

2011

**CONSTRUCCIÓN DE UN DISPOSITIVO
MANUAL PARA REALIZAR
MEDICIONES TENDIENTES A
DETERMINAR LOS VALORES DE
RIGIDEZ DINÁMICA DE MATERIALES
TÉRREOS SUPERFICIALES**





**CONSTRUCCIÓN DE UN DISPOSITIVO MANUAL PARA
REALIZAR MEDICIONES TENDIENTES A DETERMINAR
LOS VALORES DE RIGIDEZ DINÁMICA DE MATERIALES
TÉRREOS SUPERFICIALES**

TESIS DE GRADO

MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL

LUIS FRANCISCO MONTES BURITICÁ

PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA

FACULTAD DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

BOGOTÁ D.C.

diciembre de 2011

**CONSTRUCCIÓN DE UN DISPOSITIVO MANUAL PARA
REALIZAR MEDICIONES TENDIENTES A DETERMINAR
LOS VALORES DE RIGIDEZ DINÁMICA DE MATERIALES
TÉRREOS SUPERFICIALES**

TESIS DE GRADO

MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL

**Trabajo para optar el título de
Máster en Ingeniería Civil**

Director

Jorge Alberto Rodríguez Ordoñez

PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA

FACULTAD DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

BOGOTÁ D.C.

diciembre de 2011

APROBACIÓN

El Trabajo de grado con título “Construcción de un dispositivo manual para realizar mediciones tendientes a determinar los valores de rigidez dinámica de materiales térreos superficiales”, en cumplimiento de uno de los requisitos depuestos por la Pontificia Universidad Javeriana, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería civil, para optar el Título de Magister en ingeniería Civil, fue aprobado por:

Director
Ing. Jorge Alberto Rodríguez

Jurado 1
Ing. Javier Ortiz

Jurado 2
Ing. Manuel Ocampo

TABLA DE CONTENIDO

1	RESUMEN	9
2	ABSTRACT	10
3	ESTADO DEL ARTE	11
4	METODOLOGÍA.....	14
4.1	CONSTRUCCIÓN DEL DISPOSITIVO	15
4.2	CALIBRACIÓN DE LA CELDA DE CARGA Y EL ACELERÓMETRO.....	27
4.3	APLICATIVO SOFTWARE DE ANÁLISIS	29
4.3.1	<i>SEÑALES DE ENTRADA</i>	30
4.3.2	<i>POSICIONAMIENTO DE LAS SEÑALES</i>	35
4.3.3	<i>SEÑALES ALINEADAS</i>	36
4.3.4	<i>RESULTADOS</i>	37
4.4	ENSAYOS DE CAMPO.....	38
5	CONCLUSIONES.....	44
6	BIBLIOGRAFÍA	46

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Montaje del dispositivo de caída de peso ligero.....	16
Figura 2. Pin de acople para el dispositivo de liberación de masa.....	17
Figura 3. Dispositivo de Liberación de la masa.....	17
Figura 4. Pin de Traslado.....	18
Figura 5. Eje del Deflectómetro.....	18
Figura 6. a) Masas de Ensayo. b) Rótula de Amortiguamiento.....	19
Figura 7. Placa Rectangular de acero.....	19
Figura 8. Sistema de Soporte.....	20
Figura 9. Celda de Carga.....	20
Figura 10. Placa Circular de acero.....	21
Figura 11. Acelerómetro.....	21
Figura 12. . a) Lector de Tarjetas NI CDAQ-9172. b) Tarjeta de lectura (celda de carga) NI USB-9237. c) Tarjeta de lectura (acelerómetro) NI USB-9233.....	23
Figura 13. Celda de Carga.....	24
Figura 14. Tarjeta lectora principal. Fuente: National Instruments.....	26
Figura 15. Tarjeta lectora del acelerómetro. Fuente: National Instruments.....	27
Figura 16. Imagen tomada durante el proceso de montaje de la celda de carga en los laboratorios de la U Javerian. La maquina empleada para la calibración fue la Universal mostrada en la imagen.....	28
Figura 17. calibración de la celda de carga.....	28
Figura 18. Visual de la diagramación del programa.....	29

Figura 19. Visual de la primera pestaña.....	30
Figura 20. Visual de la primera pestaña.....	31
Figura 21. Barrido de Aceleración vs Tiempo, sistema de adquisición de datos. .	32
Figura 22. Barrido de Fuerza vs Tiempo y el barrido de Aceleración vs Tiempo deben ser coincidentes en el tiempo.....	33
Figura 23. Menú guardar datos para su posterior análisis.	34
Figura 24. Señales del acelerómetro y la celda de carga	36
Figura 25. Posicionamiento de las señales.....	37
Figura 26. Posicionamiento de las señales.....	38
Figura 27. Vista panorámica del PR 101+040 conocido como los Alpes.	39
Figura 28. Panorámica del sector conocido como el Intercambiador Guaduas PR65+200.....	39
Figura 29. Localización de los tramos homogéneos desde los Alpes al final de la Variante Sasaima.....	40
Figura 30. Zona correspondiente a alta montaña en la llegada al sector conocido como los Alpes.....	41
Figura 31. Zona donde se realizaron los apiques para la calzada nueva.	41
Figura 32.. Localización de las perforaciones realizadas en el sector 1.	42
Figura 33.. apiques realizados en el sector 1	43
Figura 34.. incremento del modulo con la energía del impacto.....	45
Figura 35.. relación entre el modulo y el CBR	45

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Elementos del instrumento de medición.....	15
Tabla 2. descripción técnica del acelerómetro.....	22
Tabla 3. descripción técnica de la celda de carga empleada Fuente: National Instuments	24
Tabla 4. descripción técnica de la tarjeta principal. Fuente: National Instuments.	26
Tabla 5. Relación de perforaciones del sector 1 con su abscisa.	41

1 RESUMEN

Existen diferentes métodos de medición para la caracterización de materiales a partir de pruebas dinámicas de carga evaluando la competencia de los materiales ante sollicitaciones dinámicas, dentro de las que se destacan las destructivas y las no destructivas.

Los procedimientos destructivos son dispendiosos desde el mismo momento de la extracción de la muestra o núcleo hasta la ejecución de los correspondientes ensayos, involucrando innumerables variables que deben ser controladas adecuadamente para no alterar las pruebas de laboratorio; de otro, lado los ensayos no destructivos sugieren procedimientos más expeditos para obtener la información directamente en campo, por lo que son altamente eficientes.

El actual proyecto consistió en la construcción de un dispositivo manual de medición de la fuerza y el desplazamiento resultantes de una carga dinámica, y su correspondiente calibración, para realizar pruebas dinámicas “in situ”, comúnmente llamado deflectómetro portátil de caída o PFWD por sus siglas en Ingles (Portable Falling Weight Deflectometer). El equipo consiste en la aplicación de una carga bajo condiciones dinámicas como un método no destructivo de evaluación de materiales térreos como bases, sub-bases granulares y subrasantes principalmente.

En el proyecto se evaluó el uso potencial del PFWD para medir de forma confiable el módulo elástico de subrasantes; Para lograrlo, se realizaron pruebas con el PFWD en algunos sectores de la vía Los Alpes Villeta, y se realizaron ensayos de CBR en muestras recolectadas durante las pruebas de campo. Entre estos parámetros que se consideraron durante la ejecución del ensayo de carga dinámica fue el peso de caída y la altura de caída. Se encontró que la masa de caída afectaba el módulo del PFWD significativamente. Los resultados también indicaron que existe una buena correlación entre el módulo del PFWD y los resultados del CBR.

2 ABSTRACT

Nowadays several measurement methods for material characterization exist from dynamic load tests that assess the strength of materials to dynamic stresses, among which stand out the destructive and non-destructive tests.

The destructive procedures are wasteful since the moment of sample extraction to the execution of the corresponding tests, involving several variables that have to be controlled properly so they don't change or disturb the test results, on the other hand, non-destructive tests suggests simpler procedures to obtain the information, directly on field, making them more efficient.

The actual project consists in the construction of a portable device of force and displacement measurement resultant from a dynamic load, as well as its corresponding calibration to perform "in-situ" dynamic tests, commonly known as the Portable Falling Weight Deflectometer, which consists in the application of a load under dynamic conditions as a non-destructive method of evaluation of subgrades, base and sub-base courses.

The project evaluates the potential use of the PFWD to reliably measure the elastic modulus of subgrades. To achieve this objective, several PWFD tests were made in a number of sections of the road "Los Alpes-Villeta". CBR tests (California Bearing Ratio) were also completed in these sections with the samples collected during the field trials. The test parameters of the PFWD changed while the test was done, the parameters considered where the weight of the falling mass and the falling height. The results of the PFWD modulus were compared with the obtained using the Dynamic Cone Penetration Test (DCP) evaluated in the same road sections. The investigation concluded that the falling weight changes affected significantly the PFWD elastic modulus. Results also indicate that there is a good/acceptable correlation between the PFWD modulus and the CBR test results.

3 ESTADO DEL ARTE

El uso del deflectómetro de peso ligero (LWD) ha ido creciendo a través de los años. Este equipo se utiliza principalmente como una herramienta para realizar control de calidad en la construcción así como para la investigación de materiales y construcción de vías (Fleming *et. al*, 2006). Su predecesor, el deflectómetro de caída de peso FWD ha sido usado por más de 20 años, incluyendo una cierta cantidad de usos en suelos sin consolidar. Esta es una herramienta de utilidad probada y se ha visto por muchos como una prueba estándar, pero sus problemas radican principalmente en su peso y en su costo.

El diseño actual de pavimentos está basado en modelos analíticos mecanicistas de sistemas estratificados. Estos modelos se utilizan para predecir deformaciones a partir de una carga basadas en el módulo de Young, la relación de Poisson y el espesor de cada capa. Desarrollos en el diseño de pavimentos requieren la utilización de funciones no lineales (dependencia esfuerzo deformación) para predecir deformaciones en capas de pavimentos. Un esfuerzo paralelo ha emergido hacia la utilización de la medición *in situ* de parámetros mecanicistas, como lo es el módulo de elasticidad. Esto ha hecho que se quieran dejar atrás las mediciones basadas en la densidad, las cuales no garantizan un comportamiento aceptable de la capa de base durante su vida útil de servicio (Alshibli *et al.*, 2005) , hacia dispositivos capaces de evaluar el módulo (deflectómetro de peso ligero, calibrador de la rigidez del suelo, dispositivo de compactación Briaud) y la resistencia al corte (cono dinámico de penetración). (Ryden, Mooney, 2009).

Los criterios actuales para la evaluación de pavimentos y su diseño dependen de caracterizar las capas estructurales del pavimento con valores de CBR o calculados con el módulo obtenido en pruebas FWD (Kavussi *et al.*, 2010). Sin embargo, el ensayo del

CBR consume mucho tiempo si se requiere una evaluación rápida de los materiales y el FWD no se utiliza comúnmente en pavimentos que no presentan una buena superficie ya que es muy difícil acceder a estos sitios debido al tráiler que lo transporta (Fleming *et al.*, 2000). El deflectómetro de peso ligero o LWD puede servir como alternativa para este tipo de problemas debido a su portabilidad y a lo simple de su diseño, obteniendo resultados confiables del módulo de elasticidad (George *et al.*, 2009).

Recientemente, se han desarrollado otros tipos de dispositivos portátiles para medir la rigidez *in situ*, entre estos están el ensayo de fundaciones TRL, el método de vibraciones naturales NVM, Leichtes Fallgerät de Zorn (conocido como la placa de carga dinámica alemana o GDP), el calibrador de rigidez del suelo (también conocido como el SSG), el Loadman de Finlandia, el aparato ODIN, el martillo Clegg. Todos estos dispositivos pueden ser categorizados por la tasa de pulso de carga y la intensidad de la carga máxima o presión de contacto. Mientras que todos los equipos portátiles tienen sus ventajas y desventajas, el LWD se ha consolidado como la herramienta más aceptable que retiene alguna flexibilidad en el protocolo de la prueba, como el tamaño variable de la placa, magnitud de la carga, y recolección de los datos, con el factor añadido e importante que se acerca más a la tasa de carga y al área de una rueda móvil, y un funcionamiento muy similar al FWD (Fleming *et al.*, 2000).

