo Microdeval (%)	E-238	15
Resistencia Mecánica por el método del 10% de finos, (KN)	E-224	175
Relación húmedo / seco, mínima (%)	E-224	88
DURABILIDAD		
Perdida en ensayo de solidez en sulfato de magnesio, (%)	E-220	1.9
LIMPIEZA DE GRADACIÓN COMBINADA		
Índice de plasticidad, (%)	E-126	N.P
Equivalente de arena (%)	E-133	75
Valor de azul de metileno (mg/g)	E-245	5
Impurezas del agregado grueso (%)	E-237	0.4
GEOMETRÍA DE LAS PARTÍCULAS		
Partículas planas y alargadas relación 5:1, (%)	E-240	3.2
% caras fracturadas (1 cara/ 2 caras)	E-227	95 / 91
Angularidad del agregado fino (%)	E-239	46
VOLUMETRÍA		
Densidad Bulk del llenante mineral en Kerosene, (g/cm ³)	E-225	0.8
ADHESIVIDAD		
Efecto del agua sobre mezclas asfálticas sueltas, cubrimiento (%)	E-757	100
Adhesividad del ligante a los agregados finos - Riedel Weber	E-744	4 - 7

ANEXO B. Caracterización del ligante asfáltico. (Fuente: MPI. Ltda.)

PROPIEDAD	NORMA DE REFERENCIA I.N.V.	ESPECIFICACIÓN		REPORTE DE CONTROL DE CALIDAD	FRECUENCIA DE ENSAYO
		MIN	MAX		
Penetración a 25°C, 100 gr, 5 seg (mm/10)	E-706	60	70	66	LOTE
Punto de ablandamiento, (°C)	E-712	48	54	49,6	LOTE
Índice de penetración (IP)	E-724	-1,2	0,6	-0,63	LOTE
Viscosidad absoluta a 60°C (P)	E-716	1500	-----	2318	LOTE
Viscosidad Brookfield a 60°C (P) Aguja 27, Torque > 90%	E-717	1500	-----	2159	LOTE
Pérdida por Calentamiento Película Delgada en mov. A 163°C, 85 min (%)	E-720	-----	0,8	0,22	SEMANTAL
Ductilidad a 25°C, 5 cm/min, (cm)	E-702	100	-----	134	QUINCENAL
Peso Específico	E-707	-----	-----	1,012	MENSUAL
Punto de Chispa, (°C)	E-709	230	-----	304	LOTE

PROPIEDAD	NORMA DE REFERENCIA I.N.V.	ESPECIFICACIÓN		REPORTE DE CONTROL DE CALIDAD	FRECUENCIA DE ENSAYO
		MIN	MAX		
Solubilidad en Tricloroetileno, (%)	E-713	99	-----	99,29	SEMESTRAL
Contenido de agua, (%)	E-704	-----	0,2	0	TRIMESTRAL
Contenido de Parafinas, (%)	E-718	-----	3	2,14	MENSUAL
Penetración del residuo después de la pérdida por calentamiento, % de la penetración original	E-706	50	-----	59	SEMANAL
Incremento en el Punto de Ablando después de pérdida por calentamiento en película delgada, °C	E-712	-----	9	6,2	SEMANAL
Índice de envejecimiento relación de viscosidades a 60°C del asfalto residual y el asfalto original (%)	E-717	-----	4	2,7	SEMANAL

ANEXO C. Curva reológica del asfalto 60/70. (Fuente: MPI Ltda.)



ANEXO D. Verificación de los parámetros para el porcentaje óptimo de asfalto.

ASFALTO 5.3%			
PARÁMETRO EVALUADO	VALOR	ESPECIFICACIÓN	VERIFICACIÓN
Estabilidad (N)	13797	≥ 9000	Cumple
Flujo (mm)	2,8	2,0-3,5	Cumple
Relación Estabilidad/Flujo (kN/mm)	4,9	3,0-6,0	Cumple
Vacíos del agregado mineral (%)	15,2	≥ 15	Cumple
Vacíos con aire(%)	4,6	4,0-6,0	Cumple
Vacíos con asfalto (%)	6,9	6,5-7,5	Cumple
Relación Ilenante/ligante	1,1	0,8-1,2	Cumple

ANEXO E. Resultados de los parámetros de las mezclas para diferentes porcentajes de caucho.

% GCR	Gmm	Densidad (T/m³)	Vacíos %	Estabilidad (N)	Flujo (mm)	Relación Estabilidad/Flujo (KN/mm)
Reportar	-	Reportar	4-6	≥ 9000	2-3.5	3.0-6.0
1	2,387	2,282	4,4	13250	2,7	4,9
1,5	2,383	2,263	5	12440	3	3,8
2	2,382	2,243	5,8	11010	3,5	4,6
4	2,351	2,193	6,7	10500	4,2	2,5

**ANEXO F. Informe del módulo resiliente por compresión diametral.
ESPECIMEN (CONVENCIONAL).**

(Norma EN 12697-26:2004(Annex C): (Equipo-CRT-NU14)-HYD25)

1. Temperatura: 5°C

1.1. Frecuencia: 2.5 HZ

1.1.1. Espécimen 1

Diámetro de la probeta: 100 mm

Espesor de La probeta: 62.1 mm

Densidad aparente: 2271 (kg/m³)

Coefficiente de Poisson: 0.35

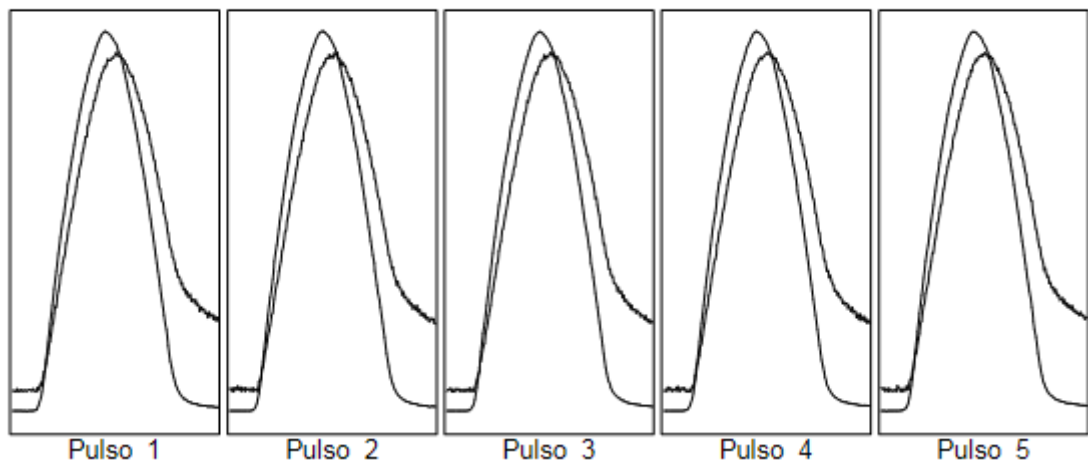
Tiempo de subida deseado (ms): 125 ms

Deformación horizontal deseada (microns): 5 µm

Número de pulsos de preparación: 10

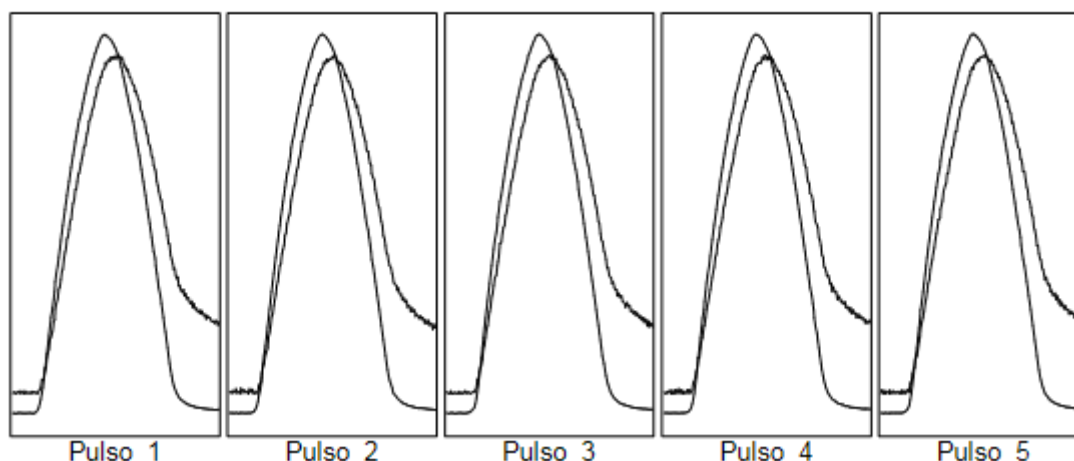
Frecuencia de lectura del transductor: 1000 Hz

Ensayo sobre el primer diámetro



Resultados	Deseada	Real Min	Real Max	Media
Fuerza vertical (kN)		4,67	4,69	4,68
Esfuerzo horizontal (kPa)		478,8	481,2	480,1
Factor de area de carga	0.60	0,61	0,62	0,61
Deformación horizontal (μm)	5,0	4,9	5,0	5,0
Tiempo de carga (subida) (ms):	125	124,0	127,0	125,6
Módulo resiliente medido (MPa)		9282	9502	9404
Módulo rediliente ajustado (MPa)		9388	9555	9481

Ensayo sobre el segundo diámetro



Resultados	Deseada	Real Min	Real Max	Media
Fuerza vertical (kN)		4,64	4,65	4,64
Esfuerzo horizontal (kPa)		475,2	476,3	475,8
Factor de area de carga	0.60	0,60	0,62	0,61
Deformación horizontal (μm)	5,0	4,9	5,0	4,9
Tiempo de carga (subida) (ms):	125	122,0	125,0	123,4
Módulo resiliente medido (MPa)		9362	9533	9453
Módulo rediliente ajustado (MPa)		9442	9569	9510

Media de los dos ensayos

Tiempo de carga (subida) (ms) :	124,5
Deformación horizontal (μm) :	4,9
Deformación horizontal (%) :	0,0049
Módulo resiliente medido (MPa) :	9429
Módulo rediliente ajustado (MPa) :	9496

Diferencia en porcentaje entre módulos resilientes ajustados medios = (-0,3)

1.1.2. Espécimen 2

Diámetro de la probeta: 100 mm

Espesor de La probeta: 62.6 mm

Densidad aparente: 2267 (kg/m³)

Coefficiente de Poisson: 0.35

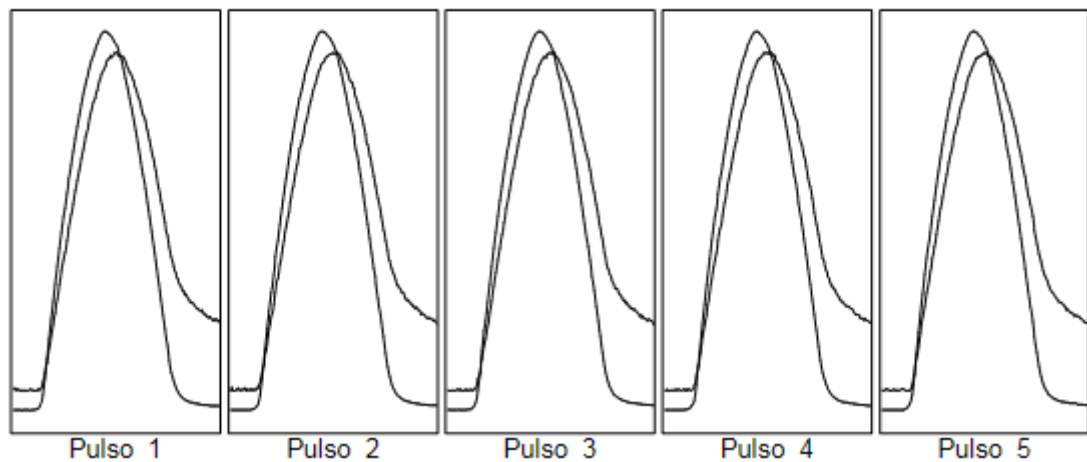
Tiempo de subida deseado (ms): 125 ms

Deformación horizontal deseada (microns): 5 µm

Número de pulsos de preparación: 10

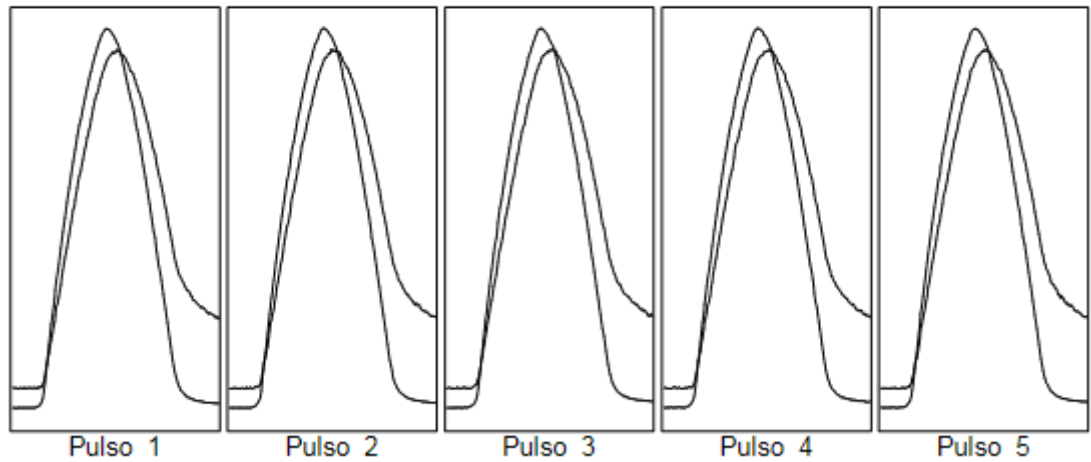
Frecuencia de lectura del transductor: 1000 Hz

Ensayo sobre el primer diámetro



Resultados	Deseada	Real Min	Real Max	Media
Fuerza vertical (kN)		4,66	4,67	4,67
Esfuerzo horizontal (kPa)		473,8	475,2	474,6
Factor de area de carga	0.60	0,62	0,63	0,63
Deformación horizontal (µm)	5,0	5,0	5,0	5,0
Tiempo de carga (subida) (ms):	125	118,0	124,0	120,8
Módulo resiliente medido (MPa)		9258	9309	9283
Módulo rediliente ajustado (MPa)		9376	9495	9444

Ensayo sobre el segundo diámetro



Resultados	Deseada	Real Min	Real Max	Media
Fuerza vertical (kN)		4,71	4,75	4,74
Esfuerzo horizontal (kPa)		479,0	483,4	481,5
Factor de area de carga	0.60	0,61	0,62	0,61
Deformación horizontal (μm)	5,0	5,0	5,1	5,0
Tiempo de carga (subida) (ms):	125	122,0	124,0	123,2
Módulo resiliente medido (MPa)		9270	9335	9303
Módulo rediliente ajustado (MPa)		9340	9442	9393

Media de los dos ensayos

Tiempo de carga (subida) (ms):	:	122,0
Deformación horizontal (μm)	:	5,0
Deformación horizontal (%)	:	0,0050
Módulo resiliente medido (MPa)	:	9293
Módulo rediliente ajustado (MPa)	:	9419

Diferencia en porcentaje entre módulos resilientes ajustados medios = (0,5)

1.1.3. Espécimen 3

Diámetro de la probeta: 100 mm

Espesor de La probeta: 62.4 mm

Densidad aparente: 2265 (kg/m³)

Coefficiente de Poisson: 0.35

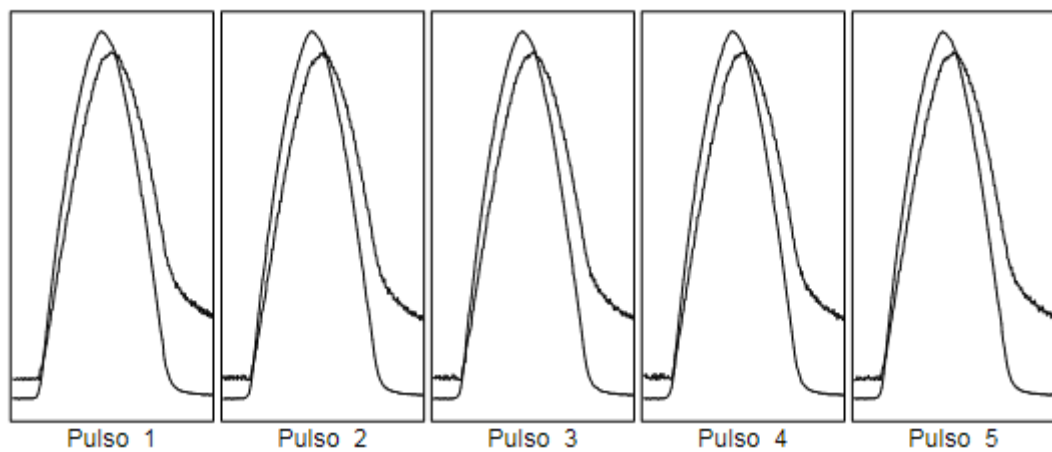
Tiempo de subida deseado (ms): 125 ms

Deformación horizontal deseada (microns): 5 µm

Número de pulsos de preparación: 10

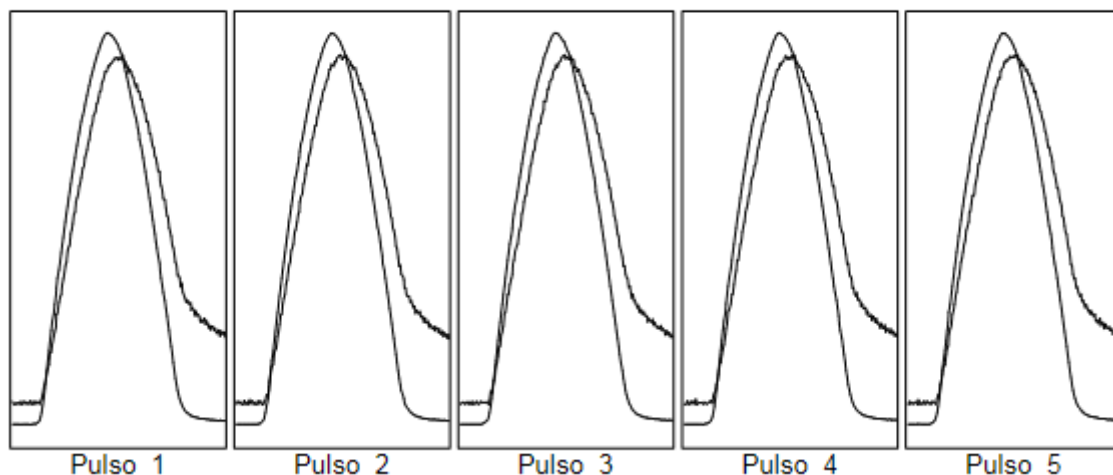
Frecuencia de lectura del transductor: 1000 Hz

Ensayo sobre el primer diámetro



Resultados	Deseada	Real Min	Real Max	Media
Fuerza vertical (kN)		4,84	4,84	4,84
Esfuerzo horizontal (kPa)		493,7	493,9	493,8
Factor de area de carga	0,60	0,61	0,62	0,62
Deformación horizontal (µm)	5,0	5,0	5,1	5,0
Tiempo de carga (subida) (ms):	125	121,0	124,0	122,8
Módulo resiliente medido (MPa)		9479	9668	9593
Módulo rediliente ajustado (MPa)		9615	9790	9711

Ensayo sobre el segundo diámetro



Resultados	Deseada	Real Min	Real Max	Media
Fuerza vertical (kN)		4,76	4,78	4,77
Esfuerzo horizontal (kPa)		485,5	487,5	486,5
Factor de area de carga	0,60	0,61	0,61	0,61
Deformación horizontal (μm)	5,0	4,9	5,0	5,0
Tiempo de carga (subida) (ms):	125	123,0	125,0	124,4
Módulo resiliente medido (MPa)		9491	9633	9538
Módulo rediliente ajustado (MPa)		9555	9679	9602

Media de los dos ensayos

Tiempo de carga (subida) (ms):	123,6
Deformación horizontal (μm):	5,0
Deformación horizontal (%):	0,0050
Módulo resiliente medido (MPa):	9566
Módulo rediliente ajustado (MPa):	9657

Diferencia en porcentaje entre módulos resilientes ajustados medios = (1)

1.2. Frecuencia: 5 HZ

1.2.1. Espécimen 1

Diámetro de la probeta: 100 mm

Espesor de La probeta: 62.1 mm

Densidad aparente: 2271 (kg/m³)

Coefficiente de Poisson: 0.35

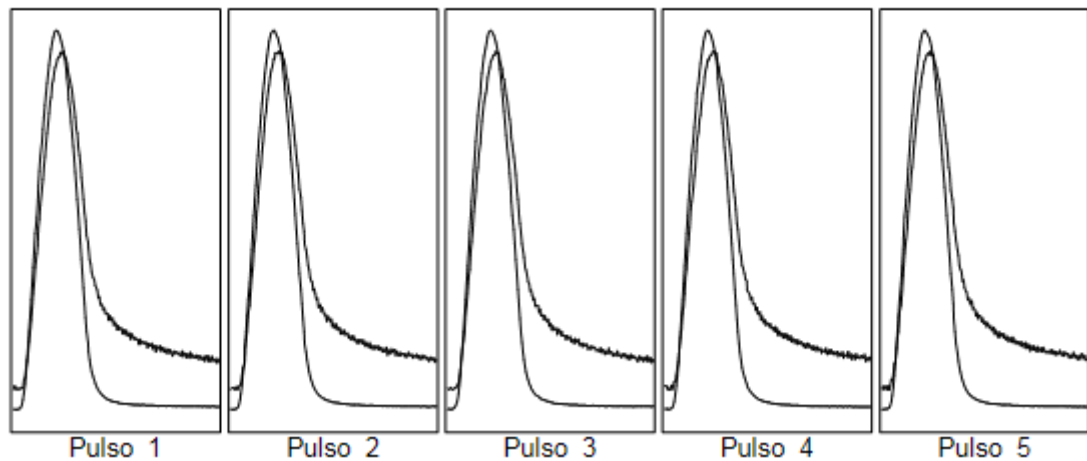
Tiempo de subida deseado (ms): 63 ms

Deformación horizontal deseada (microns): 5 μm

Número de pulsos de preparación: 10

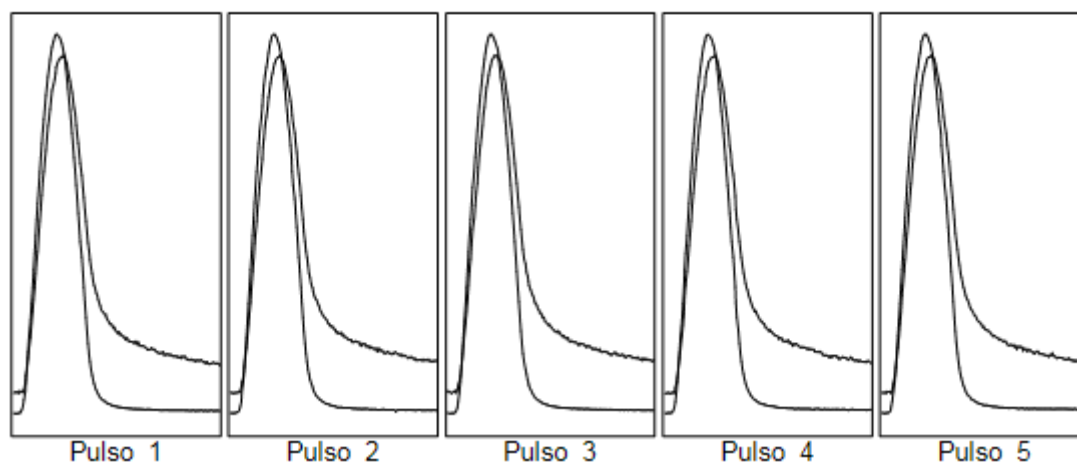
Frecuencia de lectura del transductor: 1000 Hz

Ensayo sobre el primer diámetro



Resultados	Deseada	Real Min	Real Max	Media
Fuerza vertical (kN)		5,35	5,37	5,36
Esfuerzo horizontal (kPa)		548,1	550,3	549,3
Factor de area de carga	0,60	0,59	0,60	0,59
Deformación horizontal (μm)	5,0	5,0	5,0	5,0
Tiempo de carga (subida) (ms):	63	62,0	64,0	62,8
Módulo resiliente medido (MPa)		10636	10765	10699
Módulo rediliente ajustado (MPa)		10573	10711	10640

Ensayo sobre el segundo diámetro



Resultados	Deseada	Real Min	Real Max	Media
Fuerza vertical (kN)		5,37	5,40	5,38
Esfuerzo horizontal (kPa)		550,3	553,4	551,8
Factor de area de carga	0,60	0,60	0,60	0,60
Deformación horizontal (μm)	5,0	5,0	5,0	5,0
Tiempo de carga (subida) (ms):	63	63,0	63,0	63,0
Módulo resiliente medido (MPa)		10708	10801	10763
Módulo rediliente ajustado (MPa)		10726	10817	10778

Media de los dos ensayos

Tiempo de carga (subida) (ms):	:	62,9
Deformación horizontal (μm):	:	5,0
Deformación horizontal (%):	:	0,0050
Módulo resiliente medido (MPa):	:	10731
Módulo rediliente ajustado (MPa):	:	10709

Diferencia en porcentaje entre módulos resilientes ajustados medios = (-1)

1.2.2. Espécimen 2

Diámetro de la probeta: 100 mm

Espesor de La probeta: 62.6 mm

Densidad aparente: 2267 (kg/m³)

Coefficiente de Poisson: 0.35

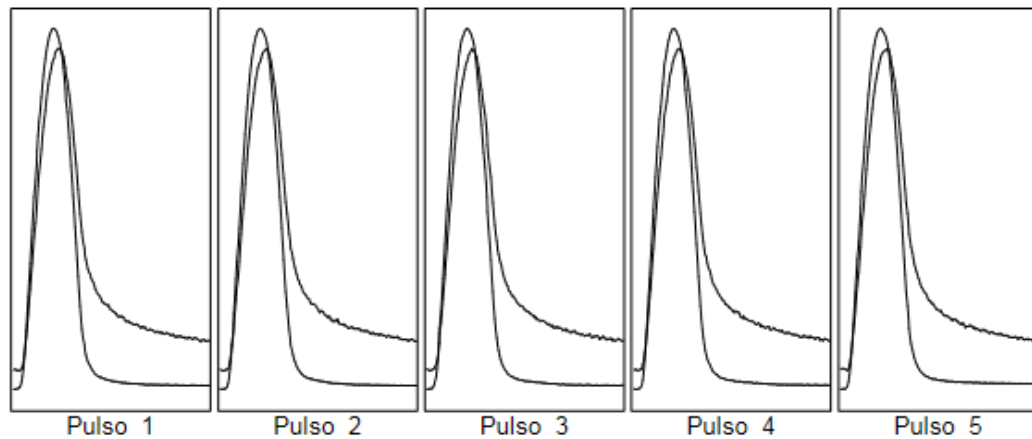
Tiempo de subida deseado (ms): 63 ms

Deformación horizontal deseada (microns): 5 μm

Número de pulsos de preparación: 10

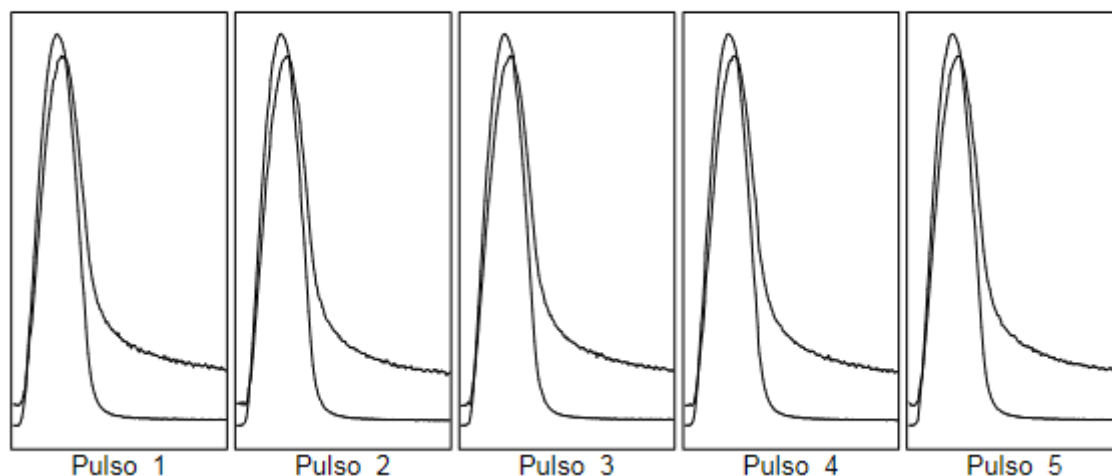
Frecuencia de lectura del transductor: 1000 Hz

Ensayo sobre el primer diámetro



Resultados	Deseada	Real Min	Real Max	Media
Fuerza vertical (kN)		5,18	5,23	5,20
Esfuerzo horizontal (kPa)		527,3	531,9	529,2
Factor de area de carga	0,60	0,61	0,62	0,62
Deformación horizontal (μm)	5,0	4,9	5,0	5,0
Tiempo de carga (subida) (ms):	63	61,0	63,0	62,2
Módulo resiliente medido (MPa)		10317	10423	10355
Módulo rediliente ajustado (MPa)		10402	10519	10467

Ensayo sobre el segundo diámetro



Resultados	Deseada	Real Min	Real Max	Media
Fuerza vertical (kN)		5,22	5,24	5,23
Esfuerzo horizontal (kPa)		531,0	533,2	532,1
Factor de area de carga	0,60	0,60	0,62	0,61
Deformación horizontal (μm)	5,0	4,9	5,0	5,0
Tiempo de carga (subida) (ms):	63	62,0	63,0	62,4
Módulo resiliente medido (MPa)		10317	10507	10418
Módulo rediliente ajustado (MPa)		10442	10557	10493

Media de los dos ensayos

Tiempo de carga (subida) (ms):	:	62,3
Deformación horizontal (μm):	:	5,0
Deformación horizontal (%):	:	0,0050
Módulo resiliente medido (MPa):	:	10387
Módulo rediliente ajustado (MPa):	:	10480

Diferencia en porcentaje entre módulos resilientes ajustados medios = (-0,2)

1.2.3. Espécimen 3

Diámetro de la probeta: 100 mm

Espesor de La probeta: 62.4 mm

Densidad aparente: 2265 (kg/m³)

Coefficiente de Poisson: 0.35

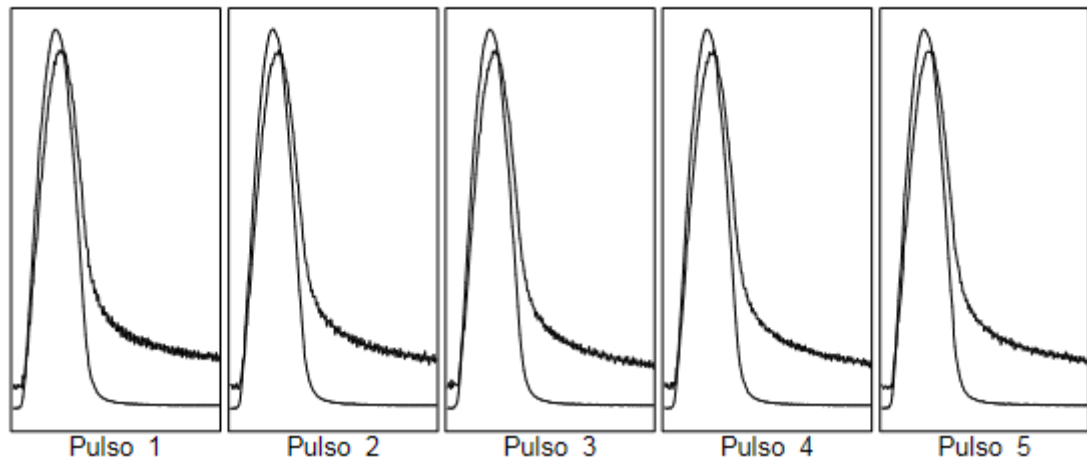
Tiempo de subida deseado (ms): 63 ms

Deformación horizontal deseada (microns): 5 µm

Número de pulsos de preparación: 10

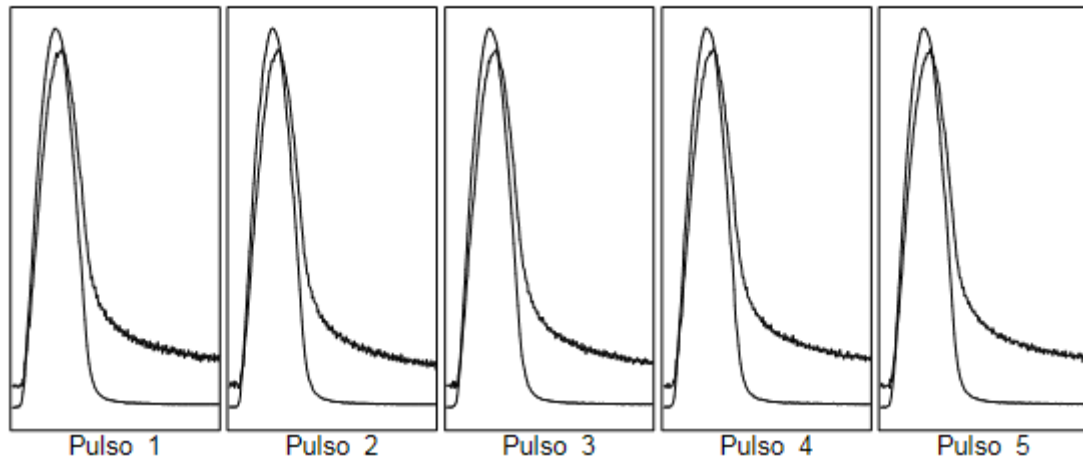
Frecuencia de lectura del transductor: 1000 Hz

Ensayo sobre el primer diámetro



Resultados	Deseada	Real Min	Real Max	Media
Fuerza vertical (kN)		5,36	5,37	5,36
Esfuerzo horizontal (kPa)		546,7	547,5	547,1
Factor de area de carga	0,60	0,60	0,61	0,61
Deformación horizontal (µm)	5,0	4,9	5,0	4,9
Tiempo de carga (subida) (ms):	63	61,0	62,0	61,4
Módulo resiliente medido (MPa)		10673	10946	10786
Módulo rediliente ajustado (MPa)		10735	11031	10846

Ensayo sobre el segundo diámetro



Resultados	Deseada	Real Min	Real Max	Media
Fuerza vertical (kN)		5,28	5,28	5,28
Esfuerzo horizontal (kPa)		538,3	539,2	538,8
Factor de area de carga	0,60	0,61	0,62	0,61
Deformación horizontal (µm)	5,0	4,8	4,9	4,9
Tiempo de carga (subida) (ms):	63	61,0	64,0	62,4
Módulo resiliente medido (MPa)		10656	10906	10772
Módulo rediliente ajustado (MPa)		10757	11007	10880

Media de los dos ensayos

Tiempo de carga (subida) (ms):	:	61,9
Deformación horizontal (µm)	:	4,9
Deformación horizontal (%)	:	0,0049
Módulo resiliente medido (MPa)	:	10779
Módulo rediliente ajustado (MPa)	:	10863

Diferencia en porcentaje entre módulos resilientes ajustados medios = (-0,3)

1.3. Frecuencia: 10 HZ

1.3.1. Espécimen 1

Diámetro de la probeta: 100 mm

Espesor de La probeta: 62.1 mm

Densidad aparente: 2271 (kg/m³)

Coefficiente de Poisson: 0.35

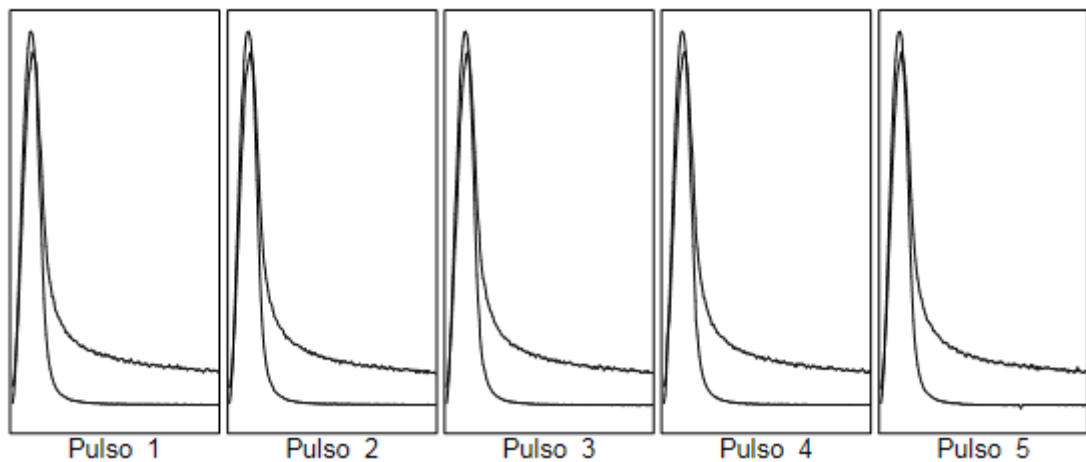
Tiempo de subida deseado (ms): 31 ms

Deformación horizontal deseada (microns): 5 µm

Número de pulsos de preparación: 10

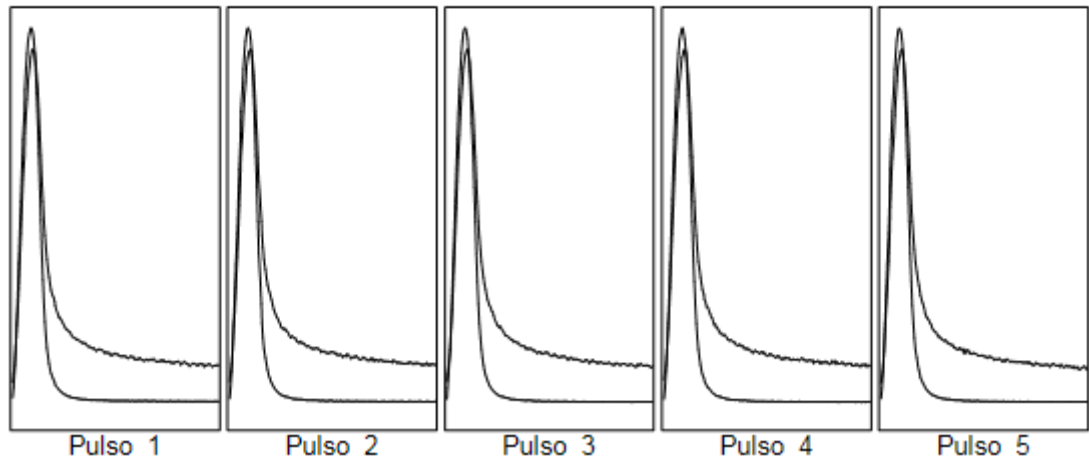
Frecuencia de lectura del transductor: 1000 Hz

Ensayo sobre el primer diámetro



Resultados	Deseada	Real Min	Real Max	Media
Fuerza vertical (kN)		5,91	5,93	5,93
Esfuerzo horizontal (kPa)		605,4	608,0	607,4
Factor de area de carga	0.60	0,59	0,59	0,59
Deformación horizontal (µm)	5,0	4,9	5,0	5,0
Tiempo de carga (subida) (ms):	31	32,0	32,0	32,0
Módulo resiliente medido (MPa)		11873	11921	11900
Módulo rediliente ajustado (MPa)		11786	11833	11805

