

# Adquisidor de datos para equipo de cierre y apertura de grieta

Héctor Luis Delbono, Gerardo Botasso  
LEMaC, Centro de Investigaciones Viales  
UTN, Facultad Regional La Plata  
La Plata, Bs. As., Argentina  
delbonoluis@hotmail.com, qbotasso@frlp.utn.edu.ar

Renzo Coronel, Omar Rodríguez, Hugo Mazzeo, José Rapallini,  
M. Zabaljauregui  
Laboratorio CODAPLI  
Dpto. Sistemas, UTN-FRLP  
La Plata, Bs. As., Argentina  
{renzo.h.coronel, rodriguezomarlp, hector.hugo.maz, josrap,  
mzabaljauregui}@gmail.com

**Abstract**—Este trabajo consistió en desarrollar el hardware y software para adquirir datos de una celda de carga y dos LVDT para un equipo que tiene por objeto generar la apertura y cierre de una grieta. La amplitud del movimiento de apertura y cierre es variable, puede ser programado por el usuario en función de la capacidad del LVDT. En principio no pasa de los 3 mm.

El equipo consiste en un motor reductor de velocidad, el cual mueve una placa móvil, quedando la otra fija registrando la celda de carga adosada al brazo, la carga necesaria para evidenciar la apertura de una fisura sobre el cuerpo de prueba.

Adicionalmente el software se adaptará a dos equipos más de sollicitaciones dinámicas para evaluar a fatiga una mezcla asfáltica. Ellos son el ensayo de módulo de rigidez, implementado en laboratorio, el cual consiste en someter una probeta prismática simplemente apoyada en sus extremos a una carga central y el ensayo de la semi probeta (SCB, de sus siglas en inglés Semi-Circular Bend Test, según Norma ASTM D8044 – 16). Para estos equipos el software se desarrolla para adquirir los datos de celdas de carga de 500/1000/1500 kg y los dos LVDTs de 25/30 mm conectados al equipo.

**Keywords**—fisuras, asfalto, ensayo, medición, lvdt

## I. INTRODUCCIÓN

El trabajo tiene como finalidad desarrollar un equipo que genere cargas cíclicas de tracción sobre una probeta multicapa con fisura inducida, logrando la apertura y cierre de la misma hasta su propagación a la capa superior (Fig. 1).

Con el equipo se busca representar las sollicitaciones que se producen ante los cambios de temperatura (dilatación y contracción) y las cargas del tránsito que generan una tracción en la fibra inferior de una capa de mezcla asfáltica cuando ésta se utiliza en repavimentación sobre un pavimento de hormigón deteriorado con presencia de fisuras.

Se realiza el ensayo en un modo de desplazamiento controlado bajo las siguientes condiciones de borde:

- Temperatura de ensayo: (0-25° C); de manera de fomentar el crecimiento de la fisura a través de la mezcla asfáltica.

- Desplazamiento de apertura para inducir la fisura : (0-3 mm); rango de movimiento de las juntas en un pavimento de hormigón.

- Tasa de carga: 10 segundos por ciclo de 10 minutos (o más) por ciclo.

- Tipo de carga: se aplica de forma de onda cíclica triangular con máximo desplazamiento constante.



Fig. 1. Equipo para cierre y apertura de fisura

## II. ESTADO DEL ARTE

Puede considerarse la fatiga de materiales como una reducción gradual de la capacidad de tomar carga por la rotura lenta del mismo como consecuencia del avance casi infinitesimal de las fisuras que se forman en su interior. La fatiga es uno de los criterios de deterioro considerados para el diseño de pavimentos asfálticos y puede ser evaluada a través de ensayos de laboratorio. La valoración a fatiga de las mezclas asfáltica resulta ser una necesidad en la vialidad argentina y un estadio necesario en el proceso de diseño de las mismas.

Del análisis que se realice de las mezclas asfálticas en torno a su comportamiento frente a la repetición de ciclos de carga-fatiga, se puede llegar a observar desempeños diferentes según sean la intensidad, la frecuencia de la carga, como así también los rangos de temperatura considerados. Para cualquier método de diseño de pavimentos se debe observar la importancia de definir adecuadamente este parámetro de entrada, pues su determinación errónea puede

dar como resultado estructuras de pavimento susceptibles a degradaciones prematuras o sobre diseñadas frente a la fatiga.

