

## **CAPÍTULO 4**

### **Pruebas y resultados**

Se comenzó por montar el inclinómetro sobre una plataforma situada en el plano inclinado destinada para dicho propósito. Primero se comprobó que dicha plataforma se encontrara a 0°, para esto se utilizó un nivel proporcionado por el departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de las Américas Puebla. Se observó que dicha base contaba con un poco de inclinación, por lo tanto se procedió a corregirlo hasta que estuviera situada completamente a 0° de inclinación. Posteriormente se realizaron perforaciones en la base de la caja de plástico para poder atornillarla y mantenerla fija al plano. Una vez que estuvo situada en la posición correcta se decidió realizar nuevas perforaciones para fijar la tablilla conteniendo al sensor, los displays y al acondicionamiento de la señal. En éste punto se volvió a verificar que la tablilla se encontrará situada exactamente a 0° de inclinación, el resultado fue satisfactorio.

Para montar el acelerómetro situado sobre el material se consideró que dicho sensor debe de moverse con libertad, es decir que los propios cables provenientes del sensor no tienen que oponer resistencia al movimiento. El cableado del sensor se hizo utilizando cables de red y posteriormente fueron recubiertos con tubo termocontráctil (termofit). Esta solución no ofrecía la libertad de movimiento necesaria porque el conjunto de los 5 cables (4 de alimentación más el de la señal del sensor) era un poco rígido. Por ésta razón, se decidió utilizar cable telefónico, ya que es sumamente flexible, ligero y fácil de conseguir. Dicho cable cuenta con 6 cables internos, los cuales se utilizaron para la alimentación necesaria: 5Volts, 15Volts, -15Volts, la señal de tierra y la salida del sensor.

Nuevamente se midieron todos los voltajes para comprobar que los circuitos funcionaran de forma adecuada. En el inclinómetro al estar situado a 0° se observó un voltaje de 2.512Volts, lo cual concuerda perfectamente con el voltaje esperado (2.5Volts).

Por otra parte, el voltaje medido al encontrarse a 45° fue de 3.37Volts. El acelerómetro indicó un voltaje de 2.515Volts al estar en completo reposo y a 0° de inclinación, se observa que se encuentra dentro del rango de 2.5Volts esperados. El siguiente paso fue verificar la señal proveniente del acondicionamiento del acelerómetro y que será procesada por el microcontrolador. Dicho voltaje se encontró en 80mVolts al estar en 0° de inclinación, dicho valor es muy cercano al cero esperado teóricamente. Con éstos valores se decidió continuar directamente a la adquisición de datos y a observar los resultados mediante LabVIEW®. En la tabla 4.1 se muestran los voltajes obtenidos en cada uno de los elementos de interés para éste proyecto.

Elemento	Voltaje
Acelerómetro	2.515V
Inclinómetro a 0°	2.512V
Inclinómetro a 45°	3.37V
Acondicionamiento del inclinómetro a 0°	80mV
Acondicionamiento del inclinómetro a 45°	3.38V

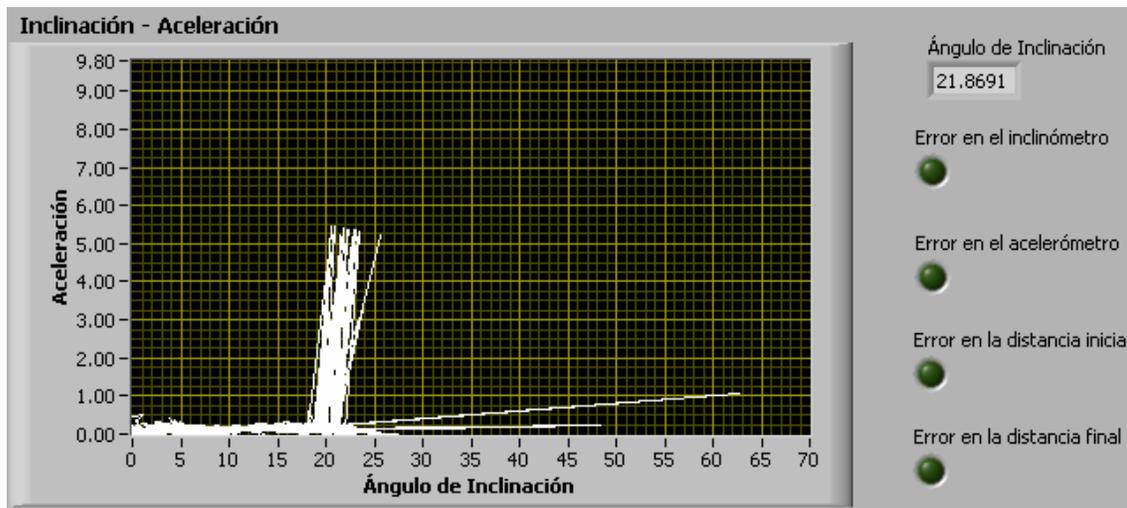
**Tabla 4.1. Voltajes medidos en los diferentes elementos**