Ensayo sobre el segundo diámetro



Resultados	Deseada	Real Min	Real Max	Media
Fuerza vertical (kN)		5,85	5,88	5,87
Esfuerzo horizontal (kPa)		599,9	602,8	601,9
Factor de area de carga	0,60	0,59	0,60	0,59
Deformación horizontal (μm)	5,0	4,9	5,0	4,9
Tiempo de carga (subida) (ms):	31	33,0	33,0	33,0
Módulo resiliente medido (MPa)		11834	12004	11931
Módulo rediliente ajustado (MPa)		11788	11945	11883

Media de los dos ensayos

Tiempo de carga (subida) (ms):	:	32,5
Deformación horizontal (μm)	:	4,9
Deformación horizontal (%)	:	0,0049
Módulo resiliente medido (MPa)	:	11916
Módulo rediliente ajustado (MPa)	:	11844

Diferencia en porcentaje entre módulos resilientes ajustados medios = (-0,7)

1.3.2. Espécimen 2

Diámetro de la probeta: 100 mm

Espesor de La probeta: 62.6 mm

Densidad aparente: 2267 (kg/m³)

Coefficiente de Poisson: 0.35

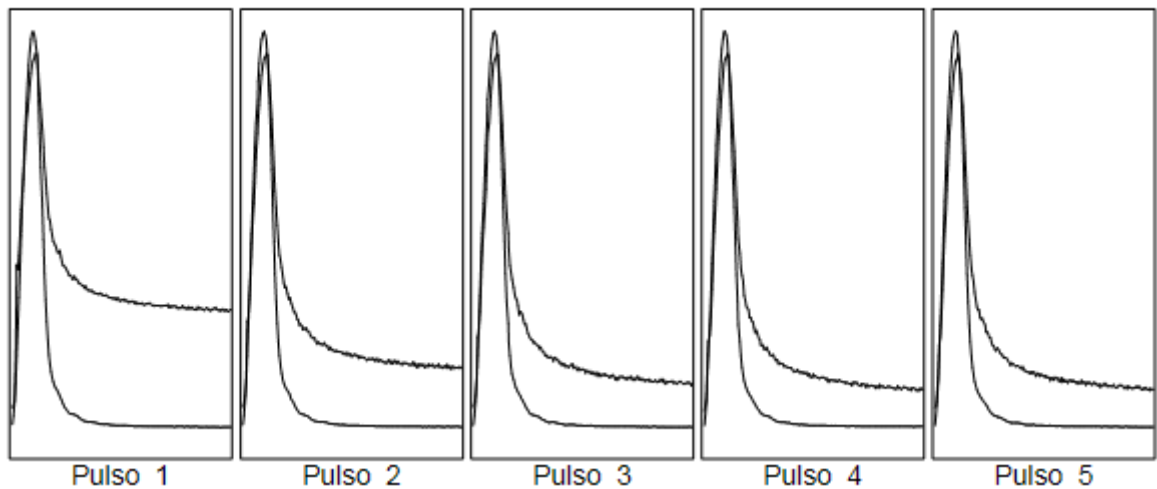
Tiempo de subida deseado (ms): 31 ms

Deformación horizontal deseada (microns): 5 µm

Número de pulsos de preparación: 10

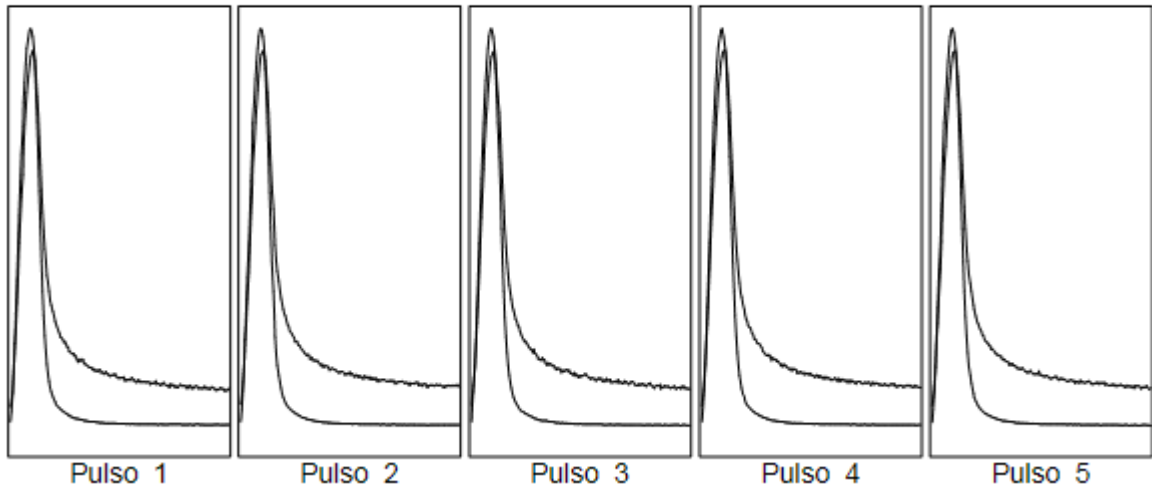
Frecuencia de lectura del transductor: 1000 Hz

Ensayo sobre el primer diámetro



Resultados	Deseada	Real Min	Real Max	Media
Fuerza vertical (kN)		5,78	5,88	5,84
Esfuerzo horizontal (kPa)		587,5	598,0	594,0
Factor de area de carga	0,60	0,59	0,60	0,60
Deformación horizontal (µm)	5,0	5,0	6,6	5,4
Tiempo de carga (subida) (ms):	31	34,0	35,0	34,6
Módulo resiliente medido (MPa)		8726	11558	10780
Módulo rediliente ajustado (MPa)		8705	11486	10751

Ensayo sobre el segundo diámetro



Resultados	Deseada	Real Min	Real Max	Media
Fuerza vertical (kN)		5,82	5,86	5,85
Esfuerzo horizontal (kPa)		591,7	596,1	594,5
Factor de area de carga	0,60	0,59	0,60	0,60
Deformación horizontal (μm)	5,0	5,0	5,0	5,0
Tiempo de carga (subida) (ms):	31	34,0	35,0	34,2
Módulo resiliente medido (MPa)		11536	11640	11577
Módulo rediliente ajustado (MPa)		11500	11600	11564

Media de los dos ensayos

Tiempo de carga (subida) (ms):	:	34,4
Deformación horizontal (μm)	:	5,2
Deformación horizontal (%)	:	0,0052
Módulo resiliente medido (MPa)	:	11179
Módulo rediliente ajustado (MPa)	:	11158

Diferencia en porcentaje entre módulos resilientes ajustados medios = (-8)

1.3.3. Espécimen 3

Diámetro de la probeta: 100 mm

Espesor de La probeta: 62.4 mm

Densidad aparente: 2265 (kg/m³)

Coefficiente de Poisson: 0.35

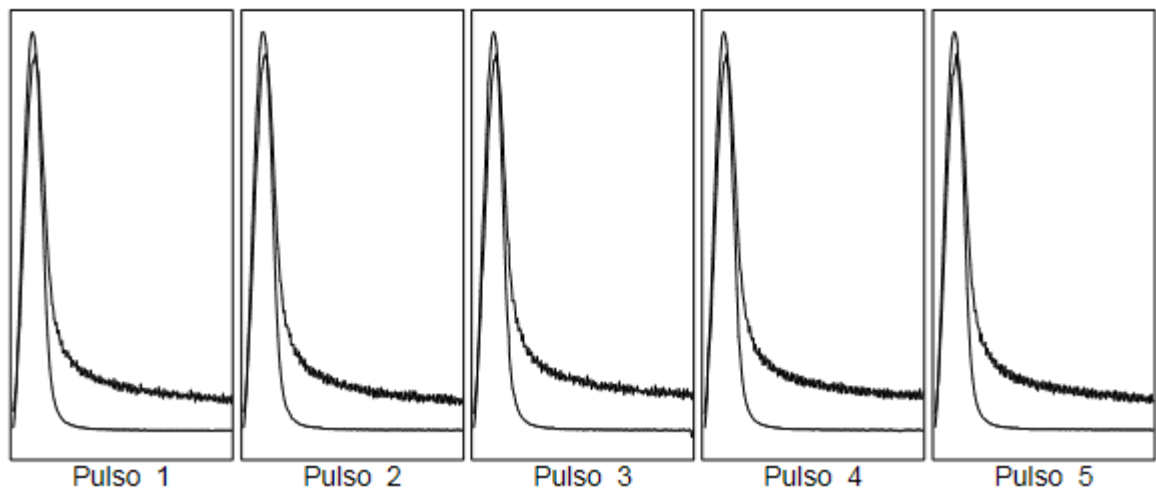
Tiempo de subida deseado (ms): 31 ms

Deformación horizontal deseada (microns): 5 µm

Número de pulsos de preparación: 10

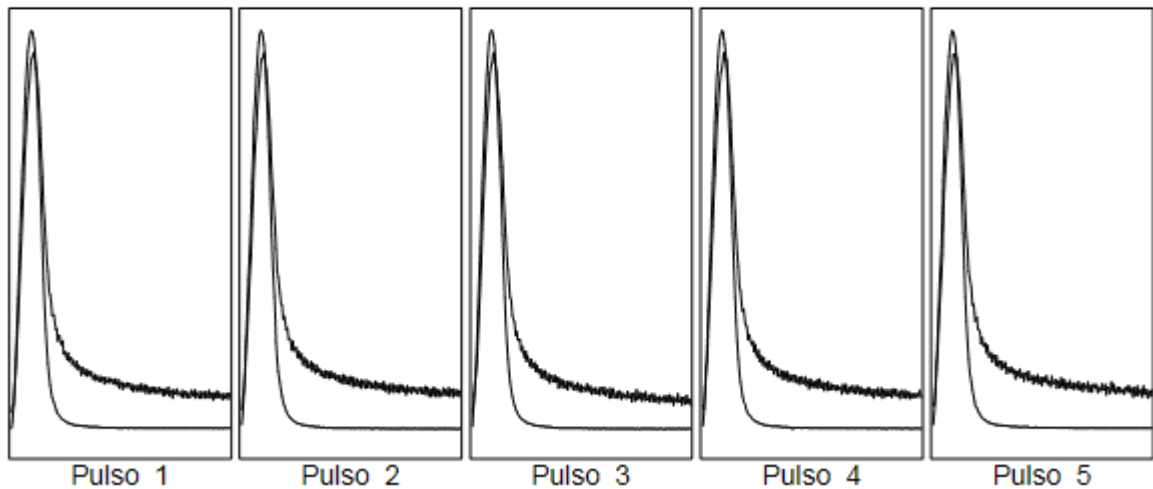
Frecuencia de lectura del transductor: 1000 Hz

Ensayo sobre el primer diámetro



Resultados	Deseada	Real Min	Real Max	Media
Fuerza vertical (kN)		6,14	6,19	6,17
Esfuerzo horizontal (kPa)		626,4	631,3	629,5
Factor de area de carga	0,60	0,58	0,58	0,58
Deformación horizontal (µm)	5,0	5,0	5,0	5,0
Tiempo de carga (subida) (ms):	31	33,0	33,0	33,0
Módulo resiliente medido (MPa)		12186	12255	12219
Módulo rediliente ajustado (MPa)		12009	12061	12031

Ensayo sobre el segundo diámetro



Resultados	Deseada	Real Min	Real Max	Media
Fuerza vertical (kN)		6,03	6,05	6,03
Esfuerzo horizontal (kPa)		614,6	616,8	615,3
Factor de area de carga	0,60	0,58	0,60	0,59
Deformación horizontal (μm)	5,0	4,8	5,0	4,9
Tiempo de carga (subida) (ms):	31	32,0	33,0	32,4
Módulo resiliente medido (MPa)		12003	12412	12129
Módulo rediliente ajustado (MPa)		11856	12366	12014

Media de los dos ensayos

Tiempo de carga (subida) (ms):	:	32,7
Deformación horizontal (μm):	:	5,0
Deformación horizontal (%):	:	0,0050
Módulo resiliente medido (MPa):	:	12174
Módulo rediliente ajustado (MPa):	:	12023

Diferencia en porcentaje entre módulos resilientes ajustados medios = (0,1)

2. Temperatura: 20°C

2.1. Frecuencia: 2.5 HZ

2.1.1. Espécimen 1

Diámetro de la probeta: 100 mm

Espesor de La probeta: 62.1 mm

Densidad aparente: 2271 (kg/m³)

Coefficiente de Poisson: 0.35

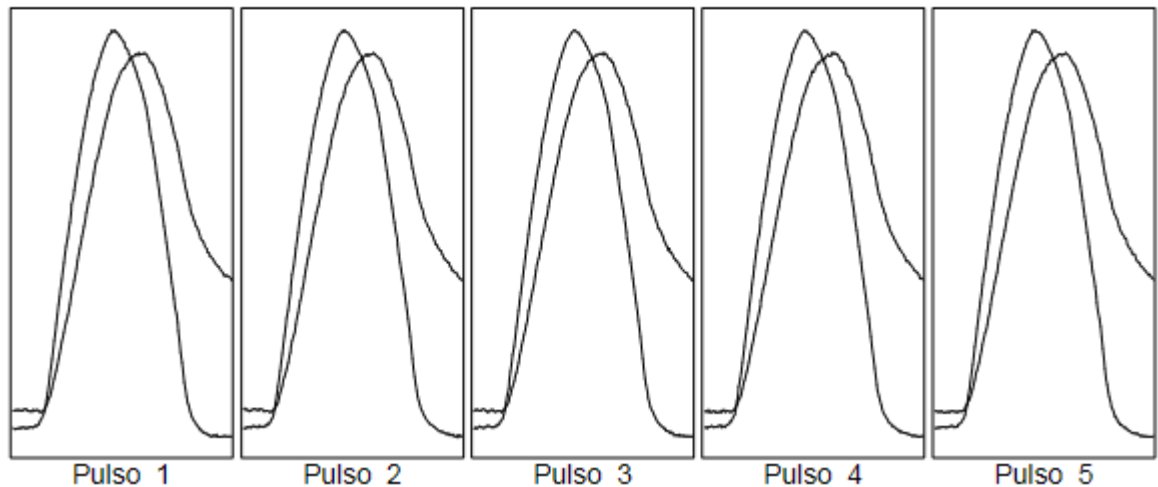
Tiempo de subida deseado (ms): 125 ms

Deformación horizontal deseada (microns): 5 μm

Número de pulsos de preparación: 10

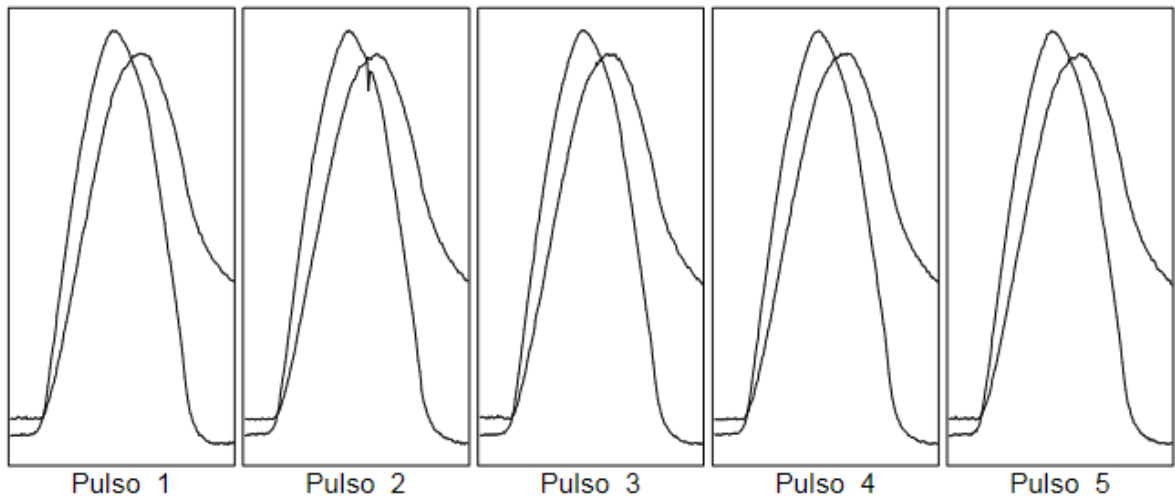
Frecuencia de lectura del transductor: 1000 Hz

Ensayo sobre el primer diámetro



Resultados	Deseada	Real Min	Real Max	Media
Fuerza vertical (kN)		1,24	1,26	1,26
Esfuerzo horizontal (kPa)		127,5	129,2	128,8
Factor de area de carga	0.60	0,60	0,61	0,61
Deformación horizontal (μm)	5,0	5,0	5,2	5,1
Tiempo de carga (subida) (ms):	125	120,0	129,0	126,4
Módulo resiliente medido (MPa)		2436	2466	2447
Módulo rediliente ajustado (MPa)		2439	2469	2452

Ensayo sobre el segundo diámetro



Resultados	Deseada	Real Min	Real Max	Media
Fuerza vertical (kN)		1,23	1,26	1,25
Esfuerzo horizontal (kPa)		126,3	128,8	127,8
Factor de area de carga	0.60	0,59	0,61	0,60
Deformación horizontal (μm)	5,0	5,0	5,2	5,1
Tiempo de carga (subida) (ms):	125	125,0	131,0	127,6
Módulo resiliente medido (MPa)		2431	2456	2444
Módulo rediliente ajustado (MPa)		2428	2466	2444

Media de los dos ensayos

Tiempo de carga (subida) (ms):	:	127,0
Deformación horizontal (μm):	:	5,1
Deformación horizontal (%):	:	0,0051
Módulo resiliente medido (MPa):	:	2446
Módulo rediliente ajustado (MPa):	:	2448

Diferencia en porcentaje entre módulos resilientes ajustados medios = (0,3)

2.1.2. Espécimen 2

Diámetro de la probeta: 100 mm

Espesor de La probeta: 62.6 mm

Densidad aparente: 2267 (kg/m³)

Coefficiente de Poisson: 0.35

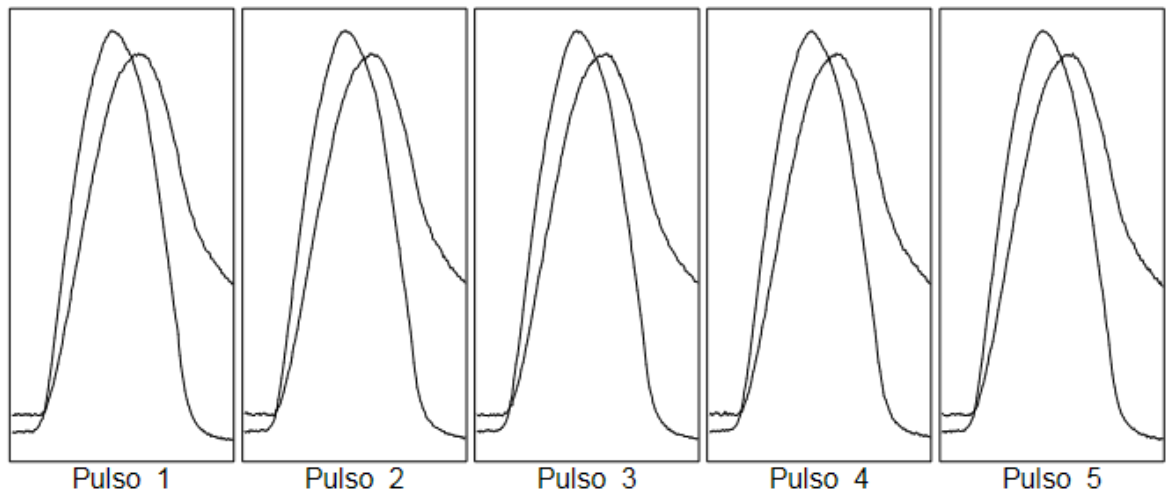
Tiempo de subida deseado (ms): 125 ms

Deformación horizontal deseada (microns): 5 μm

Número de pulsos de preparación: 10

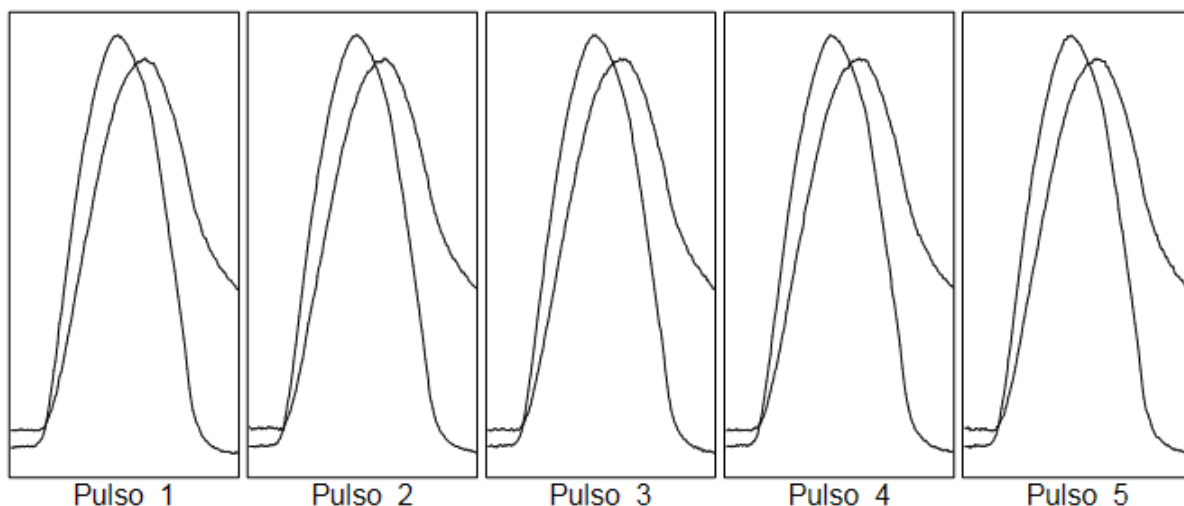
Frecuencia de lectura del transductor: 1000 Hz

Ensayo sobre el primer diámetro



Resultados	Deseada	Real Min	Real Max	Media
Fuerza vertical (kN)		1,33	1,36	1,35
Esfuerzo horizontal (kPa)		135,3	138,4	137,0
Factor de area de carga	0,60	0,60	0,62	0,61
Deformación horizontal (μm)	5,0	5,0	5,1	5,1
Tiempo de carga (subida) (ms):	125	121,0	128,0	124,2
Módulo resiliente medido (MPa)		2621	2644	2631
Módulo rediliente ajustado (MPa)		2621	2657	2638

Ensayo sobre el segundo diámetro



Resultados	Deseada	Real Min	Real Max	Media
Fuerza vertical (kN)		1,32	1,34	1,34
Esfuerzo horizontal (kPa)		134,2	136,7	135,8
Factor de area de carga	0.60	0,59	0,62	0,60
Deformación horizontal (μm)	5,0	5,0	5,1	5,1
Tiempo de carga (subida) (ms):	125	125,0	129,0	126,2
Módulo resiliente medido (MPa)		2594	2615	2605
Módulo rediliente ajustado (MPa)		2581	2627	2610

Media de los dos ensayos

Tiempo de carga (subida) (ms):	:	125,2
Deformación horizontal (μm)	:	5,1
Deformación horizontal (%)	:	0,0051
Módulo resiliente medido (MPa)	:	2618
Módulo rediliente ajustado (MPa)	:	2624

Diferencia en porcentaje entre módulos resilientes ajustados medios = (1)

2.1.3. Espécimen 3

Diámetro de la probeta: 100 mm

Espesor de La probeta: 62.4 mm

Densidad aparente: 2265 (kg/m³)

Coefficiente de Poisson: 0.35

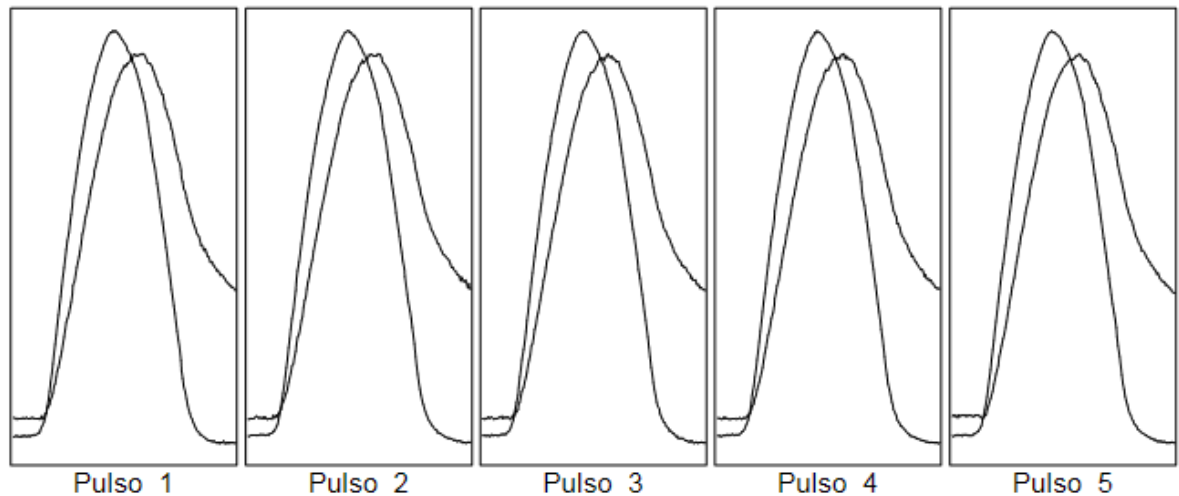
Tiempo de subida deseado (ms): 125 ms

Deformación horizontal deseada (microns): 5 μm

Número de pulsos de preparación: 10

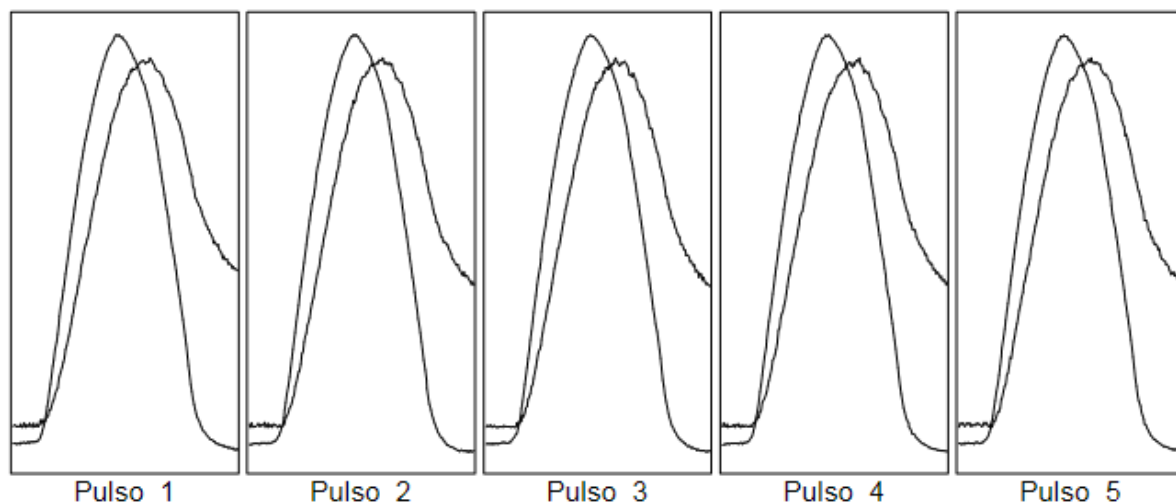
Frecuencia de lectura del transductor: 1000 Hz

Ensayo sobre el primer diámetro



Resultados	Deseada	Real Min	Real Max	Media
Fuerza vertical (kN)		1,40	1,42	1,41
Esfuerzo horizontal (kPa)		142,6	144,9	144,2
Factor de area de carga	0.60	0,60	0,62	0,61
Deformación horizontal (μm)	5,0	5,0	5,1	5,1
Tiempo de carga (subida) (ms):	125	121,0	125,0	123,8
Módulo resiliente medido (MPa)		2765	2800	2773
Módulo rediliente ajustado (MPa)		2771	2806	2786

Ensayo sobre el segundo diámetro



Resultados	Deseada	Real Min	Real Max	Media
Fuerza vertical (kN)		1,39	1,42	1,40
Esfuerzo horizontal (kPa)		141,9	144,6	143,2
Factor de area de carga	0,60	0,60	0,60	0,60
Deformación horizontal (μm)	5,0	4,7	5,0	4,9
Tiempo de carga (subida) (ms):	125	130,0	135,0	132,0
Módulo resiliente medido (MPa)		2806	2911	2861
Módulo rediliente ajustado (MPa)		2812	2905	2864

Media de los dos ensayos

Tiempo de carga (subida) (ms):	:	127,9
Deformación horizontal (μm):	:	5,0
Deformación horizontal (%):	:	0,0050
Módulo resiliente medido (MPa):	:	2817
Módulo rediliente ajustado (MPa):	:	2825

Diferencia en porcentaje entre módulos resilientes ajustados medios = (-3)

2.2. Frecuencia: 5 HZ

2.2.1. Espécimen 1

Diámetro de la probeta: 100 mm

Espesor de La probeta: 62.1 mm

Densidad aparente: 2271 (kg/m³)

Coefficiente de Poisson: 0.35

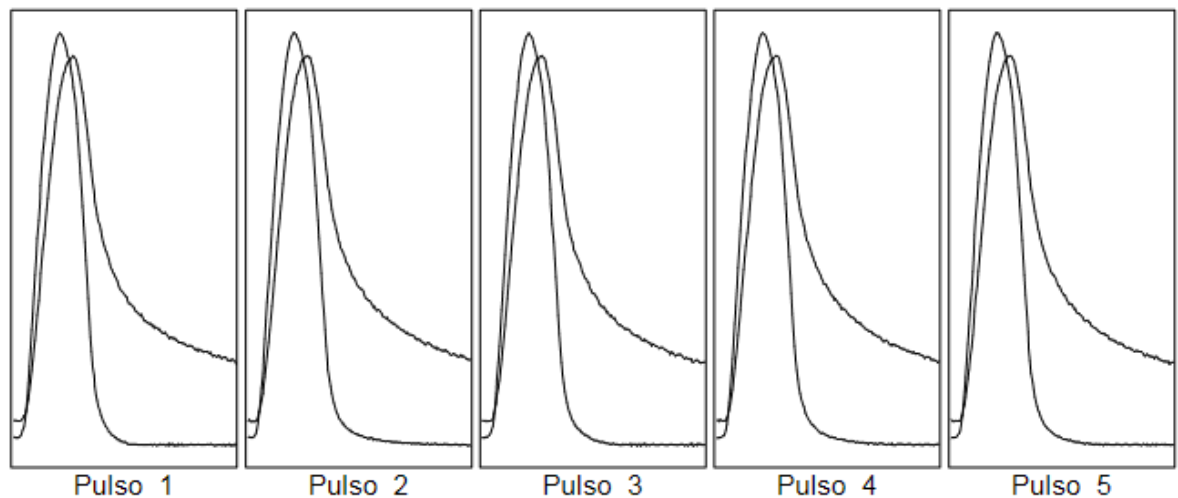
Tiempo de subida deseado (ms): 63 ms

Deformación horizontal deseada (microns): 5 μm

Número de pulsos de preparación: 10

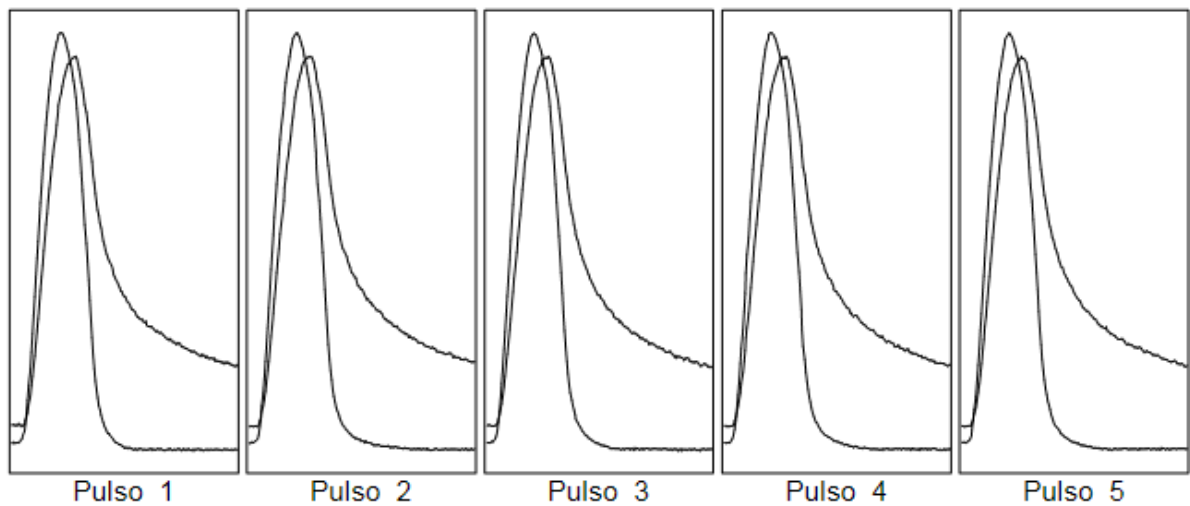
Frecuencia de lectura del transductor: 1000 Hz

Ensayo sobre el primer diámetro



Resultados	Deseada	Real Min	Real Max	Media
Fuerza vertical (kN)		1,55	1,58	1,57
Esfuerzo horizontal (kPa)		158,7	162,4	160,9
Factor de area de carga	0.60	0,59	0,62	0,60
Deformación horizontal (μm)	5,0	5,0	5,2	5,1
Tiempo de carga (subida) (ms):	63	62,0	65,0	63,4
Módulo resiliente medido (MPa)		3065	3089	3078
Módulo rediliente ajustado (MPa)		3056	3109	3082

Ensayo sobre el segundo diámetro



Resultados	Deseada	Real Min	Real Max	Media
Fuerza vertical (kN)		1,52	1,56	1,55
Esfuerzo horizontal (kPa)		156,1	160,2	158,8
Factor de area de carga	0.60	0,60	0,62	0,61
Deformación horizontal (μm)	5,0	4,9	5,1	5,0
Tiempo de carga (subida) (ms):	63	61,0	65,0	63,4
Módulo resiliente medido (MPa)		3049	3094	3069
Módulo rediliente ajustado (MPa)		3057	3123	3080

Media de los dos ensayos

Tiempo de carga (subida) (ms):	:	63,4
Deformación horizontal (μm)	:	5,1
Deformación horizontal (%)	:	0,0051
Módulo resiliente medido (MPa)	:	3074
Módulo rediliente ajustado (MPa)	:	3081

Diferencia en porcentaje entre módulos resilientes ajustados medios = (0,06)

2.2.2. Espécimen 2

Diámetro de la probeta: 100 mm

Espesor de La probeta: 62.6 mm

Densidad aparente: 2267 (kg/m³)

Coefficiente de Poisson: 0.35

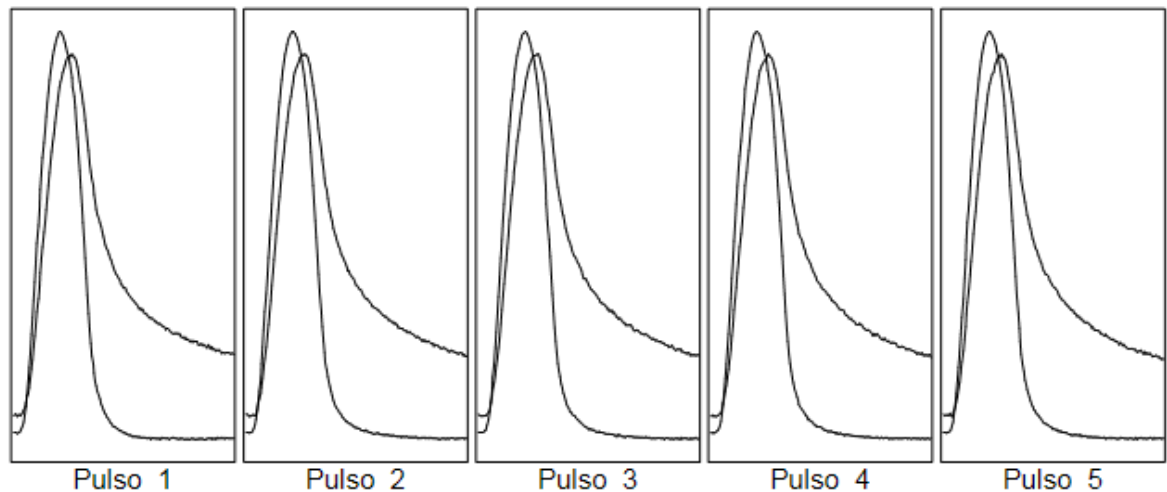
Tiempo de subida deseado (ms): 63 ms

Deformación horizontal deseada (microns): 5 μm

Número de pulsos de preparación: 10

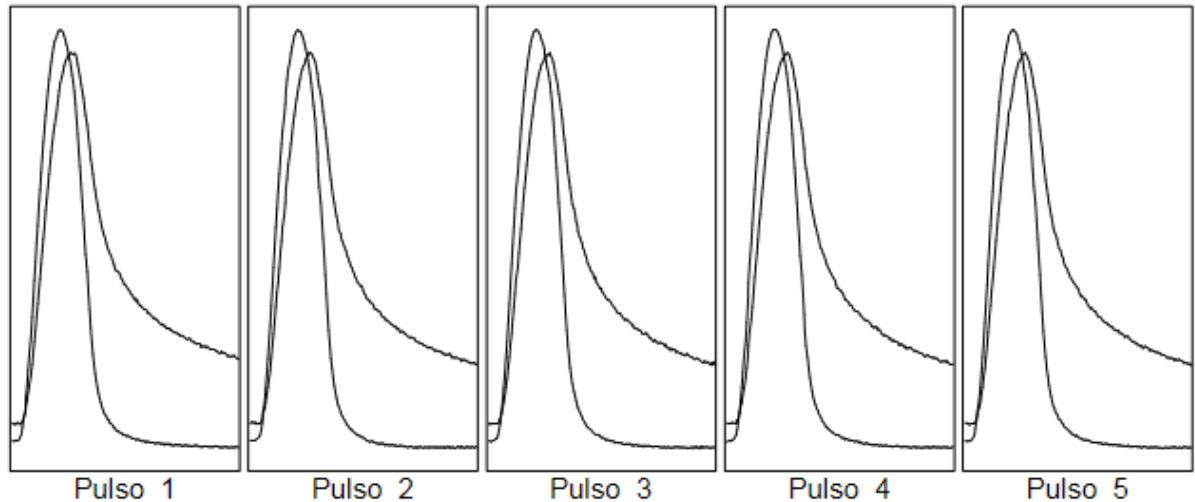
Frecuencia de lectura del transductor: 1000 Hz

Ensayo sobre el primer diámetro



Resultados	Deseada	Real Min	Real Max	Media
Fuerza vertical (kN)		1,67	1,69	1,68
Esfuerzo horizontal (kPa)		169,6	171,8	170,9
Factor de area de carga	0.60	0,59	0,60	0,60
Deformación horizontal (μm)	5,0	5,0	5,1	5,1
Tiempo de carga (subida) (ms):	63	61,0	65,0	63,6
Módulo resiliente medido (MPa)		3259	3309	3288
Módulo rediliente ajustado (MPa)		3261	3311	3284