El LWD básicamente aplica una carga de impacto en la superficie del terreno, llámese base, subbase, subrasante o pavimento, y la deformación inducida en el terreno es medida simultáneamente. Este dispositivo consiste de tres partes principales: (a) una base con una placa de carga, sensores y equipos electrónicos, (b) incluye el sistema de adquisición de datos, el neopreno o amortiguador de caucho y la barra guía (Lin *et al.*, 2006) y (c) los aplicativos de procesamiento de la información.

La profundidad de influencia del PFWD es de hasta 300 mm dependiendo de la rigidez de los materiales a ensayar (Nazzal, 2003), por lo tanto, debido a la pequeña cantidad de energía de caída, el dispositivo no puede distinguir entre capas múltiples que tengan una profundidad mayor a este valor.

Varios estudios han sido conducidos recientemente para evaluar las medidas del deflectómetro. En ellos se utilizaron el PLT (prueba de carga estática) y el deflectómetro de caída de peso ligero como puntos de referencia para la comparación. Por ejemplo, Fleming (1998) comparó el GDP con el FWD y obtuvo una correlación de 0.5 entre el módulo del GDP y del FWD. Livneh y Goldberg (2001) sugirieron que el módulo dinámico del GDP es de alrededor 0.3-0.4 veces el módulo del FWD convencional. Fleming *et. al* (2000) realizó ensayos en campo para correlacionar el módulo de tres tipos principales de LFWD (TFT, GDP and Prima 100) con el FWD. Los resultados mostraron que el módulo resiliente del FWD (M_{FWD}) se correlaciona bien con el E_{LFWD} obtenido en el Prima 100 con un coeficiente de correlación de 1.031. Sin embargo, los coeficientes de correlación con otros LFWD fueron variables (Alshibli *et al.*, 2005)

Nazzal *et al* desarrolló pruebas comparativas para el FWD, LWD y el SSG en sitios en construcción. Estos mostraron una relación general de $FWD = 0.97 PFWD$. Además para los datos controlados del laboratorio se concluyó que el LWD se estresó a una profundidad de 270-280 mm, ó aproximadamente el diámetro de una placa de carga (esta profundidad fue significativamente más profunda que la profundidad alcanzada cuando se estresó por el SSG) (Fleming *et al.*, 2000).

Peterson *et al.* revisó el uso de dispositivos PFWD para proveer un control de calidad para la compactación. Ellos encontraron que el LWD se estresó entre 0.1 y 0.3m de profundidad, y esto se aproximaba a 3000 cm^3 de volumen. Ellos también concluyeron

que el módulo pareció ser dependiente al esfuerzo aplicado (altura de caída), y esto era un factor de influencia más para el LWD que para el FWD (Fleming *et al.*, 2000).

4 METODOLOGÍA

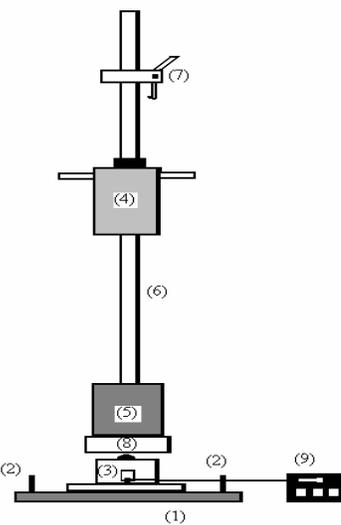
La metodología empleada se fundamentó en la culminación exitosa de las siguientes cuatro tareas básicas:

1. **Construcción del dispositivo:** Cuyo objetivo final consistió en la elaboración física de un instrumento de medición de la fuerza y la deformación de una masa que cae libremente, transmitiendo la carga a un plato circular, para lo cual se ejecutaron las siguientes actividades:
 - Planeamiento conceptual de un dispositivo capaz de medir fuerza y deformación con los instrumentos suministrados por la Universidad Javeriana, los cuales son:
 - Celda de carga de 250 kg.
 - Acelerómetro.
 - Sistema de adquisición de datos.
 - Diseño geométrico y de materiales de los elementos del dispositivo, de los cuales se hace entrega de los correspondientes planos.
 - Construcción de los elementos mediante la ayuda externa (tornos, fresas y demás elementos metalmecánicos).
2. **Aplicativo (software):** una vez construido el dispositivo, se diseñó un programa o software que permite analizar la información suministrada por la celda de carga y el acelerómetro.
3. **Calibración de la celda de carga:** la calibración consistió en cargar gradualmente la celda de carga, tomando lecturas con lo cual se construyó una carta de calibración, con el objeto de tener mediciones ajustadas a la masa que se busca dejar caer y tarar el instrumento en cero.
4. **Pruebas en campo:** esta etapa consistió en la ejecución del ensayo con el dispositivo manual en terreno observando los resultados obtenidos.

4.1 CONSTRUCCIÓN DEL DISPOSITIVO

El montaje consistió en la construcción física de un instrumento manual que permite hacer mediciones del ensayo de placa dinámica y que consta de los elementos enumerados en la **Tabla 1**:

Tabla 1. Elementos del instrumento de medición

ESQUEMA	ÍTEM
	1 Estructura de soporte del plato
	2 Acelerómetro
	3 Celda de carga
	4 Masa
	5 Estructura de recibo del impacto
	6 Barra Guía
	7 Mecanismo de liberación de la masa
	8 Plato o sistema de amortiguamiento
	8 Sistema de adquisición de datos

Para la materialización del esquema mencionado previamente se conto inicialmente los siguientes equipos suministrados por la Universidad Javeriana:

- Celda de carga : 227 kg.
- Acelerómetro: Rango pico 98 m/s².
- Tarjetas lectoras NI CDAQ-9172, NI USB-9237 NI USB-9233.

Con los elementos suministrado por la Universidad se diseñó una estructura capaz de soportar una carga dinámica, la cual consta de los elementos descritos a continuación y que una vez armados tienen la forma indicada en la siguiente figura:

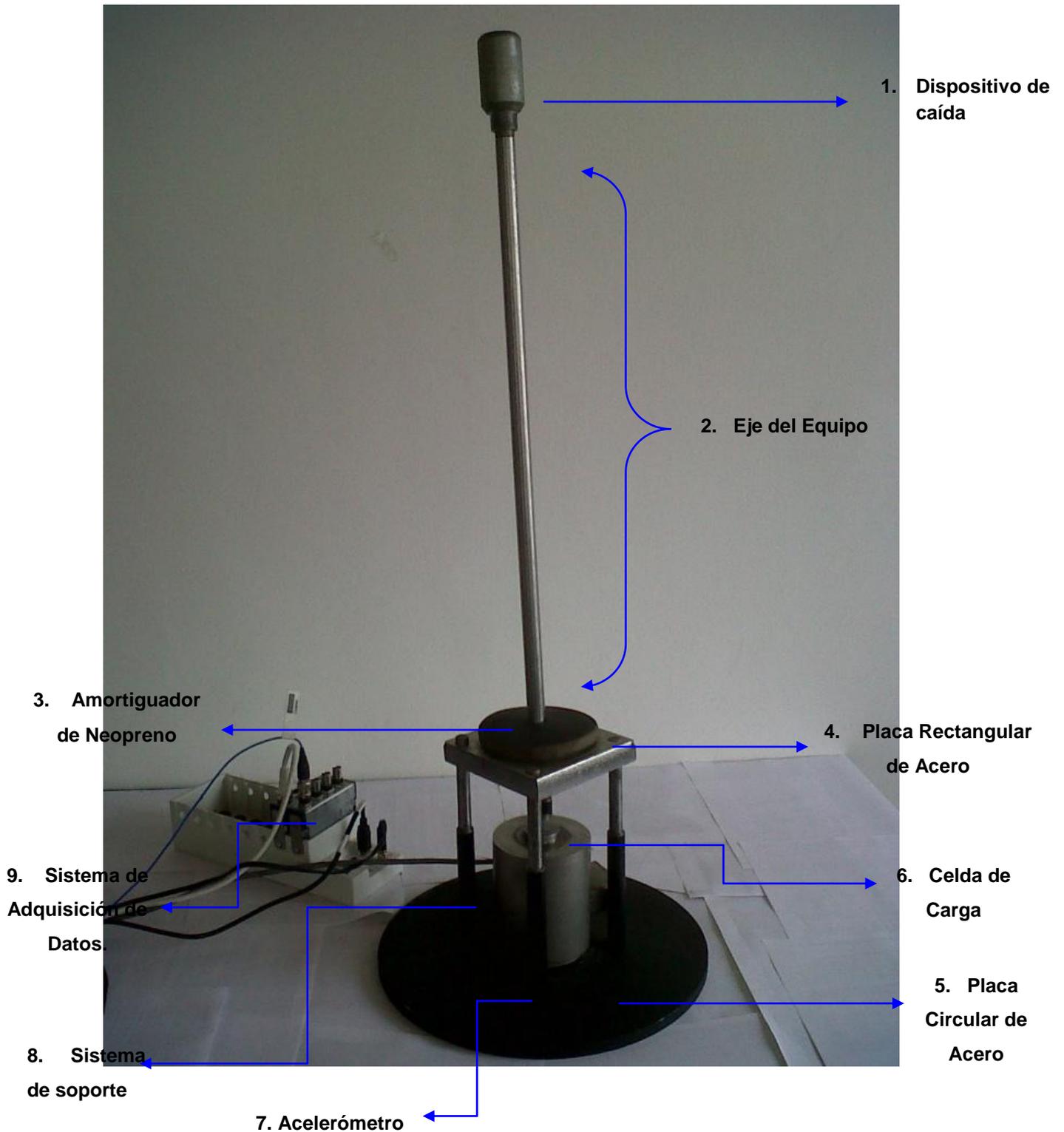


Figura 1. Montaje del dispositivo de caída de peso ligero.



Figura 2. Pin de acople para el dispositivo de liberación de masa.

Pin de Acople para el dispositivo de liberación de masa: Este elemento está hecho de acero. Se ubica en la parte superior de la barra guía y se acopla a ésta mediante una rosca. Se utiliza para que el dispositivo de liberación de masa encaje en la barra. *Mide 3.2 cm de longitud y 1.5 cm de diámetro.*

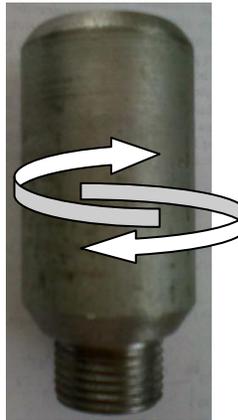


Figura 3. Dispositivo de Liberación de la masa.

Dispositivo de liberación de la masa: se encuentra en la parte superior del equipo y se debe colocar encima del Pin de Acople descrito anteriormente. Este dispositivo de liberación cuenta con una rosca en su parte inferior que encaja con la masa de ensayo. Para que ésta masa se libere, se requiere un movimiento rotatorio en el dispositivo tal como se aprecia en la figura, que deje que ésta caiga libremente hacia el amortiguador de neopreno. Este dispositivo mide 6 cm de largo y tiene un diámetro de 3.5 cm, y está hecho de acero.



Figura 4. Pin de Traslado.

Pin de Traslado: Cuando se requiera realizar un traslado del deflectómetro, se reemplaza el Pin de acople por un elemento de acero circular de 6 cm de diámetro que cuenta con una rosca interna que se acopla al eje ó barra guía del deflectómetro. Este elemento permite un mejor agarre del equipo.



Figura 5. Eje del Deflectómetro.

Eje del deflectómetro: Este elemento, también denominado como “Barra Guía”, tiene 55 cm de longitud y 1.5 cm de diámetro. A través de este elemento, la masa de ensayo cae libremente desde el dispositivo de liberación de la masa descrito anteriormente hasta el amortiguador de Neopreno.

Masas de ensayo: El deflectómetro se calibró con diferentes masas de ensayo de 0.5, 1, 2 y 8 kg. Estas masas se utilizan para conocer la influencia que genera el cambio en el pulso de fuerza para una misma altura de caída.