En el caso de mezclas asfálticas, estas son sometidas a sollicitaciones de corta duración al paso de los ejes del vehículo. La fisuración por fatiga no se presenta inmediatamente sino con el transcurso del tiempo debido a la repetición de cargas en la base del camino a causa de esfuerzos de tracción que se acumulan a cada paso de los neumáticos.

En laboratorio se utilizan dos tipos de señales de carga en los ensayos de fatiga: sollicitaciones sinusoidales en fuerza o sollicitaciones sinusoidales en desplazamiento. La sollicitación a aplicar depende del espesor de la capa y de su rigidez relativa (Fig. 2).

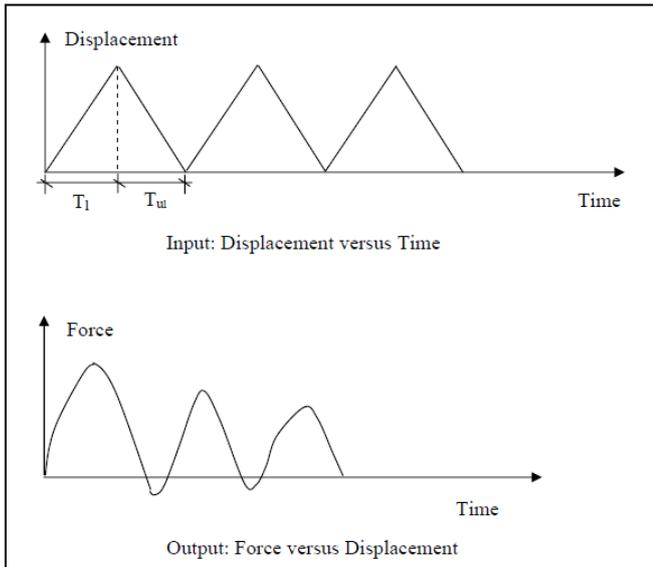


Fig. 2. Entrada/salida de probador de superposición

### III. CARACTERÍSTICAS DE LA MEDICIÓN CON LVDT

Un LVDT (Linear Variable Differential Transformer) es un transformador que produce una tensión proporcional al desplazamiento de un núcleo ferromagnético (núcleo móvil separado). Este tipo de transductor consiste en un bobinado primario alimentado por una señal de corriente alterna y dos bobinados secundarios (Fig. 3).

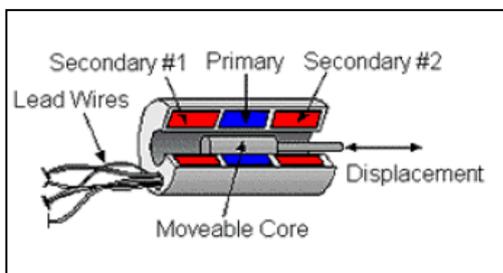


Fig. 3. Corte de un LVDT mostrando sus bobinados

En la práctica los LVDT son usados con etapas demoduladoras de portadora que proveen la señal portadora (la señal alterna hacia el bobinado primario) y convierten (o demodulan) la señal AC inducida en una señal DC.

Los LVDT utilizados en el presente trabajo son dos transductores de desplazamiento de características según las indicadas en las Figuras 4 y 5.