Posteriormente se conectaron los sensores al módulo SCXI-1302 y éste, a su vez a la tarjeta de adquisición de datos DAQ-6024E. Dentro del programa realizado en LabVIEW® se procedió a iniciar la captura de las señales. Para esto se dio clic en el botón “inicio” y se observaron los resultados mediante gráficas.

#### **4.1 Graficación de inclinación-aceleración**

En la gráfica de ángulo de inclinación-aceleración se observó que existió una pequeña variación, parecía existir aceleración incluso cuando el acelerómetro aún no se movía de su posición. Esta pequeña diferencia se debe a que ambos sensores no mandan exactamente el mismo voltaje al encontrarse en completo reposo, por lo tanto se decidió ajustar la diferencia mediante la fórmula del cálculo de aceleración y tomando en cuenta los valores de la tabla 4.1.

En la figura 4.1 se pueden observar las distorsiones existentes en la gráfica de inclinación-aceleración, aparentemente existe una aceleración inicial en el móvil que decrece conforme aumenta el ángulo de inclinación. Además se aprecia un máximo de aceleración en aproximadamente 21°, pero dicho máximo no se distingue con claridad, existen algunos trazos alrededor de dicha medición.



**Figura 4.1. Gráfica de inclinación-aceleración con ruido**

Para corregir las distorsiones mostradas en la figura 4.1 se decidió ajustar los valores de offset en cada uno de los sensores, a los valores obtenidos físicamente y no a los teóricos.

Posterior a realizar los cambios se decidió comprobar nuevamente el funcionamiento y se observó que en la gráfica aún estaban presentes algunas variaciones. Las señales se observaban con ruido o con pequeñas diferencias de voltaje, pero dichas variaciones producían resultados no deseados. La figura 4.2 muestra la gráfica de lo explicado anteriormente. Cabe mencionar que las variaciones de voltaje fueron del orden de milivolts.

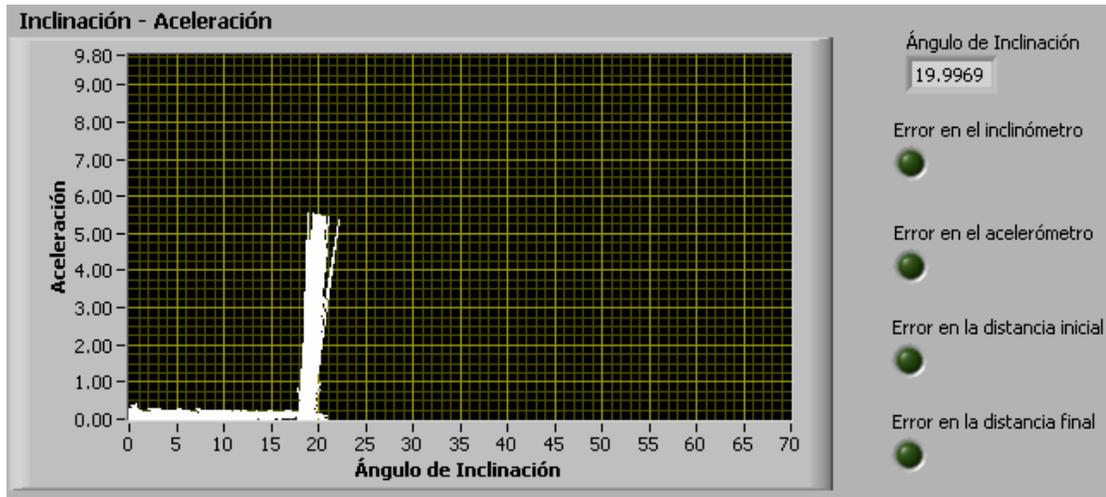


Figura 4.2. Variaciones en la gráfica de inclinación-aceleración

Para corregir el problema anterior se decidió utilizar un bloque para obtener el valor RMS de la señal proveniente del inclinómetro, de ésta manera se pueden disminuir las pequeñas variaciones encontradas en la señal. Nuevamente se procedió a comprobar el funcionamiento, ésta vez se observó que ya no existió variaciones en la gráfica del ángulo de inclinación, pero la aceleración no fue detectada. La figura 4.3 muestra lo mencionado anteriormente. Cabe mencionar que en dicha ocasión, el móvil se desplazó al estar situado en 22° pero no se observa aceleración en la gráfica.