Ensayo sobre el segundo diámetro



Resultados	Deseada	Real Min	Real Max	Media
Fuerza vertical (kN)		1,67	1,68	1,67
Esfuerzo horizontal (kPa)		169,4	170,4	170,0
Factor de area de carga	0,60	0,59	0,61	0,60
Deformación horizontal (μm)	5,0	5,1	5,1	5,1
Tiempo de carga (subida) (ms):	63	62,0	65,0	63,6
Módulo resiliente medido (MPa)		3251	3276	3259
Módulo rediliente ajustado (MPa)		3230	3287	3252

Media de los dos ensayos

Tiempo de carga (subida) (ms):	:	63,6
Deformación horizontal (μm)	:	5,1
Deformación horizontal (%)	:	0,0051
Módulo resiliente medido (MPa)	:	3274
Módulo rediliente ajustado (MPa)	:	3268

Diferencia en porcentaje entre módulos resilientes ajustados medios = (1,0)

2.2.3. Espécimen 3

Diámetro de la probeta: 100 mm

Espesor de La probeta: 62.4 mm

Densidad aparente: 2265 (kg/m³)

Coefficiente de Poisson: 0.35

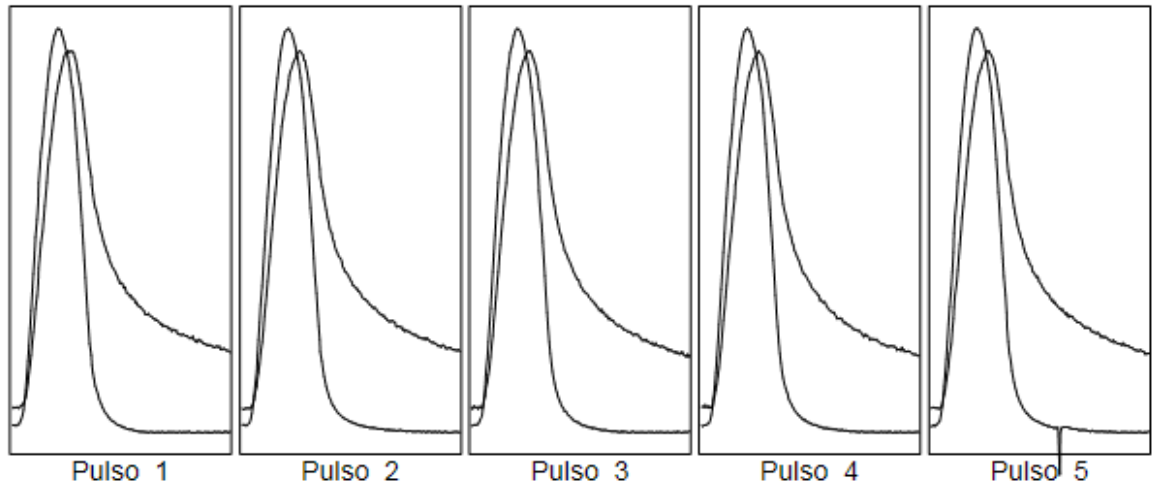
Tiempo de subida deseado (ms): 63 ms

Deformación horizontal deseada (microns): 5 μm

Número de pulsos de preparación: 10

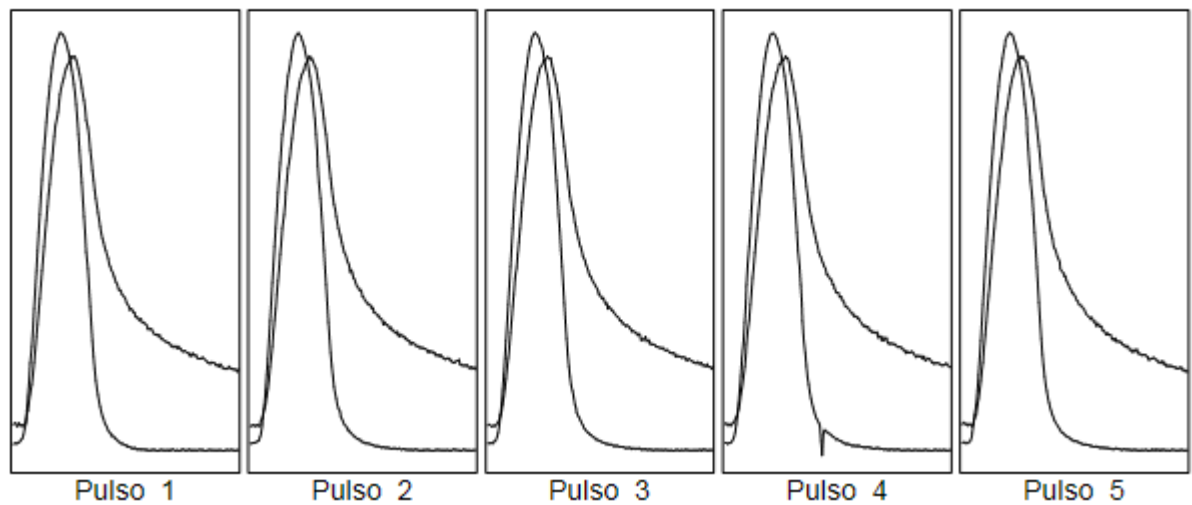
Frecuencia de lectura del transductor: 1000 Hz

Ensayo sobre el primer diámetro



Resultados	Deseada	Real Min	Real Max	Media
Fuerza vertical (kN)		1,74	1,77	1,76
Esfuerzo horizontal (kPa)		177,8	180,4	179,7
Factor de area de carga	0.60	0,59	0,61	0,60
Deformación horizontal (μm)	5,0	4,9	5,1	5,0
Tiempo de carga (subida) (ms):	63	63,0	65,0	63,8
Módulo resiliente medido (MPa)		3452	3506	3476
Módulo rediliente ajustado (MPa)		3463	3515	3481

Ensayo sobre el segundo diámetro



Resultados	Deseada	Real Min	Real Max	Media
Fuerza vertical (kN)		1,73	1,76	1,75
Esfuerzo horizontal (kPa)		176,2	179,4	178,5
Factor de area de carga	0,60	0,59	0,62	0,60
Deformación horizontal (μm)	5,0	5,0	5,1	5,1
Tiempo de carga (subida) (ms):	63	63,0	65,0	64,0
Módulo resiliente medido (MPa)		3399	3483	3441
Módulo rediliente ajustado (MPa)		3415	3486	3447

Media de los dos ensayos

Tiempo de carga (subida) (ms):	:	63,9
Deformación horizontal (μm)	:	5,0
Deformación horizontal (%)	:	0,0050
Módulo resiliente medido (MPa)	:	3459
Módulo rediliente ajustado (MPa)	:	3464

Diferencia en porcentaje entre módulos resilientes ajustados medios = (1,0)

2.3. Frecuencia: 10 HZ

2.3.1. Espécimen 1

Diámetro de la probeta: 100 mm

Espesor de La probeta: 62.1 mm

Densidad aparente: 2271 (kg/m³)

Coefficiente de Poisson: 0.35

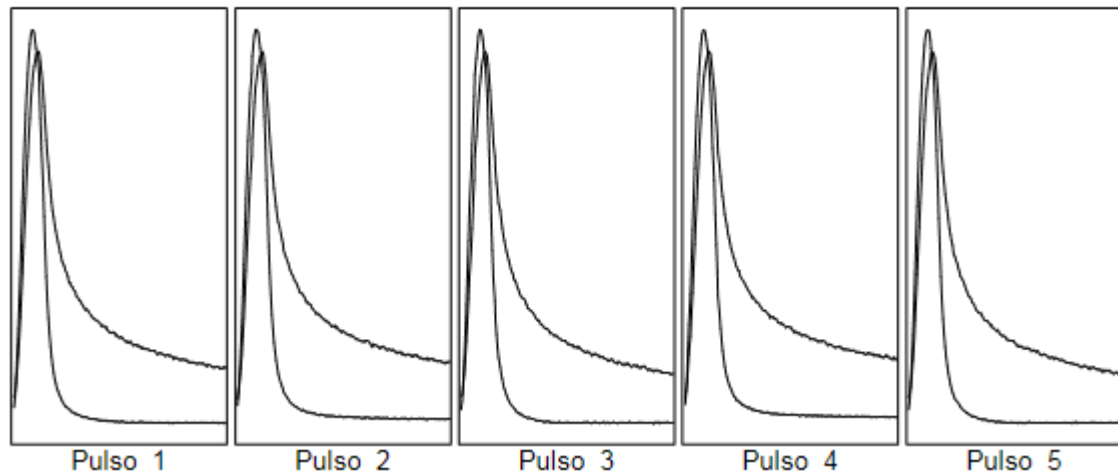
Tiempo de subida deseado (ms): 31 ms

Deformación horizontal deseada (microns): 5 µm

Número de pulsos de preparación: 10

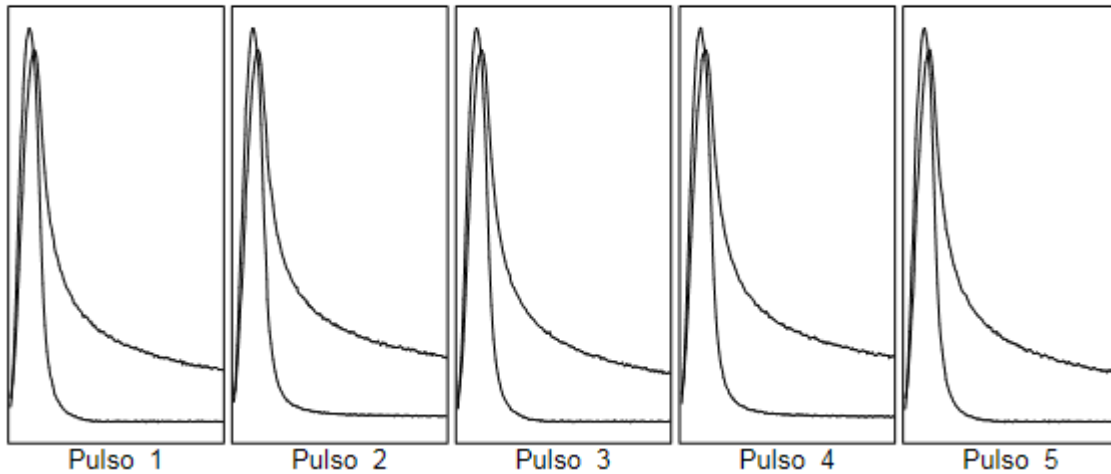
Frecuencia de lectura del transductor: 1000 Hz

Ensayo sobre el primer diámetro



Resultados	Deseada	Real Min	Real Max	Media
Fuerza vertical (kN)		1,92	1,98	1,95
Esfuerzo horizontal (kPa)		197,0	203,0	199,5
Factor de area de carga	0.60	0,58	0,61	0,59
Deformación horizontal (µm)	5,0	5,0	5,2	5,1
Tiempo de carga (subida) (ms):	31	32,0	34,0	33,2
Módulo resiliente medido (MPa)		3813	3844	3822
Módulo rediliente ajustado (MPa)		3770	3836	3807

Ensayo sobre el segundo diámetro



Resultados	Deseada	Real Min	Real Max	Media
Fuerza vertical (kN)		1,92	1,98	1,94
Esfuerzo horizontal (kPa)		196,4	202,4	198,9
Factor de area de carga	0,60	0,59	0,60	0,59
Deformación horizontal (μm)	5,0	5,0	5,2	5,1
Tiempo de carga (subida) (ms):	31	32,0	35,0	33,4
Módulo resiliente medido (MPa)		3752	3857	3804
Módulo rediliente ajustado (MPa)		3743	3831	3791

Media de los dos ensayos

Tiempo de carga (subida) (ms):	:	33,3
Deformación horizontal (μm):	:	5,1
Deformación horizontal (%):	:	0,0051
Módulo resiliente medido (MPa):	:	3813
Módulo rediliente ajustado (MPa):	:	3799

Diferencia en porcentaje entre módulos resilientes ajustados medios = (0,4)

2.3.2. Espécimen 2

Diámetro de la probeta: 100 mm

Espesor de La probeta: 62.6 mm

Densidad aparente: 2267 (kg/m³)

Coefficiente de Poisson: 0.35

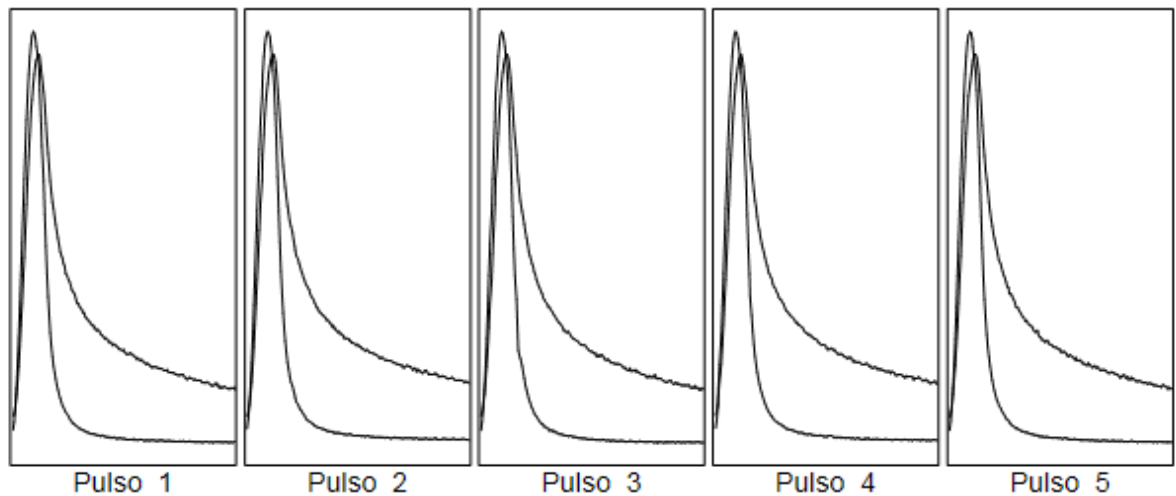
Tiempo de subida deseado (ms): 31 ms

Deformación horizontal deseada (microns): 5 μm

Número de pulsos de preparación: 10

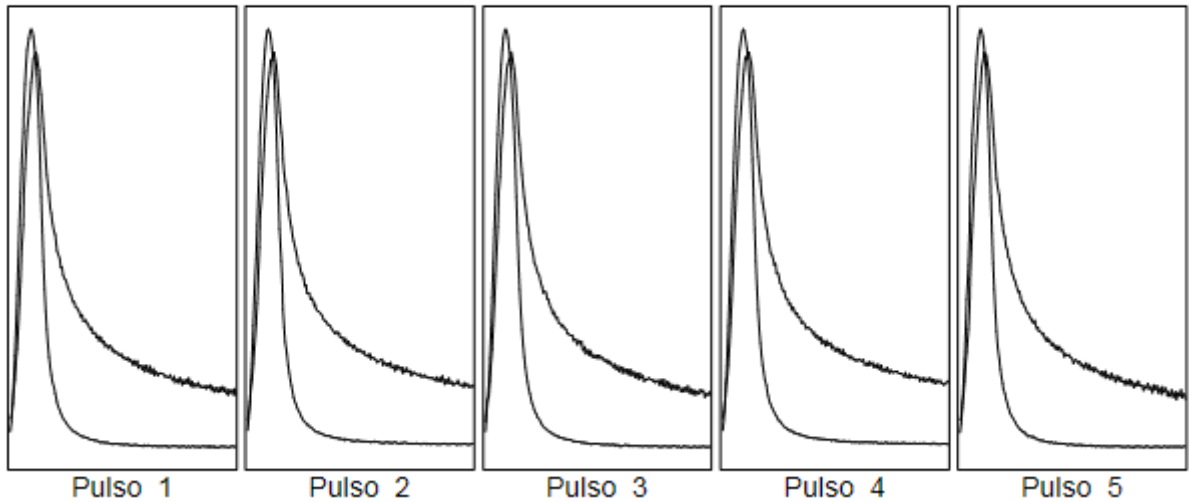
Frecuencia de lectura del transductor: 1000 Hz

Ensayo sobre el primer diámetro



Resultados	Deseada	Real Min	Real Max	Media
Fuerza vertical (kN)		2,06	2,10	2,08
Esfuerzo horizontal (kPa)		210,0	213,3	211,7
Factor de area de carga	0.60	0,57	0,59	0,58
Deformación horizontal (μm)	5,0	5,0	5,1	5,0
Tiempo de carga (subida) (ms):	31	32,0	34,0	33,2
Módulo resiliente medido (MPa)		4061	4119	4090
Módulo rediliente ajustado (MPa)		4022	4075	4047

Ensayo sobre el segundo diámetro



Resultados	Deseada	Real Min	Real Max	Media
Fuerza vertical (kN)		2,08	2,11	2,10
Esfuerzo horizontal (kPa)		211,5	214,8	213,1
Factor de area de carga	0,60	0,57	0,60	0,59
Deformación horizontal (µm)	5,0	5,0	5,1	5,0
Tiempo de carga (subida) (ms):	31	32,0	34,0	33,2
Módulo resiliente medido (MPa)		4114	4150	4124
Módulo rediliente ajustado (MPa)		4062	4122	4091

Media de los dos ensayos

Tiempo de carga (subida) (ms):	:	33,2
Deformación horizontal (µm)	:	5,0
Deformación horizontal (%)	:	0,0050
Módulo resiliente medido (MPa)	:	4107
Módulo rediliente ajustado (MPa)	:	4069

Diferencia en porcentaje entre módulos resilientes ajustados medios = (-1)

2.3.3. Espécimen 3

Diámetro de la probeta: 100 mm

Espesor de La probeta: 62.4 mm

Densidad aparente: 2265 (kg/m³)

Coefficiente de Poisson: 0.35

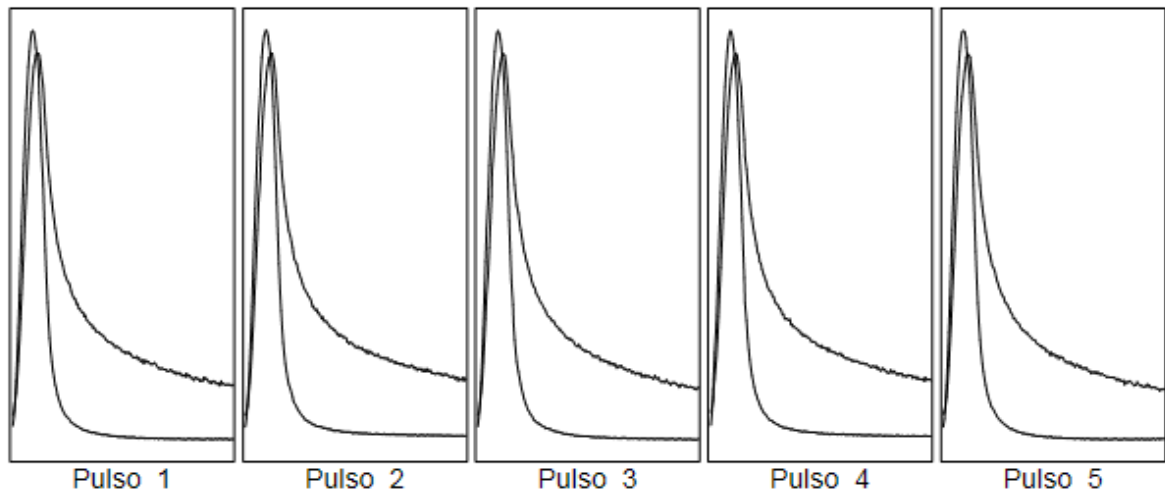
Tiempo de subida deseado (ms): 31 ms

Deformación horizontal deseada (microns): 5 μm

Número de pulsos de preparación: 10

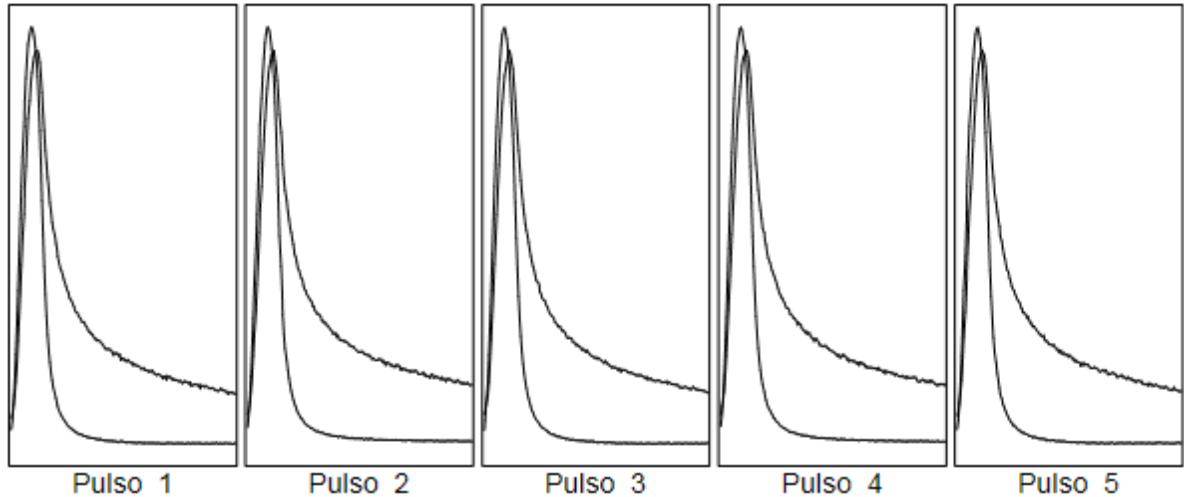
Frecuencia de lectura del transductor: 1000 Hz

Ensayo sobre el primer diámetro



Resultados	Deseada	Real Min	Real Max	Media
Fuerza vertical (kN)		2,20	2,25	2,23
Esfuerzo horizontal (kPa)		224,1	229,4	227,1
Factor de area de carga	0.60	0,58	0,59	0,59
Deformación horizontal (μm)	5,0	5,0	5,1	5,1
Tiempo de carga (subida) (ms):	31	32,0	34,0	32,8
Módulo resiliente medido (MPa)		4346	4406	4372
Módulo rediliente ajustado (MPa)		4294	4364	4335

Ensayo sobre el segundo diámetro



Resultados	Deseada	Real Min	Real Max	Media
Fuerza vertical (kN)		2,19	2,22	2,20
Esfuerzo horizontal (kPa)		223,8	226,3	224,9
Factor de area de carga	0,60	0,59	0,60	0,59
Deformación horizontal (μm)	5,0	4,9	5,1	5,1
Tiempo de carga (subida) (ms):	31	32,0	34,0	32,6
Módulo resiliente medido (MPa)		4302	4411	4333
Módulo rediliente ajustado (MPa)		4270	4394	4316

Media de los dos ensayos

Tiempo de carga (subida) (ms):	:	32,7
Deformación horizontal (μm):	:	5,1
Deformación horizontal (%):	:	0,0051
Módulo resiliente medido (MPa):	:	4353
Módulo rediliente ajustado (MPa):	:	4326

Diferencia en porcentaje entre módulos resilientes ajustados medios = (0,4)

3. Temperatura: 40°C

3.1. Frecuencia: 2.5 HZ

3.1.1. Espécimen 1

Diámetro de la probeta: 100 mm

Espesor de La probeta: 62.1 mm

Densidad aparente: 2271 (kg/m³)

Coeficiente de Poisson: 0.35

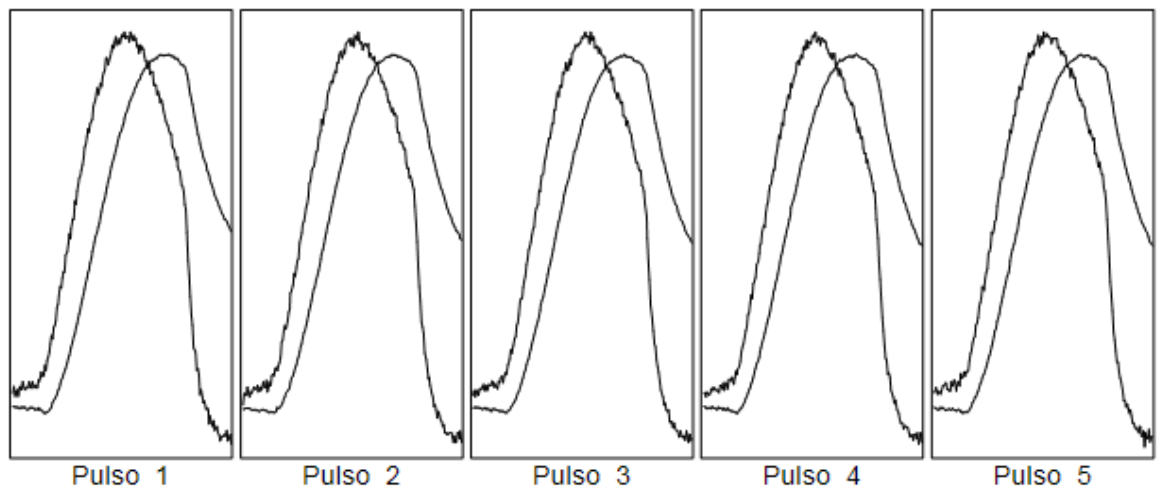
Tiempo de subida deseado (ms): 125 ms

Deformación horizontal deseada (microns): 5 μm

Número de pulsos de preparación: 10

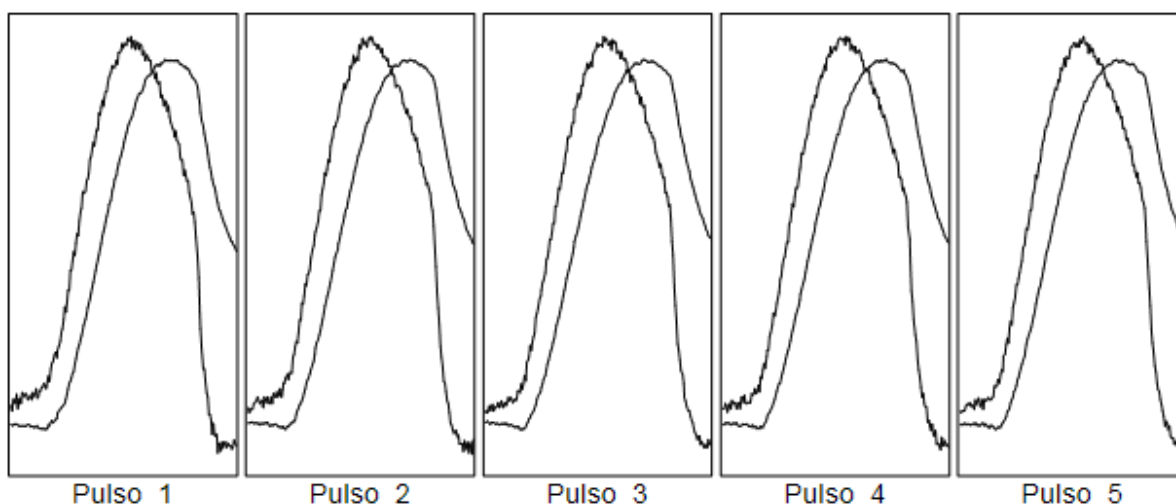
Frecuencia de lectura del transductor: 1000 Hz

Ensayo sobre el primer diámetro



Resultados	Deseada	Real Min	Real Max	Media
Fuerza vertical (kN)		0,19	0,20	0,20
Esfuerzo horizontal (kPa)		19,8	20,6	20,1
Factor de area de carga	0.60	0,59	0,61	0,60
Deformación horizontal (μm)	5,0	6,5	6,7	6,6
Tiempo de carga (subida) (ms):	125	136,0	147,0	141,4
Módulo resiliente medido (MPa)		287	302	296
Módulo rediliente ajustado (MPa)		287	301	296

Ensayo sobre el segundo diámetro



Resultados	Deseada	Real Min	Real Max	Media
Fuerza vertical (kN)		0,18	0,20	0,19
Esfuerzo horizontal (kPa)		18,3	20,4	19,5
Factor de area de carga	0.60	0,58	0,62	0,60
Deformación horizontal (μm)	5,0	5,7	6,5	6,2
Tiempo de carga (subida) (ms):	125	126,0	146,0	138,8
Módulo resiliente medido (MPa)		298	312	305
Módulo rediliente ajustado (MPa)		299	312	305

Media de los dos ensayos

Tiempo de carga (subida) (ms):	:	140,1
Deformación horizontal (μm):	:	6,4
Deformación horizontal (%):	:	0,0064
Módulo resiliente medido (MPa):	:	301
Módulo rediliente ajustado (MPa):	:	301

Diferencia en porcentaje entre módulos resilientes ajustados medios = (-3)

3.1.2. Espécimen 2

Diámetro de la probeta: 100 mm

Espesor de La probeta: 62.6 mm

Densidad aparente: 2267 (kg/m³)

Coefficiente de Poisson: 0.35

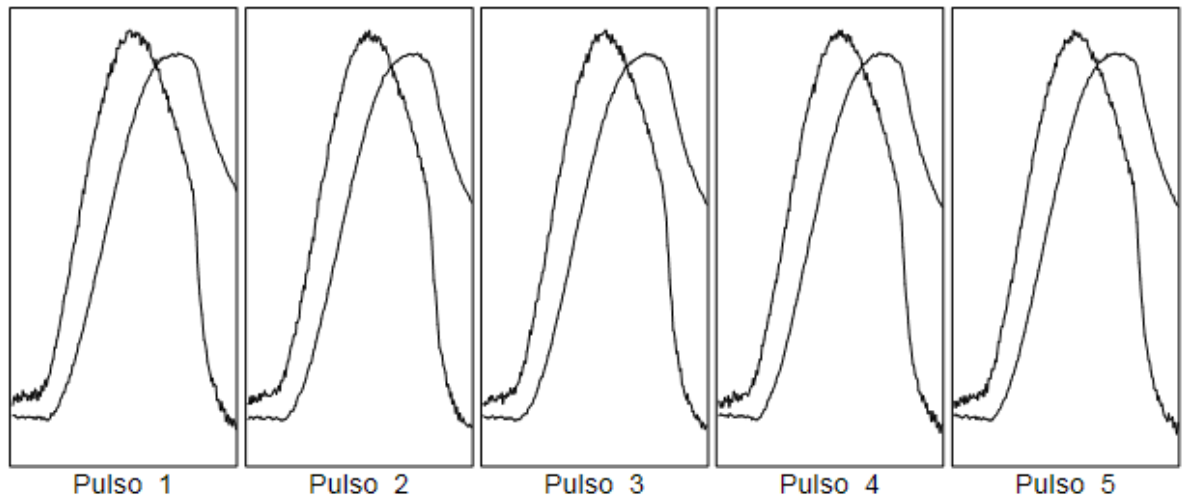
Tiempo de subida deseado (ms): 125 ms

Deformación horizontal deseada (microns): 5 µm

Número de pulsos de preparación: 10

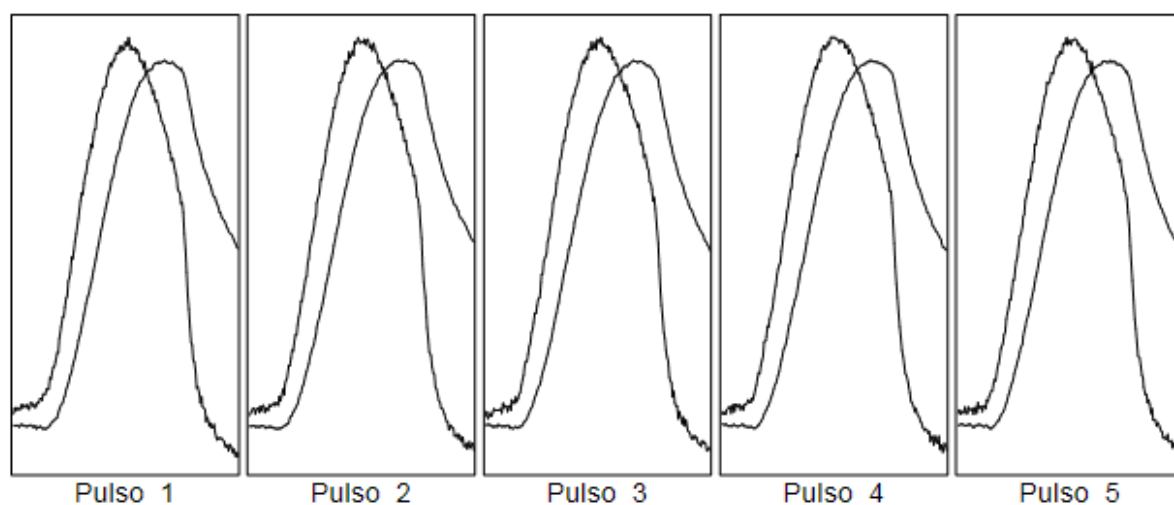
Frecuencia de lectura del transductor: 1000 Hz

Ensayo sobre el primer diámetro



Resultados	Deseada	Real Min	Real Max	Media
Fuerza vertical (kN)		0,20	0,21	0,21
Esfuerzo horizontal (kPa)		20,8	21,2	21,0
Factor de area de carga	0.60	0,57	0,59	0,58
Deformación horizontal (µm)	5,0	5,8	6,3	6,0
Tiempo de carga (subida) (ms):	125	141,0	159,0	148,2
Módulo resiliente medido (MPa)		327	352	342
Módulo rediliente ajustado (MPa)		325	350	341

Ensayo sobre el segundo diámetro



Resultados	Deseada	Real Min	Real Max	Media
Fuerza vertical (kN)		0,22	0,23	0,23
Esfuerzo horizontal (kPa)		22,0	23,6	23,1
Factor de area de carga	0,60	0,56	0,60	0,58
Deformación horizontal (μm)	5,0	5,8	6,2	6,1
Tiempo de carga (subida) (ms):	125	130,0	141,0	135,6
Módulo resiliente medido (MPa)		363	378	370
Módulo rediliente ajustado (MPa)		360	375	368

Media de los dos ensayos

Tiempo de carga (subida) (ms):	:	141,9
Deformación horizontal (μm):	:	6,0
Deformación horizontal (%):	:	0,0060
Módulo resiliente medido (MPa):	:	356
Módulo rediliente ajustado (MPa):	:	355

Diferencia en porcentaje entre módulos resilientes ajustados medios = (-8)

3.1.3. Espécimen 3

Diámetro de la probeta: 100 mm

Espesor de La probeta: 62.4 mm

Densidad aparente: 2265 (kg/m³)

Coefficiente de Poisson: 0.35

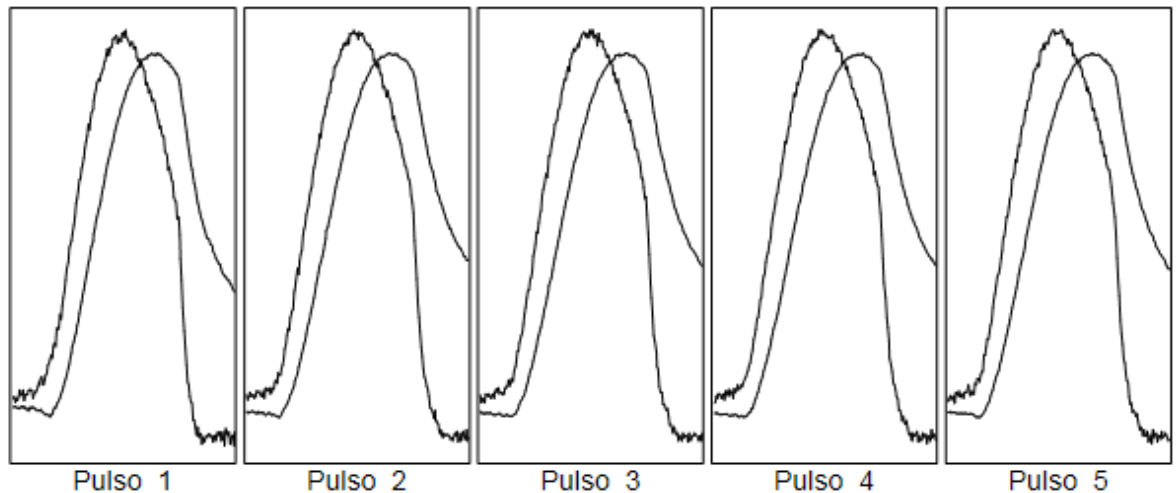
Tiempo de subida deseado (ms): 125 ms

Deformación horizontal deseada (microns): 5 µm

Número de pulsos de preparación: 10

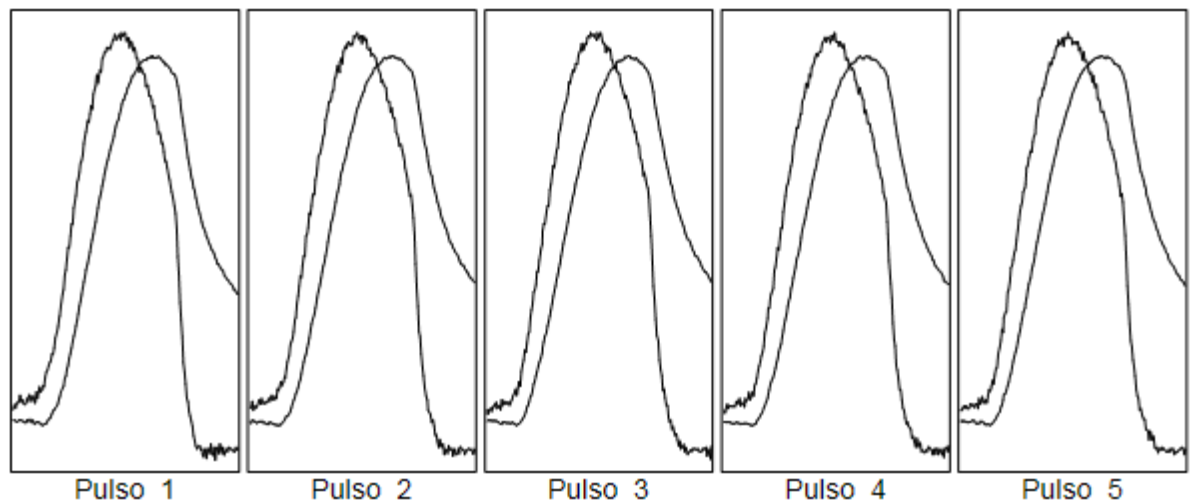
Frecuencia de lectura del transductor: 1000 Hz

Ensayo sobre el primer diámetro



Resultados	Deseada	Real Min	Real Max	Media
Fuerza vertical (kN)		0,19	0,22	0,21
Esfuerzo horizontal (kPa)		19,3	22,5	21,7
Factor de area de carga	0.60	0,59	0,63	0,62
Deformación horizontal (µm)	5,0	5,2	6,5	6,2
Tiempo de carga (subida) (ms):	125	130,0	141,0	133,8
Módulo resiliente medido (MPa)		333	361	342
Módulo rediliente ajustado (MPa)		333	363	343

Ensayo sobre el segundo diámetro



Resultados	Deseada	Real Min	Real Max	Media
Fuerza vertical (kN)		0,20	0,23	0,22
Esfuerzo horizontal (kPa)		20,3	23,3	22,4
Factor de area de carga	0.60	0,60	0,62	0,61
Deformación horizontal (μm)	5,0	5,7	6,6	6,3
Tiempo de carga (subida) (ms):	125	125,0	141,0	129,4
Módulo resiliente medido (MPa)		338	350	345
Módulo rediliente ajustado (MPa)		338	351	346