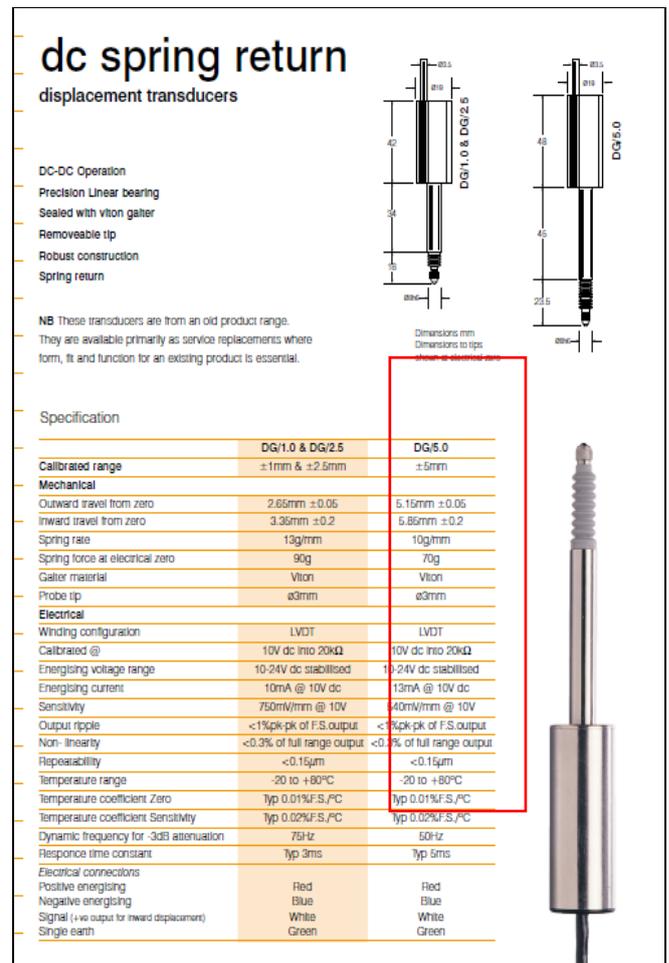


Fig. 4. Características de los LVDT utilizados en la medición

El demodulador sensible a la fase es un convertidor AC/DC que produce una tensión DC (típicamente entre 0 y 10 Volts) proporcional a la magnitud de salida del LVDT y sensible a la fase de la señal de salida relativa a la señal (portadora) de entrada.

Cuando el núcleo es desplazado hacia un lado del primario, la salida del LVDT está en fase con la entrada y el demodulador produce una señal positiva. Cuando el núcleo es desplazado hacia el otro lado, la salida del LVDT estará desfasada 180 grados respecto a la señal del primario. La salida del demodulador es entonces una tensión negativa proporcional al desplazamiento.

Los LVDT proveen una salida lineal para pequeños desplazamientos mientras el núcleo permanezca dentro del bobinado primario. La distancia exacta es función de la geometría del LVDT.

En la práctica los LVDT son usados con etapas demoduladoras de portadora que proveen la señal portadora (la señal alterna hacia el bobinado primario) y convierten (o demodulan) la señal AC inducida en una señal DC.



Fig. 5. Uno de los LVDT utilizados en la medición

El demodulador sensible a la fase es un convertor AC/DC que produce una tensión DC (típicamente entre 0 y 10 Volts) proporcional a la magnitud de salida del LVDT y sensible a la fase de la señal de salida relativa a la señal (portadora) de entrada.

Cuando el núcleo es desplazado hacia un lado del primario, la salida del LVDT esta en fase con la entrada y el demodulador produce una señal positiva. Cuando el núcleo es desplazado hacia el otro lado, la salida del LVDT estará desfasada 180 grados respecto a la señal del primario. La salida del demodulador es entonces una tensión negativa proporcional al desplazamiento.

Para realizar las pruebas de funcionamiento al LVDT fue necesario el uso de un completo subsistema de acondicionamiento de señal. Se utiliza conjuntamente con el sensor LVDT para convertir la posición mecánica de este transductor a una tensión de DC unipolar o bipolar con una capacidad alta de repetición. Con la adición de algunos componentes pasivos externos se establece la frecuencia y la ganancia, se convierte la salida del bobinado secundario del LVDT sin procesar en una señal escalada de corriente continua.

#### Celda de carga:

La celda de carga es una estructura diseñada para soportar cargas de compresión, tensión y flexión, en cuyo interior se encuentran uno o varios sensores de deformación llamados Strain Gauges que detectan los valores de deformación.

La celda de carga digital mide esta deformación mediante circuitos puente de Wheatstone (Fig. 6) que actúan en las bases de la máquina o sistemas de pesaje para encontrar reacciones. Una vez obtenida la resistencia, se produce la transducción y se puede obtener el valor que la máquina resiste.