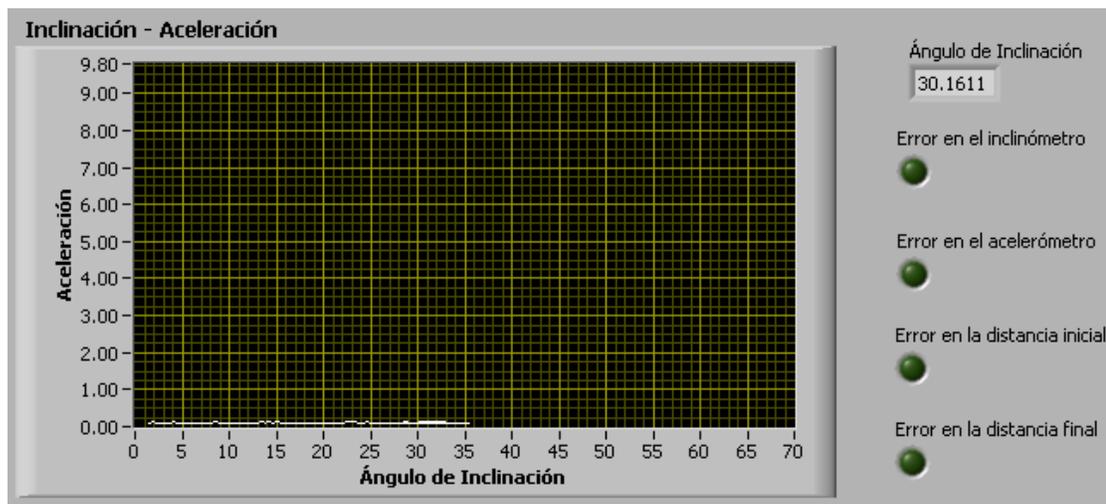


Figura 4.3. Gráfica de inclinación-aceleración sin detectar la aceleración

El valor que es importante mostrar de la aceleración es el máximo positivo que alcanza en cualquier desplazamiento, esto debido a que no se están considerando las aceleraciones negativas (desaceleraciones) que sufre el material. Se decidió utilizar un bloque que calcula el máximo de una señal, dicho bloque se conecto antes de la gráfica de inclinación-aceleración. La figura 4.4 muestra como se implemento ésta parte. En la figura 4.5 se pueden ver los resultados obtenidos en la gráfica inclinación-aceleración.