Media de los dos ensayos

Tiempo de carga (subida) (ms):	: 131,6
Deformación horizontal (μm):	: 6,3
Deformación horizontal (%):	: 0,0063
Módulo resiliente medido (MPa):	: 344
Módulo rediliente ajustado (MPa):	: 345

Diferencia en porcentaje entre módulos resilientes ajustados medios = (-0,9)

3.2. Frecuencia: 5 HZ

3.2.1. Espécimen 1

Diámetro de la probeta: 100 mm

Espesor de La probeta: 62.1 mm

Densidad aparente: 2271 (kg/m³)

Coefficiente de Poisson: 0.35

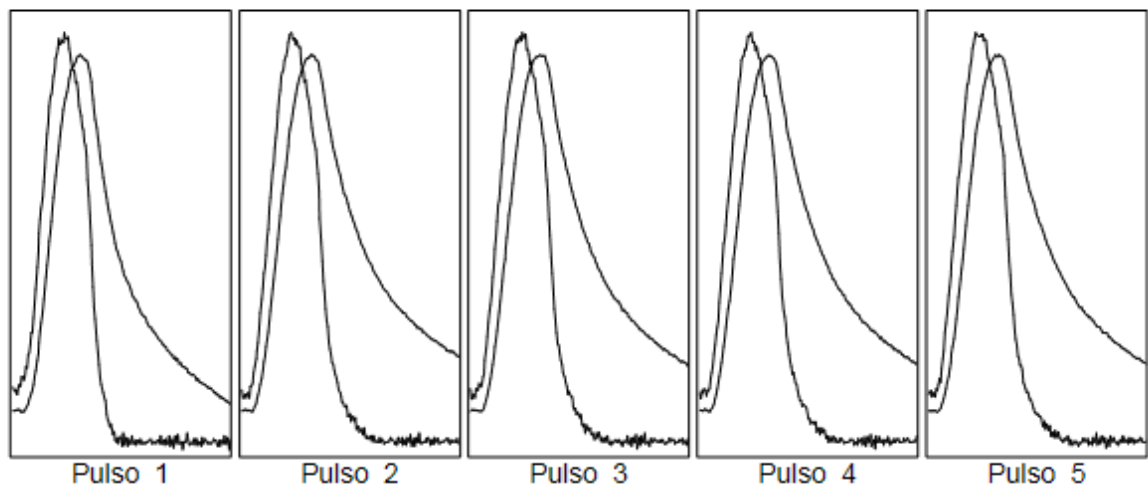
Tiempo de subida deseado (ms): 63 ms

Deformación horizontal deseada (microns): 5 μ m

Número de pulsos de preparación: 10

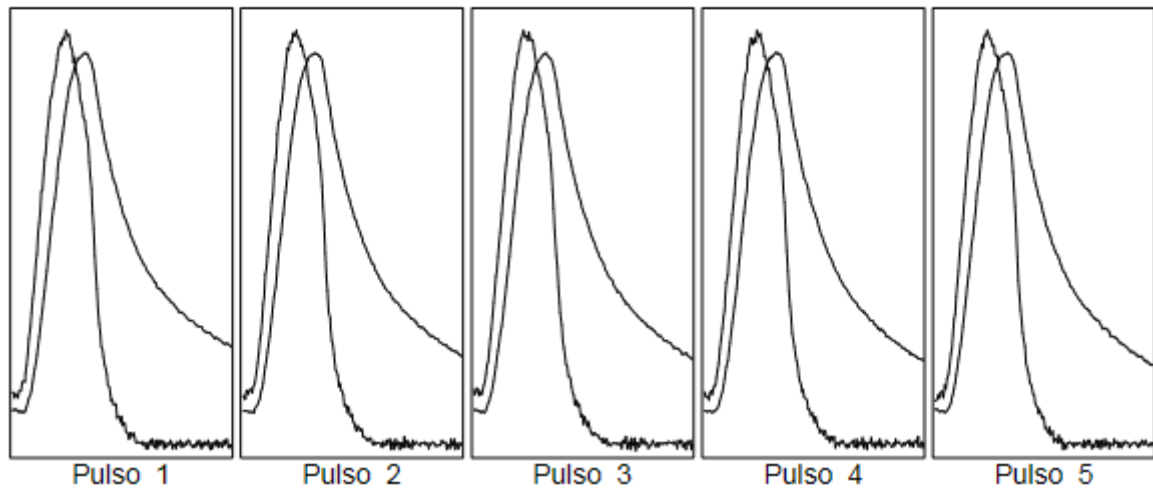
Frecuencia de lectura del transductor: 1000 Hz

Ensayo sobre el primer diámetro



Resultados	Deseada	Real Min	Real Max	Media
Fuerza vertical (kN)		0,22	0,25	0,24
Esfuerzo horizontal (kPa)		22,1	26,0	25,0
Factor de area de carga	0.60	0,56	0,61	0,59
Deformación horizontal (μm)	5,0	5,3	6,7	6,4
Tiempo de carga (subida) (ms):	63	65,0	71,0	67,8
Módulo resiliente medido (MPa)		370	409	383
Módulo rediliente ajustado (MPa)		369	408	382

Ensayo sobre el segundo diámetro



Resultados	Deseada	Real Min	Real Max	Media
Fuerza vertical (kN)		0,24	0,25	0,25
Esfuerzo horizontal (kPa)		25,0	25,8	25,4
Factor de area de carga	0.60	0,56	0,60	0,58
Deformación horizontal (μm)	5,0	6,6	6,8	6,7
Tiempo de carga (subida) (ms):	63	70,0	76,0	73,6
Módulo resiliente medido (MPa)		364	371	368
Módulo rediliente ajustado (MPa)		363	368	366

Media de los dos ensayos

Tiempo de carga (subida) (ms):	:	70,7
Deformación horizontal (μm):	:	6,5
Deformación horizontal (%):	:	0,0065
Módulo resiliente medido (MPa):	:	376
Módulo rediliente ajustado (MPa):	:	374

Diferencia en porcentaje entre módulos resilientes ajustados medios = (4)

3.2.2. Espécimen 2

Diámetro de la probeta: 100 mm

Espesor de La probeta: 62.6 mm

Densidad aparente: 2267 (kg/m³)

Coefficiente de Poisson: 0.35

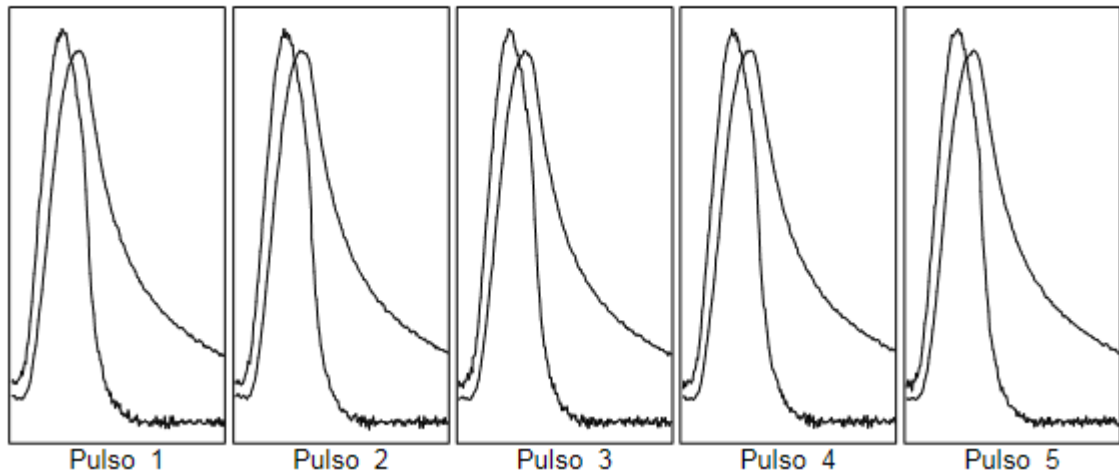
Tiempo de subida deseado (ms): 63 ms

Deformación horizontal deseada (microns): 5 μm

Número de pulsos de preparación: 10

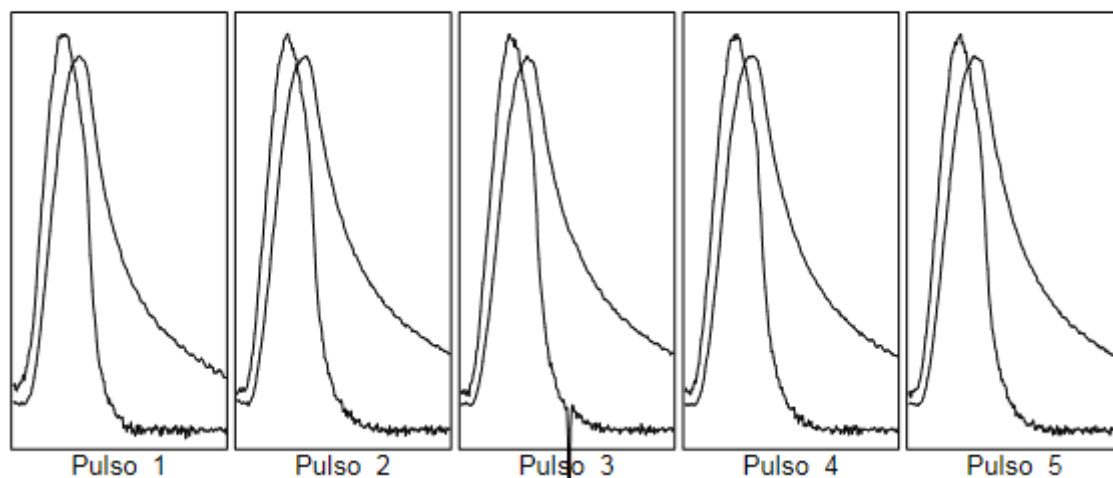
Frecuencia de lectura del transductor: 1000 Hz

Ensayo sobre el primer diámetro



Resultados	Deseada	Real Min	Real Max	Media
Fuerza vertical (kN)		0,25	0,26	0,26
Esfuerzo horizontal (kPa)		25,5	26,8	26,2
Factor de area de carga	0.60	0,56	0,60	0,58
Deformación horizontal (μm)	5,0	5,4	5,8	5,6
Tiempo de carga (subida) (ms):	63	63,0	68,0	65,2
Módulo resiliente medido (MPa)		449	463	455
Módulo rediliente ajustado (MPa)		448	462	453

Ensayo sobre el segundo diámetro



Resultados	Deseada	Real Min	Real Max	Media
Fuerza vertical (kN)		0,24	0,27	0,27
Esfuerzo horizontal (kPa)		24,5	27,9	27,1
Factor de area de carga	0,60	0,53	0,61	0,57
Deformación horizontal (μm)	5,0	5,2	6,2	6,0
Tiempo de carga (subida) (ms):	63	58,0	75,0	67,2
Módulo resiliente medido (MPa)		435	457	441
Módulo rediliente ajustado (MPa)		433	449	438

Media de los dos ensayos

Tiempo de carga (subida) (ms):	:	66,2
Deformación horizontal (μm)	:	5,8
Deformación horizontal (%)	:	0,0058
Módulo resiliente medido (MPa)	:	448
Módulo rediliente ajustado (MPa)	:	446

Diferencia en porcentaje entre módulos resilientes ajustados medios = (3)

3.2.3. Espécimen 3

Diámetro de la probeta: 100 mm

Espesor de La probeta: 62.4 mm

Densidad aparente: 2265 (kg/m³)

Coefficiente de Poisson: 0.35

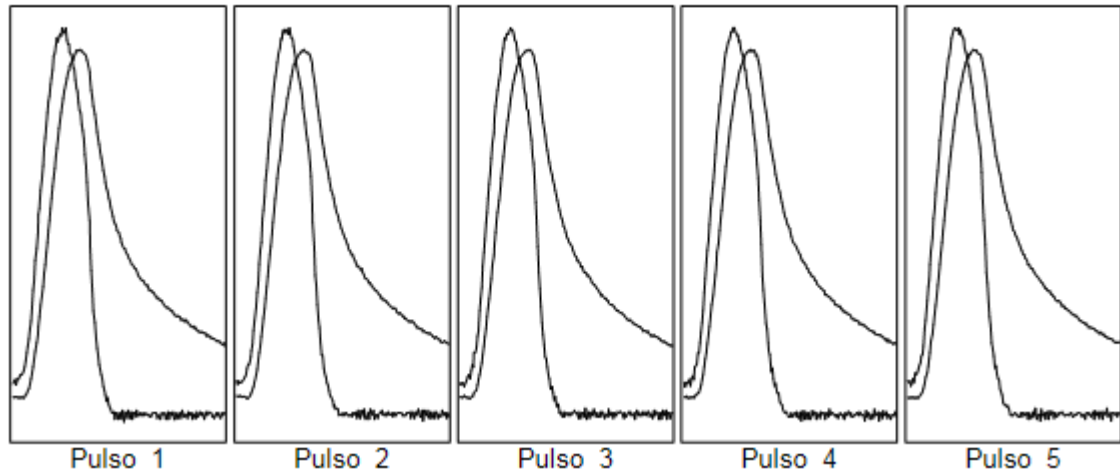
Tiempo de subida deseado (ms): 63 ms

Deformación horizontal deseada (microns): 5 µm

Número de pulsos de preparación: 10

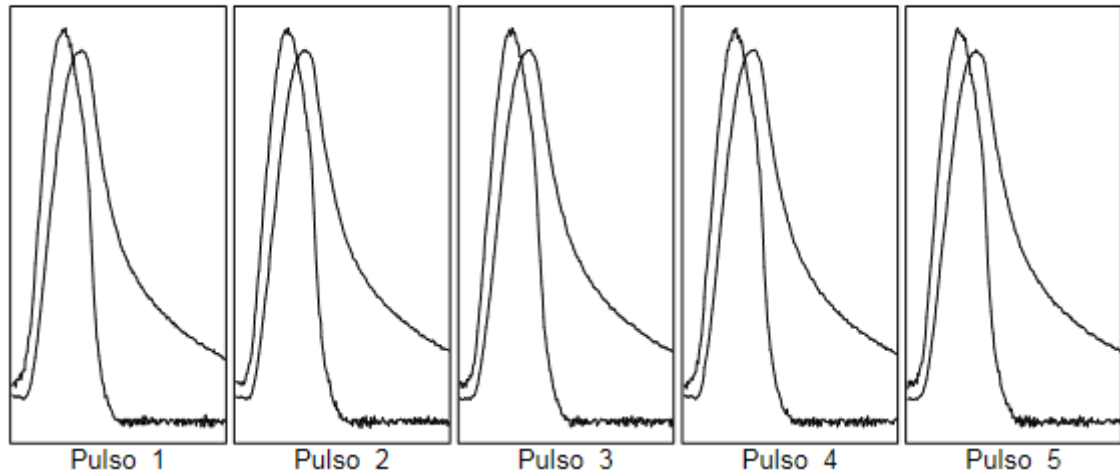
Frecuencia de lectura del transductor: 1000 Hz

Ensayo sobre el primer diámetro



Resultados	Deseada	Real Min	Real Max	Media
Fuerza vertical (kN)		0,25	0,26	0,26
Esfuerzo horizontal (kPa)		25,5	26,6	26,1
Factor de area de carga	0.60	0,58	0,64	0,61
Deformación horizontal (µm)	5,0	5,6	5,9	5,7
Tiempo de carga (subida) (ms):	63	63,0	69,0	66,2
Módulo resiliente medido (MPa)		436	447	443
Módulo rediliente ajustado (MPa)		438	451	444

Ensayo sobre el segundo diámetro



Resultados	Deseada	Real Min	Real Max	Media
Fuerza vertical (kN)		0,25	0,26	0,26
Esfuerzo horizontal (kPa)		25,4	26,7	26,1
Factor de area de carga	0.60	0,56	0,61	0,59
Deformación horizontal (μm)	5,0	5,5	6,0	5,8
Tiempo de carga (subida) (ms):	63	64,0	74,0	68,6
Módulo resiliente medido (MPa)		431	449	436
Módulo rediliente ajustado (MPa)		428	449	435

Media de los dos ensayos

Tiempo de carga (subida) (ms):	:	67,4
Deformación horizontal (μm)	:	5,8
Deformación horizontal (%)	:	0,0058
Módulo resiliente medido (MPa)	:	440
Módulo rediliente ajustado (MPa)	:	440

Diferencia en porcentaje entre módulos resilientes ajustados medios = (2)

3.3. Frecuencia: 10 HZ

3.3.1. Espécimen 1

Diámetro de la probeta: 100 mm

Espesor de La probeta: 62.1 mm

Densidad aparente: 2271 (kg/m³)

Coefficiente de Poisson: 0.35

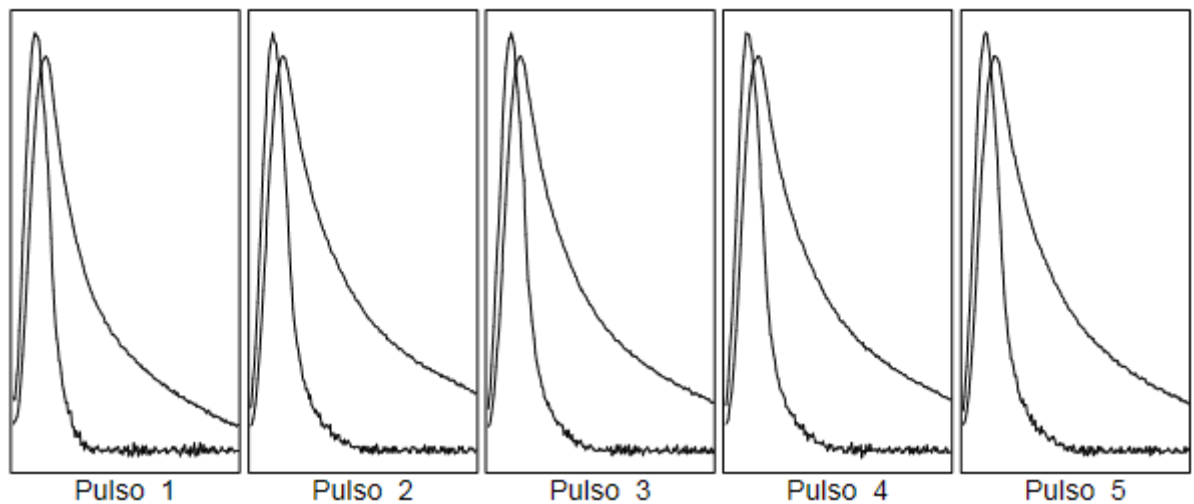
Tiempo de subida deseado (ms): 31 ms

Deformación horizontal deseada (microns): 5 μ m

Número de pulsos de preparación: 10

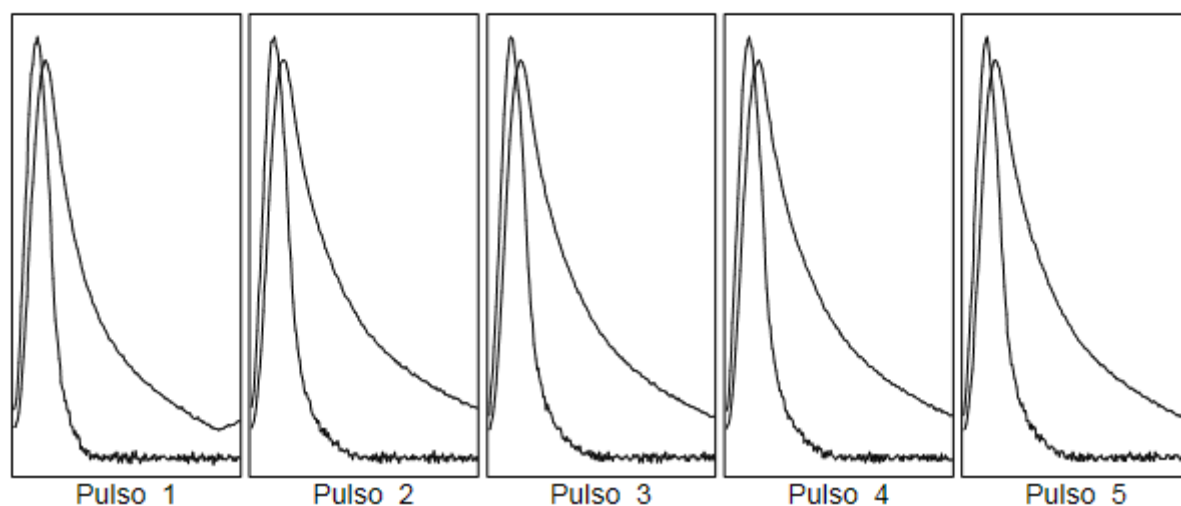
Frecuencia de lectura del transductor: 1000 Hz

Ensayo sobre el primer diámetro



Resultados	Deseada	Real Min	Real Max	Media
Fuerza vertical (kN)		0,27	0,31	0,30
Esfuerzo horizontal (kPa)		28,1	31,8	30,8
Factor de area de carga	0.60	0,54	0,62	0,57
Deformación horizontal (μm)	5,0	5,5	6,4	6,2
Tiempo de carga (subida) (ms):	31	32,0	36,0	34,0
Módulo resiliente medido (MPa)		479	502	487
Módulo rediliente ajustado (MPa)		478	504	484

Ensayo sobre el segundo diámetro



Resultados	Deseada	Real Min	Real Max	Media
Fuerza vertical (kN)		0,28	0,31	0,31
Esfuerzo horizontal (kPa)		29,2	32,2	31,4
Factor de area de carga	0.60	0,56	0,61	0,59
Deformación horizontal (μm)	5,0	5,5	6,3	6,1
Tiempo de carga (subida) (ms):	31	34,0	38,0	36,2
Módulo resiliente medido (MPa)		485	514	498
Módulo rediliente ajustado (MPa)		486	513	497

Media de los dos ensayos

Tiempo de carga (subida) (ms):	:	35,1
Deformación horizontal (μm):	:	6,2
Deformación horizontal (%):	:	0,0062
Módulo resiliente medido (MPa):	:	493
Módulo rediliente ajustado (MPa):	:	491

Diferencia en porcentaje entre módulos resilientes ajustados medios = (-3)

3.3.2. Espécimen 2

Diámetro de la probeta: 100 mm

Espesor de La probeta: 62.6 mm

Densidad aparente: 2267 (kg/m³)

Coefficiente de Poisson: 0.35

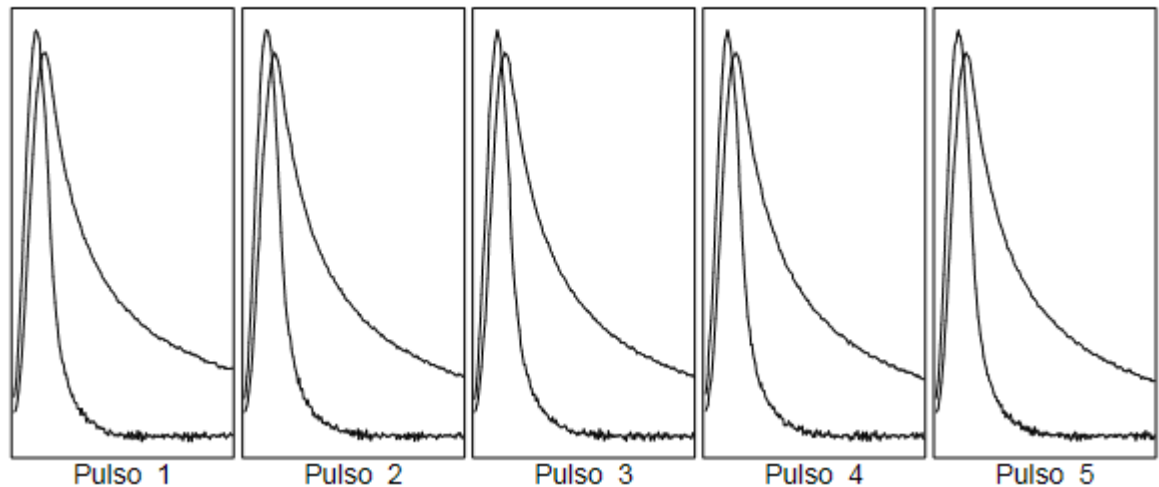
Tiempo de subida deseado (ms): 31 ms

Deformación horizontal deseada (microns): 5 µm

Número de pulsos de preparación: 10

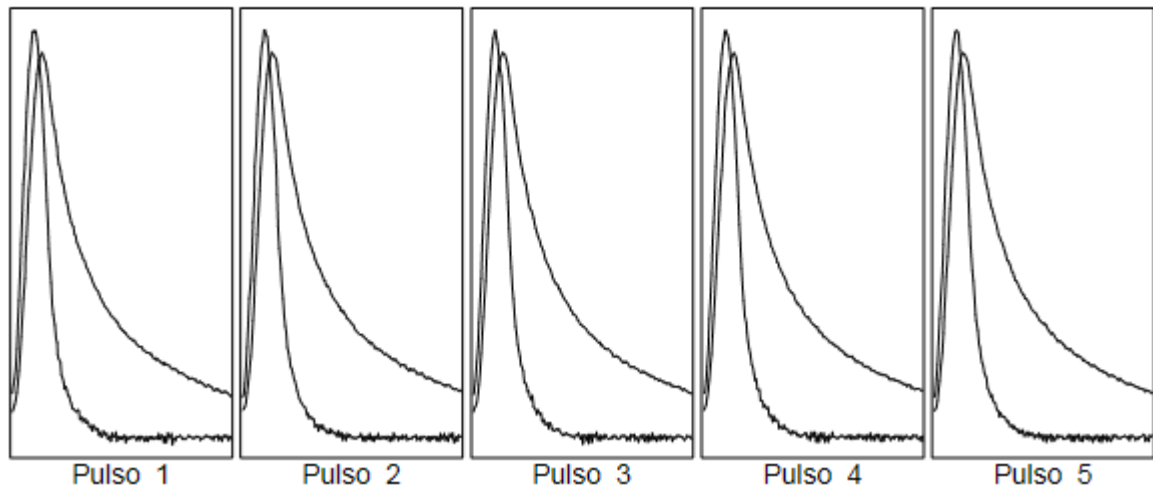
Frecuencia de lectura del transductor: 1000 Hz

Ensayo sobre el primer diámetro



Resultados	Deseada	Real Min	Real Max	Media
Fuerza vertical (kN)		0,33	0,34	0,34
Esfuerzo horizontal (kPa)		34,0	35,1	34,7
Factor de area de carga	0.60	0,58	0,60	0,58
Deformación horizontal (µm)	5,0	5,6	5,8	5,8
Tiempo de carga (subida) (ms):	31	33,0	38,0	35,8
Módulo resiliente medido (MPa)		584	588	586
Módulo rediliente ajustado (MPa)		580	586	583

Ensayo sobre el segundo diámetro



Resultados	Deseada	Real Min	Real Max	Media
Fuerza vertical (kN)		0,32	0,34	0,33
Esfuerzo horizontal (kPa)		32,7	34,4	33,7
Factor de area de carga	0.60	0,54	0,57	0,56
Deformación horizontal (μm)	5,0	5,3	5,7	5,6
Tiempo de carga (subida) (ms):	31	32,0	36,0	34,6
Módulo resiliente medido (MPa)		579	596	588
Módulo rediliente ajustado (MPa)		574	590	581

Media de los dos ensayos

Tiempo de carga (subida) (ms):	:	35,2
Deformación horizontal (μm)	:	5,7
Deformación horizontal (%)	:	0,0057
Módulo resiliente medido (MPa)	:	587
Módulo rediliente ajustado (MPa)	:	582

Diferencia en porcentaje entre módulos resilientes ajustados medios = (0,3)

3.3.3. Espécimen 3

Diámetro de la probeta: 100 mm

Espesor de La probeta: 62.4 mm

Densidad aparente: 2265 (kg/m³)

Coefficiente de Poisson: 0.35

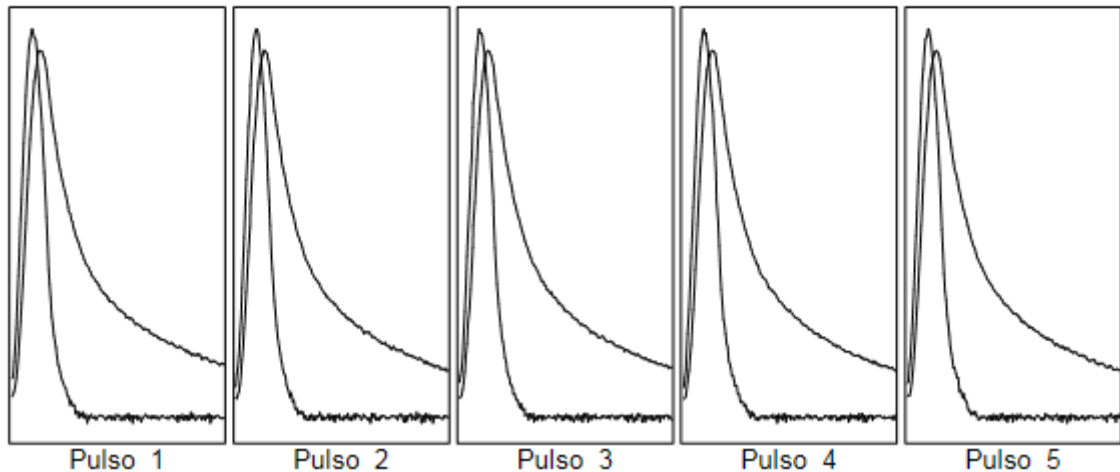
Tiempo de subida deseado (ms): 31 ms

Deformación horizontal deseada (microns): 5 μm

Número de pulsos de preparación: 10

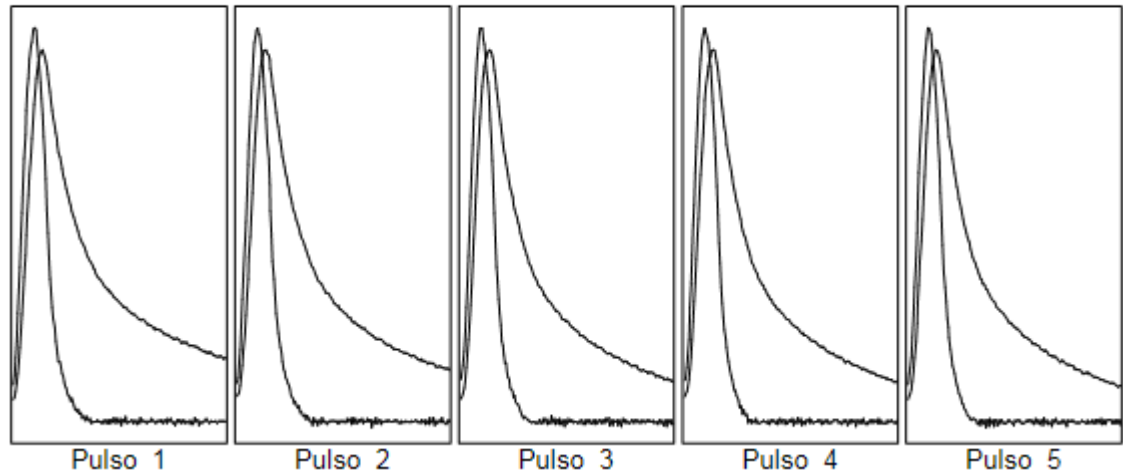
Frecuencia de lectura del transductor: 1000 Hz

Ensayo sobre el primer diámetro



Resultados	Deseada	Real Min	Real Max	Media
Fuerza vertical (kN)		0,32	0,33	0,32
Esfuerzo horizontal (kPa)		32,2	33,3	32,8
Factor de area de carga	0.60	0,57	0,59	0,58
Deformación horizontal (μm)	5,0	5,5	5,6	5,5
Tiempo de carga (subida) (ms):	31	32,0	35,0	33,6
Módulo resiliente medido (MPa)		573	582	578
Módulo rediliente ajustado (MPa)		569	580	574

Ensayo sobre el segundo diámetro



Resultados	Deseada	Real Min	Real Max	Media
Fuerza vertical (kN)		0,33	0,34	0,33
Esfuerzo horizontal (kPa)		33,3	34,7	33,9
Factor de area de carga	0.60	0,57	0,61	0,59
Deformación horizontal (μm)	5,0	5,6	5,9	5,7
Tiempo de carga (subida) (ms):	31	31,0	38,0	34,4
Módulo resiliente medido (MPa)		572	585	578
Módulo rediliente ajustado (MPa)		570	584	577

Media de los dos ensayos

Tiempo de carga (subida) (ms):	34,0
Deformación horizontal (μm):	5,6
Deformación horizontal (%):	0,0056
Módulo resiliente medido (MPa):	578
Módulo rediliente ajustado (MPa):	576

Diferencia en porcentaje entre módulos resilientes ajustados medios = (-0,5)

**ANEXO G. Informe del módulo resiliente por compresión diametral.
ESPECIMEN (CON GCR AL 1.5%).**

1. Temperatura: 5°C

1.1. Frecuencia: 2.5 HZ

1.1.1. Espécimen 1

Diámetro de la probeta: 100 mm

Espesor de La probeta: 63.1 mm

Densidad aparente: 2246 (kg/m³)

Coefficiente de Poisson: 0.35

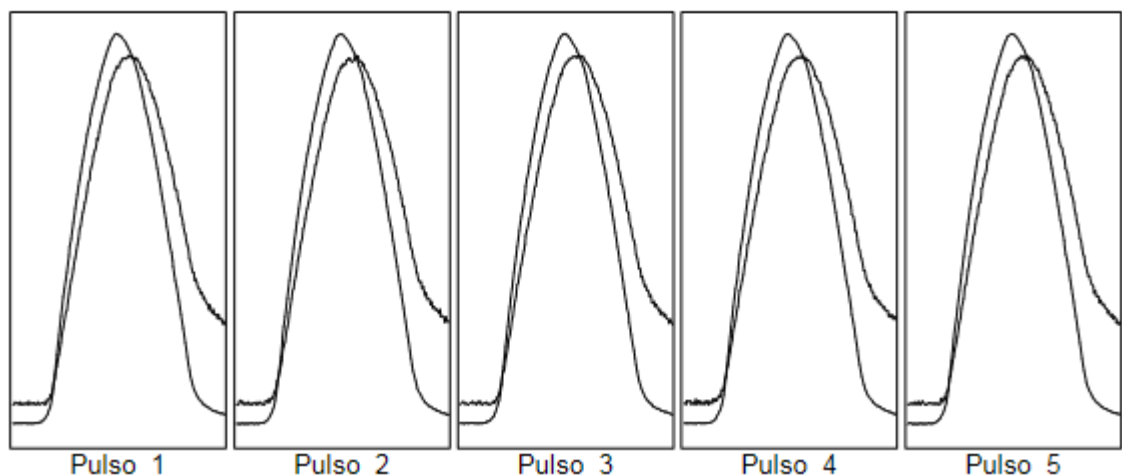
Tiempo de subida deseado (ms): 125 ms

Deformación horizontal deseada (microns): 5 µm

Número de pulsos de preparación: 10

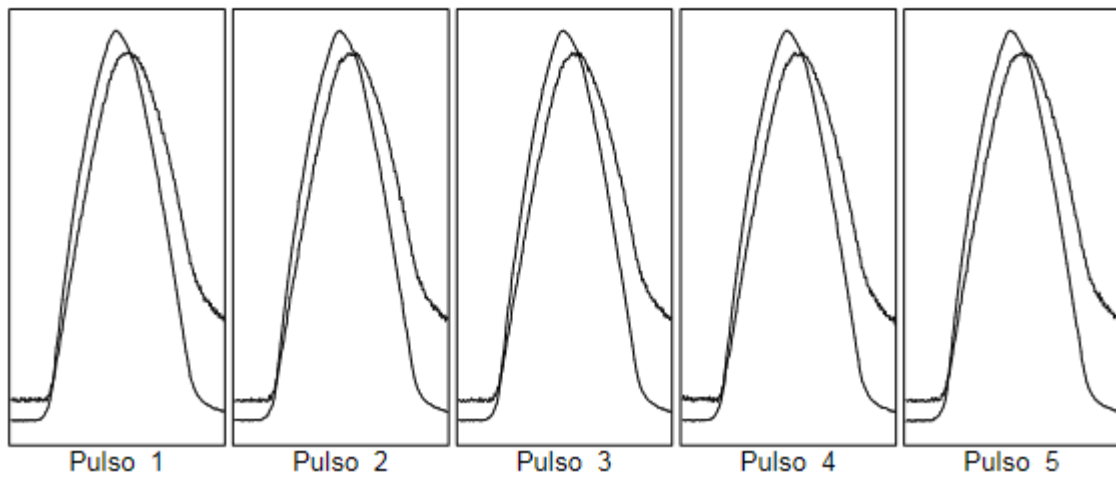
Frecuencia de lectura del transductor: 1000 Hz

Ensayo sobre el primer diámetro



Resultados	Deseada	Real Min	Real Max	Media
Fuerza vertical (kN)		3,12	3,13	3,13
Esfuerzo horizontal (kPa)		315,0	316,1	315,4
Factor de area de carga	0.60	0,61	0,62	0,62
Deformación horizontal (μm)	5,0	4,9	5,0	5,0
Tiempo de carga (subida) (ms):	125	121,0	126,0	123,4
Módulo resiliente medido (MPa)		6152	6203	6177
Módulo rediliente ajustado (MPa)		6199	6282	6239

Ensayo sobre el segundo diámetro



Resultados	Deseada	Real Min	Real Max	Media
Fuerza vertical (kN)		3,10	3,11	3,11
Esfuerzo horizontal (kPa)		312,6	313,8	313,4
Factor de area de carga	0.60	0,61	0,62	0,61
Deformación horizontal (μm)	5,0	4,8	4,9	4,9
Tiempo de carga (subida) (ms):	125	121,0	125,0	122,8
Módulo resiliente medido (MPa)		6202	6291	6247
Módulo rediliente ajustado (MPa)		6250	6341	6290

Media de los dos ensayos

Tiempo de carga (subida) (ms):	:	123,1
Deformación horizontal (μm):	:	4,9
Deformación horizontal (%):	:	0,0049
Módulo resiliente medido (MPa):	:	6212
Módulo rediliente ajustado (MPa):	:	6265

Diferencia en porcentaje entre módulos resilientes ajustados medios = (-0,8)

1.1.2. Espécimen 2

Diámetro de la probeta: 100 mm

Espesor de La probeta: 62.8 mm

Densidad aparente: 2250 (kg/m³)