- Tensión máxima de excitación: 15V
- Alinealidad %C.N.: 0.03
- Histéresis %C.N.: 0.02
- Repetibilidad %C.N.: 0.02
- Creep % de C.N. en 20' : 0.03
- Long. del cable: 3m
- Sobrecarga admisible %C.N. : 150
- Carga limite %C.N.: 300
- Corr. cero por temp %C.N./gr cent: 0.003
- Corr. de sens por temp %C.N./gr cent: 0.0015

Datos individuales:

- Modelo CZI-1000
- capacidad kg: 1000
- Impedancia entrada: 386.3 ohm
- Impedancia salida: 350.3 ohm
- Resistencia de aislación: 75510 Mohm
- Sensibilidad: 2.943 mV/V
- Balance de cero: 0.034 mV/V

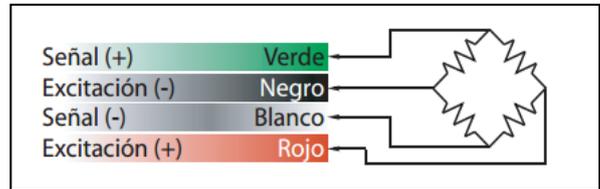


Fig. 6. Circuito eléctrico de la celda de carga

#### Descripción de la Celda utilizada

La celda de carga utilizada es una celda de acero inoxidable tipo S para aplicaciones de tensión/compresión. En la Fig. 7 pueden observarse las características principales tomadas de las hojas de datos del fabricante.

DESCRIPCION			
Es una nueva celda para trabajo a la tracción/compresión			
Protección IP67			
Apta para trabajo en industria láctea			
			
ESPECIFICACIONES GENERALES			
Tensión max. V	15	Creep %CN	0,03
Capacidades Kg.	50, 100, 250, 500, 1000	Long de cable Mts	3
Sensibilidad mV/V	3 +/- 10%	Sobrecarga %CN	150
Resistencia del puente Ω	350	Corr cero por temp %CN/°C	+/- 0.003
Rango comp.de Temp. °C	-10 a 40	Cor sens por temp %CN/°C	+/- 0.0015
Balance de cero %CN	+/- 1	Res aislación M Ω	> 5000
Alinealidad %CN	0,03	Material Base	Acero Inoxidable
Histéresis %CN	0,02	Grado de protección	IP67
Repetibilidad %CN	0,02		

Fig. 7. Características de la celda de carga

Para la realización de los ensayos, la celda se ubica en el equipo como se observa en la Fig. 8.

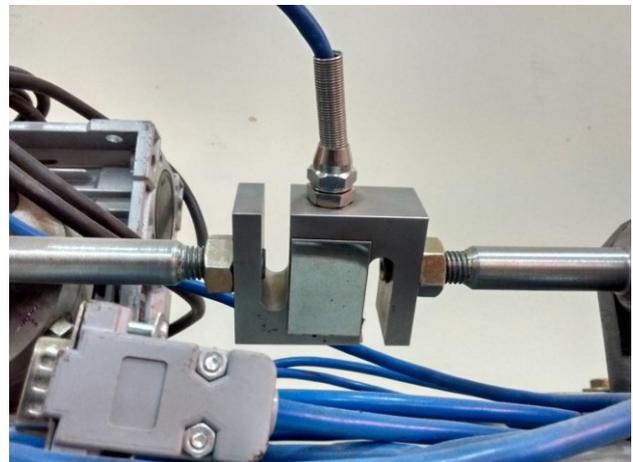


Fig. 8. Celda de carga adosada al equipo

#### IV. DESARROLLO DE LA APLICACIÓN

##### A. Propuesta:

###### 1) Datos de entrada:

- En la pantalla inicial se podrá agregar: desplazamiento impuesto, tipo de muestra, velocidad de ensayo, temperatura de ensayo.
- Se deberán calibrar inicialmente la celda de carga y cada uno de los LVDT (poner en cero).