Rótula de amortiguamiento: tiene 10 cm de diámetro y posee un orificio central por donde pasa la barra guía del deflectómetro. Este elemento está hecho de neopreno y se encuentra encima de la placa rectangular de acero. Junto con esta placa reciben el impulso de fuerza generado al dejar caer la masa libremente. Se utiliza para disminuir el pulso de fuerza (acero – acero) simulando el amortiguamiento que genera el paso de un vehículo a través de un suelo, un material de base o sub-base, o un material de subrasante que está alrededor de los 40 milisegundos o mayor (Fleming y Rogers, 1995).



a)



b)

Figura 6. a) Masas de Ensayo. b) Rótula de Amortiguamiento



Figura 7. Placa Rectangular de acero

Placa rectangular de acero: ésta placa de 11.5 cm x 12.5 cm está ubicada sobre la celda de carga mediante el sistema de soporte, encima de este elemento se encuentra el amortiguador de neopreno. Su principal función es permitir que la carga se distribuya uniformemente hacia la celda de carga. Cuenta en su parte central con un pin para acoplar la barra o eje del deflectómetro mediante una rosca, y en la cara posterior se labró una hendidura del diámetro de la celda de carga para facilitar el acople.



Figura 8. Sistema de Soporte

Sistema de soporte. Este sistema está compuesto por cuatro varillas de acero de 20 cm de longitud, divididas en dos tramos con diferente diámetro. Los primeros 11.5 cm tienen un diámetro de 1.5 cm mientras que, a partir de esa medida el diámetro cambia a 1 cm. Está diseñado principalmente para proteger a la celda de carga, y en especial a la muela que ésta tiene en su parte superior, para que el impacto generado por la caída de la masa no la desplace hacia abajo generando un daño a la celda y en general a todo el equipo.



Figura 9. Celda de Carga

Celda de Carga: modelo **LC1001** de **OMEGA**. Este dispositivo mide la fuerza que transmite la masa que cae libremente a lo largo del eje y que golpea el amortiguador de neopreno y la placa rectangular. Está hecha de acero y tiene 11.6 cm de longitud y 8.9 cm de diámetro. Este elemento se conecta a un sistema de adquisición de datos.



Figura 10. Placa Circular de acero

Placa Circular de Acero: tiene 30 cm de diámetro. Se encuentra ubicada en la parte inferior del equipo. Esta placa está en contacto con el suelo, subrasante o materiales de base a ensayar. Cuenta con cuatro orificios por donde se insertan cuatro tornillos de 1,8 cm de diámetro que se utilizan para ajustar la celda de carga a esta placa. Esta también posee un pequeño orificio en donde se dispone el acelerómetro.



Figura 11. Acelerómetro

Acelerómetro: modelo **350B03** de **PCB piezotronics**. Este dispositivo está unido a la placa circular de acero mediante una rosca. Tiene como función medir la aceleración de

la placa circular de acero cuando se deja caer libremente la masa de ensayo. En la siguiente tabla se presenta la descripción técnica del acelerómetro del impactó.

Tabla 2. descripción técnica del acelerómetro

PERFORMANCE	ENGLISH	SI
Sensitivity ($\pm 30\%$)	0.5 mV/g	0.05 mV/(m/s ²)
Measurement Range	$\pm 10,000$ g pk	$\pm 98,000$ m/s ² pk
Frequency Range (± 1 dB)	0.4 to 10,000 Hz	0.4 to 10,000 Hz
(- 3 dB)	0.2 to 25,000 Hz	0,2 to 25,000 Hz
Electrical Filter Corner Frequency (-3 dB)	13 kHz	13 kHz
Mechanical Filter Resonant Frequency	23 kHz	23 kHz
Resonant Frequency	≥ 100 kHz	≥ 100 kHz
Broadband Resolution (1 to 10,000 Hz)	0.04 g rms	0.39 m/s ² rms
Non-Linearity	$\leq 2.0\%$	$\leq 2.0\%$
Transverse Sensitivity	$\leq 7\%$	$\leq 7\%$
ENVIROMENTAL		
Overload Limit (Shock)	$\pm 50,000$ g pk	$\pm 490,000$ m/s ² pk
Temperature Range (Operating)	0 to 150 °F	-18 to +66 °C
(Storage)	-40 to 200 °F	-40 to +93 °C
Base Strain Sensitivity	0.002 g/ μ s	0.02 (m/s ²) / μ s
ELECTRICAL		
Excitation Voltage	20 to 30 VDC	20 to 30 VDC
Constant Current Excitation	2 to 20 mA	2 to 20 mA
Output Impedance	≤ 200 ohm	≤ 200 ohm
Output Bias Voltage	8 to 14 VDC	8 to 14 VDC
Discharge Time Constant	1.0 to 2.0 sec	1.0 to 2.0 sec
Setting Time (within 10% of bias)	< 10 sec	< 10 sec
PHYSICAL		
Sensing Element	Ceramic	Ceramic
Sensing Geometry	Shear	Shear
Housing Material	Titanium	Titanium
Sealing	Hermetic	Hermetic
Size (Hex x Height)	0.375 in x 1.02 in	9.5 mm x 25.9 mm

Sistema de Adquisición de Datos: está compuesto por tres elementos, el primero es un lector de tarjetas. Su función es recibir la información de la celda de carga y transmitirla al computador, los otros dos elementos son las tarjetas de adquisición de la celda y del acelerómetro respectivamente. La información la recibe el lector por medio de dos tarjetas de lectura. La primera (**NI USB-9237**) se conecta a la celda de carga, mientras que la segunda (**NI USB-9233**) está conectada al acelerómetro.

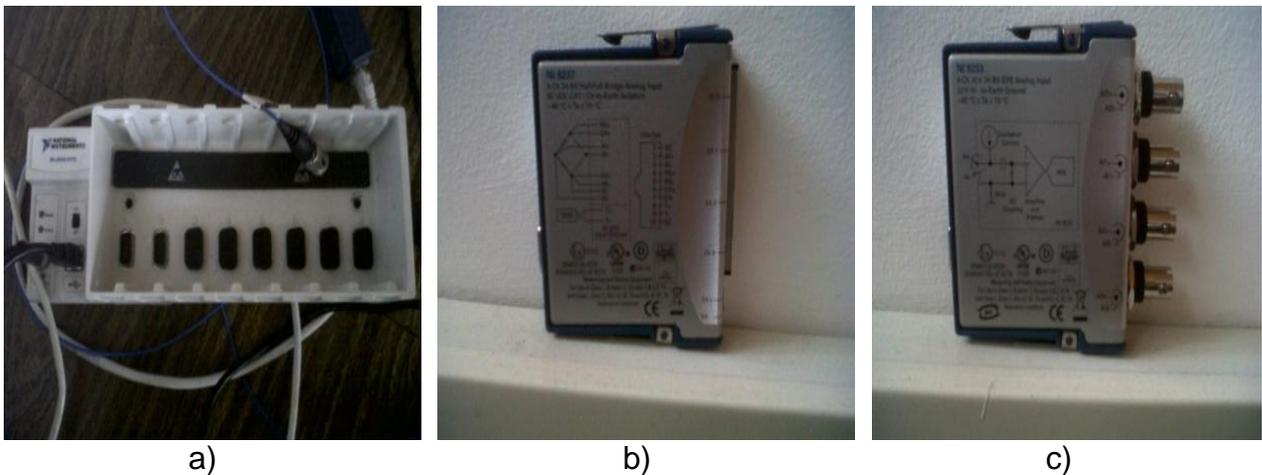


Figura 12. . a) Lector de Tarjetas NI CDAQ-9172. b) Tarjeta de lectura (celda de carga) NI USB-9237. c) Tarjeta de lectura (acelerómetro) NI USB-9233

El sistema de adquisición de datos convierte los valores eléctricos de corriente o de voltaje (señales análogas) a valores digitales (ej: 0 V = 0000 0000 digital, 5 V = 1111 1111 digital, 2.5 V = 1000 0000 digital). En los sistemas electrónicos, cada valor digital corresponde a un valor decimal único, el cual debe ser escalado (multiplicado por una constante) para ajustar su valor al valor físico real.

El hardware entonces incluye los siguientes componentes:

SENSORES: Como su nombre lo indica estos elementos perciben la variable física para la cual han sido diseñados y traducen la magnitud física a una señal eléctrica

equivalentes de corriente o voltaje en rangos estandarizados y están en la celda de carga y en el acelerómetro.

CELDA DE CARGA: Sensor diseñado especialmente para medición de peso. Su principio de operación es la variación de la resistencia eléctrica debida a deformaciones mecánicas. El sensor se alimenta permanentemente con una fuente de voltaje constante y su salida presenta una señal del orden de los mili voltios proporcional a la deformación percibida.



Figura 13. Celda de Carga

Tabla 3. descripción técnica de la celda de carga empleada **Fuente:** National Instruments

Excitation	10 Vdc (15 Vdc max)
Intrinsically Safe	IS/I.II.III/1/CDEFG
FM Hazardous Location:	S/I/I/ABCD (must be specified at time of order)
Protection Class	IP67

Linearity	±0.05 % FSO
Hysteresis	±0.03 % FSO
Repeatability	±0.02 % FSO
Zero Balance	±1 % FS
Operating Temp Range	-46 to 100 °C (-50 to 212 °F)
Compensated Temp Range	16 to 71 °C (60 to 160 °F)
Thermal Effects	
Zero	±0.0018 % FS/°C
Span	±0.0018 % rdg/°C
Safe overload	150 % of rated capacity
Ultimate Overload	300% of rated capacity
Input Resistance	350 ± 10 Ω
Output Resistance	350 ± 10 Ω
FS deflection	0.18 to 0.50 mm (0.007 to 0.020) typical
Construction	
Metric and Standard Ranges <500,000 lb	17-4 HP stainless steel
Ranges ≥ 500,000 lb	High-alloy steel
Electrical	
LC1001/LCM1001	4.8 M (15') 4-Conductor shielded PVC cable
LC1011/LCM1001	PTIH-10-6P (or equiv.)
Mating connector	PT06F10-6S

SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS: TARJETA PRINCIPAL

Tarjeta para acondicionamiento de señal y adquisición de datos de acelerómetros marca NI ref. 9233. Permite tomar desde 2000 datos por segundo hasta un máximo de 25000 datos por segundo, especialmente diseñada para medición de vibraciones instrumentadas con acelerómetros.

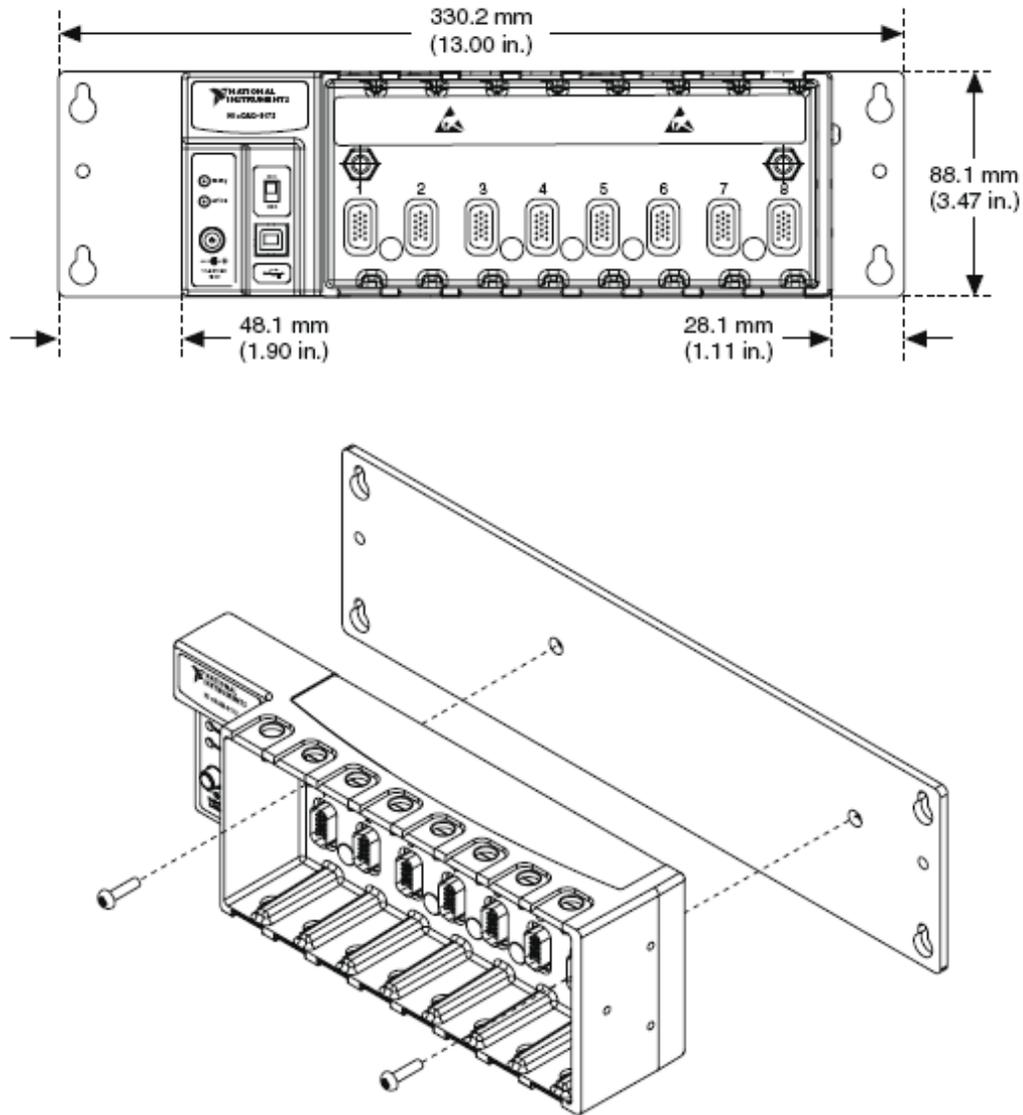


Figura 14. Tarjeta lectora principal. **Fuente:** National Instruments

Tabla 4. descripción técnica de la tarjeta principal. **Fuente:** National Instruments