Coefficiente de Poisson: 0.35

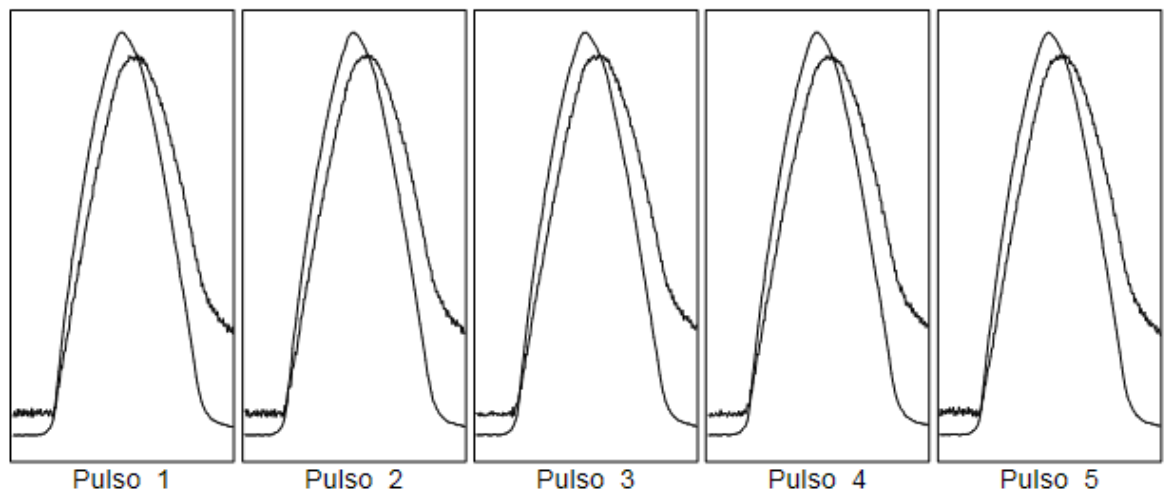
Tiempo de subida deseado (ms): 125 ms

Deformación horizontal deseada (microns): 5 µm

Número de pulsos de preparación: 10

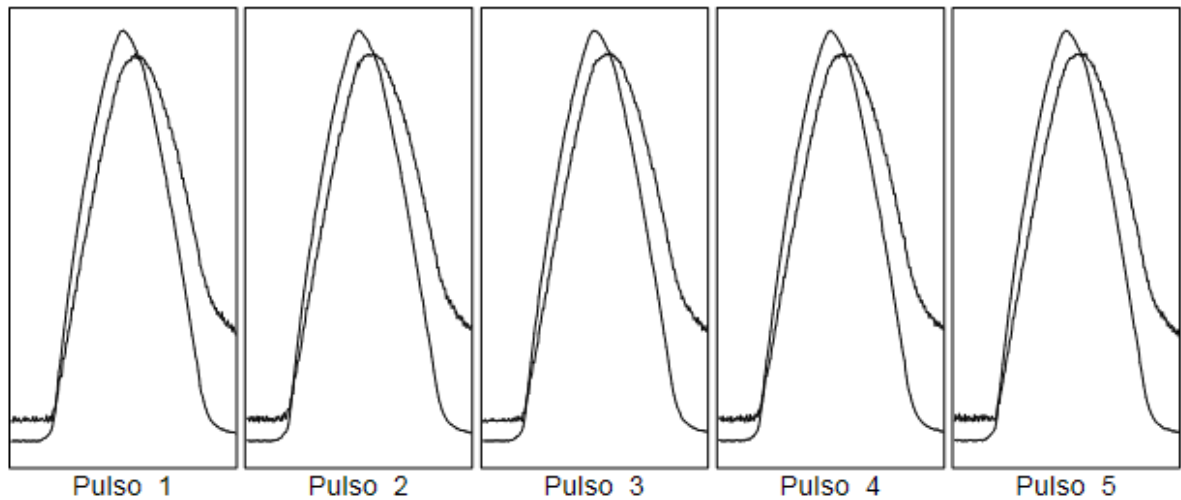
Frecuencia de lectura del transductor: 1000 Hz

Ensayo sobre el primer diámetro



Resultados	Deseada	Real Min	Real Max	Media
Fuerza vertical (kN)		2,84	2,87	2,85
Esfuerzo horizontal (kPa)		287,4	290,9	289,3
Factor de area de carga	0,60	0,61	0,62	0,62
Deformación horizontal (µm)	5,0	4,8	5,0	4,9
Tiempo de carga (subida) (ms):	125	121,0	127,0	124,4
Módulo resiliente medido (MPa)		5634	5837	5752
Módulo rediliente ajustado (MPa)		5700	5884	5812

Ensayo sobre el segundo diámetro



Resultados	Deseada	Real Min	Real Max	Media
Fuerza vertical (kN)		2,87	2,90	2,89
Esfuerzo horizontal (kPa)		291,1	294,2	292,7
Factor de area de carga	0,60	0,61	0,61	0,61
Deformación horizontal (μm)	5,0	4,9	5,1	5,0
Tiempo de carga (subida) (ms):	125	124,0	127,0	125,8
Módulo resiliente medido (MPa)		5640	5782	5688
Módulo rediliente ajustado (MPa)		5665	5807	5717

Media de los dos ensayos

Tiempo de carga (subida) (ms):	:	125,1
Deformación horizontal (μm):	:	5,0
Deformación horizontal (%):	:	0,0050
Módulo resiliente medido (MPa):	:	5720
Módulo rediliente ajustado (MPa):	:	5765

Diferencia en porcentaje entre módulos resilientes ajustados medios = (2)

1.1.3. Espécimen 3

Diámetro de la probeta: 100 mm

Espesor de La probeta: 62.6 mm

Densidad aparente: 2252 (kg/m³)

Coefficiente de Poisson: 0.35

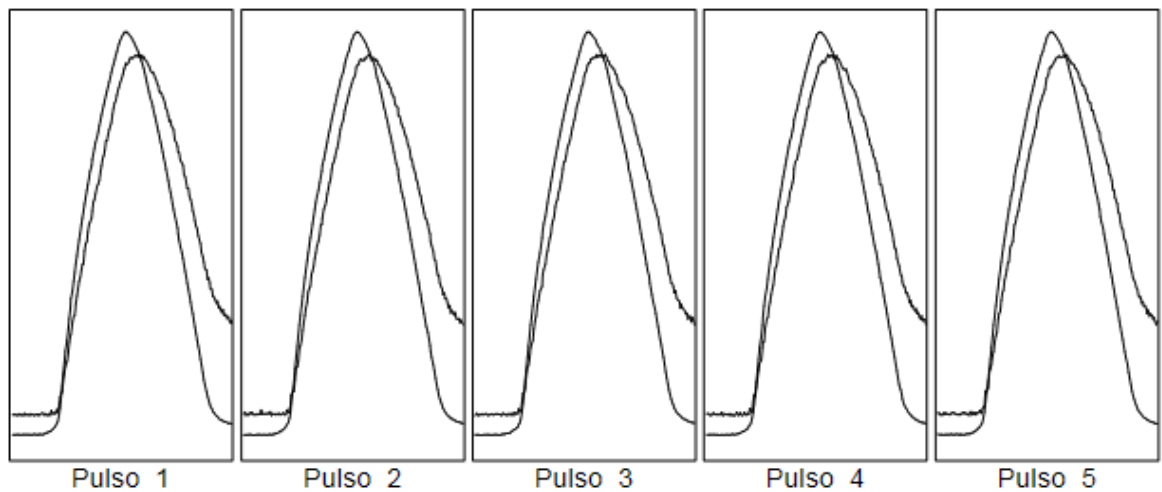
Tiempo de subida deseado (ms): 125 ms

Deformación horizontal deseada (microns): 5 μm

Número de pulsos de preparación: 10

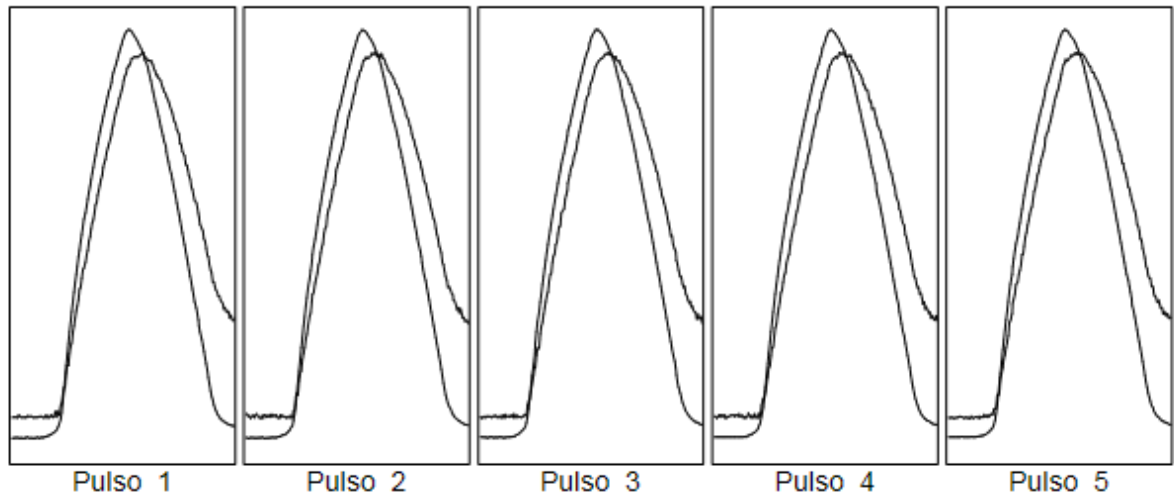
Frecuencia de lectura del transductor: 1000 Hz

Ensayo sobre el primer diámetro



Resultados	Deseada	Real Min	Real Max	Media
Fuerza vertical (kN)		3,41	3,43	3,43
Esfuerzo horizontal (kPa)		347,0	349,1	348,5
Factor de area de carga	0.60	0,61	0,62	0,61
Deformación horizontal (μm)	5,0	5,0	5,0	5,0
Tiempo de carga (subida) (ms):	125	120,0	124,0	122,4
Módulo resiliente medido (MPa)		6755	6792	6771
Módulo rediliente ajustado (MPa)		6789	6834	6820

Ensayo sobre el segundo diámetro



Resultados	Deseada	Real Min	Real Max	Media
Fuerza vertical (kN)		3,35	3,39	3,38
Esfuerzo horizontal (kPa)		340,3	344,9	343,3
Factor de area de carga	0,60	0,61	0,61	0,61
Deformación horizontal (μm)	5,0	4,9	5,0	5,0
Tiempo de carga (subida) (ms):	125	124,0	127,0	124,8
Módulo resiliente medido (MPa)		6728	6773	6748
Módulo rediliente ajustado (MPa)		6762	6832	6789

Media de los dos ensayos

Tiempo de carga (subida) (ms):	:	123,6
Deformación horizontal (μm)	:	5,0
Deformación horizontal (%)	:	0,0050
Módulo resiliente medido (MPa)	:	6760
Módulo rediliente ajustado (MPa)	:	6805

Diferencia en porcentaje entre módulos resilientes ajustados medios = (0,5)

1.2. Frecuencia: 5 HZ

1.2.1. Espécimen 1

Diámetro de la probeta: 100 mm

Espesor de La probeta: 63.1 mm

Densidad aparente: 2246 (kg/m³)

Coefficiente de Poisson: 0.35

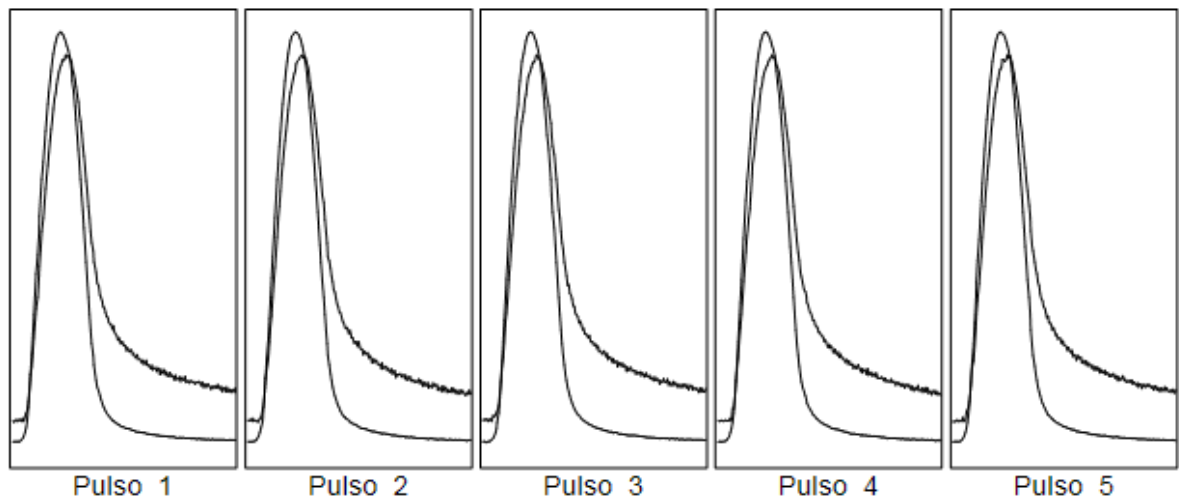
Tiempo de subida deseado (ms): 63 ms

Deformación horizontal deseada (microns): 5 μm

Número de pulsos de preparación: 10

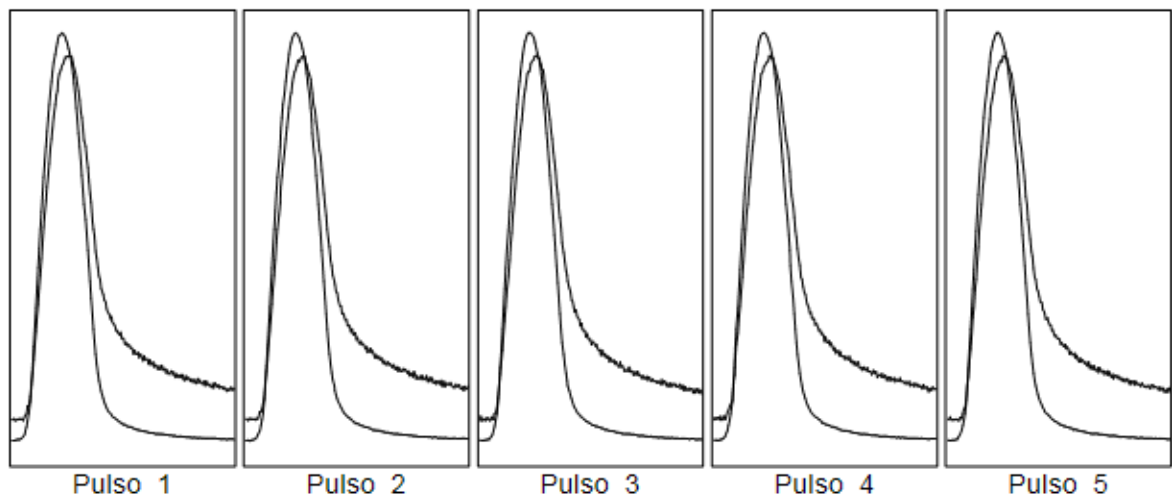
Frecuencia de lectura del transductor: 1000 Hz

Ensayo sobre el primer diámetro



Resultados	Deseada	Real Min	Real Max	Media
Fuerza vertical (kN)		3,52	3,54	3,53
Esfuerzo horizontal (kPa)		355,4	356,6	356,0
Factor de area de carga	0,60	0,62	0,64	0,63
Deformación horizontal (μm)	5,0	4,9	5,0	5,0
Tiempo de carga (subida) (ms):	63	59,0	59,0	59,0
Módulo resiliente medido (MPa)		6954	7035	6989
Módulo rediliente ajustado (MPa)		7065	7157	7107

Ensayo sobre el segundo diámetro



Resultados	Deseada	Real Min	Real Max	Media
Fuerza vertical (kN)		3,49	3,50	3,50
Esfuerzo horizontal (kPa)		352,6	353,5	352,9
Factor de area de carga	0,60	0,61	0,63	0,62
Deformación horizontal (μm)	5,0	4,9	4,9	4,9
Tiempo de carga (subida) (ms):	63	58,0	61,0	58,8
Módulo resiliente medido (MPa)		6945	6980	6969
Módulo rediliente ajustado (MPa)		7024	7085	7064

Media de los dos ensayos

Tiempo de carga (subida) (ms):	:	58,9
Deformación horizontal (μm):	:	4,9
Deformación horizontal (%):	:	0,0049
Módulo resiliente medido (MPa):	:	6979
Módulo rediliente ajustado (MPa):	:	7086

Diferencia en porcentaje entre módulos resilientes ajustados medios = (0,6)

1.2.2. Espécimen 2

Diámetro de la probeta: 100 mm

Espesor de La probeta: 62.8 mm

Densidad aparente: 2250 (kg/m³)

Coefficiente de Poisson: 0.35

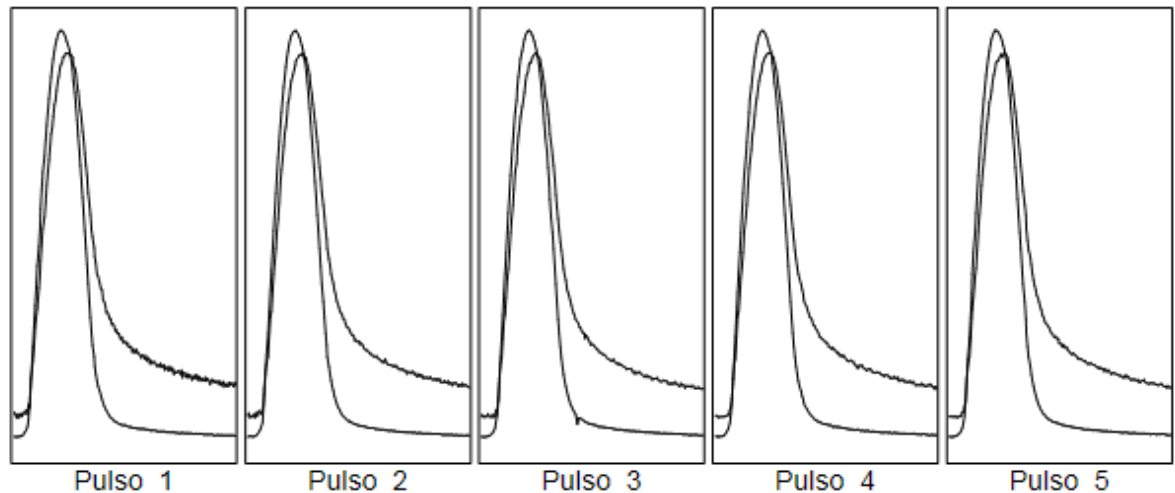
Tiempo de subida deseado (ms): 63 ms

Deformación horizontal deseada (microns): 5 µm

Número de pulsos de preparación: 10

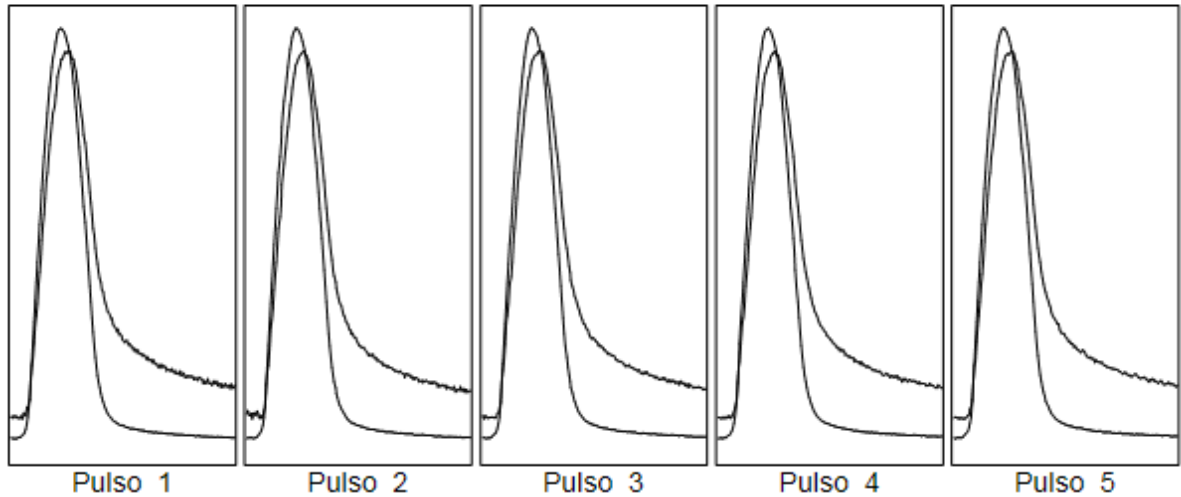
Frecuencia de lectura del transductor: 1000 Hz

Ensayo sobre el primer diámetro



Resultados	Deseada	Real Min	Real Max	Media
Fuerza vertical (kN)		3,19	3,22	3,21
Esfuerzo horizontal (kPa)		323,3	326,6	325,5
Factor de area de carga	0.60	0,63	0,64	0,63
Deformación horizontal (µm)	5,0	4,9	5,0	4,9
Tiempo de carga (subida) (ms):	63	56,0	59,0	57,2
Módulo resiliente medido (MPa)		6390	6457	6416
Módulo rediliente ajustado (MPa)		6500	6576	6549

Ensayo sobre el segundo diámetro



Resultados	Deseada	Real Min	Real Max	Media
Fuerza vertical (kN)		3,18	3,21	3,20
Esfuerzo horizontal (kPa)		322,1	325,9	324,1
Factor de area de carga	0.60	0,62	0,63	0,62
Deformación horizontal (μm)	5,0	4,8	5,0	4,9
Tiempo de carga (subida) (ms):	63	58,0	59,0	58,2
Módulo resiliente medido (MPa)		6366	6560	6442
Módulo rediliente ajustado (MPa)		6465	6634	6523

Media de los dos ensayos

Tiempo de carga (subida) (ms):	:	57,7
Deformación horizontal (μm)	:	4,9
Deformación horizontal (%)	:	0,0049
Módulo resiliente medido (MPa)	:	6429
Módulo rediliente ajustado (MPa)	:	6536

Diferencia en porcentaje entre módulos resilientes ajustados medios = (0,4)

1.2.3. Espécimen 3

Diámetro de la probeta: 100 mm

Espesor de La probeta: 62.6 mm

Densidad aparente: 2252 (kg/m³)

Coefficiente de Poisson: 0.35

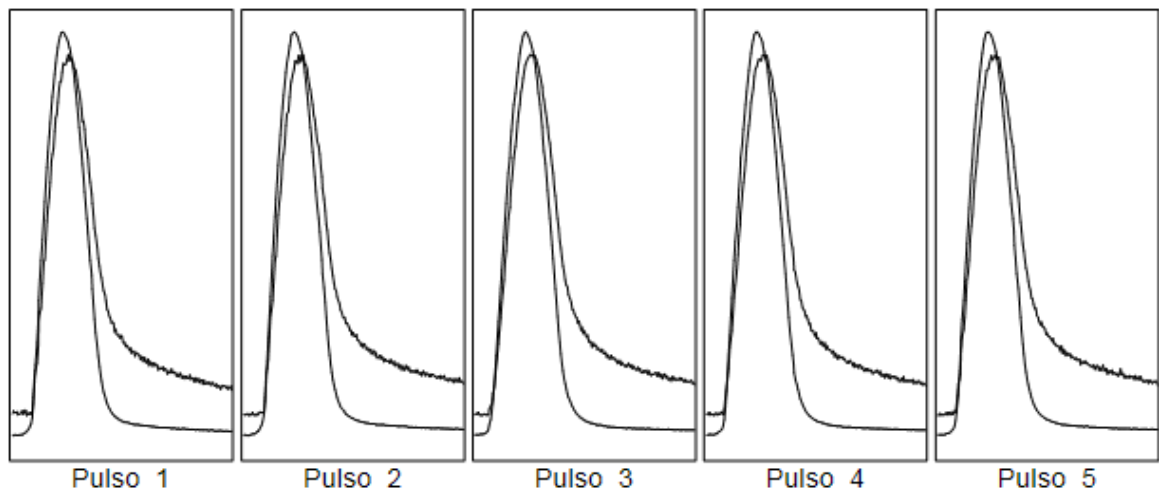
Tiempo de subida deseado (ms): 63 ms

Deformación horizontal deseada (microns): 5 μm

Número de pulsos de preparación: 10

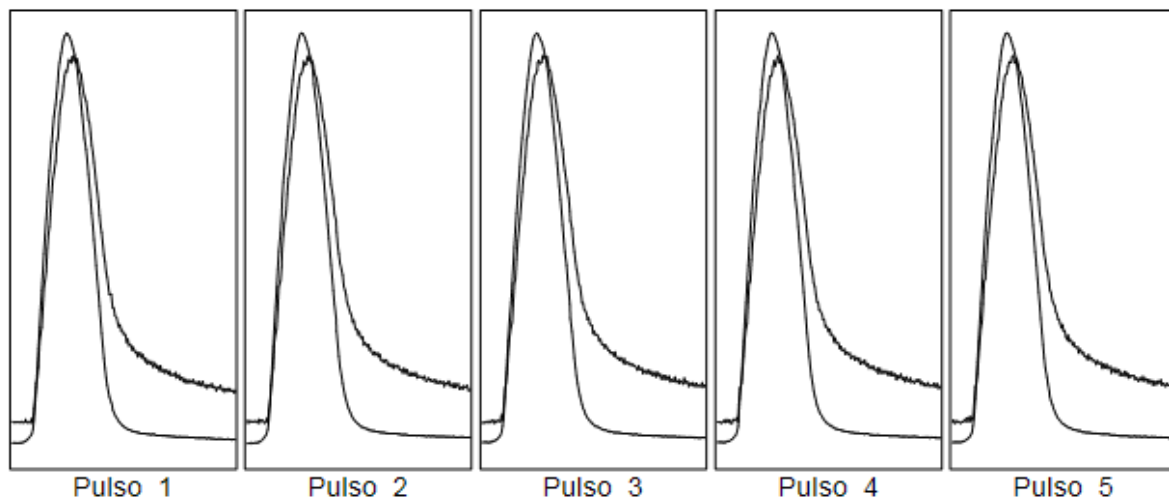
Frecuencia de lectura del transductor: 1000 Hz

Ensayo sobre el primer diámetro



Resultados	Deseada	Real Min	Real Max	Media
Fuerza vertical (kN)		3,80	3,85	3,83
Esfuerzo horizontal (kPa)		386,4	391,1	389,2
Factor de area de carga	0,60	0,58	0,62	0,60
Deformación horizontal (μm)	5,0	4,9	5,0	5,0
Tiempo de carga (subida) (ms):	63	55,0	62,0	58,0
Módulo resiliente medido (MPa)		7566	7692	7611
Módulo rediliente ajustado (MPa)		7488	7776	7628

Ensayo sobre el segundo diámetro



Resultados	Deseada	Real Min	Real Max	Media
Fuerza vertical (kN)		3,74	3,78	3,77
Esfuerzo horizontal (kPa)		380,6	384,8	383,6
Factor de area de carga	0,60	0,61	0,61	0,61
Deformación horizontal (μm)	5,0	4,8	5,0	5,0
Tiempo de carga (subida) (ms):	63	59,0	61,0	60,2
Módulo resiliente medido (MPa)		7488	7645	7547
Módulo rediliente ajustado (MPa)		7515	7670	7577

Media de los dos ensayos

Tiempo de carga (subida) (ms):	:	59,1
Deformación horizontal (μm):	:	5,0
Deformación horizontal (%):	:	0,0050
Módulo resiliente medido (MPa):	:	7579
Módulo rediliente ajustado (MPa):	:	7603

Diferencia en porcentaje entre módulos resilientes ajustados medios = (0,7)

1.3. Frecuencia: 10 HZ

1.3.1. Espécimen 1

Diámetro de la probeta: 100 mm

Espesor de La probeta: 63.1 mm

Densidad aparente: 2246 (kg/m³)

Coefficiente de Poisson: 0.35

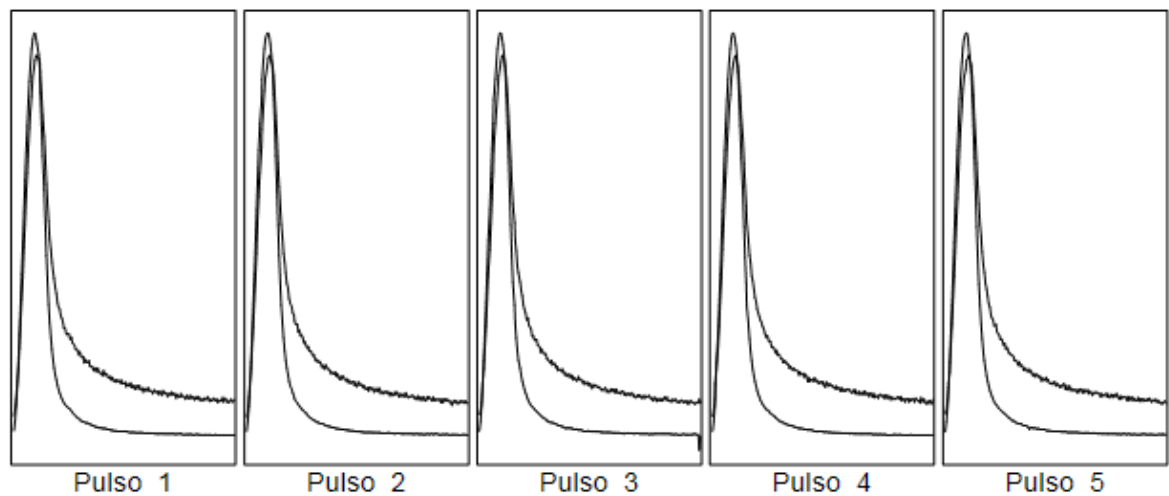
Tiempo de subida deseado (ms): 31 ms

Deformación horizontal deseada (microns): 5 μm

Número de pulsos de preparación: 10

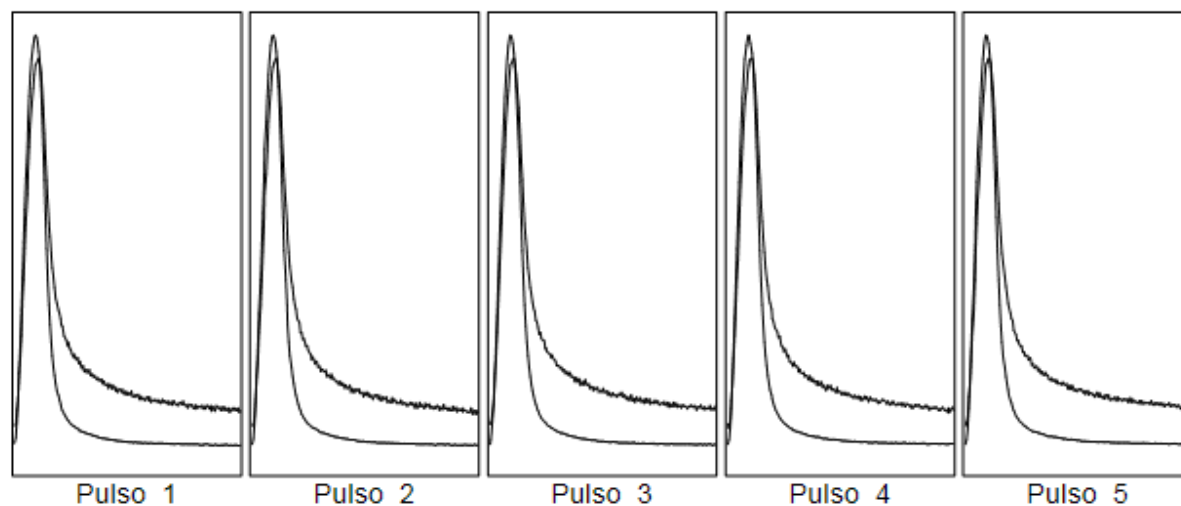
Frecuencia de lectura del transductor: 1000 Hz

Ensayo sobre el primer diámetro



Resultados	Deseada	Real Min	Real Max	Media
Fuerza vertical (kN)		3,98	4,04	4,01
Esfuerzo horizontal (kPa)		401,6	407,2	404,7
Factor de area de carga	0.60	0,58	0,59	0,58
Deformación horizontal (μm)	5,0	5,0	5,0	5,0
Tiempo de carga (subida) (ms):	31	34,0	35,0	34,2
Módulo resiliente medido (MPa)		7848	7945	7877
Módulo rediliente ajustado (MPa)		7756	7878	7797

Ensayo sobre el segundo diámetro



Resultados	Deseada	Real Min	Real Max	Media
Fuerza vertical (kN)		3,94	3,98	3,96
Esfuerzo horizontal (kPa)		397,2	401,9	399,6
Factor de area de carga	0.60	0,59	0,60	0,59
Deformación horizontal (μm)	5,0	4,9	5,0	5,0
Tiempo de carga (subida) (ms):	31	32,0	34,0	32,8
Módulo resiliente medido (MPa)		7818	7920	7861
Módulo rediliente ajustado (MPa)		7762	7924	7826

Media de los dos ensayos

Tiempo de carga (subida) (ms):	:	33,5
Deformación horizontal (μm):	:	5,0
Deformación horizontal (%):	:	0,0050
Módulo resiliente medido (MPa):	:	7869
Módulo rediliente ajustado (MPa):	:	7812

Diferencia en porcentaje entre módulos resilientes ajustados medios = (-0,4)

1.3.2. Espécimen 2

Diámetro de la probeta: 100 mm

Espesor de La probeta: 62.8 mm

Densidad aparente: 2250 (kg/m³)

Coefficiente de Poisson: 0.35

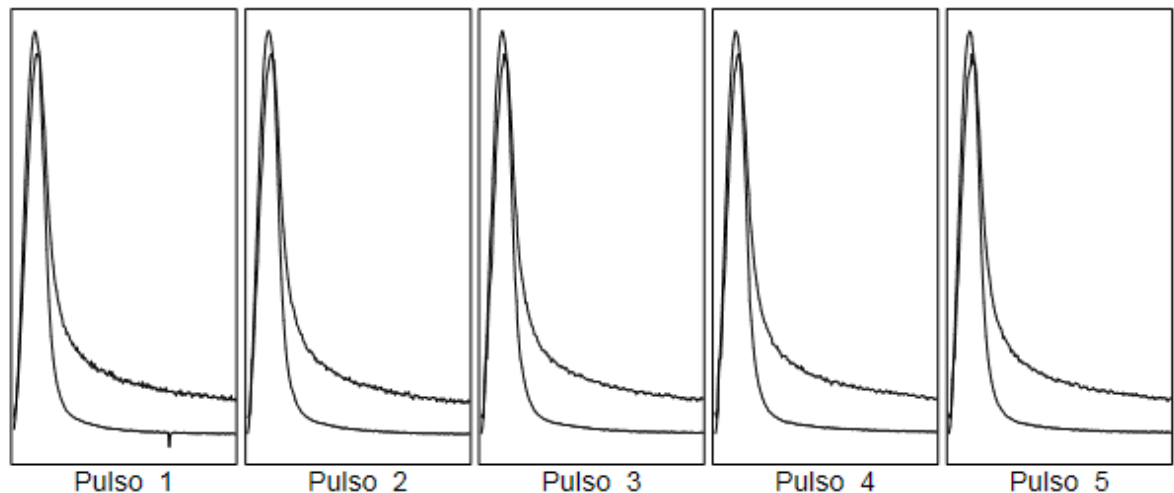
Tiempo de subida deseado (ms): 31 ms

Deformación horizontal deseada (microns): 5 μ m

Número de pulsos de preparación: 10

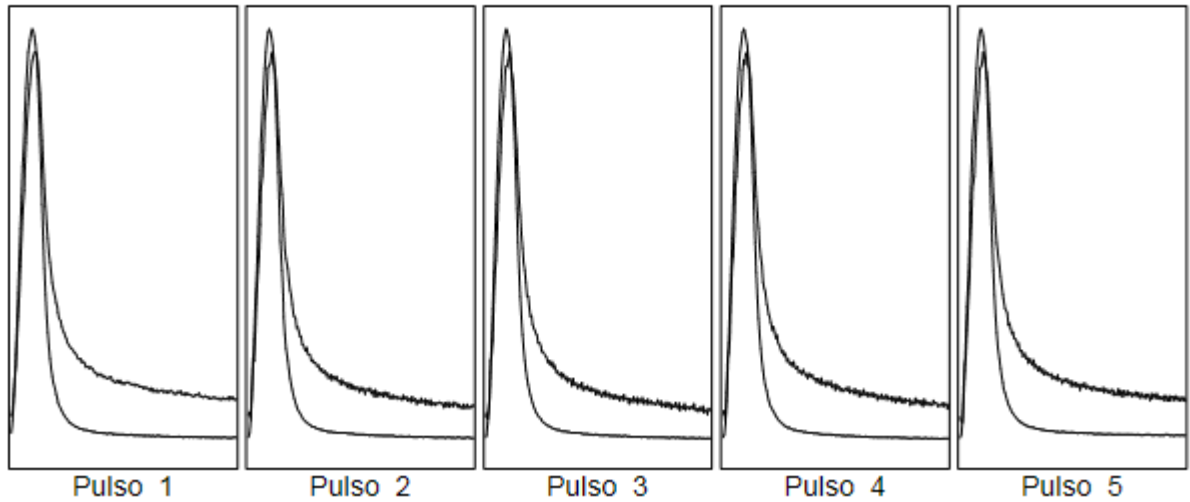
Frecuencia de lectura del transductor: 1000 Hz

Ensayo sobre el primer diámetro



Resultados	Deseada	Real Min	Real Max	Media
Fuerza vertical (kN)		3,67	3,77	3,73
Esfuerzo horizontal (kPa)		371,7	382,2	378,1
Factor de area de carga	0.60	0,58	0,58	0,58
Deformación horizontal (μ m)	5,0	5,0	5,3	5,2
Tiempo de carga (subida) (ms):	31	34,0	35,0	34,8
Módulo resiliente medido (MPa)		7073	7206	7135
Módulo rediliente ajustado (MPa)		7005	7114	7056

Ensayo sobre el segundo diámetro



Resultados	Deseada	Real Min	Real Max	Media
Fuerza vertical (kN)		3,59	3,67	3,63
Esfuerzo horizontal (kPa)		364,3	371,7	368,0
Factor de area de carga	0,60	0,58	0,59	0,59
Deformación horizontal (μm)	5,0	4,9	5,1	5,0
Tiempo de carga (subida) (ms):	31	33,0	34,0	33,2
Módulo resiliente medido (MPa)		7065	7172	7114
Módulo rediliente ajustado (MPa)		7035	7097	7069

Media de los dos ensayos

Tiempo de carga (subida) (ms):	:	34,0
Deformación horizontal (μm)	:	5,1
Deformación horizontal (%)	:	0,0051
Módulo resiliente medido (MPa)	:	7125
Módulo rediliente ajustado (MPa)	:	7063

Diferencia en porcentaje entre módulos resilientes ajustados medios = (-0,2)

1.3.3. Espécimen 3

Diámetro de la probeta: 100 mm

Espesor de La probeta: 62.6 mm

Densidad aparente: 2252 (kg/m³)