###### 2) Sistema de grabación de datos:

- Carga y deformación serán almacenados en un archivo definido por el usuario: tiempo, ciclo o número de carga, desplazamientos (si dos LVDT se utilizan). La tasa mínima de recogida de datos se encuentra en intervalos de 0,1 segundos.
- Visual: en un gráfico mostrar la carga en función del tiempo o el número de ciclo. Proporcionar una representación visual de los desplazamientos medidos en cada LVDT.

Para el desarrollo de la aplicación se identificaron los siguientes requerimientos (Fig. 9):

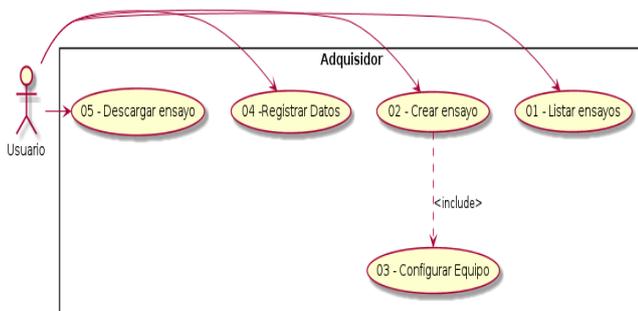


Fig. 9. Diagrama de requerimientos

##### B. Descripción de los Casos de Uso

1) *Listar ensayos*: permite visualizar los ensayos realizados con el equipo, los cuales son almacenados en formato CSV (Fig. 10).

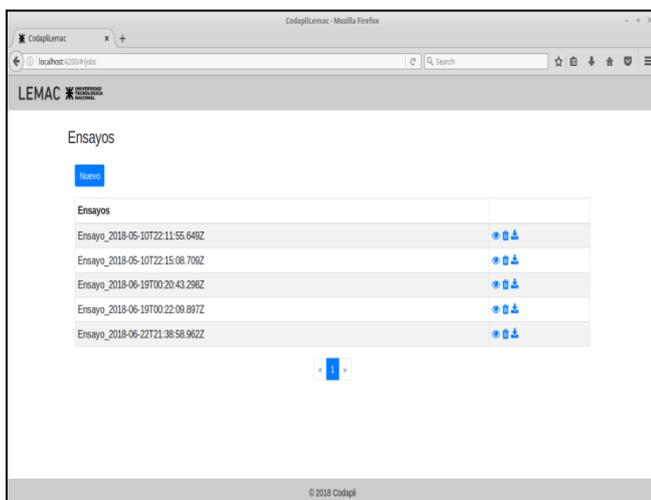


Fig. 10. Pantalla de ensayos realizados

2) *Crear ensayo*: permite al usuario crear ensayos de los tipos requeridos (apertura y cierre, módulo rigidez, semi-probeta). Para esto primero selecciona un tipo de ensayo y posteriormente completa los datos del ensayo seleccionado.

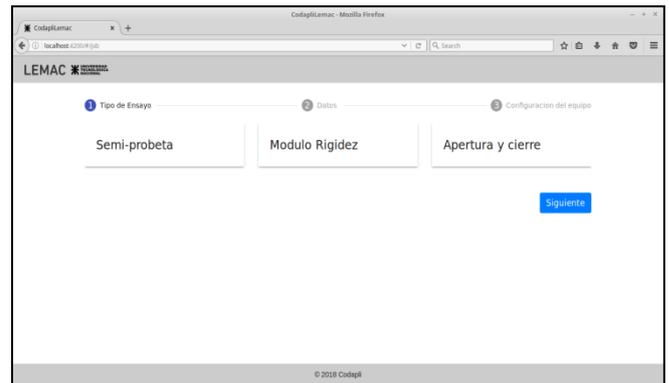


Fig. 11. Pantalla selección de tipo de ensayo

3) *Configurar equipo*: permite al usuario configurar los dispositivos conectados (Fig. 12), celda de carga de 500/1000/1500 Kg y los dos LVDTs de 25/30 mm conectados al equipo. A su vez permite determinar el periodo entre muestras que va desde 1 muestra/s a 1 muestra/hora, tomando valores intermedios especificados por el usuario.