Input FIFO size	2,047 samples
Sample Rate	
Maximum	3.2 MS/s (Multi-channel, aggregate)
Minimum	0 S/s
Timing Accuracy	50 ppm of sample rate
Timing Resolution	50 ns
Number of Channels Supported	Determined by the C series I/O modules

TARJETA DE ADQUISICIÓN DE DATOS PARA ACELERÓMETROS: Tarjeta para acondicionamiento de señal y adquisición de datos de celdas de carga marca ni ref NI 9237 Permite tomar desde 2000 datos por segundo hasta un máximo de 25000 datos por segundo, especialmente diseñada para medición de esfuerzo mediante celdas de carga.

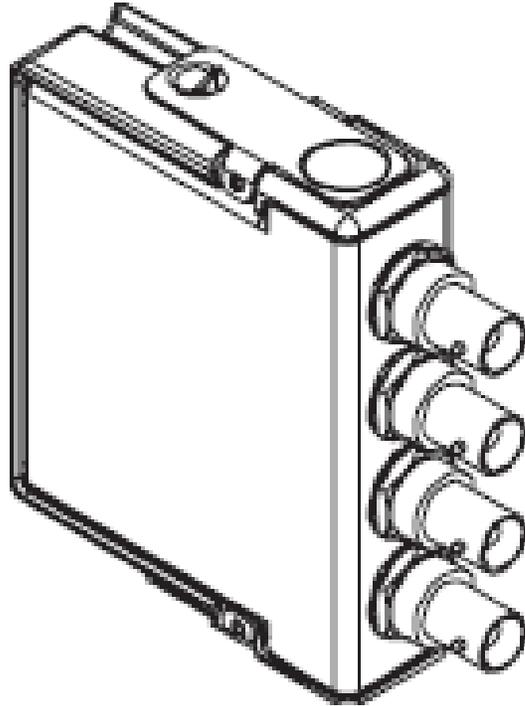


Figura 15. Tarjeta lectora del acelerómetro. **Fuente:** National Instruments

4.2 CALIBRACIÓN DE LA CELDA DE CARGA Y EL ACELERÓMETRO

La calibración de la celda de carga consistió en transmitir una fuerza conocida que para este caso se realizó con la máquina universal marca SHIMATSU de la Pontificia Universidad Javeriana como se indica en la siguiente figura mientras se lee el correspondiente valor en voltios emitidos por la celda para luego encontrar la ecuación o función que relacione el voltaje con la carga



Figura 16. Imagen tomada durante el proceso de montaje de la celda de carga en los laboratorios de la U Javeriana. La maquina empleada para la calibración fue la Universal mostrada en la imagen

De los datos obtenidos de la maquina universal y los registros de voltaje de la celda se encuentra la ecuación lineal (ver **Figura 17**) que posteriormente se implemento en el software de adquisición de datos para de esta forma trabajar con los valores reales

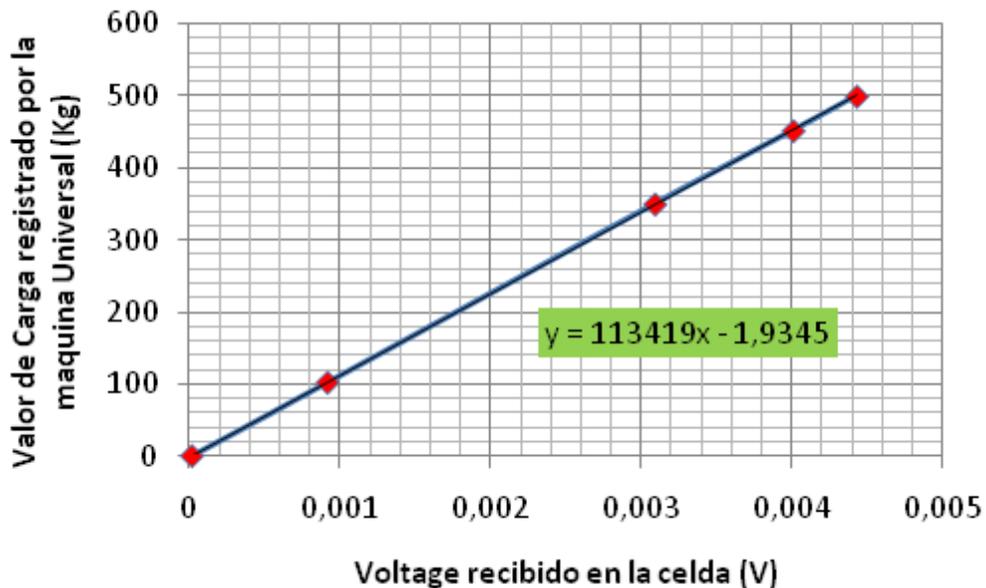


Figura 17. Calibración de la celda de carga

La calibración del acelerómetro se efectuó tomando los datos suministrados por el fabricante en la hoja de especificaciones técnicas (ver figura) e implemento dichos datos en el software de adquisición de datos para así trabajar con los valores reales.

Computador: permite realizar las lecturas y analizar la información proveniente de la celda de carga.

4.3 APLICATIVO SOFTWARE DE ANÁLISIS

El software desarrollado empleo la plataforma LABVIEW de la casa National Instrument por poseer gran versatilidad y ayudas relacionadas con las tarjetas de adquisición de datos, celda de Carga, acelerómetro y las herramientas para el procesamiento de señales.

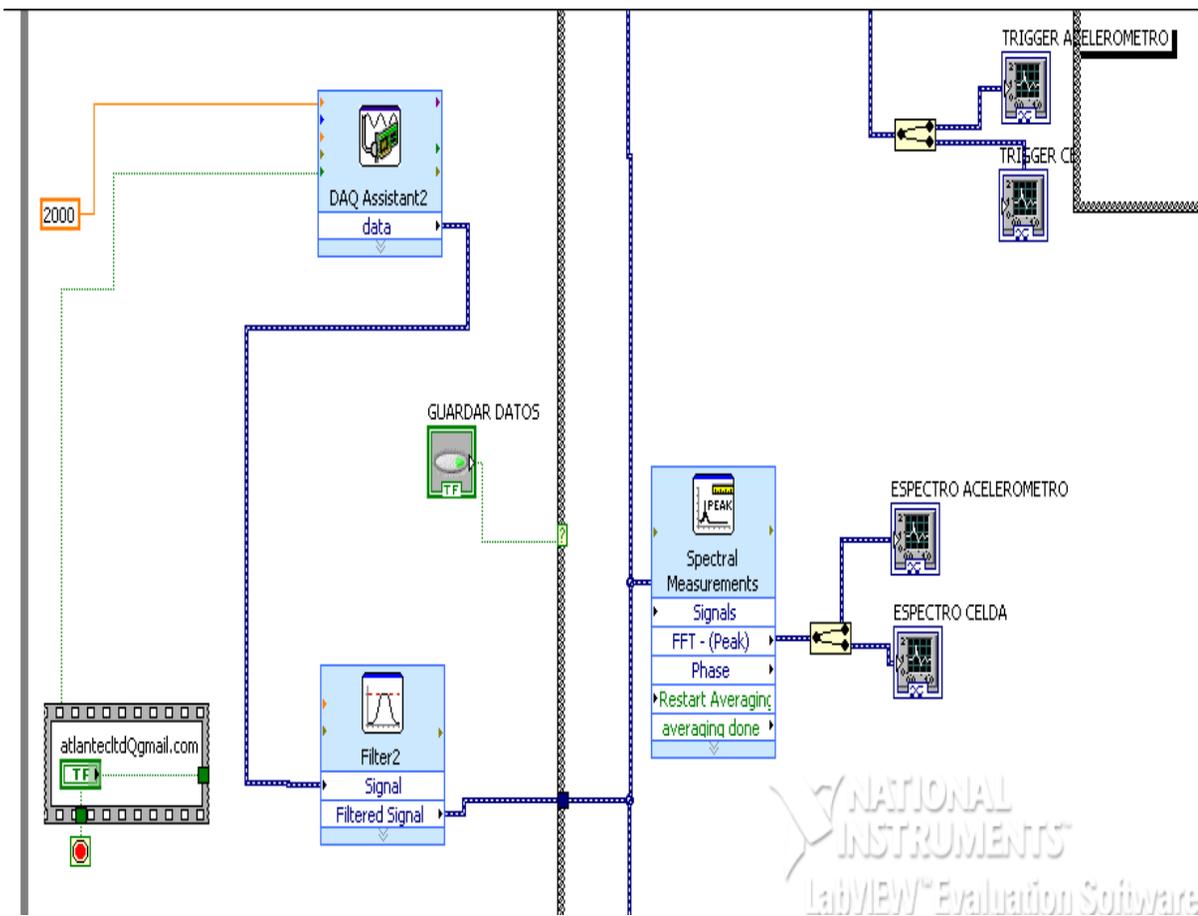


Figura 18. Visual de la diagramación del programa

La interfaz gráfica creada contiene básicamente las siguientes cuatro pestañas las cuales se explican en los siguientes numerales:

4.3.1 SEÑALES DE ENTRADA

En la pestaña inicial se presentan en tiempo real las señales del acelerómetro, de la celda de carga, barras de ajuste, un botón de inicio del ensayo así como el número de muestras que serán recolectadas.