Coefficiente de Poisson: 0.35

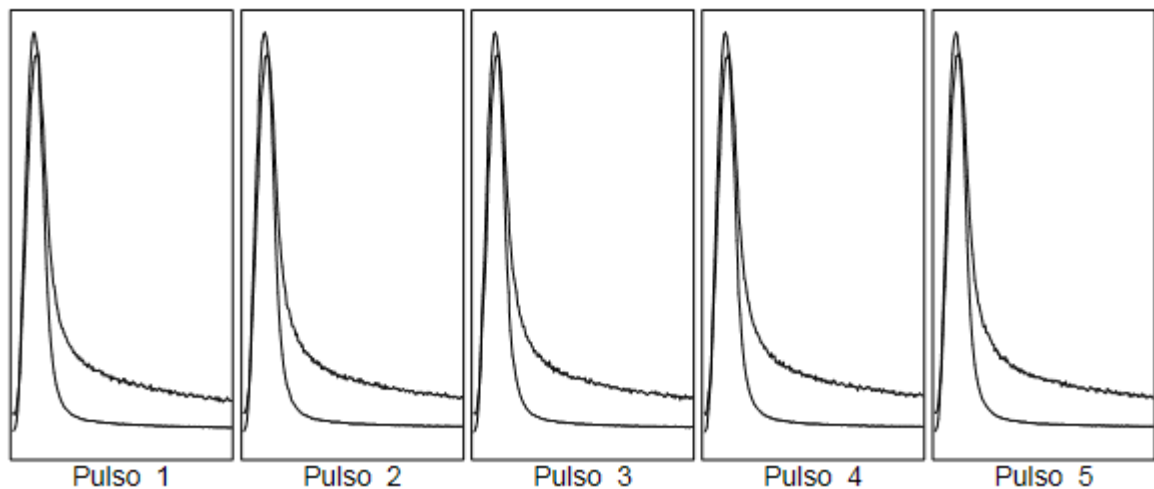
Tiempo de subida deseado (ms): 31 ms

Deformación horizontal deseada (microns): 5 μm

Número de pulsos de preparación: 10

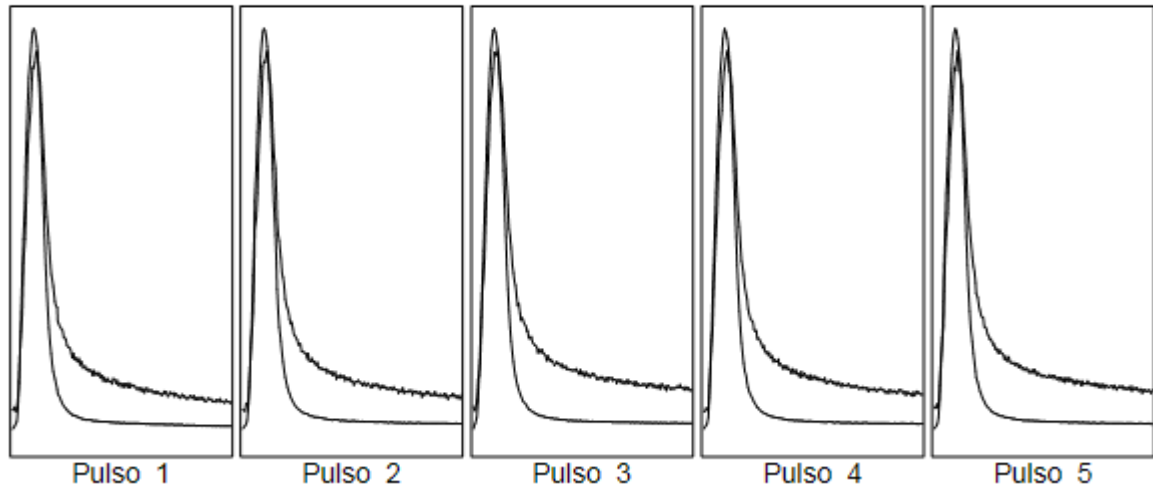
Frecuencia de lectura del transductor: 1000 Hz

Ensayo sobre el primer diámetro



Resultados	Deseada	Real Min	Real Max	Media
Fuerza vertical (kN)		4,34	4,44	4,40
Esfuerzo horizontal (kPa)		441,8	451,4	447,2
Factor de area de carga	0,60	0,57	0,59	0,58
Deformación horizontal (μm)	5,0	4,9	5,1	5,0
Tiempo de carga (subida) (ms):	31	30,0	31,0	30,4
Módulo resiliente medido (MPa)		8607	8691	8652
Módulo rediliente ajustado (MPa)		8475	8639	8539

Ensayo sobre el segundo diámetro



Resultados	Deseada	Real Min	Real Max	Media
Fuerza vertical (kN)		4,20	4,31	4,27
Esfuerzo horizontal (kPa)		426,7	438,6	434,1
Factor de area de carga	0,60	0,58	0,61	0,60
Deformación horizontal (μm)	5,0	4,8	5,1	5,0
Tiempo de carga (subida) (ms):	31	29,0	32,0	29,8
Módulo resiliente medido (MPa)		8363	8624	8478
Módulo rediliente ajustado (MPa)		8326	8589	8448

Media de los dos ensayos

Tiempo de carga (subida) (ms):	:	30,1
Deformación horizontal (μm):	:	5,0
Deformación horizontal (%):	:	0,0050
Módulo resiliente medido (MPa):	:	8565
Módulo rediliente ajustado (MPa):	:	8494

Diferencia en porcentaje entre módulos resilientes ajustados medios = (1)

2. Temperatura: 20°C

2.1. Frecuencia: 2.5 HZ

2.1.1. Espécimen 1

Diámetro de la probeta: 100 mm

Espesor de La probeta: 63.1 mm

Densidad aparente: 2246 (kg/m³)

Coefficiente de Poisson: 0.35

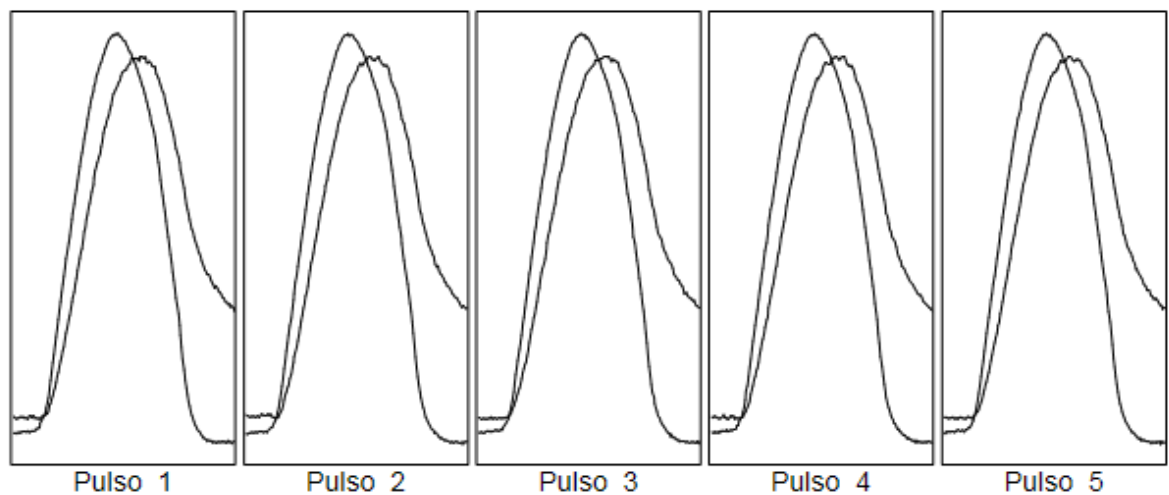
Tiempo de subida deseado (ms): 125 ms

Deformación horizontal deseada (microns): 5 μm

Número de pulsos de preparación: 10

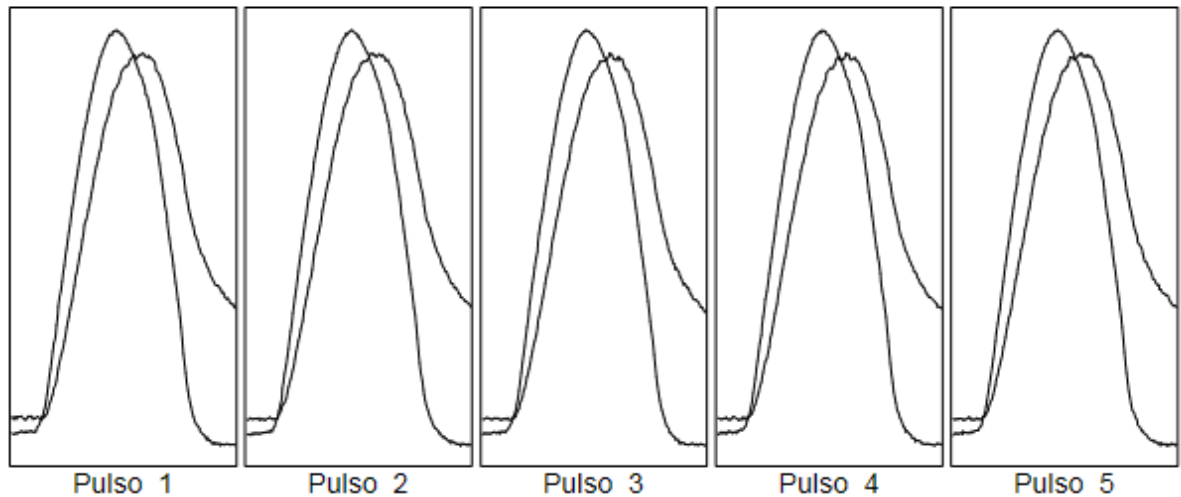
Frecuencia de lectura del transductor: 1000 Hz

Ensayo sobre el primer diámetro



Resultados	Deseada	Real Min	Real Max	Media
Fuerza vertical (kN)		0,98	0,99	0,98
Esfuerzo horizontal (kPa)		98,3	99,4	99,1
Factor de area de carga	0.60	0,60	0,61	0,60
Deformación horizontal (μm)	5,0	5,0	5,1	5,1
Tiempo de carga (subida) (ms):	125	125,0	130,0	128,2
Módulo resiliente medido (MPa)		1891	1916	1901
Módulo rediliente ajustado (MPa)		1896	1917	1904

Ensayo sobre el segundo diámetro



Resultados	Deseada	Real Min	Real Max	Media
Fuerza vertical (kN)		0,97	0,98	0,97
Esfuerzo horizontal (kPa)		97,8	98,7	98,2
Factor de area de carga	0.60	0,60	0,61	0,61
Deformación horizontal (μm)	5,0	4,9	5,1	5,0
Tiempo de carga (subida) (ms):	125	125,0	134,0	129,6
Módulo resiliente medido (MPa)		1890	1939	1909
Módulo rediliente ajustado (MPa)		1897	1944	1916

Media de los dos ensayos

Tiempo de carga (subida) (ms):	:	128,9
Deformación horizontal (μm):	:	5,0
Deformación horizontal (%):	:	0,0050
Módulo resiliente medido (MPa):	:	1905
Módulo rediliente ajustado (MPa):	:	1910

Diferencia en porcentaje entre módulos resilientes ajustados medios = (-0,6)

2.1.2. Espécimen 2

Diámetro de la probeta: 100 mm

Espesor de La probeta: 62.8 mm

Densidad aparente: 2250 (kg/m³)

Coefficiente de Poisson: 0.35

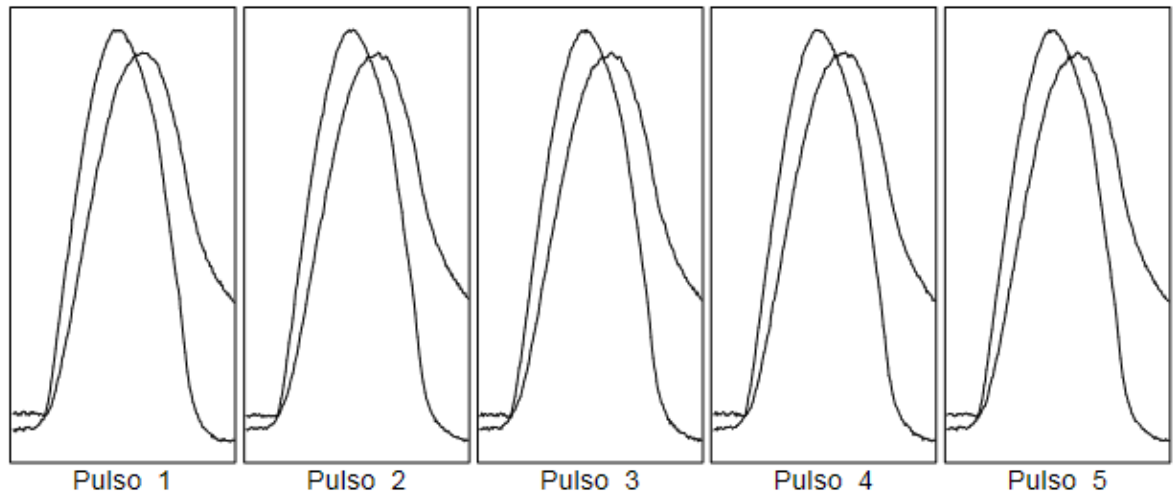
Tiempo de subida deseado (ms): 125 ms

Deformación horizontal deseada (microns): 5 μm

Número de pulsos de preparación: 10

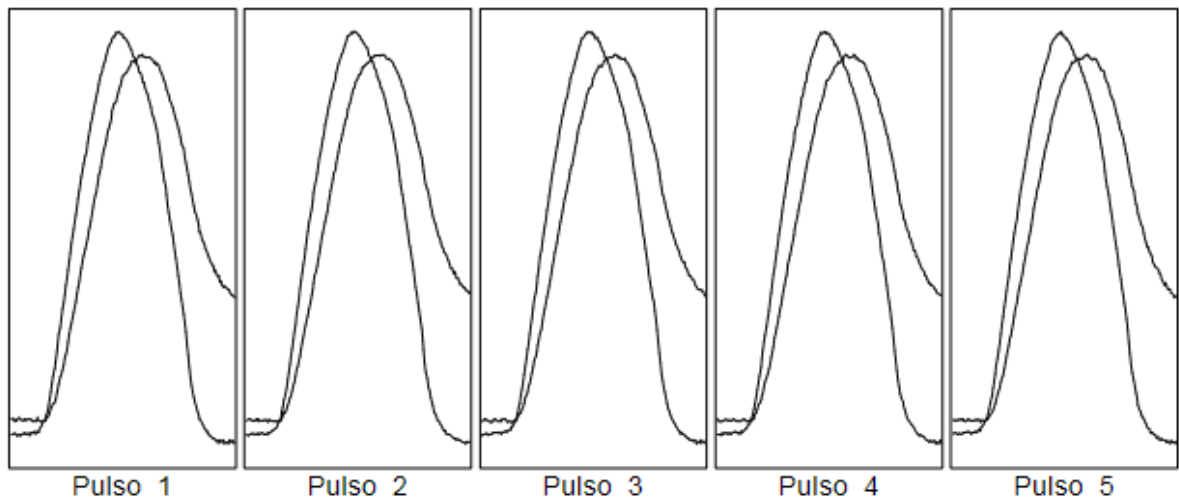
Frecuencia de lectura del transductor: 1000 Hz

Ensayo sobre el primer diámetro



Resultados	Deseada	Real Min	Real Max	Media
Fuerza vertical (kN)		0,86	0,88	0,87
Esfuerzo horizontal (kPa)		87,2	88,9	88,5
Factor de area de carga	0.60	0,59	0,62	0,60
Deformación horizontal (μm)	5,0	5,0	5,2	5,1
Tiempo de carga (subida) (ms):	125	125,0	132,0	127,8
Módulo resiliente medido (MPa)		1672	1702	1684
Módulo rediliente ajustado (MPa)		1672	1703	1684

Ensayo sobre el segundo diámetro



Resultados	Deseada	Real Min	Real Max	Media
Fuerza vertical (kN)		0,86	0,88	0,87
Esfuerzo horizontal (kPa)		87,2	88,8	88,3
Factor de area de carga	0.60	0,58	0,60	0,59
Deformación horizontal (μm)	5,0	5,0	5,1	5,1
Tiempo de carga (subida) (ms):	125	124,0	130,0	127,0
Módulo resiliente medido (MPa)		1688	1704	1693
Módulo rediliente ajustado (MPa)		1677	1704	1685

Media de los dos ensayos

Tiempo de carga (subida) (ms):	:	127,4
Deformación horizontal (μm)	:	5,1
Deformación horizontal (%)	:	0,0051
Módulo resiliente medido (MPa)	:	1689
Módulo rediliente ajustado (MPa)	:	1685

Diferencia en porcentaje entre módulos resilientes ajustados medios = (-0,06)

2.1.3. Espécimen 3

Diámetro de la probeta: 100 mm

Espesor de La probeta: 62.6 mm

Densidad aparente: 2252 (kg/m³)

Coefficiente de Poisson: 0.35

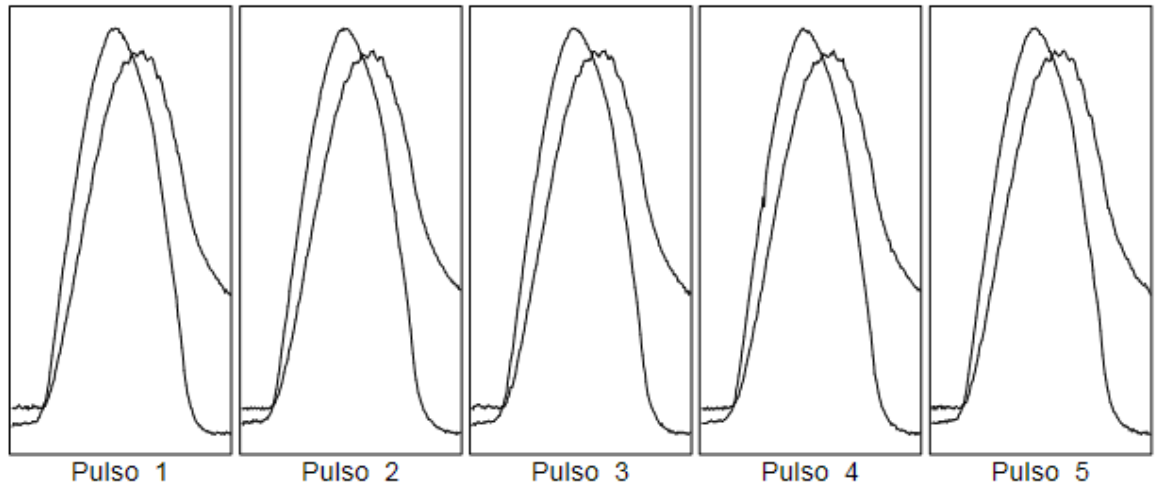
Tiempo de subida deseado (ms): 125 ms

Deformación horizontal deseada (microns): 5 μ m

Número de pulsos de preparación: 10

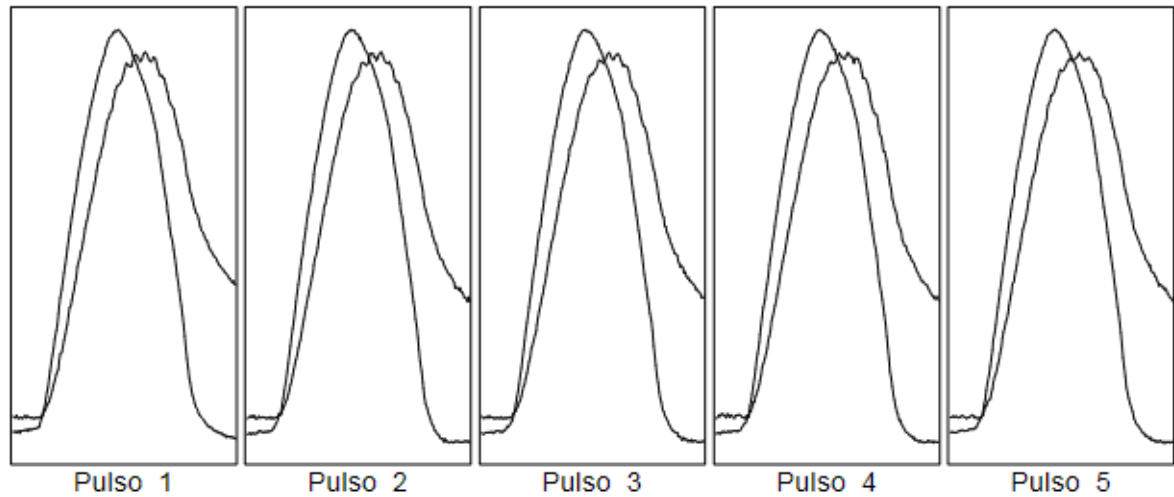
Frecuencia de lectura del transductor: 1000 Hz

Ensayo sobre el primer diámetro



Resultados	Deseada	Real Min	Real Max	Media
Fuerza vertical (kN)		0,97	0,99	0,98
Esfuerzo horizontal (kPa)		98,6	100,5	99,8
Factor de area de carga	0.60	0,60	0,61	0,60
Deformación horizontal (μ m)	5,0	5,0	5,1	5,1
Tiempo de carga (subida) (ms):	125	123,0	131,0	126,0
Módulo resiliente medido (MPa)		1904	1940	1917
Módulo rediliente ajustado (MPa)		1899	1935	1919

Ensayo sobre el segundo diámetro



Resultados	Deseada	Real Min	Real Max	Media
Fuerza vertical (kN)		0,97	1,01	0,99
Esfuerzo horizontal (kPa)		98,3	102,8	100,1
Factor de area de carga	0,60	0,59	0,61	0,60
Deformación horizontal (μm)	5,0	5,0	5,3	5,1
Tiempo de carga (subida) (ms):	125	124,0	137,0	128,6
Módulo resiliente medido (MPa)		1889	1920	1908
Módulo rediliente ajustado (MPa)		1884	1923	1906

Media de los dos ensayos

Tiempo de carga (subida) (ms):	: 127,3
Deformación horizontal (μm):	: 5,1
Deformación horizontal (%):	: 0,0051
Módulo resiliente medido (MPa):	: 1913
Módulo rediliente ajustado (MPa):	: 1913

Diferencia en porcentaje entre módulos resilientes ajustados medios = (0,7)

2.2. Frecuencia: 5 HZ

2.2.1. Espécimen 1

Diámetro de la probeta: 100 mm

Espesor de La probeta: 63.1 mm

Densidad aparente: 2246 (kg/m³)

Coefficiente de Poisson: 0.35

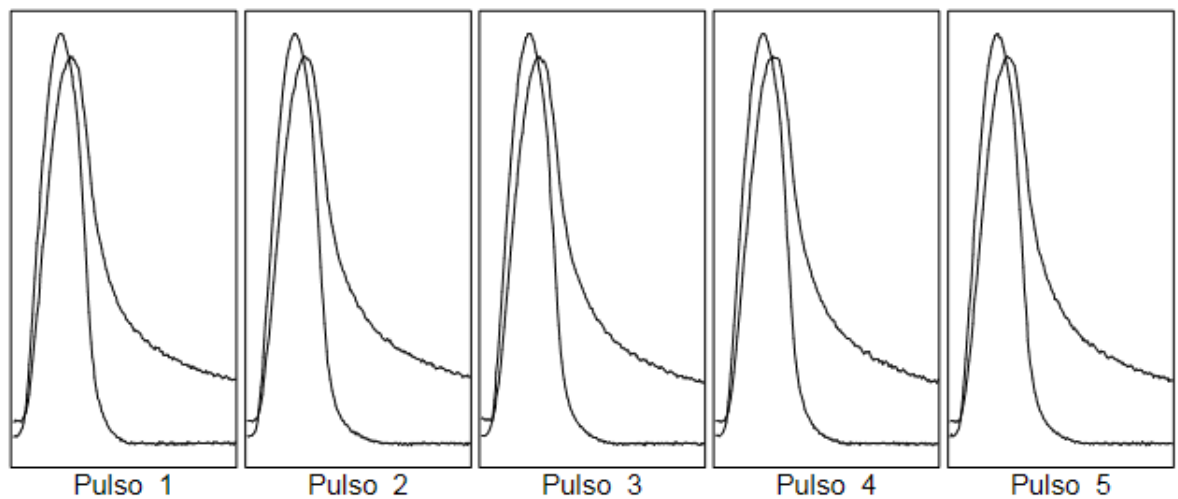
Tiempo de subida deseado (ms): 63 ms

Deformación horizontal deseada (microns): 5 μ m

Número de pulsos de preparación: 10

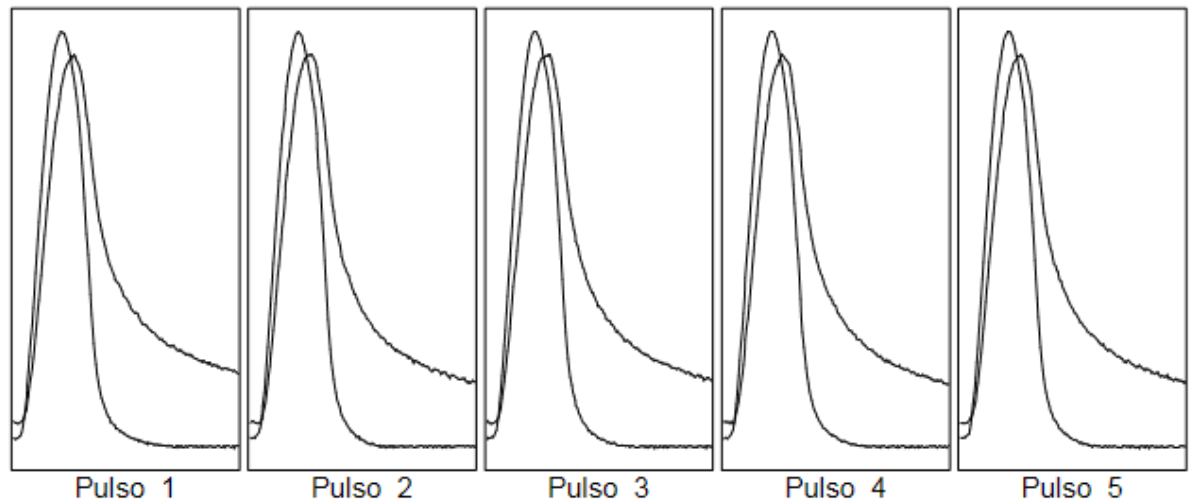
Frecuencia de lectura del transductor: 1000 Hz

Ensayo sobre el primer diámetro



Resultados	Deseada	Real Min	Real Max	Media
Fuerza vertical (kN)		1,16	1,19	1,18
Esfuerzo horizontal (kPa)		116,9	119,7	118,8
Factor de area de carga	0,60	0,59	0,60	0,60
Deformación horizontal (μm)	5,0	5,0	5,1	5,0
Tiempo de carga (subida) (ms):	63	61,0	66,0	64,6
Módulo resiliente medido (MPa)		2280	2303	2292
Módulo rediliente ajustado (MPa)		2281	2301	2292

Ensayo sobre el segundo diámetro



Resultados	Deseada	Real Min	Real Max	Media
Fuerza vertical (kN)		1,18	1,19	1,18
Esfuerzo horizontal (kPa)		118,9	119,9	119,5
Factor de area de carga	0,60	0,58	0,61	0,59
Deformación horizontal (μm)	5,0	5,0	5,2	5,1
Tiempo de carga (subida) (ms):	63	64,0	68,0	65,4
Módulo resiliente medido (MPa)		2238	2296	2270
Módulo rediliente ajustado (MPa)		2244	2290	2263

Media de los dos ensayos

Tiempo de carga (subida) (ms):	:	65,0
Deformación horizontal (μm):	:	5,1
Deformación horizontal (%):	:	0,0051
Módulo resiliente medido (MPa):	:	2281
Módulo rediliente ajustado (MPa):	:	2278

Diferencia en porcentaje entre módulos resilientes ajustados medios = (1)

2.2.2. Espécimen 2

Diámetro de la probeta: 100 mm

Espesor de La probeta: 62.8 mm

Densidad aparente: 2250 (kg/m³)

Coefficiente de Poisson: 0.35

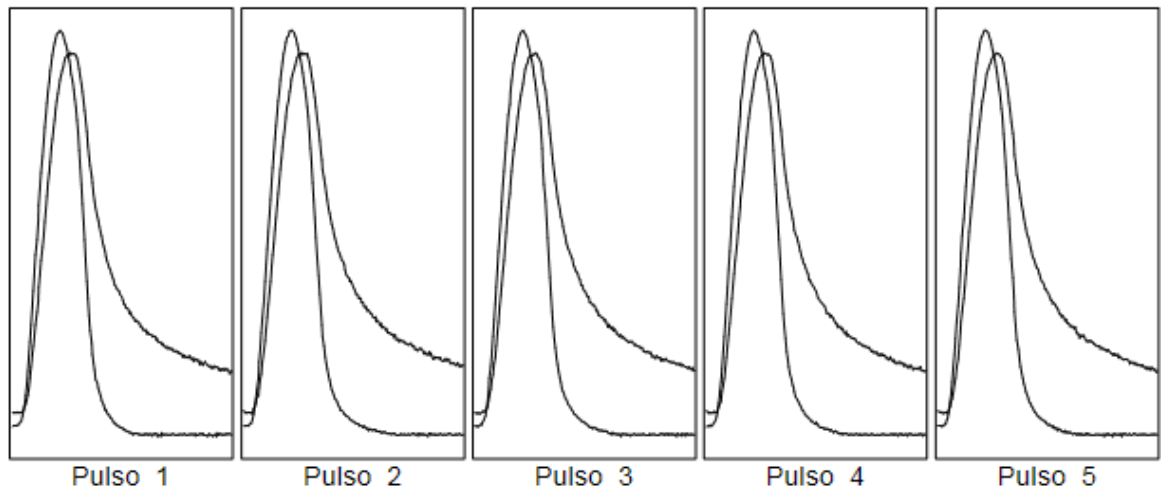
Tiempo de subida deseado (ms): 63 ms

Deformación horizontal deseada (microns): 5 μm

Número de pulsos de preparación: 10

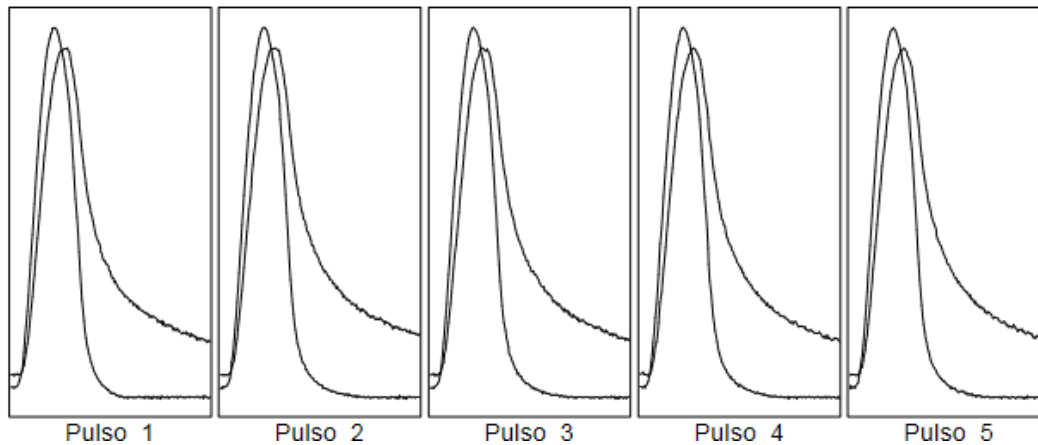
Frecuencia de lectura del transductor: 1000 Hz

Ensayo sobre el primer diámetro



Resultados	Deseada	Real Min	Real Max	Media
Fuerza vertical (kN)		1,06	1,09	1,08
Esfuerzo horizontal (kPa)		107,9	110,8	109,9
Factor de area de carga	0.60	0,60	0,61	0,60
Deformación horizontal (μm)	5,0	4,9	5,2	5,1
Tiempo de carga (subida) (ms):	63	62,0	67,0	64,6
Módulo resiliente medido (MPa)		2087	2141	2104
Módulo rediliente ajustado (MPa)		2085	2147	2106

Ensayo sobre el segundo diámetro



Resultados	Deseada	Real Min	Real Max	Media
Fuerza vertical (kN)		1,07	1,09	1,09
Esfuerzo horizontal (kPa)		108,0	110,8	110,1
Factor de area de carga	0.60	0,59	0,61	0,60
Deformación horizontal (μm)	5,0	5,0	5,2	5,1
Tiempo de carga (subida) (ms):	63	62,0	69,0	64,6
Módulo resiliente medido (MPa)		2076	2116	2088
Módulo rediliente ajustado (MPa)		2068	2121	2087

Media de los dos ensayos

Tiempo de carga (subida) (ms):	64,6
Deformación horizontal (μm):	5,1
Deformación horizontal (%):	0,0051
Módulo resiliente medido (MPa):	2096
Módulo rediliente ajustado (MPa):	2097

Diferencia en porcentaje entre módulos resilientes ajustados medios = (0,9)

2.2.3. Espécimen 3

Diámetro de la probeta: 100 mm

Espesor de La probeta: 62.6 mm

Densidad aparente: 2252 (kg/m³)

Coefficiente de Poisson: 0.35

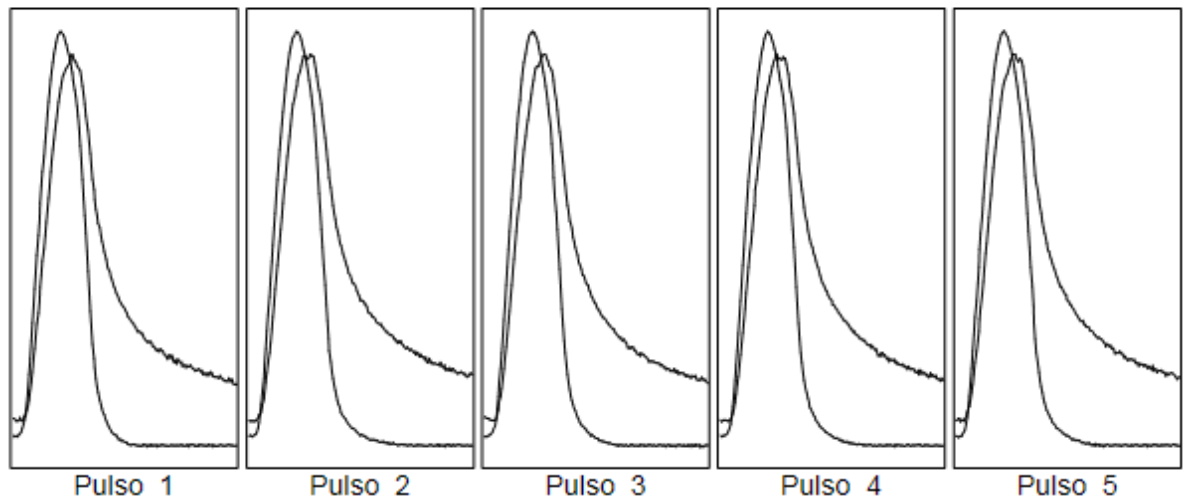
Tiempo de subida deseado (ms): 63 ms

Deformación horizontal deseada (microns): 5 µm

Número de pulsos de preparación: 10

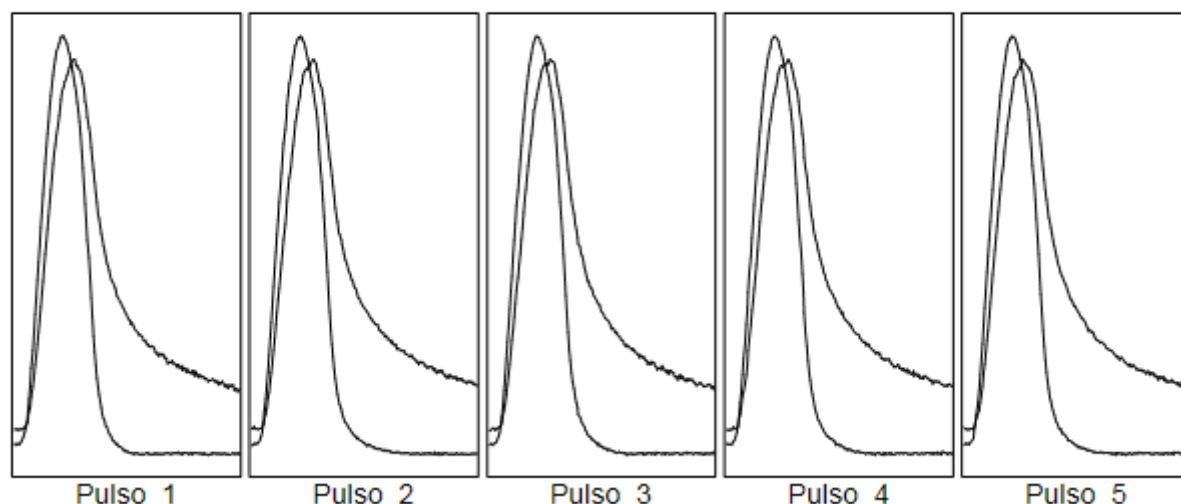
Frecuencia de lectura del transductor: 1000 Hz

Ensayo sobre el primer diámetro



Resultados	Deseada	Real Min	Real Max	Media
Fuerza vertical (kN)		1,20	1,23	1,22
Esfuerzo horizontal (kPa)		122,2	125,3	124,0
Factor de area de carga	0,60	0,59	0,60	0,60
Deformación horizontal (µm)	5,0	5,0	5,2	5,1
Tiempo de carga (subida) (ms):	63	62,0	65,0	63,8
Módulo resiliente medido (MPa)		2349	2400	2378
Módulo rediliente ajustado (MPa)		2347	2390	2372

Ensayo sobre el segundo diámetro



Resultados	Deseada	Real Min	Real Max	Media
Fuerza vertical (kN)		1,19	1,22	1,21
Esfuerzo horizontal (kPa)		120,7	123,9	122,7
Factor de area de carga	0,60	0,59	0,60	0,60
Deformación horizontal (μm)	5,0	4,9	5,1	5,1
Tiempo de carga (subida) (ms):	63	63,0	68,0	64,4
Módulo resiliente medido (MPa)		2353	2376	2363
Módulo rediliente ajustado (MPa)		2350	2375	2360

Media de los dos ensayos

Tiempo de carga (subida) (ms):	:	64,1
Deformación horizontal (μm)	:	5,1
Deformación horizontal (%)	:	0,0051
Módulo resiliente medido (MPa)	:	2371
Módulo rediliente ajustado (MPa)	:	2366

Diferencia en porcentaje entre módulos resilientes ajustados medios = (0,5)

2.3. Frecuencia: 10 HZ

2.3.1. Espécimen 1

Diámetro de la probeta: 100 mm

Espesor de La probeta: 63.1 mm

Densidad aparente: 2246 (kg/m³)