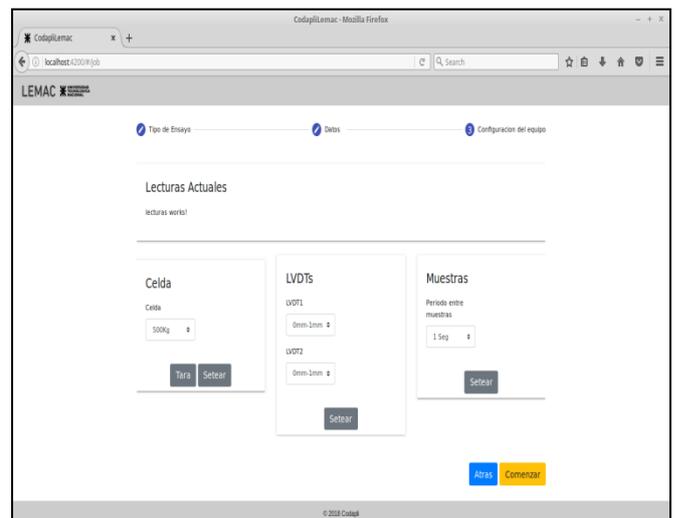


Fig. 12. Pantalla de configuración de dispositivos.

4) *Registrar datos*: muestra en la interfaz los datos que se van registrando en tiempo real (Fig. 13). Para este caso se visualizan dos graficas una de fuerza/tiempo y otra de desplazamiento/tiempo. Además se muestra información acerca del ensayo que se está realizando.



Fig. 13. Pantalla de ensayo con registro de datos

5) *Descargar ensayo*: Permite descargar un ensayo en formato plano (CSV).

### C. Tecnologías utilizadas

Para la realización de este proyecto se utilizó como base Javascript y C++ en arduino. En la Fig. 14 se muestra el diagrama de componentes.

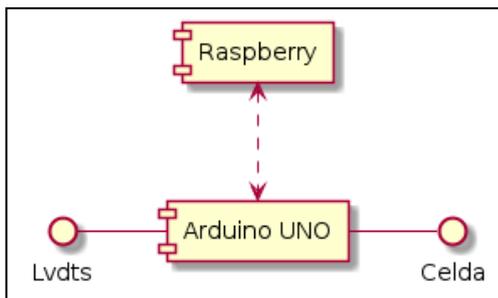


Fig. 14. Diagrama de componentes

- **Arduino UNO**: Se desarrolló un dispositivo mediador entre los circuitos electrónicos y la visualización del usuario. El objetivo de la placa Arduino es enviar los datos recibidos de los dispositivos conectados hacia la Raspberry Pi y recibir los comandos de configuración y seteo para la celda conectada y/o lvdts. Para esto se creó un protocolo para comunicar los dispositivos en formato JSON con distintos códigos que son intercambiados entre la Raspberry Pi y la Arduino:

Para LVDTs (M.1)

```
{ code: 200,
  lvd0: { lvd: <10|20|25>, selected: true},
  lvd1: { lvd: <10|20|25>, selected: false}
}
```

Para CELDA (M.2)

```
{
  code: 300,
  celda: <500|1000|2000>
}
```

Para la TARA vamos a enviar (M.2.1)

```
{ code: 301 }
Para TIEMPO_MUESTREO (M.3)
{
  code: 400,
  time: <10|60|600|900|1800|3600>
}
```

M.4 Este mensaje es enviado periódicamente de acuerdo al tiempo de muestreo seteado.

```
{
  celda: <valor>
  lvd0: <valor>
  lvd1: <valor>
}
```

Mensaje de Error M.5 Utilizado para comunicar errores

```
{
  code: 500
  error: <Texto>
}
```

- **Raspberry Pi 3**: se desarrolló una API Restfull en NodeJS y Angular 6 (Fig. 15). La API se encarga de gestionar la comunicación entre la placa Arduino y los datos que visualiza el cliente (información de los ensayos y datos registrados).



Fig. 15. Componentes de la API Restfull.