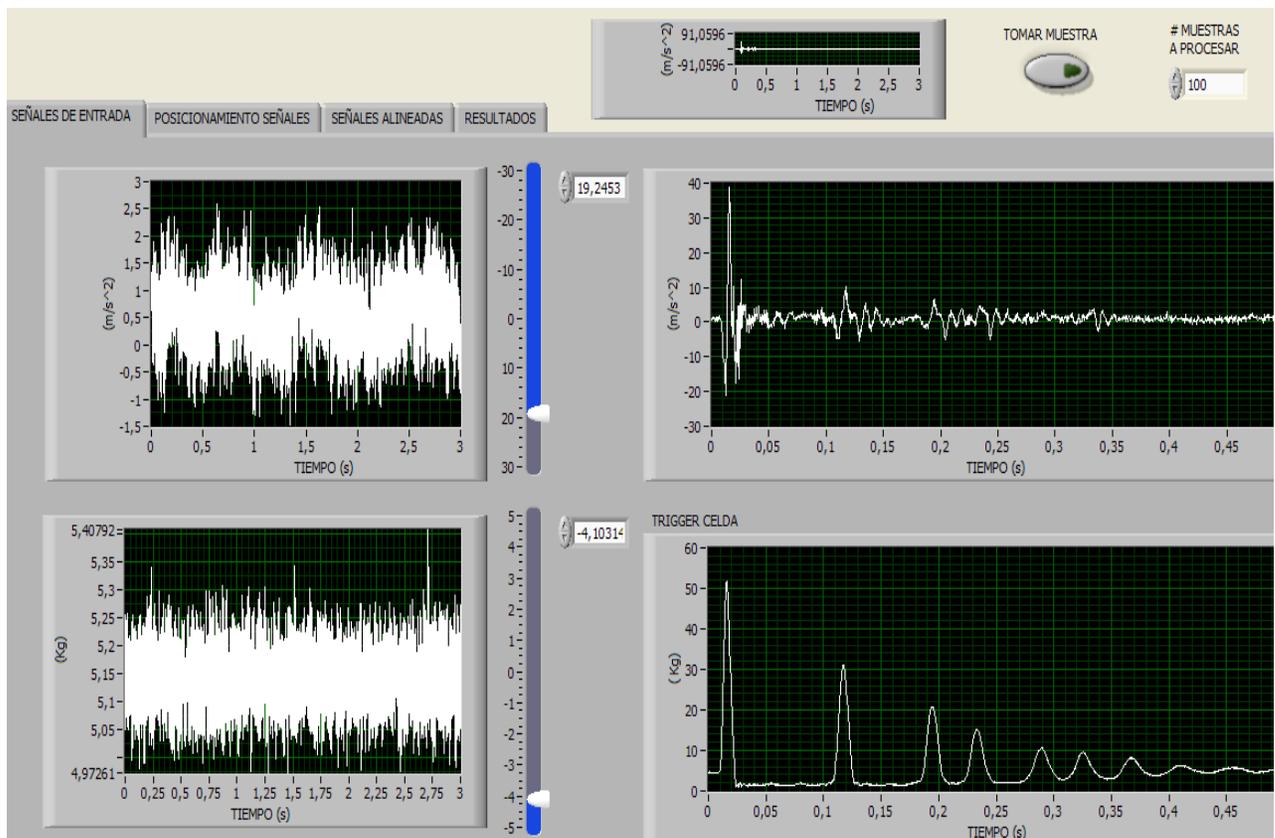


Figura 19. Visual de la primera pestaña

El objeto de las barras de ajuste se implementó, tanto para la señal emitida por el acelerómetro como para la celda de carga por las siguientes razones:

El acelerómetro tiene la capacidad de leer frecuencias que no son del interés del ensayo como las emitidas por elementos electrónicos (celulares, radios, ect) y

adicionalmente ruido o vibraciones por lo cual antes de iniciar el ensayo se hace necesario llevar las lecturas a cero o tarar el ensayo.

La celda de carga al igual que el acelerómetro debe ser ajustado a un valor de cero debido a que con la repetición del ensayo se noto que tanto los neoprenos como el ajuste de las placas se descalibran por lo tanto se creó una barra de ajuste del elemento que garantice un punto de inicio.

En las siguiente figura se indican los elementos de la pestaña de las señales:

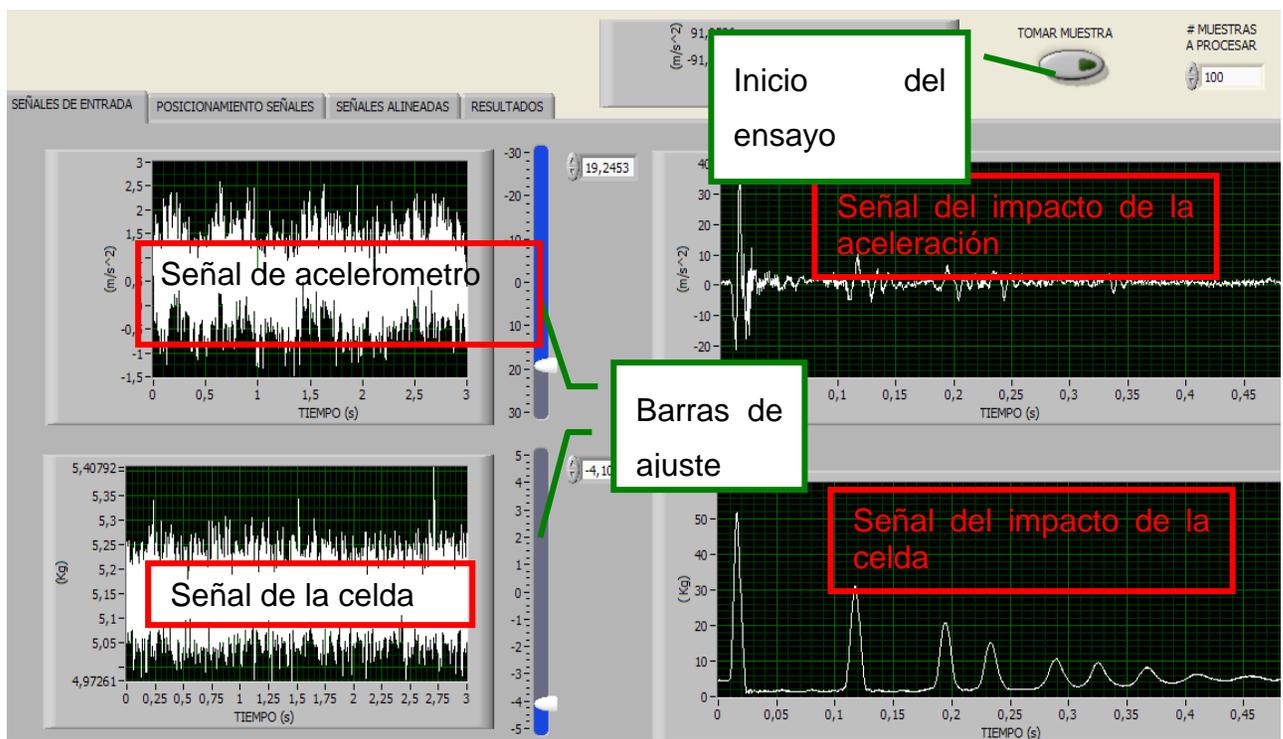


Figura 20. Visual de la primera pestaña

Adicionalmente se incorporo una ventana en la que se puede digitar el número de muestras que se desean tomar, esto con el objeto de restringir los datos recolectados por la sensibilidad de los dispositivos y evitar un desborde de datos que puede hacer inmanejable la información.

Por el método de ensayo y error se determino que el número de datos con los cuales se puede garantizar un buen análisis de la información son los primeros 0.45 segundos

que corresponde a unos 100 datos aproximadamente y teniendo en cuenta que el intervalo de lectura alcance a tomar los 0.40 milisegundo en los que ocurre el evento principal el que es en esencia cuando cae la masa e impacta la celda de carga.

El programa incluye un bloque trigger o condicional que se encarga de detectar y guardar los datos correspondientes exclusivamente al impacto de la masa y filtra los demás datos inútiles.

En esta pestaña se deja una gráfica de rastreo o barrido de **Aceleración vs Tiempo** que refleja el recorrido completo de la aceleración una vez se desarrolla el ensayo. Como se puede apreciar en la siguiente figura, al principio se puede notar una onda pico (hacia abajo contra el suelo y hacia arriba el rebote), ésta es generada por el golpe inicial de la masa cuando golpea el sistema de carga y por consiguiente la celda de carga. Las demás ondas que aparecen después de ésta, se generan por el rebote de la masa de ensayo debido al amortiguamiento.

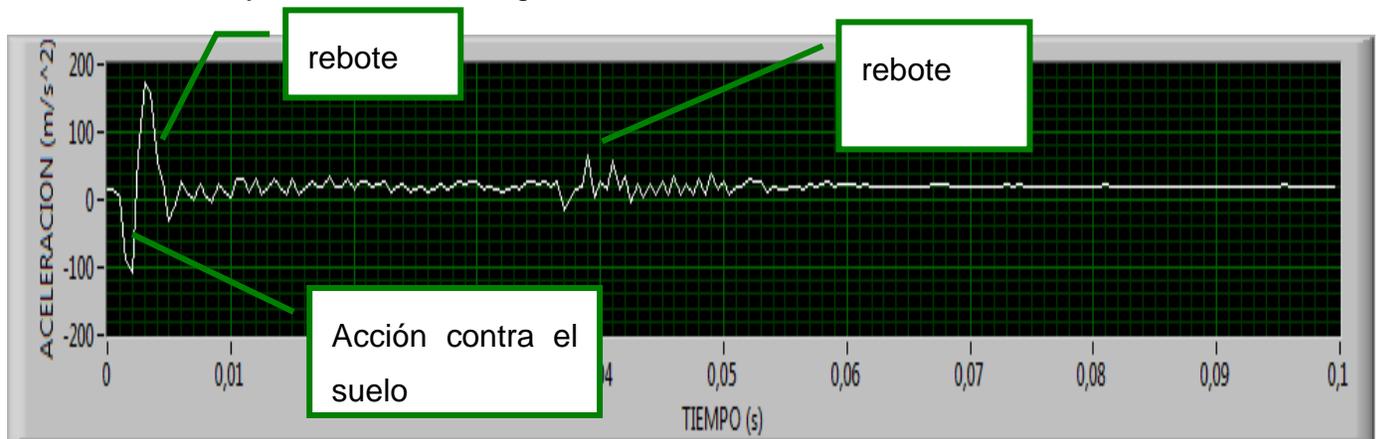


Figura 21. Barrido de Aceleración vs Tiempo, sistema de adquisición de datos.

En esta gráfica se puede observar cuán grande puede ser la aceleración inversa esto es a materiales más rígidos los materiales se deforman menos pero generan que todo el dispositivo literalmente se eleve cuando termina el pulso de fuerza.

En la parte inferior izquierda de la pestaña se presenta una gráfica que representa el **barrido de Fuerza vs Tiempo**: mostrando el recorrido completo del impulso de fuerza con respecto al tiempo, una vez se ha dejado caer la masa de ensayo. Así como en la

gráfica anterior, se aprecia una onda pico generada por el golpe inicial y ondas subsecuentes generadas por el rebote de la masa que debe ser coincidente con la gráfica del barrido de la aceleración y que permite al usuario determinar visualmente si el ensayo fue ejecutado correctamente.

En la siguiente figura se muestra las dos gráficas y la coincidencia de las señales del acelerómetro y de la celda de carga



Figura 22. Barrido de Fuerza vs Tiempo y el barrido de Aceleración vs Tiempo deben ser coincidentes en el tiempo.

Una vez el usuario determina que el ensayo se ejecuto correctamente debe guardar los datos para su posterior manipulación en la segunda pestaña.

El almacenamiento de los datos se realiza manualmente aceptando guardar un archivo llamado "ACEL_FUERZA_PORCENTUAL". En un menú (ver la siguiente figura) que se

ejecuta automáticamente después de la caída de la masa y la lectura de por lo menos el número de datos determinado por el usuario previamente.

Los datos son guardados en el disco duro del computador como un archivo plano que podrá ser manipulado en programas convencionales como excel para poder hacer un control externo de la información que posteriormente se debe realizar.