Coefficiente de Poisson: 0.35

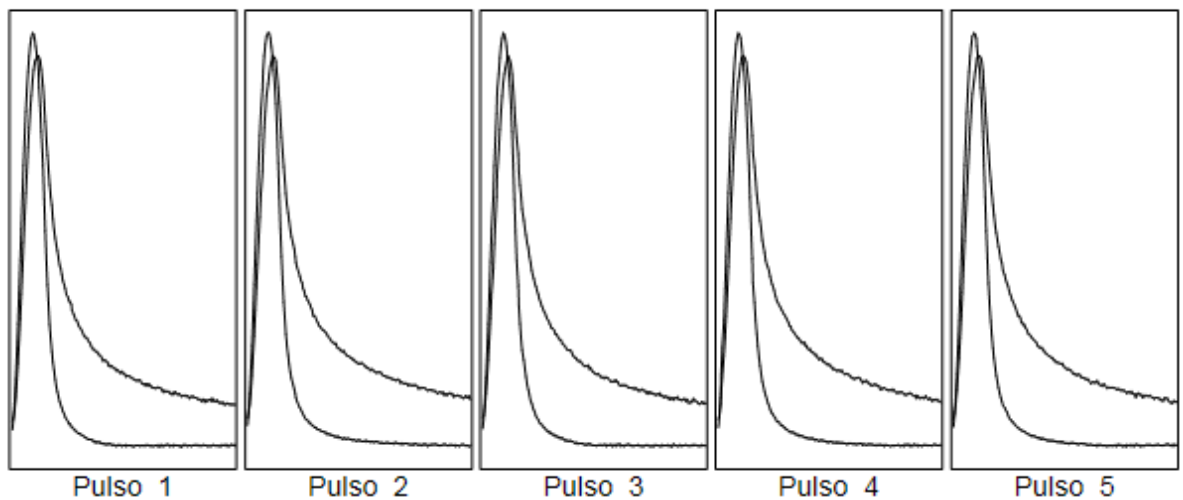
Tiempo de subida deseado (ms): 31 ms

Deformación horizontal deseada (microns): 5 μm

Número de pulsos de preparación: 10

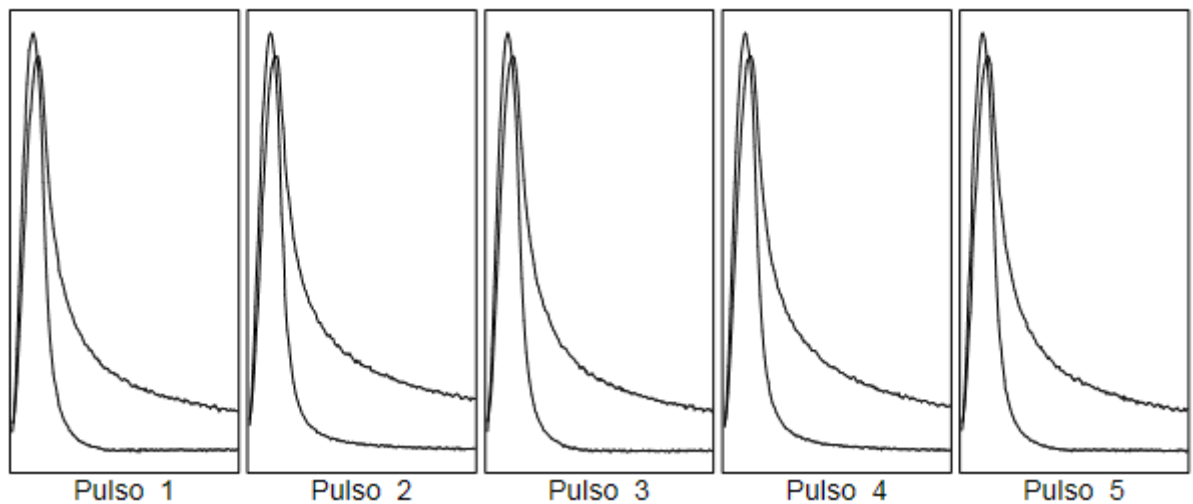
Frecuencia de lectura del transductor: 1000 Hz

Ensayo sobre el primer diámetro



Resultados	Deseada	Real Min	Real Max	Media
Fuerza vertical (kN)		1,42	1,45	1,44
Esfuerzo horizontal (kPa)		143,5	146,3	145,3
Factor de area de carga	0.60	0,58	0,59	0,59
Deformación horizontal (μm)	5,0	5,0	5,2	5,1
Tiempo de carga (subida) (ms):	31	34,0	36,0	34,4
Módulo resiliente medido (MPa)		2758	2815	2775
Módulo rediliente ajustado (MPa)		2737	2793	2755

Ensayo sobre el segundo diámetro



Resultados	Deseada	Real Min	Real Max	Media
Fuerza vertical (kN)		1,40	1,44	1,42
Esfuerzo horizontal (kPa)		141,6	144,9	143,1
Factor de area de carga	0.60	0,59	0,61	0,60
Deformación horizontal (μm)	5,0	5,0	5,2	5,1
Tiempo de carga (subida) (ms):	31	33,0	35,0	34,6
Módulo resiliente medido (MPa)		2737	2784	2757
Módulo rediliente ajustado (MPa)		2731	2803	2753

Media de los dos ensayos

Tiempo de carga (subida) (ms):	:	34,5
Deformación horizontal (μm):	:	5,1
Deformación horizontal (%):	:	0,0051
Módulo resiliente medido (MPa):	:	2766
Módulo rediliente ajustado (MPa):	:	2754

Diferencia en porcentaje entre módulos resilientes ajustados medios = (0,07)

2.3.2. Espécimen 2

Diámetro de la probeta: 100 mm

Espesor de La probeta: 62.8 mm

Densidad aparente: 2250 (kg/m³)

Coefficiente de Poisson: 0.35

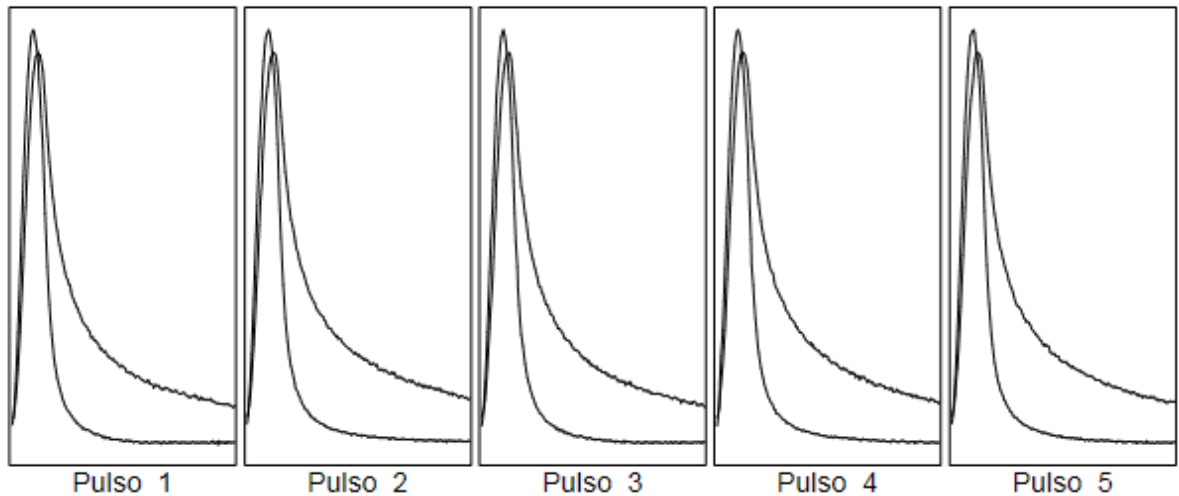
Tiempo de subida deseado (ms): 31 ms

Deformación horizontal deseada (microns): 5 μm

Número de pulsos de preparación: 10

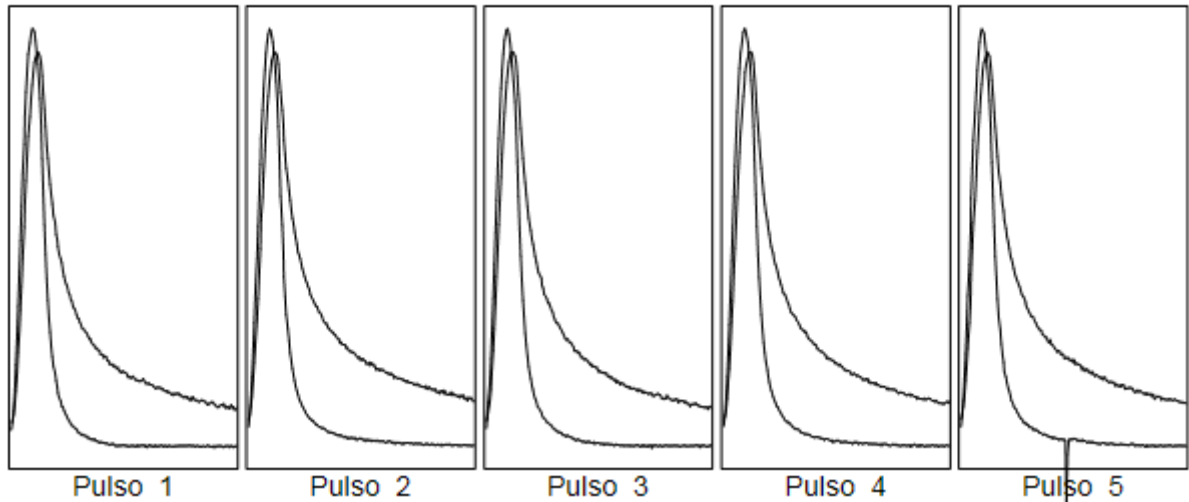
Frecuencia de lectura del transductor: 1000 Hz

Ensayo sobre el primer diámetro



Resultados	Deseada	Real Min	Real Max	Media
Fuerza vertical (kN)		1,31	1,35	1,34
Esfuerzo horizontal (kPa)		132,9	136,6	135,6
Factor de area de carga	0.60	0,57	0,60	0,58
Deformación horizontal (μm)	5,0	5,0	5,3	5,2
Tiempo de carga (subida) (ms):	31	33,0	36,0	34,8
Módulo resiliente medido (MPa)		2530	2588	2562
Módulo rediliente ajustado (MPa)		2496	2581	2542

Ensayo sobre el segundo diámetro



Resultados	Deseada	Real Min	Real Max	Media
Fuerza vertical (kN)		1,29	1,32	1,31
Esfuerzo horizontal (kPa)		130,8	134,2	133,0
Factor de area de carga	0,60	0,58	0,60	0,59
Deformación horizontal (µm)	5,0	5,0	5,2	5,1
Tiempo de carga (subida) (ms):	31	33,0	35,0	33,8
Módulo resiliente medido (MPa)		2521	2559	2537
Módulo resiliente ajustado (MPa)		2505	2561	2525

Media de los dos ensayos

Tiempo de carga (subida) (ms):	:	34,3
Deformación horizontal (µm)	:	5,1
Deformación horizontal (%)	:	0,0051
Módulo resiliente medido (MPa)	:	2550
Módulo resiliente ajustado (MPa)	:	2534

Diferencia en porcentaje entre módulos resilientes ajustados medios = (0,7)

2.3.3. Espécimen 3

Diámetro de la probeta: 100 mm

Espesor de La probeta: 62.6 mm

Densidad aparente: 2252 (kg/m³)

Coefficiente de Poisson: 0.35

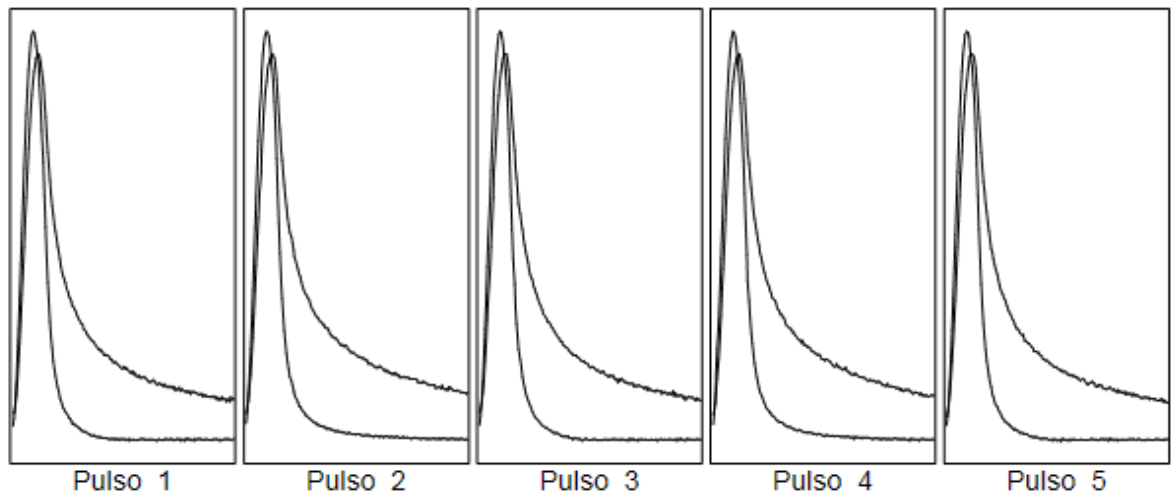
Tiempo de subida deseado (ms): 31 ms

Deformación horizontal deseada (microns): 5 μm

Número de pulsos de preparación: 10

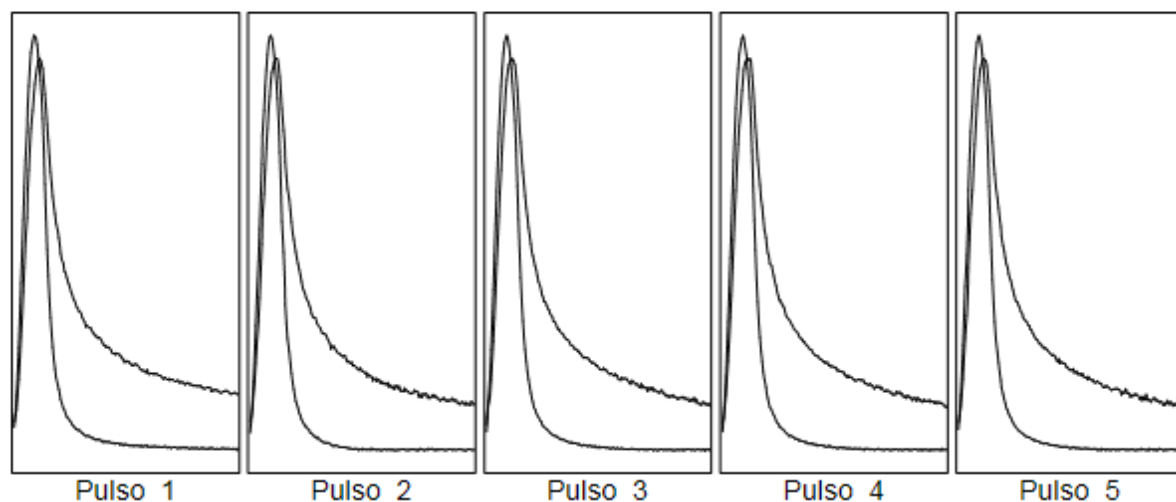
Frecuencia de lectura del transductor: 1000 Hz

Ensayo sobre el primer diámetro



Resultados	Deseada	Real Min	Real Max	Media
Fuerza vertical (kN)		1,48	1,51	1,49
Esfuerzo horizontal (kPa)		150,2	153,9	151,9
Factor de area de carga	0.60	0,57	0,61	0,59
Deformación horizontal (μm)	5,0	5,0	5,2	5,1
Tiempo de carga (subida) (ms):	31	33,0	36,0	34,2
Módulo resiliente medido (MPa)		2902	2917	2910
Módulo rediliente ajustado (MPa)		2858	2930	2891

Ensayo sobre el segundo diámetro



Resultados	Deseada	Real Min	Real Max	Media
Fuerza vertical (kN)		1,47	1,49	1,48
Esfuerzo horizontal (kPa)		149,6	151,8	150,9
Factor de area de carga	0,60	0,56	0,59	0,58
Deformación horizontal (μm)	5,0	5,0	5,1	5,0
Tiempo de carga (subida) (ms):	31	33,0	40,0	35,2
Módulo resiliente medido (MPa)		2906	2926	2916
Módulo rediliente ajustado (MPa)		2851	2906	2886

Media de los dos ensayos

Tiempo de carga (subida) (ms):	:	34,7
Deformación horizontal (μm)	:	5,1
Deformación horizontal (%)	:	0,0051
Módulo resiliente medido (MPa)	:	2913
Módulo rediliente ajustado (MPa)	:	2889

Diferencia en porcentaje entre módulos resilientes ajustados medios = (0,2)

3. Temperatura: 40°C

3.1. Frecuencia: 2.5 HZ

3.1.1. Espécimen 1

Diámetro de la probeta: 100 mm

Espesor de La probeta: 63.1 mm

Densidad aparente: 2246 (kg/m³)

Coefficiente de Poisson: 0.35

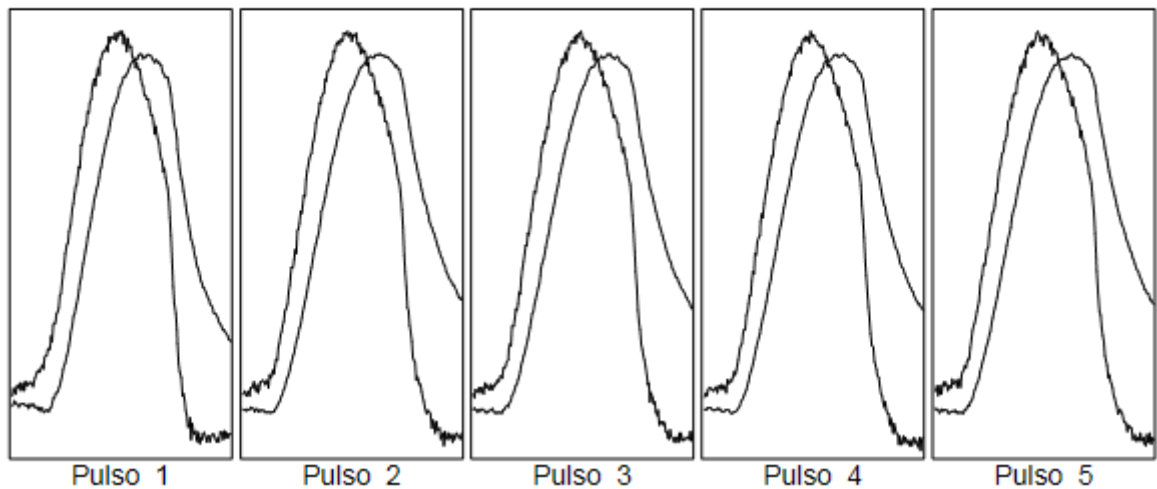
Tiempo de subida deseado (ms): 125 ms

Deformación horizontal deseada (microns): 5 μm

Número de pulsos de preparación: 10

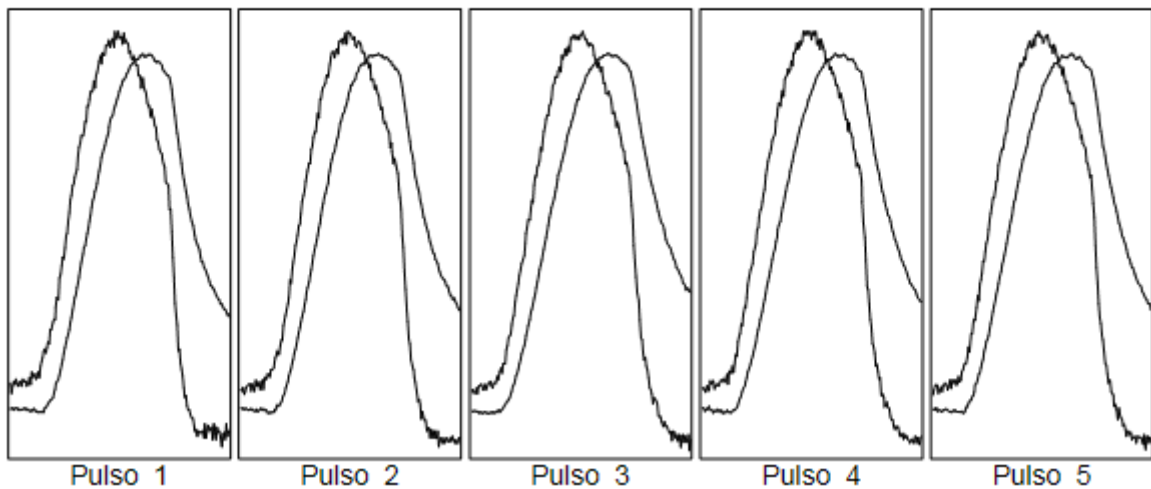
Frecuencia de lectura del transductor: 1000 Hz

Ensayo sobre el primer diámetro



Resultados	Deseada	Real Min	Real Max	Media
Fuerza vertical (kN)		0,17	0,21	0,20
Esfuerzo horizontal (kPa)		17,3	20,8	19,8
Factor de area de carga	0,60	0,59	0,63	0,60
Deformación horizontal (μm)	5,0	5,1	6,6	6,2
Tiempo de carga (subida) (ms):	125	123,0	140,0	131,0
Módulo resiliente medido (MPa)		305	328	311
Módulo rediliente ajustado (MPa)		304	331	312

Ensayo sobre el segundo diámetro



Resultados	Deseada	Real Min	Real Max	Media
Fuerza vertical (kN)		0,18	0,20	0,19
Esfuerzo horizontal (kPa)		17,8	20,2	19,1
Factor de area de carga	0,60	0,59	0,62	0,60
Deformación horizontal (μm)	5,0	5,5	6,5	6,1
Tiempo de carga (subida) (ms):	125	119,0	141,0	131,8
Módulo resiliente medido (MPa)		297	316	307
Módulo rediliente ajustado (MPa)		298	317	307

Media de los dos ensayos

Tiempo de carga (subida) (ms):	:	131,4
Deformación horizontal (μm):	:	6,1
Deformación horizontal (%):	:	0,0061
Módulo resiliente medido (MPa):	:	309
Módulo rediliente ajustado (MPa):	:	310

Diferencia en porcentaje entre módulos resilientes ajustados medios = (2)

3.1.2. Espécimen 2

Diámetro de la probeta: 100 mm

Espesor de La probeta: 62.8 mm

Densidad aparente: 2250 (kg/m³)

Coefficiente de Poisson: 0.35

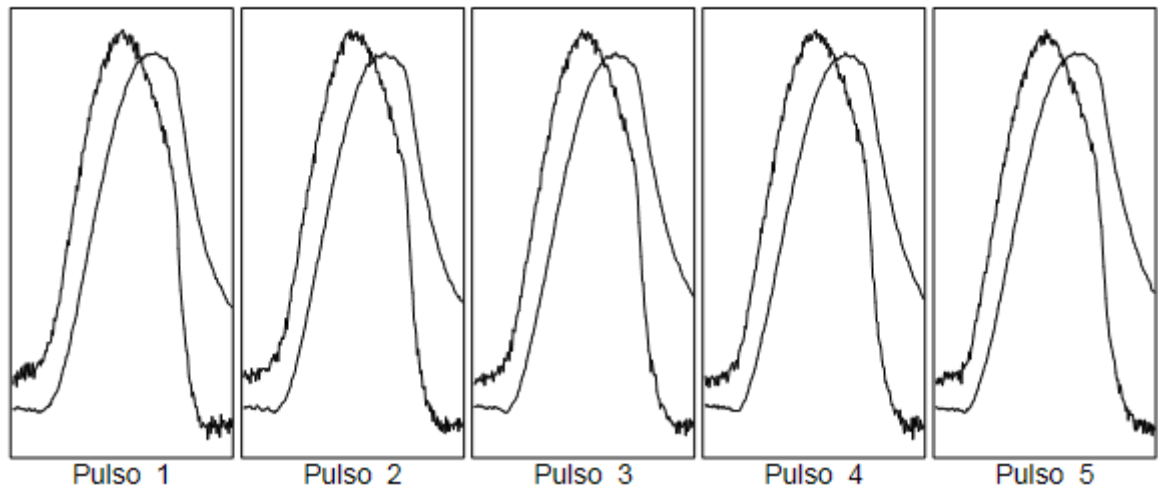
Tiempo de subida deseado (ms): 125 ms

Deformación horizontal deseada (microns): 5 μm

Número de pulsos de preparación: 10

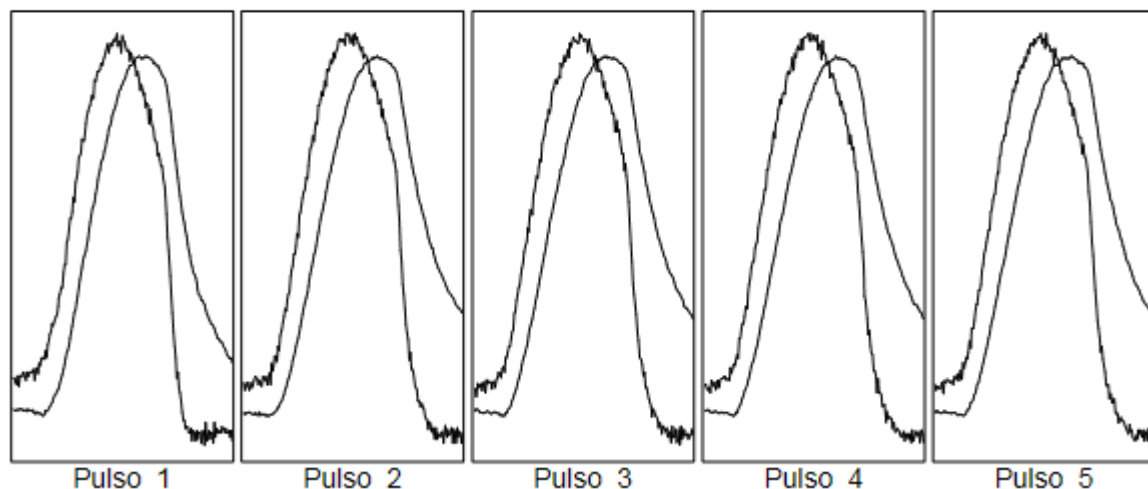
Frecuencia de lectura del transductor: 1000 Hz

Ensayo sobre el primer diámetro



Resultados	Deseada	Real Min	Real Max	Media
Fuerza vertical (kN)		0,15	0,17	0,16
Esfuerzo horizontal (kPa)		15,2	17,5	16,4
Factor de area de carga	0.60	0,58	0,60	0,60
Deformación horizontal (μm)	5,0	5,7	6,7	6,3
Tiempo de carga (subida) (ms):	125	119,0	141,0	131,6
Módulo resiliente medido (MPa)		249	260	254
Módulo rediliente ajustado (MPa)		249	260	254

Ensayo sobre el segundo diámetro



Resultados	Deseada	Real Min	Real Max	Media
Fuerza vertical (kN)		0,14	0,17	0,16
Esfuerzo horizontal (kPa)		14,5	17,3	16,6
Factor de area de carga	0.60	0,59	0,63	0,61
Deformación horizontal (μm)	5,0	5,1	6,7	6,4
Tiempo de carga (subida) (ms):	125	109,0	141,0	124,6
Módulo resiliente medido (MPa)		247	275	255
Módulo rediliente ajustado (MPa)		247	277	255

Media de los dos ensayos

Tiempo de carga (subida) (ms) :	128,1
Deformación horizontal (μm) :	6,3
Deformación horizontal (%) :	0,0063
Módulo resiliente medido (MPa) :	255
Módulo rediliente ajustado (MPa) :	255

Diferencia en porcentaje entre módulos resilientes ajustados medios = (-0,4)

3.1.3. Espécimen 3

Diámetro de la probeta: 100 mm

Espesor de La probeta: 62.6 mm

Densidad aparente: 2252 (kg/m³)

Coefficiente de Poisson: 0.35

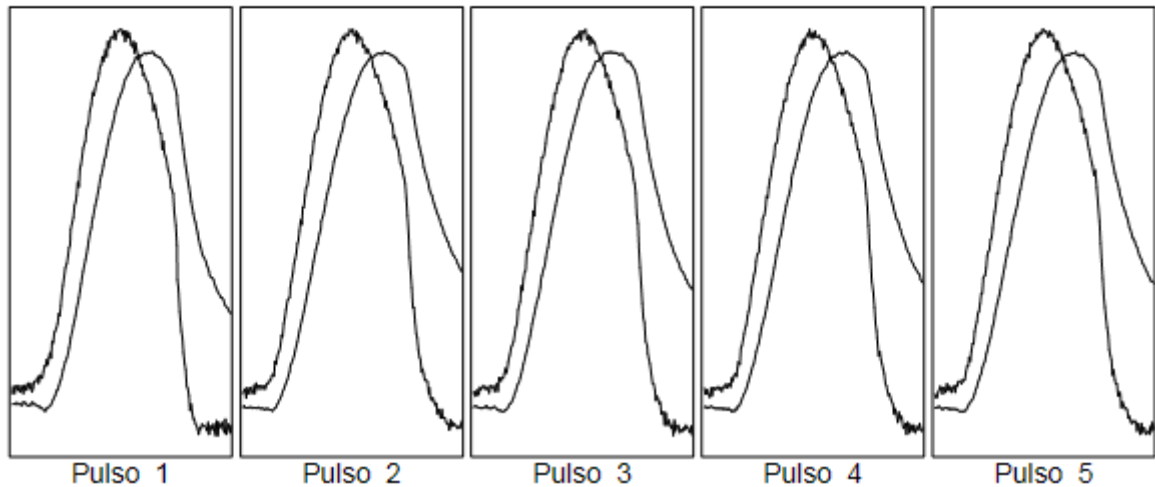
Tiempo de subida deseado (ms): 125 ms

Deformación horizontal deseada (microns): 5 μm

Número de pulsos de preparación: 10

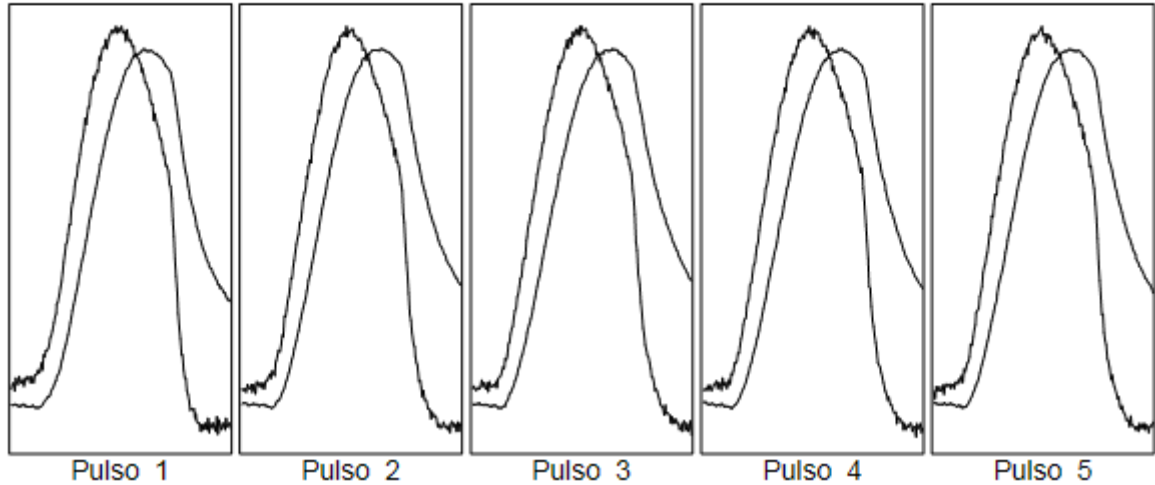
Frecuencia de lectura del transductor: 1000 Hz

Ensayo sobre el primer diámetro



Resultados	Deseada	Real Min	Real Max	Media
Fuerza vertical (kN)		0,19	0,22	0,21
Esfuerzo horizontal (kPa)		19,1	22,5	21,4
Factor de area de carga	0.60	0,58	0,62	0,60
Deformación horizontal (μm)	5,0	5,2	6,7	6,2
Tiempo de carga (subida) (ms):	125	130,0	142,0	134,0
Módulo resiliente medido (MPa)		327	361	339
Módulo rediliente ajustado (MPa)		325	363	339

Ensayo sobre el segundo diámetro



Resultados	Deseada	Real Min	Real Max	Media
Fuerza vertical (kN)		0,20	0,22	0,22
Esfuerzo horizontal (kPa)		20,0	22,6	21,8
Factor de area de carga	0.60	0,58	0,62	0,59
Deformación horizontal (μm)	5,0	5,5	6,5	6,2
Tiempo de carga (subida) (ms):	125	108,0	142,0	128,2
Módulo resiliente medido (MPa)		338	352	345
Módulo rediliente ajustado (MPa)		339	351	344

Media de los dos ensayos

Tiempo de carga (subida) (ms):	: 131,1
Deformación horizontal (μm):	: 6,2
Deformación horizontal (%):	: 0,0062
Módulo resiliente medido (MPa):	: 342
Módulo rediliente ajustado (MPa):	: 342

Diferencia en porcentaje entre módulos resilientes ajustados medios = (-1)

3.2. Frecuencia: 5 HZ

3.2.1. Espécimen 1

Diámetro de la probeta: 100 mm

Espesor de La probeta: 63.1 mm

Densidad aparente: 2246 (kg/m³)

Coefficiente de Poisson: 0.35

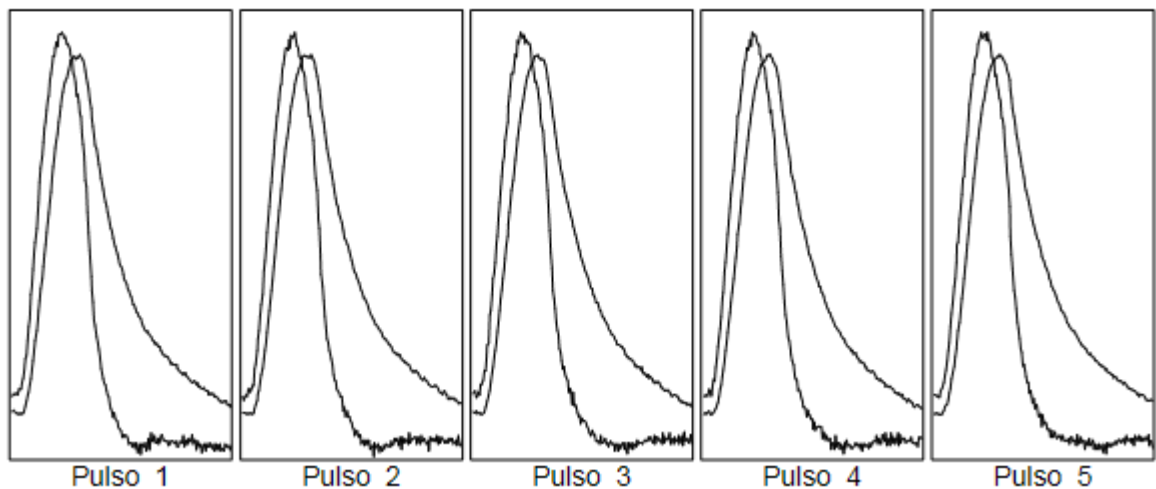
Tiempo de subida deseado (ms): 63 ms

Deformación horizontal deseada (microns): 5 μ m

Número de pulsos de preparación: 10

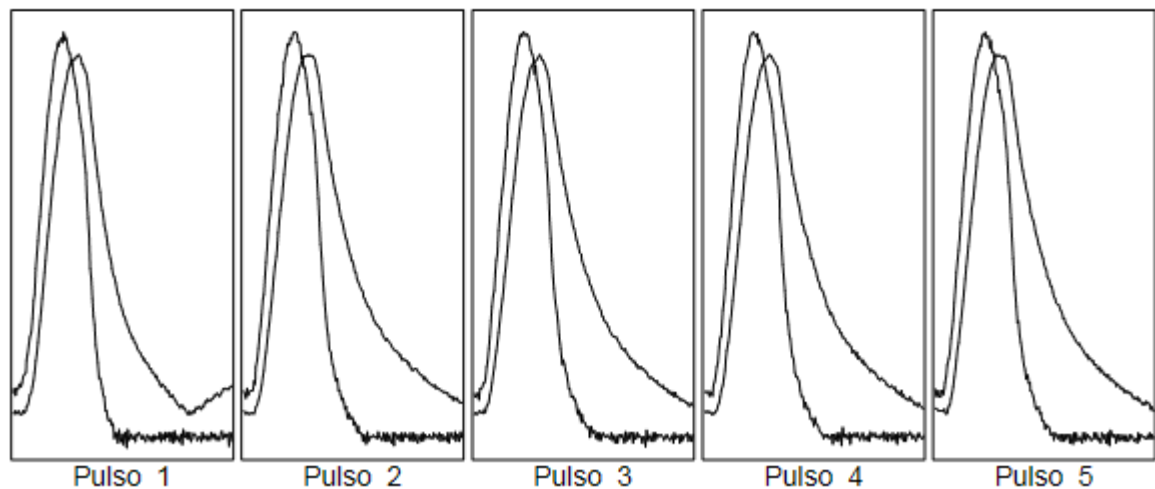
Frecuencia de lectura del transductor: 1000 Hz

Ensayo sobre el primer diámetro



Resultados	Deseada	Real Min	Real Max	Media
Fuerza vertical (kN)		0,23	0,24	0,24
Esfuerzo horizontal (kPa)		23,5	24,4	24,0
Factor de area de carga	0.60	0,57	0,61	0,59
Deformación horizontal (μm)	5,0	5,8	6,2	6,1
Tiempo de carga (subida) (ms):	63	64,0	75,0	68,0
Módulo resiliente medido (MPa)		372	393	384
Módulo rediliente ajustado (MPa)		369	394	383

Ensayo sobre el segundo diámetro



Resultados	Deseada	Real Min	Real Max	Media
Fuerza vertical (kN)		0,22	0,24	0,23
Esfuerzo horizontal (kPa)		21,8	24,5	23,6
Factor de area de carga	0.60	0,56	0,60	0,58
Deformación horizontal (μm)	5,0	5,2	6,2	6,0
Tiempo de carga (subida) (ms):	63	63,0	74,0	69,8
Módulo resiliente medido (MPa)		375	408	385
Módulo rediliente ajustado (MPa)		375	406	384

Media de los dos ensayos

Tiempo de carga (subida) (ms):	:	68,9
Deformación horizontal (μm):	:	6,0
Deformación horizontal (%):	:	0,0060
Módulo resiliente medido (MPa):	:	385
Módulo rediliente ajustado (MPa):	:	384

Diferencia en porcentaje entre módulos resilientes ajustados medios = (-0,3)

3.2.2. Espécimen 2

Diámetro de la probeta: 100 mm

Espesor de La probeta: 62.8 mm

Densidad aparente: 2250 (kg/m³)

Coefficiente de Poisson: 0.35

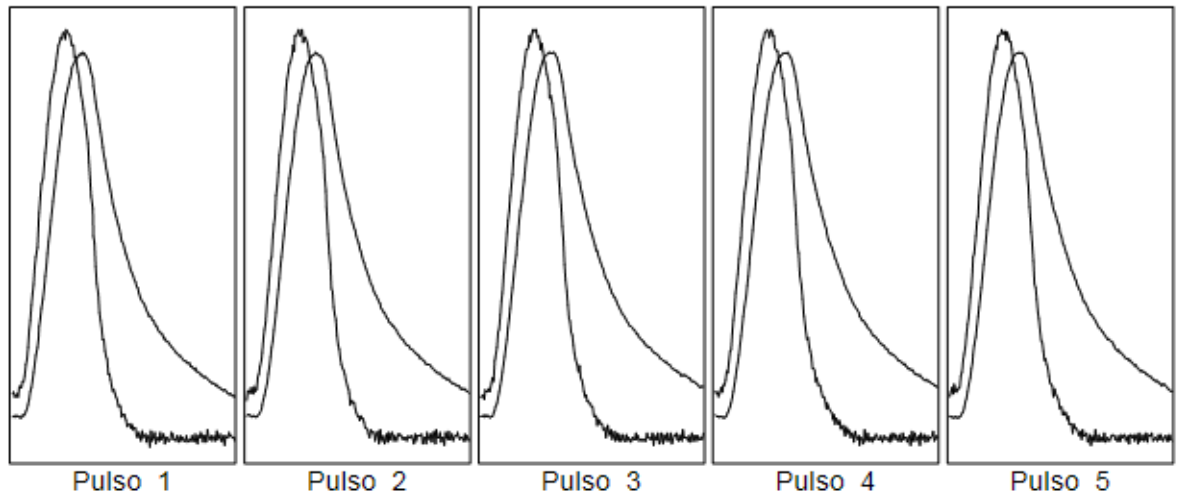
Tiempo de subida deseado (ms): 63 ms

Deformación horizontal deseada (microns): 5 μm

Número de pulsos de preparación: 10

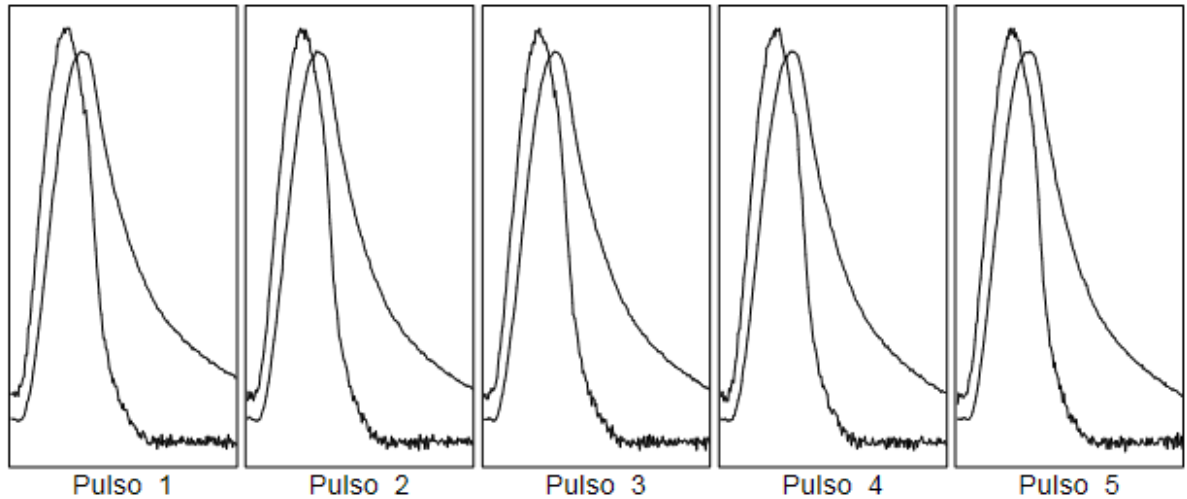
Frecuencia de lectura del transductor: 1000 Hz