La API es la encargada de gestionar todas actividades solicitadas por el usuario exponiendo al cliente los siguientes endpoints:

```
var express = require('express');
var router = express.Router();

// Require controller modules.
var jobsController = require('../controllers/jobsController.js')
var settingsController = require('../controllers/settingsController.js')

/* Los endpoints que vamos a manejar para crear o solicitar datos desde el cliente */
router.get('/jobs', jobsController.jobs_get);
router.delete('/job/:file', jobsController.removeFileJob);
router.get('/job/download/:file', jobsController.downloadFile);
router.get('/job', jobsController.job_get);
router.post('/job', jobsController.job_post);
router.get('/job/:fileJob', jobsController.jobs_get_values);
router.post('/job/start', jobsController.jobs_start);
router.post('/job/stop', jobsController.jobs_stop);
//-----
router.get('/init/settings', settingsController.initSerial);
router.get('/close/settings', settingsController.closeSerial);

router.post('/settings/lvdts', settingsController.settings_set_lvdts);
router.post('/settings/celda', settingsController.settings_set_celda);
router.post('/settings/tara', settingsController.settings_set_tara);
router.post('/settings/interval', settingsController.settings_set_time_muestreo);

module.exports = router
```

Fig. 16. Endpoints utilizados en la API

### D. Formato del Archivo CSV:

El archivo de extensión csv generado depende el tipo de ensayo que se va a realizar, pero consta de una cabecera, una descripción del ensayo y registros de los valores obtenidos de los dispositivos.

Primera línea :

- Tipo de ensayo - Apertura y Cierre:  
fecha|tipo|dimensiones|material|temperatura|recorrido|Placa
- Tipo de ensayo - Módulo Rigidez:  
fecha|tipo|dimensiones|temperatura|frecuencia|carga|material|muestra
- Tipo de ensayo -Semi Probeta:  
fecha|tipo|muestra|material|diametro|espesor|ranura|

Segunda línea:

Datos correspondiente al ingreso del usuario al momento de crear el archivo.

Demás líneas:

Registro de datos

<valorCelda>,<valorLvdt1>,<valorLvdt2>,<time>

## V. CONCLUSIONES

Aunque el proyecto aún se encuentra en la fase de desarrollo, se ha logrado obtener lecturas muy aceptables con un bajo margen de error. Actualmente se continúa trabajando para mejorar la precisión de las lecturas.

Otro de los problemas a resolver está relacionado con que se ha detectado una elevación de la temperatura en la Raspberry PI. El hecho que dos de los ensayos tienen tiempos de duracion muy largos -que pueden insumir varios días- genera que se acumule un volumen de datos importantes si el tiempo entre muestras es pequeño. El

aumento del tiempo entre muestras, si bien no mejora la precision, nos da un panorama mejor de lo que está ocurriendo con la probeta de hormigón a lo largo del tiempo.

## REFERENCIAS

- [1] [http://www.navlampmechatronics.com/blog/25\\_Tutorial-trasmisor-de-celda-de-carga-HX711-Ba.html](http://www.navlampmechatronics.com/blog/25_Tutorial-trasmisor-de-celda-de-carga-HX711-Ba.html)
- [2] <https://www.npmjs.com/package/hx711>
- [3] <https://angular.io/>
- [4] [https://www.mouser.com/ds/2/813/hx711\\_english-1022875.pdf](https://www.mouser.com/ds/2/813/hx711_english-1022875.pdf)
- [5] <https://www.json.org/>
- [6] <https://nodejs.org/dist/latest-v10.x/docs/api/>
- [7] <http://expressjs.com/es/guide/routing.html>
- [8] [https://es.wikipedia.org/wiki/Amplificador\\_operacional](https://es.wikipedia.org/wiki/Amplificador_operacional)
- [9] [https://es.wikipedia.org/wiki/Valores\\_separados\\_por\\_comas](https://es.wikipedia.org/wiki/Valores_separados_por_comas)
- [10] ASTM D8044 – 16. Standard Test Method for Evaluation of Asphalt Mixture Cracking Resistance using the Semi-Circular Bend Test (SCB) at Intermediate Temperatures.