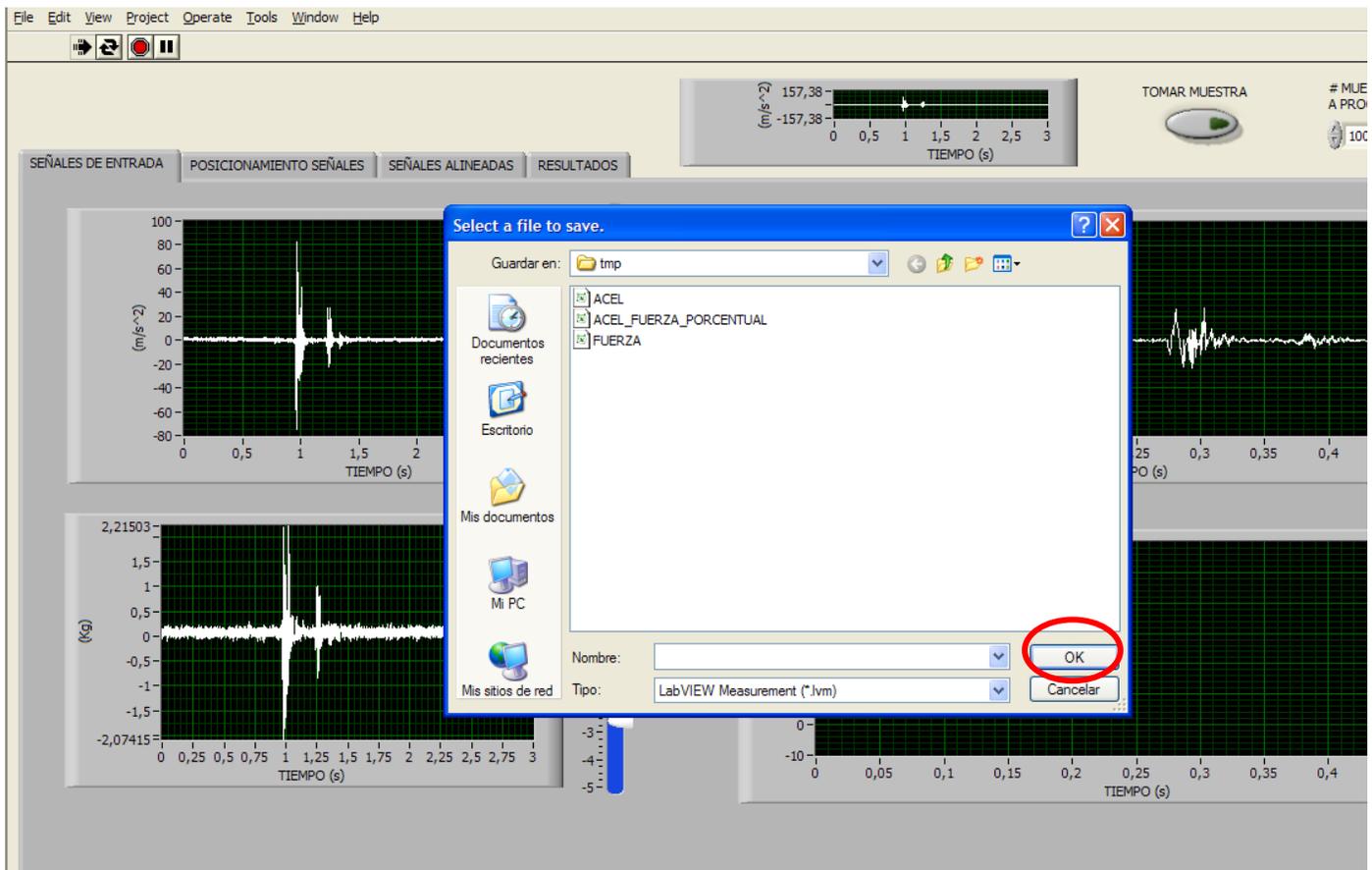


Figura 23. Menú guardar datos para su posterior análisis.

Después que el programa ha guardado los datos se puede pasar a la segunda pestaña en la cual se empieza el procesamiento de la información y es independiente de las señales en tiempo real que se observan en la primera pestaña.

4.3.2 POSICIONAMIENTO DE LAS SEÑALES

Como se ha mencionado en el párrafo anterior los datos del ensayo son almacenados en un texto plano que es nuevamente leído por el aplicativo.

En esta pestaña se muestran dos gráficas iguales en las que muestran las señales leídas o barridas de la aceleración y la fuerza normalizadas o en porcentaje para facilidad de manejo

La señal de aceleración se muestra en blanco mientras la señal de fuerza se muestra en rojo.

El objeto de las dos gráficas es en cada una de ellas determinar visualmente mediante un cursor el inicio del pulso de fuerza y el de aceleración en cada una de las gráficas, así en la gráfica de la parte superior se tara la señal de fuerza y su valor inicial es registrado en una ventana en la

en la primera gráfica

El primer paso que debe hacer el usuario es alinear las señales dado que en el momento de la toma de datos de las señales son guardadas en diferentes intervalos de tiempo.

Este desfase se hace necesario por el mecanismo o condicional generado para guardar las señales en la sección donde se localiza la información necesaria, omitiendo datos inútiles o una cantidad que desborde la memoria del computador.

En la siguiente figura se indica el desfase de las señales.

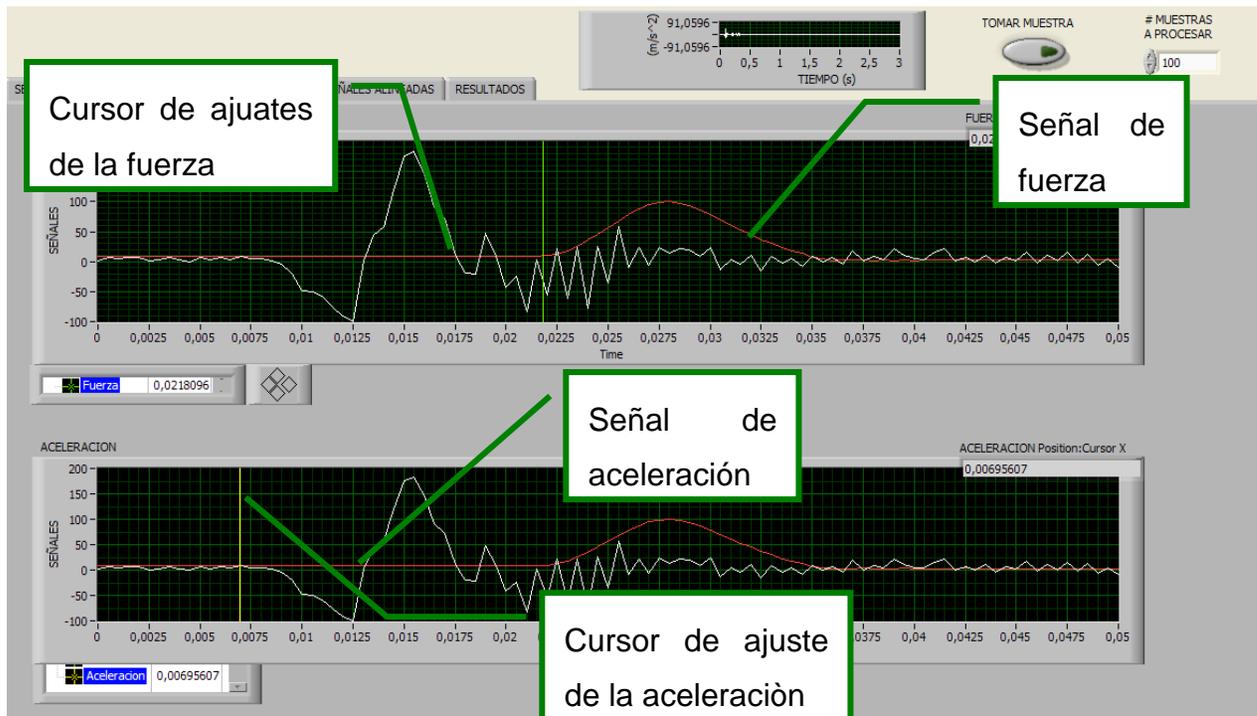


Figura 24. Señales del acelerómetro y la celda de carga

4.3.3 SEÑALES ALINEADAS

Luego de alinear las señales en esta pestaña se revisa que tanto la aceleración como la fuerza coincidan mediante una interface gráfica en la que el usuario puede visualmente ver el momento del pulso de fuerza contra la aceleración, la velocidad y el desplazamiento instantáneo.

En la siguiente figura se indica los ítem que deben ser observados en las gráficas mostradas en esta pestaña los cuales en términos generales son: 1 la aceleración máxima debe coincidir con el máximo pulso de fuerza; 2 la velocidad para el máximo punto de aceleración y debido a que hay un cambio de pendiente debe ser cercano a cero, este fenómeno es previsible porque es el instante en el que termina la aplicación del pulso de fuerza y se inicia el rebote instantáneo, :3 la máxima de formación ocurre en el pico del pulso de fuerza.



Figura 25. Posicionamiento de las señales

4.3.4 RESULTADOS

En esta pestaña básicamente se entra y se determina la pendiente de la curva esfuerzo deformación mediante dos cursores, uno en la parte superior y el otro en la parte inferior.

El principio general del dispositivo consiste en una masa que cae e impacta una placa, produciendo un pulso de carga y una deflexión en la placa; Con la información del pulso de carga, la deformación y la geometría del área de contacto de la placa se calcula el módulo de deformación mecánica (E) usando la solución de Boussinesq:

Donde $k = \pi/2$ ó 2 para placas rígidas y flexibles, respectivamente; $\delta_c =$ deflexión central; $\sigma =$ esfuerzo aplicado; y $R =$ radio de la placa.

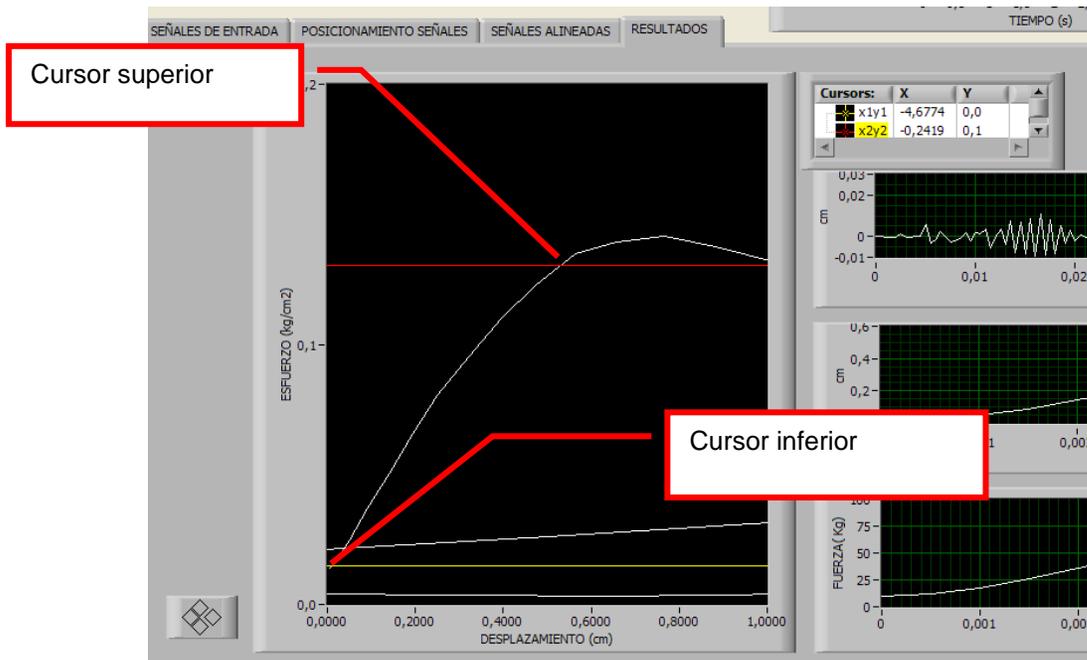


Figura 26. Posicionamiento de las señales

4.4 ENSAYOS DE CAMPO

Los ensayos de campo se realizaron dentro de los estudios de pavimentos de la vía Los Alpes Villeta que se encuentra en el departamento de Cundinamarca, a escasos 36 kilómetros de la capital de la república de Colombia.

Este corredor vial forma parte de la red vial del departamento de Cundinamarca y se encuentra estrechamente vinculada con la red vial nacional, al comunicar por el sur con la ruta transversal 50 y con la futura ruta del sol que comunica la ciudad de Bogotá con el norte del país y la costa atlántica. Por el norte se conecta con la vía concesionada Los Alpes Facatativá – Bogotá y hacia el occidente formando parte de la concesión departamental Los Alpes - Chuguacal – Cambao.

El corredor actual tiene una longitud aproximada de treinta y seis kilómetros iniciando en el sitio donde termina la concesión nacional Río Bogotá –Facatativá – Los Alpes que

opera la empresa CCFC (sector de Los Alpes PR101 + 040) y llega hasta el Municipio de Villeta en el sector denominado como el intercambiador Guaduas (PR 65 +200).