Ensayo sobre el primer diámetro



Resultados	Deseada	Real Min	Real Max	Media
Fuerza vertical (kN)		0,21	0,22	0,21
Esfuerzo horizontal (kPa)		21,0	22,2	21,7
Factor de area de carga	0.60	0,56	0,61	0,58
Deformación horizontal (μm)	5,0	6,0	6,5	6,3
Tiempo de carga (subida) (ms):	63	69,0	74,0	72,0
Módulo resiliente medido (MPa)		333	340	336
Módulo rediliente ajustado (MPa)		331	340	334

Ensayo sobre el segundo diámetro



Resultados	Deseada	Real Min	Real Max	Media
Fuerza vertical (kN)		0,22	0,22	0,22
Esfuerzo horizontal (kPa)		21,9	22,2	22,0
Factor de area de carga	0.60	0,59	0,62	0,60
Deformación horizontal (μm)	5,0	6,5	6,8	6,6
Tiempo de carga (subida) (ms):	63	65,0	77,0	71,4
Módulo resiliente medido (MPa)		314	329	323
Módulo rediliente ajustado (MPa)		316	328	323

Media de los dos ensayos

Tiempo de carga (subida) (ms):	71,7
Deformación horizontal (μm):	6,5
Deformación horizontal (%):	0,0065
Módulo resiliente medido (MPa):	330
Módulo rediliente ajustado (MPa):	329

Diferencia en porcentaje entre módulos resilientes ajustados medios = (3)

3.2.3. Espécimen 3

Diámetro de la probeta: 100 mm

Espesor de La probeta: 62.6 mm

Densidad aparente: 2252 (kg/m³)

Coefficiente de Poisson: 0.35

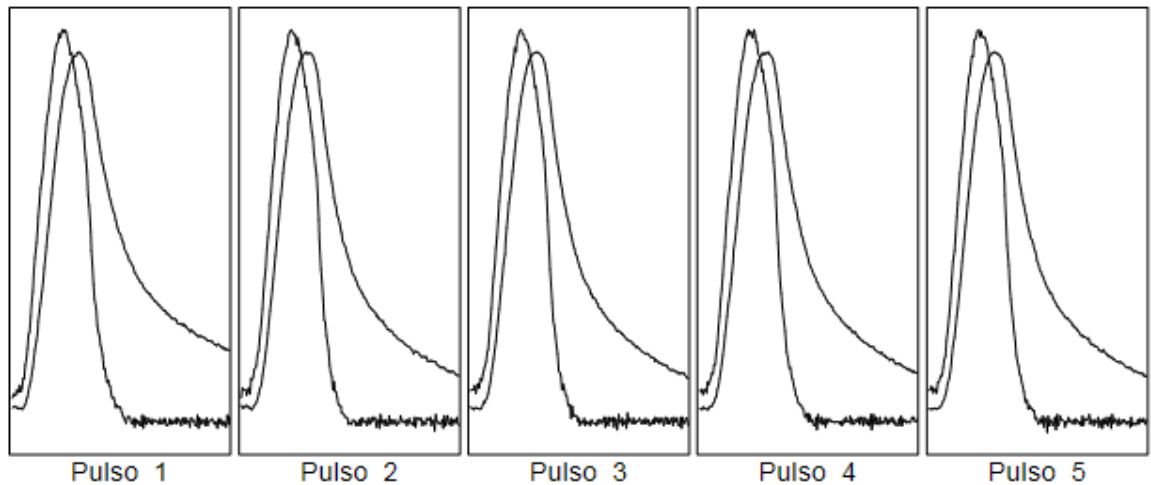
Tiempo de subida deseado (ms): 63 ms

Deformación horizontal deseada (microns): 5 µm

Número de pulsos de preparación: 10

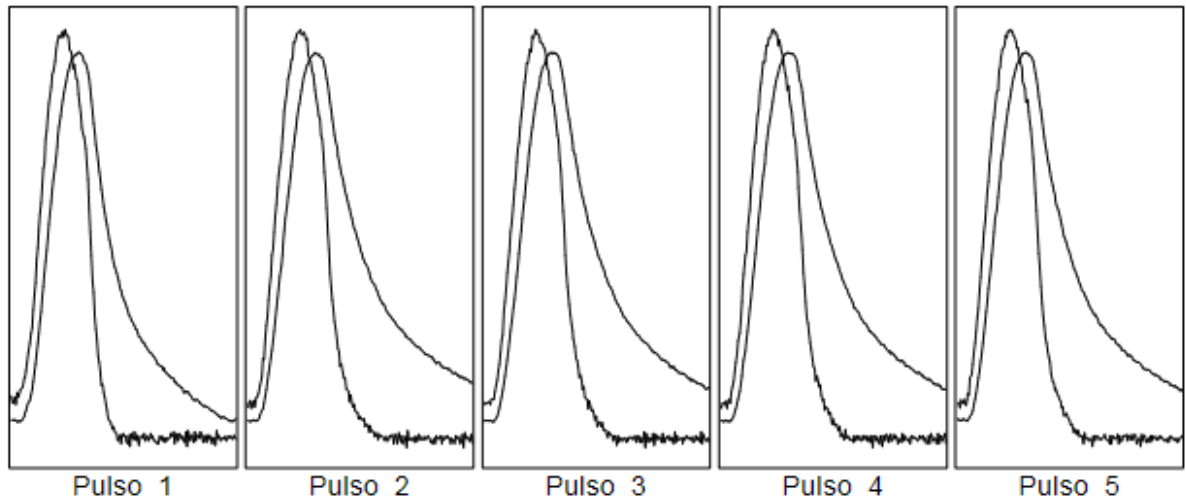
Frecuencia de lectura del transductor: 1000 Hz

Ensayo sobre el primer diámetro



Resultados	Deseada	Real Min	Real Max	Media
Fuerza vertical (kN)		0,24	0,25	0,24
Esfuerzo horizontal (kPa)		24,1	25,5	24,6
Factor de area de carga	0.60	0,58	0,61	0,59
Deformación horizontal (µm)	5,0	5,4	5,9	5,6
Tiempo de carga (subida) (ms):	63	57,0	70,0	60,8
Módulo resiliente medido (MPa)		417	437	428
Módulo rediliente ajustado (MPa)		415	437	428

Ensayo sobre el segundo diámetro



Resultados	Deseada	Real Min	Real Max	Media
Fuerza vertical (kN)		0,23	0,26	0,25
Esfuerzo horizontal (kPa)		23,3	26,5	25,6
Factor de area de carga	0,60	0,57	0,62	0,59
Deformación horizontal (μm)	5,0	5,1	6,2	5,9
Tiempo de carga (subida) (ms):	63	68,0	75,0	70,0
Módulo resiliente medido (MPa)		411	446	420
Módulo rediliente ajustado (MPa)		408	447	419

Media de los dos ensayos

Tiempo de carga (subida) (ms):	:	65,4
Deformación horizontal (μm):	:	5,8
Deformación horizontal (%):	:	0,0058
Módulo resiliente medido (MPa):	:	424
Módulo rediliente ajustado (MPa):	:	424

Diferencia en porcentaje entre módulos resilientes ajustados medios = (2)

3.3. Frecuencia: 10 HZ

3.3.1. Espécimen 1

Diámetro de la probeta: 100 mm

Espesor de La probeta: 63.1 mm

Densidad aparente: 2246 (kg/m³)

Coefficiente de Poisson: 0.35

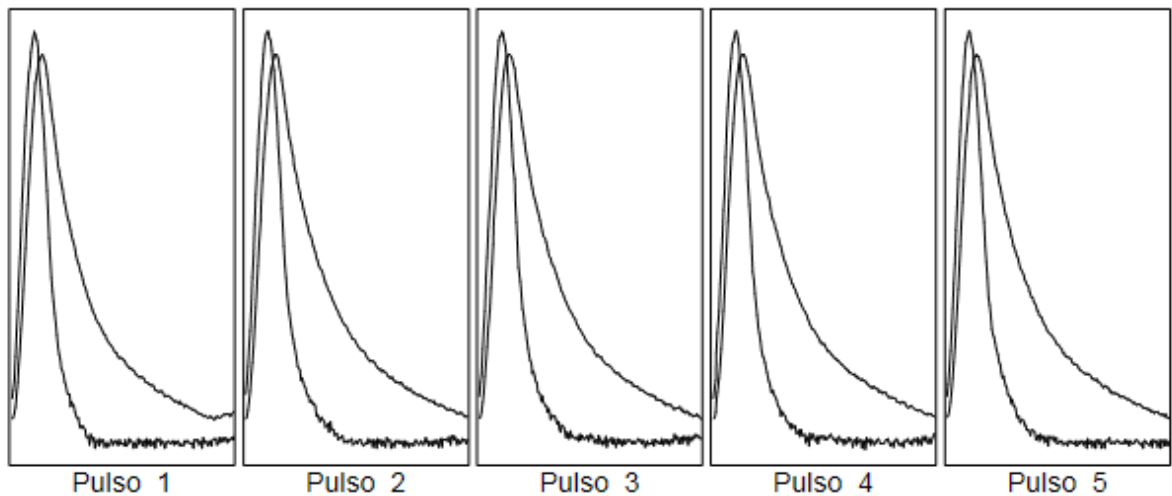
Tiempo de subida deseado (ms): 31 ms

Deformación horizontal deseada (microns): 5 μm

Número de pulsos de preparación: 10

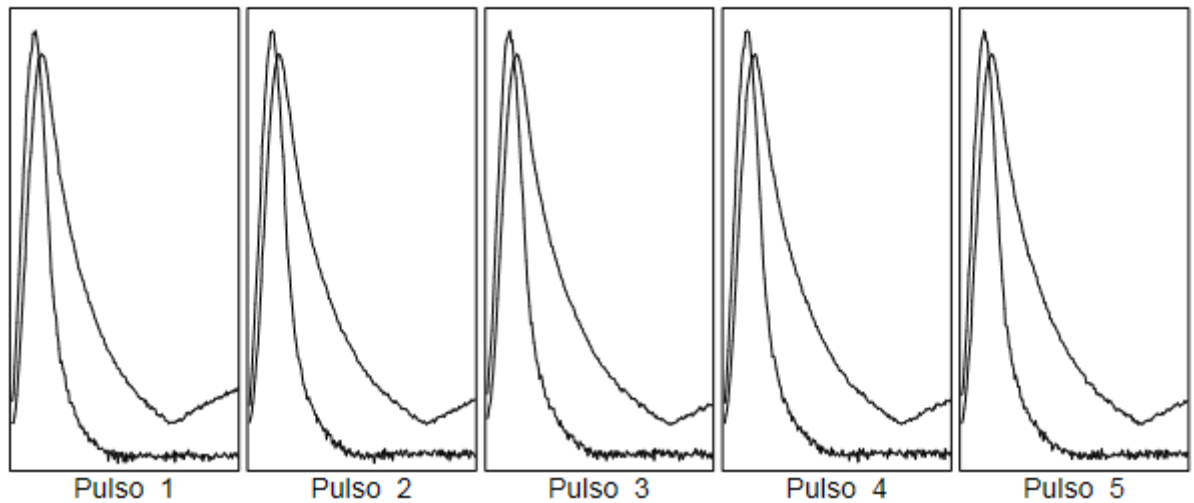
Frecuencia de lectura del transductor: 1000 Hz

Ensayo sobre el primer diámetro



Resultados	Deseada	Real Min	Real Max	Media
Fuerza vertical (kN)		0,28	0,30	0,29
Esfuerzo horizontal (kPa)		28,3	30,0	29,5
Factor de area de carga	0.60	0,57	0,61	0,60
Deformación horizontal (μm)	5,0	5,6	6,1	5,9
Tiempo de carga (subida) (ms):	31	35,0	38,0	36,8
Módulo resiliente medido (MPa)		474	491	483
Módulo rediliente ajustado (MPa)		471	492	482

Ensayo sobre el segundo diámetro



Resultados	Deseada	Real Min	Real Max	Media
Fuerza vertical (kN)		0,29	0,30	0,29
Esfuerzo horizontal (kPa)		29,2	29,9	29,6
Factor de area de carga	0.60	0,57	0,62	0,59
Deformación horizontal (μm)	5,0	5,6	6,0	5,9
Tiempo de carga (subida) (ms):	31	35,0	39,0	36,8
Módulo resiliente medido (MPa)		481	506	489
Módulo rediliente ajustado (MPa)		478	508	488

Media de los dos ensayos

Tiempo de carga (subida) (ms) :	36,8
Deformación horizontal (μm) :	5,9
Deformación horizontal (%) :	0,0059
Módulo resiliente medido (MPa) :	486
Módulo rediliente ajustado (MPa) :	485

Diferencia en porcentaje entre módulos resilientes ajustados medios = (-1)

3.3.2. Espécimen 2

Diámetro de la probeta: 100 mm

Espesor de La probeta: 62.8 mm

Densidad aparente: 2250 (kg/m³)

Coefficiente de Poisson: 0.35

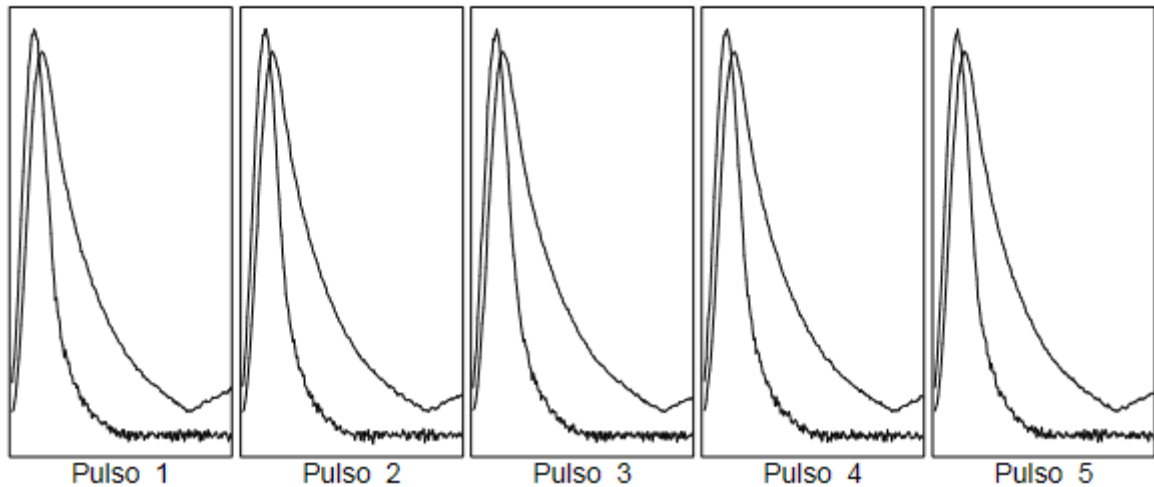
Tiempo de subida deseado (ms): 31 ms

Deformación horizontal deseada (microns): 5 μm

Número de pulsos de preparación: 10

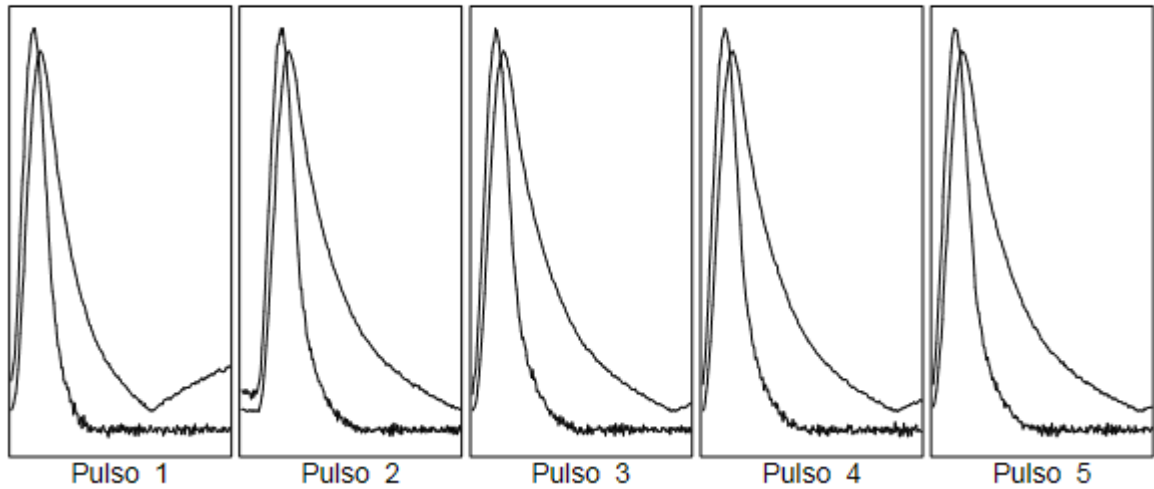
Frecuencia de lectura del transductor: 1000 Hz

Ensayo sobre el primer diámetro



Resultados	Deseada	Real Min	Real Max	Media
Fuerza vertical (kN)		0,24	0,25	0,25
Esfuerzo horizontal (kPa)		24,3	25,3	24,9
Factor de area de carga	0.60	0,56	0,60	0,58
Deformación horizontal (μm)	5,0	5,7	6,0	5,9
Tiempo de carga (subida) (ms):	31	33,0	41,0	38,0
Módulo resiliente medido (MPa)		406	419	412
Módulo rediliente ajustado (MPa)		402	416	410

Ensayo sobre el segundo diámetro



Resultados	Deseada	Real Min	Real Max	Media
Fuerza vertical (kN)		0,23	0,26	0,25
Esfuerzo horizontal (kPa)		23,8	26,1	25,4
Factor de area de carga	0.60	0,56	0,61	0,59
Deformación horizontal (μm)	5,0	5,1	6,0	5,8
Tiempo de carga (subida) (ms):	31	33,0	38,0	35,6
Módulo resiliente medido (MPa)		418	452	428
Módulo rediliente ajustado (MPa)		415	453	426

Media de los dos ensayos

Tiempo de carga (subida) (ms):	:	36,8
Deformación horizontal (μm):	:	5,8
Deformación horizontal (%):	:	0,0058
Módulo resiliente medido (MPa):	:	420
Módulo rediliente ajustado (MPa):	:	418

Diferencia en porcentaje entre módulos resilientes ajustados medios = (-4)

3.3.3. Espécimen 3

Diámetro de la probeta: 100 mm

Espesor de La probeta: 62.6 mm

Densidad aparente: 2252 (kg/m³)

Coefficiente de Poisson: 0.35

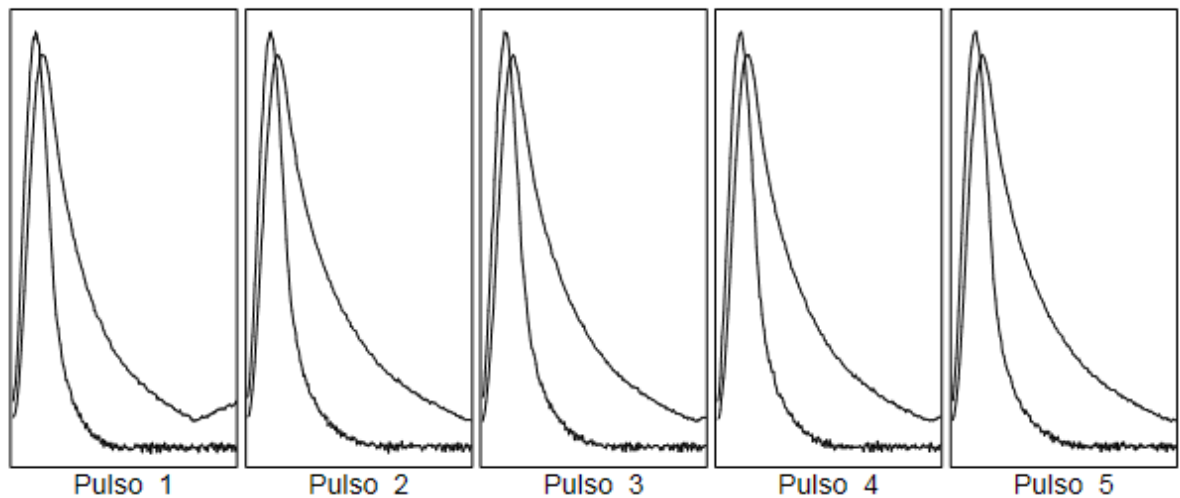
Tiempo de subida deseado (ms): 31 ms

Deformación horizontal deseada (microns): 5 μm

Número de pulsos de preparación: 10

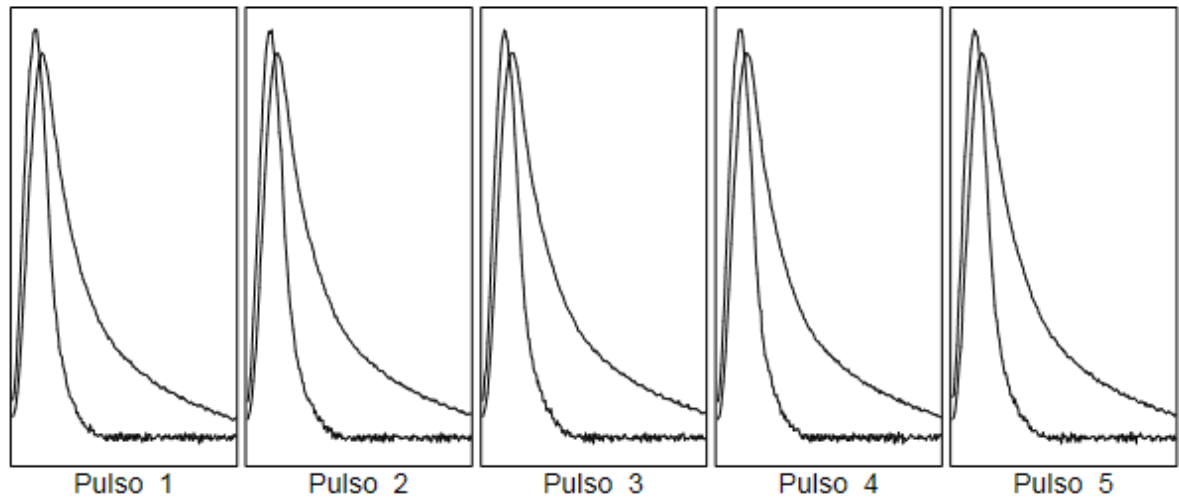
Frecuencia de lectura del transductor: 1000 Hz

Ensayo sobre el primer diámetro



Resultados	Deseada	Real Min	Real Max	Media
Fuerza vertical (kN)		0,30	0,32	0,31
Esfuerzo horizontal (kPa)		30,2	32,1	31,5
Factor de area de carga	0.60	0,57	0,62	0,60
Deformación horizontal (μm)	5,0	5,3	5,9	5,7
Tiempo de carga (subida) (ms):	31	35,0	39,0	36,2
Módulo resiliente medido (MPa)		529	552	537
Módulo rediliente ajustado (MPa)		527	554	537

Ensayo sobre el segundo diámetro



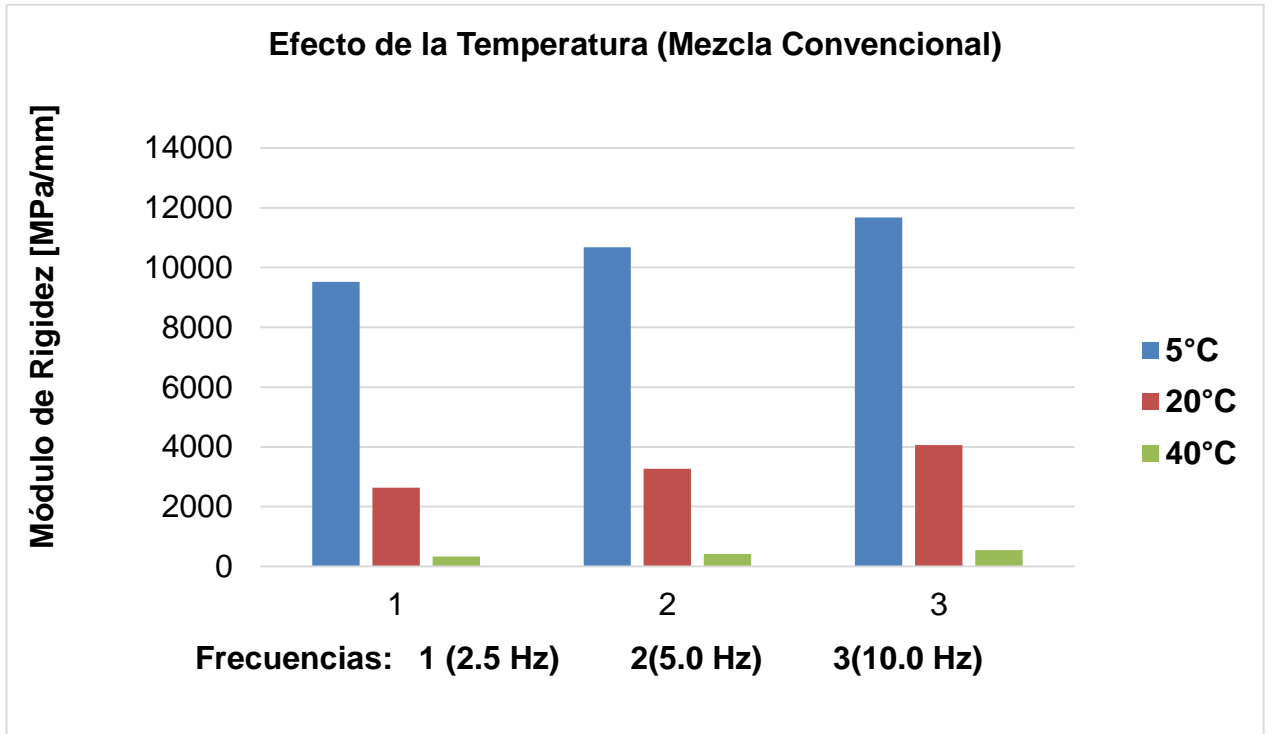
Resultados	Deseada	Real Min	Real Max	Media
Fuerza vertical (kN)		0,31	0,32	0,31
Esfuerzo horizontal (kPa)		31,4	32,1	31,8
Factor de area de carga	0.60	0,55	0,62	0,58
Deformación horizontal (μm)	5,0	5,5	5,8	5,7
Tiempo de carga (subida) (ms):	31	31,0	39,0	35,2
Módulo resiliente medido (MPa)		541	557	547
Módulo rediliente ajustado (MPa)		538	554	545

Media de los dos ensayos

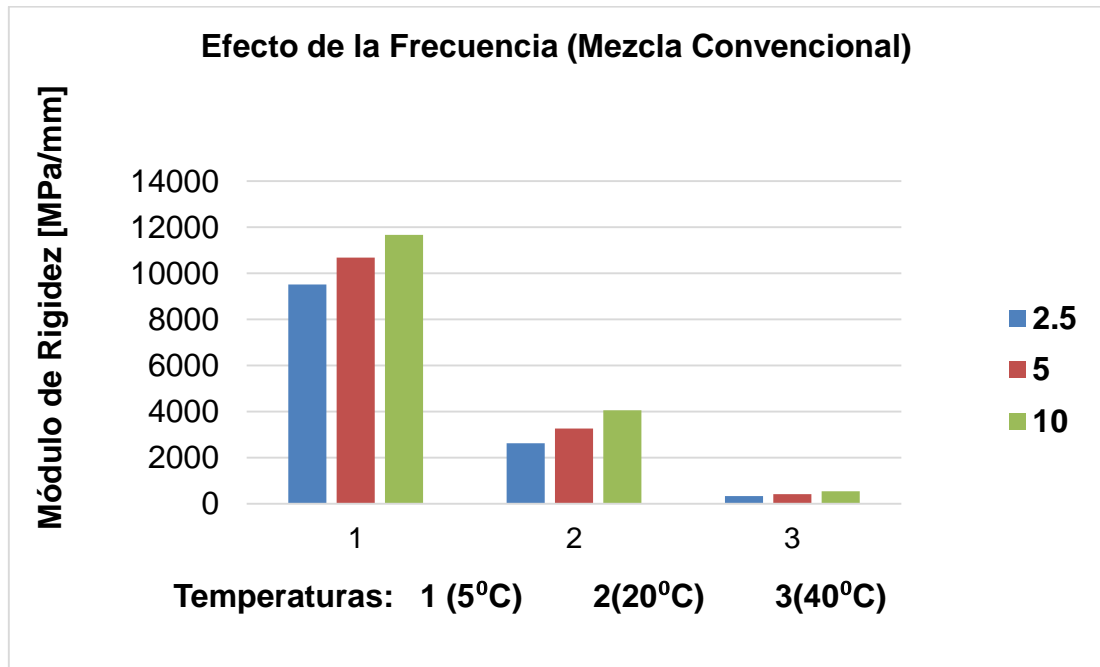
Tiempo de carga (subida) (ms):	35,7
Deformación horizontal (μm):	5,7
Deformación horizontal (%):	0,0057
Módulo resiliente medido (MPa):	542
Módulo rediliente ajustado (MPa):	541

Diferencia en porcentaje entre módulos resilientes ajustados medios = (-1)

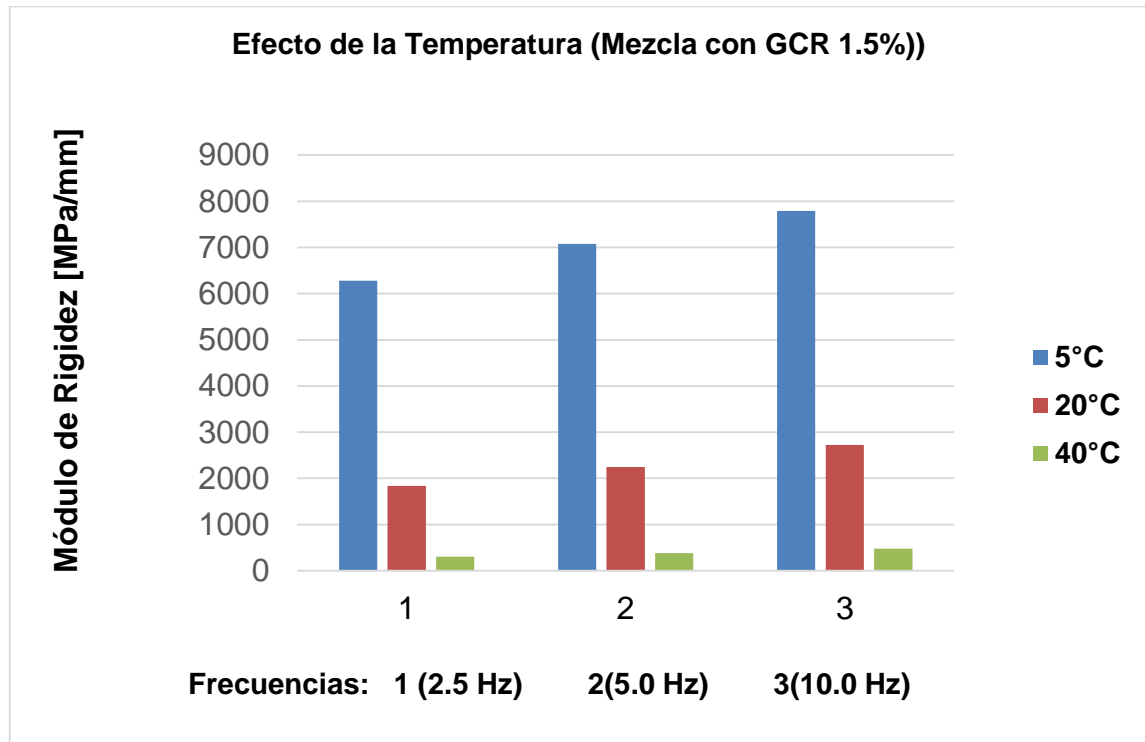
ANEXO H. Efecto de temperaturas a frecuencias constantes en las mezclas.



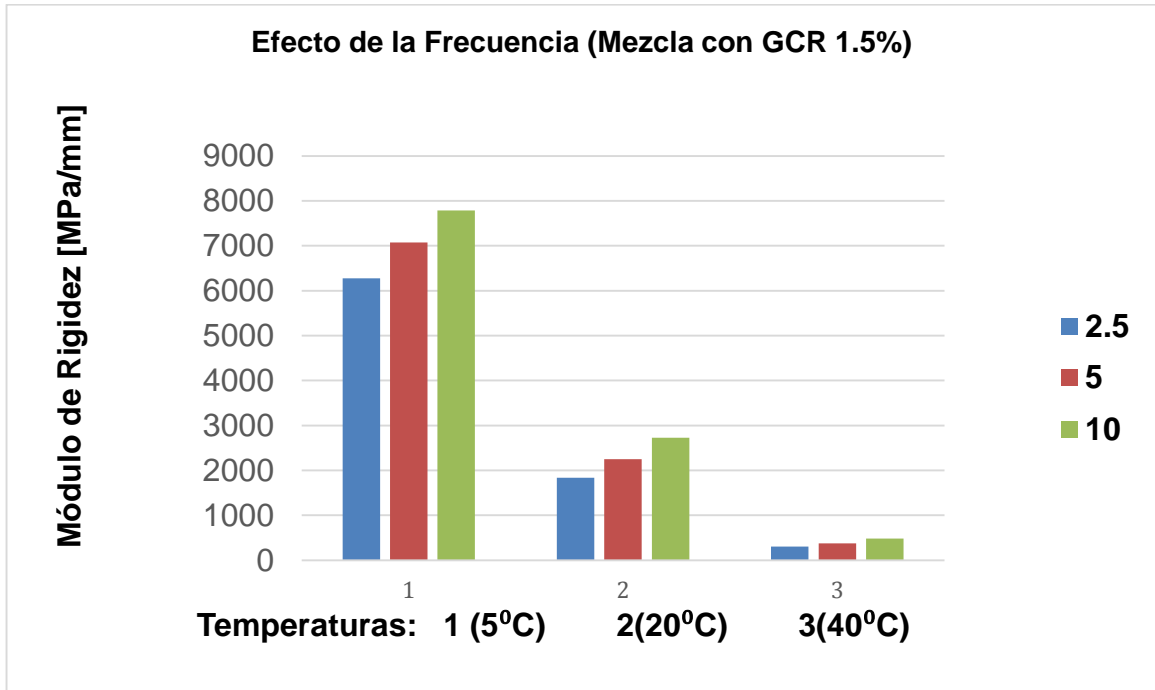
ANEXO I. Efecto de frecuencias a temperaturas constantes en las mezclas.



ANEXO J. Efecto de frecuencias a temperaturas constantes en las mezclas.



ANEXO K. Efecto de frecuencias a temperaturas constantes en las mezclas.



ANEXO L. Resultados de deformaciones para una mezcla convencional MDC-19.

N° de Pasada	t [min]	Probeta N°1	Probeta N°2	Prom. Deformac.
		Deformac. [mm]	Deformac. [mm]	
0	0	0	0	0.00
42	1	0.92	0.7	0.81
126	3	2.34	1.79	2.07
210	5	2.84	2.15	2.50
420	10	3.52	2.7	3.11
630	15	3.95	3.07	3.51
840	20	4.27	3.36	3.82
1050	25	4.53	3.61	4.07
1260	30	4.7	3.78	4.24
1470	35	4.89	3.96	4.43
1680	40	5.08	4.16	4.62
1890	45	5.19	4.31	4.75
2520	60	5.59	4.75	5.17
3150	75	5.94	5.14	5.54
3780	90	6.29	5.47	5.88
4410	105	6.7	5.87	6.29
5040	120	6.97	6.12	6.55

ANEXO M. Resultados de deformación total de una mezcla convencional MDC-19.

Probeta	Deformación Total al Final del Ensayo [μm]
1	6.97
2	6.12
PROMEDIO	6.55

ANEXO N. Resultados velocidades de deformación MDC-19.

Probeta	Velocidad de deformación [$\mu\text{m}/\text{minutos}$]		
	Intervalo [minutos]		
	30-45	75-90	105-120
1	32.67	23.33	18.00
2	35.33	22.00	16.67
PROMEDIO	34.00	22.67	17.33

ANEXO O. Resultados de deformaciones para una mezcla MDC-19 con GCR al 1.5% de reemplazo.

N° de Pasada	t [min]	Probeta N°1	Probeta N°2	Prom. Deformac.
		Deformac. [mm]	Deformac. [mm]	
0	0	0	0	0.00
42	1	0.26	0.26	0.26
126	3	0.67	0.66	0.67
210	5	0.81	0.8	0.81
420	10	1.04	0.98	1.01
630	15	1.2	1.12	1.16
840	20	1.31	1.21	1.26
1050	25	1.42	1.29	1.36
1260	30	1.49	1.35	1.42
1470	35	1.55	1.4	1.48
1680	40	1.6	1.45	1.53
1890	45	1.66	1.48	1.57
2520	60	1.83	1.62	1.73
3150	75	1.97	1.73	1.85
3780	90	2.06	1.8	1.93
4410	105	2.16	1.87	2.02
5040	120	2.26	1.95	2.11

ANEXO P. Resultados de deformación total de una mezcla MDC-19 con 1.5% de reemplazo.

Probeta	Deformación Total al Final del Ensayo [μm]
1	2.26
2	1.95
PROMEDIO	2.105

ANEXO Q. Resultados velocidades de deformación de una mezcla MDC-19 con 1.5% de reemplazo.

Probeta	Velocidad de deformación [$\mu\text{m}/\text{minutos}$]		
	Intervalo [minutos]		
	30-45	75-90	105-120
1	11.33	6.00	6.67
2	8.67	4.67	5.33
PROMEDIO	10.00	5.33	6.00