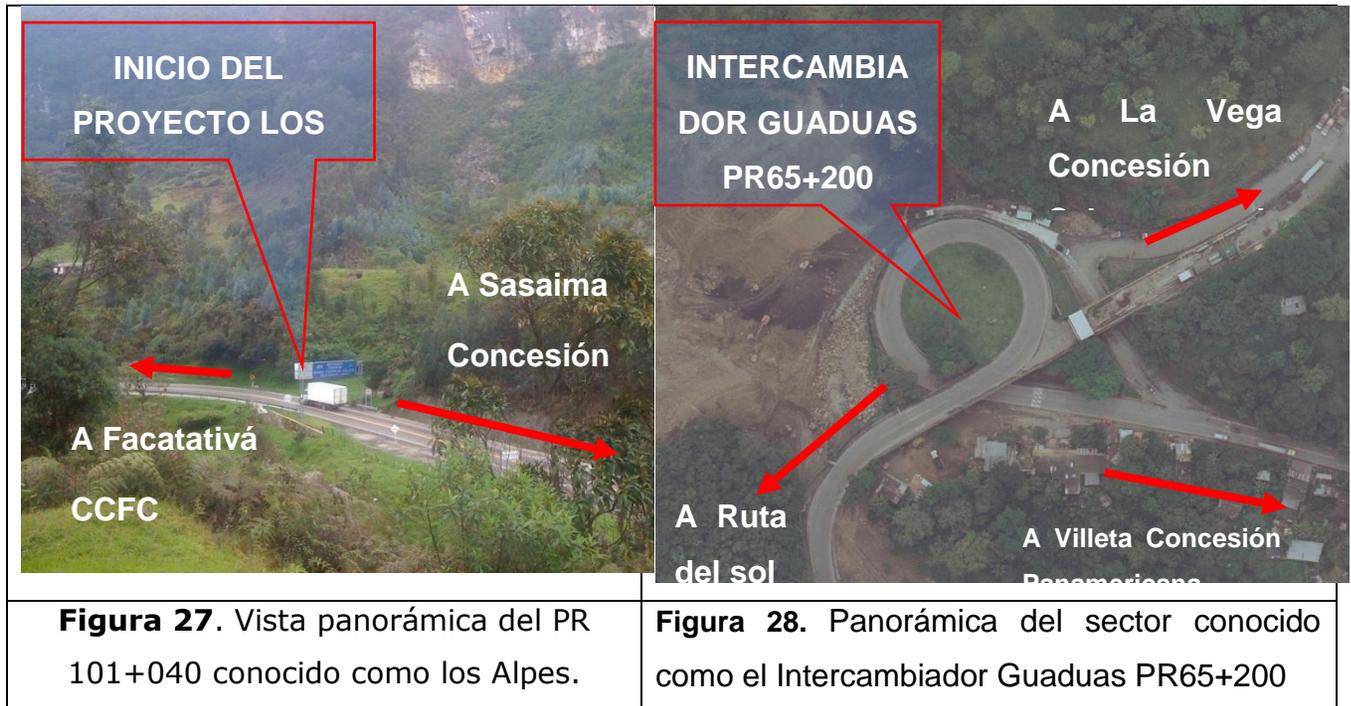


Figura 27. Vista panorámica del PR 101+040 conocido como los Alpes.

Figura 28. Panorámica del sector conocido como el Intercambiador Guaduas PR65+200

Durante los estudios que buscan llevar a doble calzada el sector comprendido entre los Alpes y el municipio de Villeta, conectando a la ruta 50 con la ruta del Sol mediante la implementación de las variantes de los municipios de Albán, Sasaima y Villeta con una longitud aproximada de treinta y ocho (38.0) kilómetros Siguiendo los requerimiento técnicos típicos para este tipo de proyectos el valor de los predios, de manera que la solución propuesta no atraviese sectores cuyos costos hagan inviable el proyecto.

Dentro de los estudio y de acuerdo con las condiciones físico-mecánicas de los materiales rocosos aflorantes en el área del corredor proyectado, así como su disposición estructural, características morfogenéticas y morfométricas, y los procesos morfodinámicos en los materiales, se establecer una clasificación de zonas homogéneas o unidades de terreno para el corredor.

Las zonas homogéneas o unidades de terreno definidas principalmente por su características geológicas, geomorfológicas, geotécnicas, nos proporciona las

condiciones de estabilidad apropiadas y/o de susceptibilidad o su comportamiento a que están sujetos ante cualquier utilización ingenieril.

A continuación se relacionan las zonas homogéneas que para un mayor entendimiento se distribuyeron de la siguiente forma y en los cuales se realizaron apiques en los que se extrajeron muestras de CBR, y ejecutaron ensayos de clasificación y se probó el dispositivo:

- Tramos desde la Alpes al fin de la variante Sasaima (Son 15)
- Tramos o sectores de la Variante Sasaima (5 zonas)
- Tramos desde el fin de la Variante Villeta e inicio de la Variante Sasaima (Son 12)
- Tramos de la Variante Villeta (6 zonas)

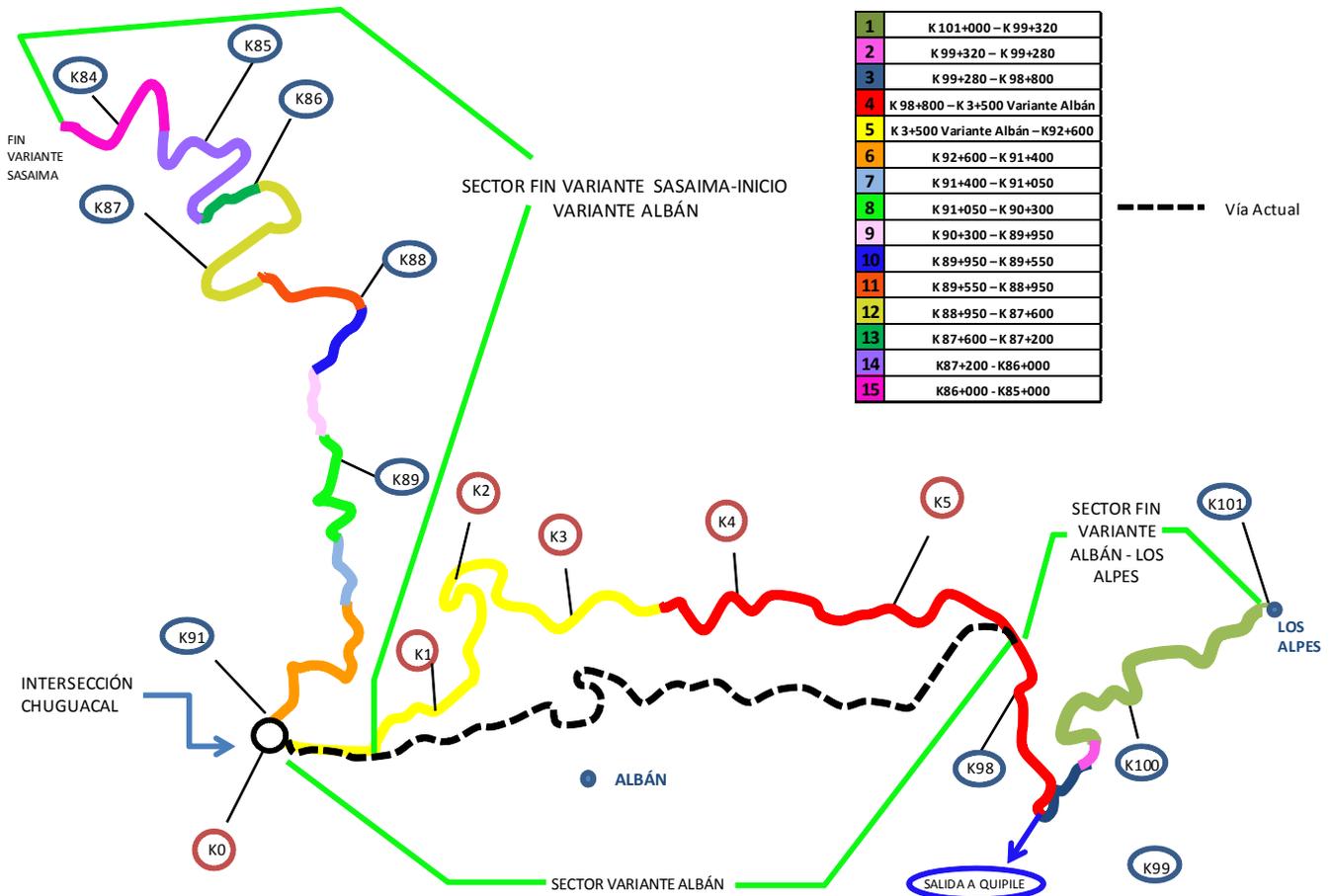


Figura 29. Localización de los tramos homogéneos desde los Alpes al final de la Variante Sasaima.

En el tramo comprendido desde el KM 101+000 AL KM 99+320 la zona corresponde al trazado de ampliación del corredor sobre material aflorante de Qco.. Morfológicamente corresponden a laderas que son fuertes y con relieves fuertemente ondulados a colinados en Qco.



Figura 30. Zona correspondiente a alta montaña en la llegada al sector conocido como los Alpes



Figura 31. Zona donde se realizaron los apiques para la calzada nueva.

En este sector se hicieron seis (6) apiques para un total de 9.49 ML de perforación y siete (7) sondeos manuales para un total de 47 ML de perforación, dichas perforaciones con sus respectivas abscisas se muestran a continuación:

Tabla 5. Relación de perforaciones del sector 1 con su abscisa.

PERFORACIÓN	ABSCISA
Apique 1	K101+000
Apique 2	K100+750
Apique 3	K100+500
Apique 4	K100+250
Apique 5	K99+500
Apique 6	K100+600
Sondeo Manual 1	K100+600
Sondeo Manual 1 A	K100+600

Sondeo Manual 2	K100+600
Sondeo Manual 3	K100+600
Sondeo Manual 4	K100+030
Sondeo manual 5	K100+030
Sondeo Manual 6	K100+030

Los resultados de los ensayos de laboratorio se presentan en el Anexo I, así como los registros de perforación que esquemáticamente se muestran en la siguiente figura:

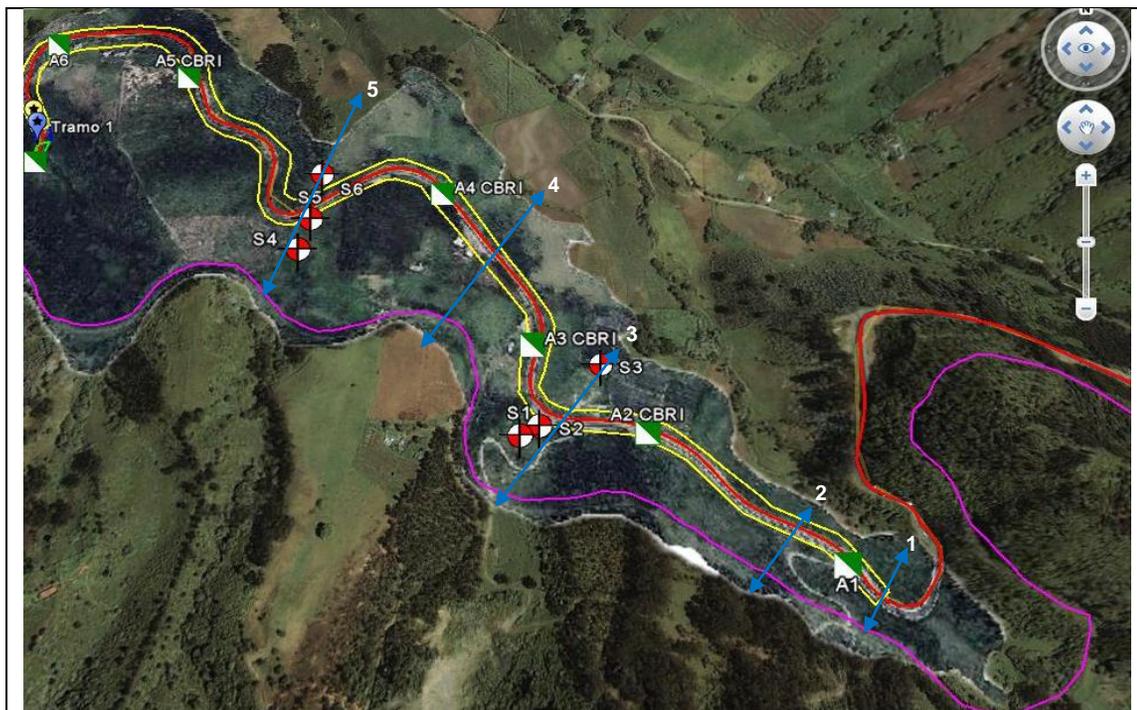
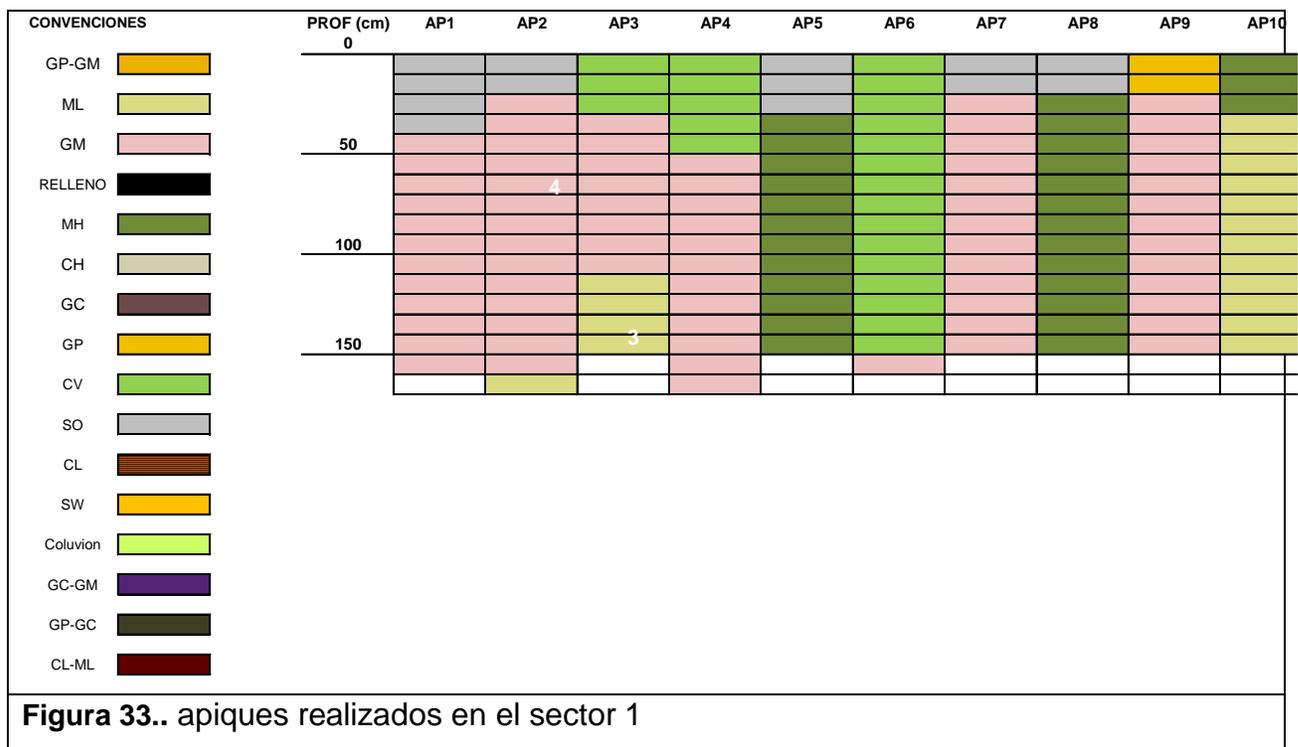


Figura 32.. Localización de las perforaciones realizadas en el sector 1.

En la parte superior de este tramo se encuentra en su mayoría suelo orgánico y capa vegetal, los cuales varían entre 0.2m a 0.4m y 0.3m hasta 1.50m respectivamente, debajo de estos encontramos en un mayor porcentaje suelos conformados por gravas con finos (limo arenoso) de baja plasticidad y de alta compresibilidad, en menor

porcentaje encontramos un suelo limo arenoso de grano fino de consistencia dura, plasticidad media y alta compresibilidad, en donde el LL varía entre 59% y 73%, con un IP que varía entre 16% y 23%, cuyo estrato varía entre 0.3m hasta 1.3m y en menor porcentaje se encuentra un suelo limo arenoso de consistencia dura, baja plasticidad y compresibilidad, el cual tiene una variación de su profundidad entre 0.1m y 1.20m.

A continuación se indica gráficamente la exploración realizada en el sector1



5 CONCLUSIONES

Existen diferentes métodos de medición para la caracterización de materiales a partir de pruebas dinámicas de carga evaluando la competencia de los materiales ante sollicitaciones dinámicas, dentro de las que se destacan las destructivas y las no destructivas.

Los procedimientos destructivos son dispendiosos desde el mismo momento de la extracción de la muestra o núcleo hasta la ejecución de los correspondientes ensayos, involucrando innumerables variables que deben ser controladas adecuadamente para no alterar los de las pruebas de laboratorio, de otro lado los ensayos no destructivos sugieren procedimientos más expeditos para obtener la información directamente en campo por lo que son altamente eficientes.

La construcción de un dispositivo manual de medición de la fuerza y el desplazamiento resultantes de una carga dinámica para realizar pruebas dinámicas “in situ” comúnmente llamado deflectómetro portátil de caída o PFWD por sus siglas en Ingles (Portable Falling Weight Deflectometer) que consiste en la aplicación de una carga bajo condiciones dinámicas como un método no destructivo de evaluación de materiales térreos como bases, sub-bases granulares y subrasantes principalmente queda a disposición de la Universidad Javeriana como parte de los equipos con los cuales se puede ampliar la investigación en esta materia sin embargo se recomienda la compra de una celda de carga con un rango más amplio que 250 kg con el fin de poder analizar el ensayo para mayores pulsos de carga.

A partir del dispositivo se podrá proyectar un programa de ensayos de laboratorio para corroborar la información primaria obtenida como por ejemplo el incremento del modulo con el aumento de las masas utilizadas (0.5 kg, 1.0 kg y 2.0 kg) la cual se puede observar en la siguiente figura:

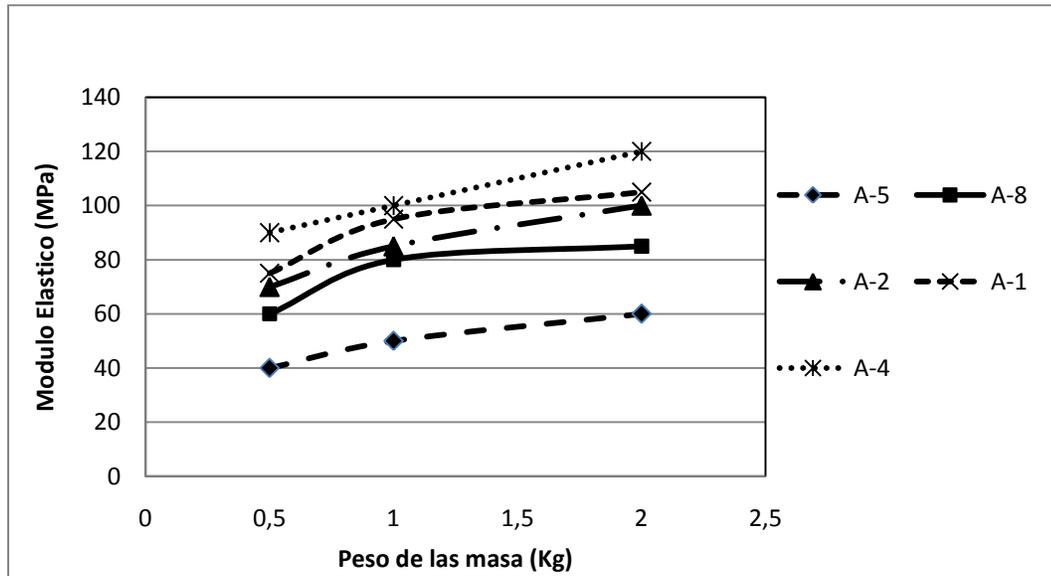


Figura 34.. incremento del modulo con la energía del impacto

Los resultados muestran inicialmente que puede existir una buena relación entre el CBR y el módulo calculado a partir del dispositivo para ciertos rangos de CBR como se indica en la siguiente figura:

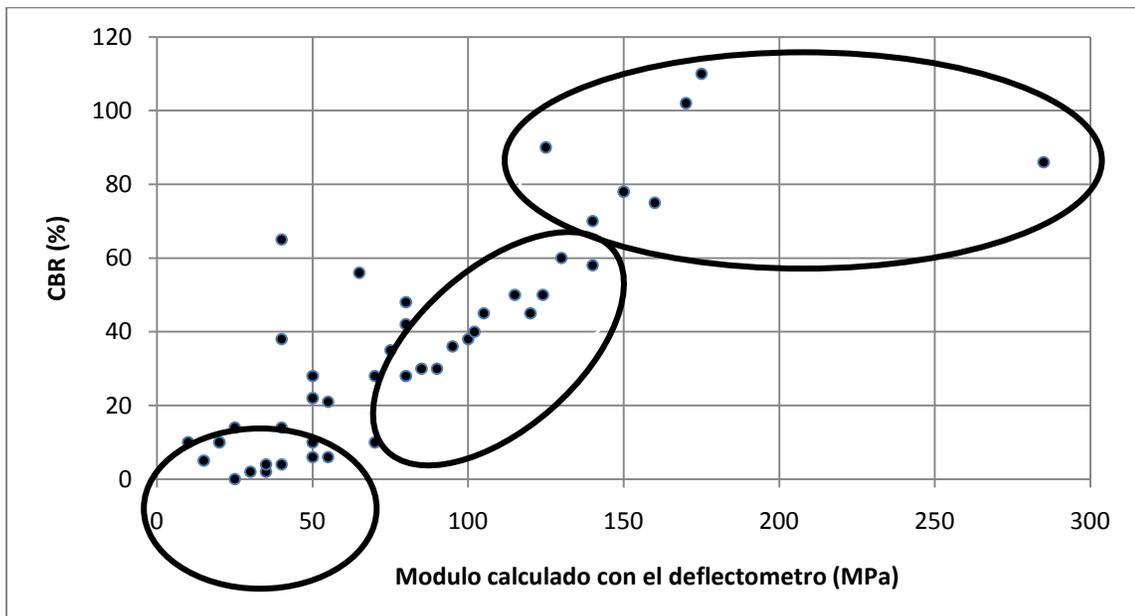


Figura 35.. relación entre el modulo y el CBR

6 BIBLIOGRAFÍA

- Adam C., Adam D., 2003. *Modelling of the Dynamic Load Plate Test With the Falling Weight Device*. Asian journal of civil engineering (building and housing). 4, 73-89.
- Alshibi K., Abu-Farsakh M., Seyman E., 2006. *Laboratory Evaluation of the Geogauge and Light Falling Weight Deflectometer as Construction Contro Tools*. Journal of Materials in Civil Engineering ASCE, 560-569.
- ASTM Standards E2583 – 07, 2007. *Standard Test Method for Measuring Deflections with a Light Weight Deflectometer (LWD)*.
- Fleming P., Frost M., Lambert J., 2007. *A review of the Lightweight Deflectometer (LWD) for Routine In-Situ Assessment of Pavement Material Stiffness*. Tranportation Research Board. 1-15.
- Fleming P, Frost M., Rogers C., 2000. *A comparison between devices for Measuring Stiffness In-Situ*. Unbound aggregates in road construction: Proceedings of the Fifth International Symposium on Unbound Aggregates in Road, Nottingham, United Kingdom.193-200
- Hossain M., Apeageyi A, 2010. *Evaluation of the Lightweight Deflectometer for In-Situ Determination of Pavement Layer Moduli*. Virginia Transportation Research Council. (434) 293-1900
- Kavussi A., Rafiei K., Yasrobi S., 2010. *Evaluation of PFWD as Quality Control Tool of Pavement Layers*. Journal of Civil Engineering and Management. 16(1), 123-129.
- Guzina B., Nintcheu S., 2002. *A study of ground-structure interaction in dynamic plate load testing*. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics. 26, 1147-1166.
- Mojica J., 2006. Análisis mediante modelos físicos de Interacción Suelo Estructura en Tuberías Flexibles Enterradas. Pontificia Universidad Javeriana.
- Pavana K., Vennapusa R., White D. *Comparison of Light Weight Deflectometer Measurements for Pavement Foundation Materials*, Geotechnical Testing Journal. 32, 1-13.
- Pérez A., Garnica P., Gómez J., Martínez G., 2004. *Uso y Calibración de Deflectómetros de Impacto en la Evaluación Estructural de Pavimentos*. Secretaría de comunicaciones y transportes, Instituto Mexicano del Transporte. 252. 1-54.
- Ryden N., Mooney M., 2009. *Analysis of Surface waves from the Light Weight Deflectometer*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 29. 1134-1142.

- Saldaña F., Crespo R., Fernández C., 2004. Comparación entre Ensayos de Carga con Placa y Ensayos con Deflectómetro de Impacto Portátil. 1-9.
- Tadeo Carlos, 2006. Ensayo de Placa de Carga Dinámica de 300 mm de diámetro. Boletín de la Asociación de Laboratorios Acreditados de la Comunidad de Madrid. 1-8.