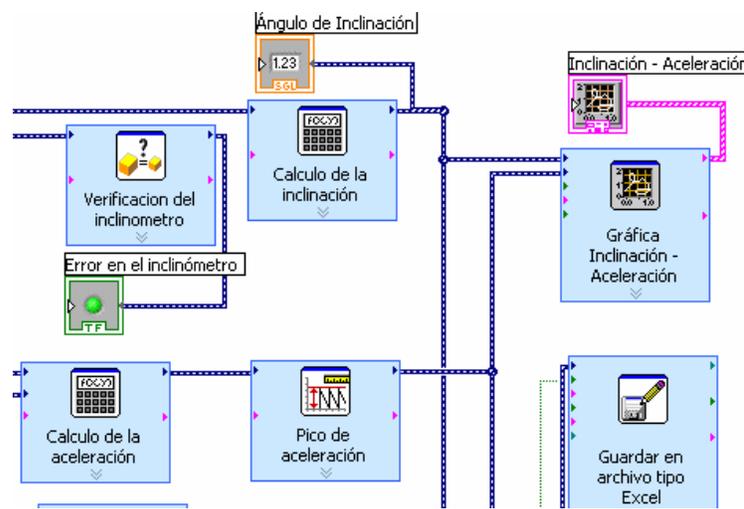


Figura 4.4. Cálculo del máximo de la señal

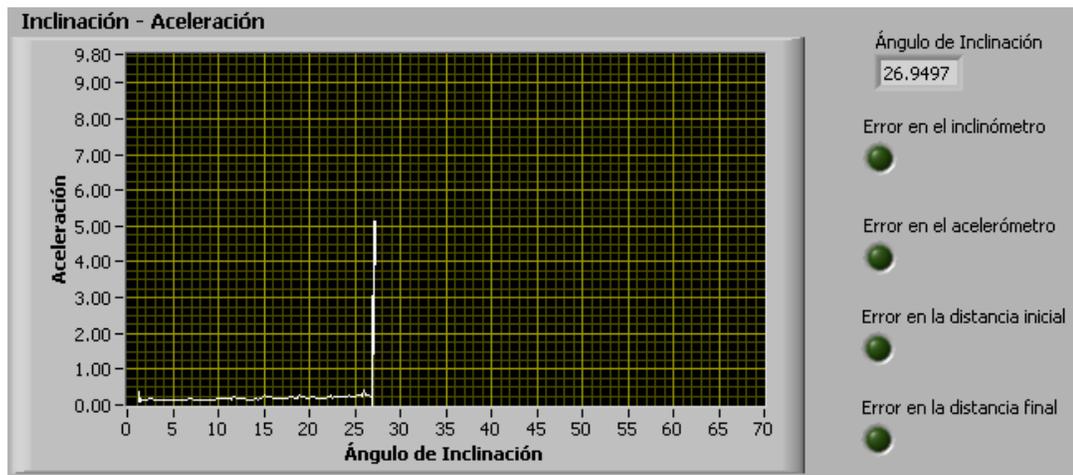


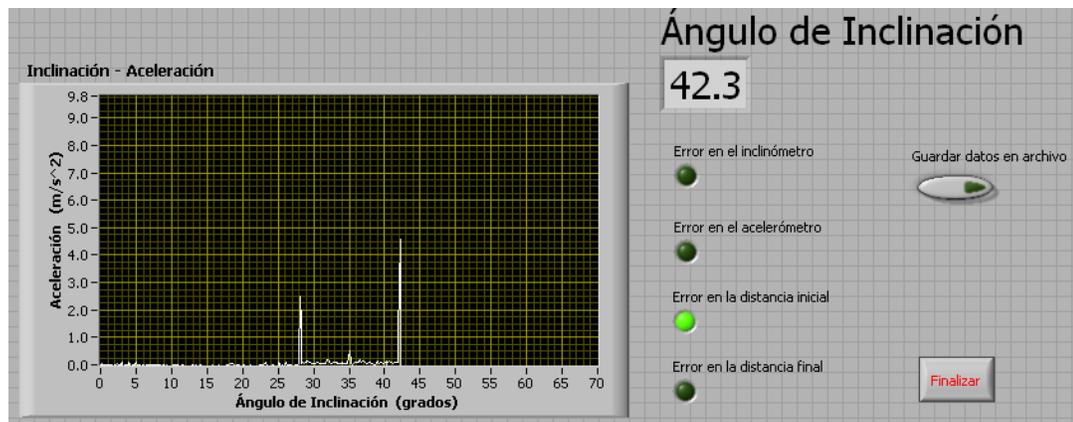
Figura 4.5. Resultado en la gráfica de inclinación-aceleración

De la figura 4.5 se puede observar una curva mucho más consistente respecto a inclinación y también a aceleración. La aceleración máxima con la que se movió el material se situó al alcanzar  $26.9^\circ$  de inclinación. Esta forma de expresar los resultados facilita la lectura y desprecia las pequeñas variaciones que existen en las señales de los sensores.

Como siguiente paso se decidió hacer pruebas utilizando materiales reales y ubicando el acelerómetro sobre dichos materiales. En todos los casos se tomaron 3 mediciones en las mismas condiciones, algunas diferencias en los resultados llegan a ser notorias. A continuación se detallan cada una de las pruebas realizadas.

#### 4.1.1 Pruebas utilizando como material base una lija del número 60

Para la primera prueba se decidió utilizar la superficie de una lija del número 60 y sobre ella se ubicó el acelerómetro. Se comenzó a elevar el plano inclinado, con poca velocidad y los resultados de dicho experimento se muestran en la figura 4.6.



**Figura 4.6. Primera prueba sobre una lija del número 60**

El experimento se volvió a repetir para observar si existían diferencias en los resultados obtenidos, las condiciones se mantuvieron constantes, mismos materiales y poca velocidad al elevar el plano inclinado. En la figura 4.7 se observa que el material se comportó de manera distinta, necesito una inclinación de  $55^\circ$  para registrar su máxima aceleración.

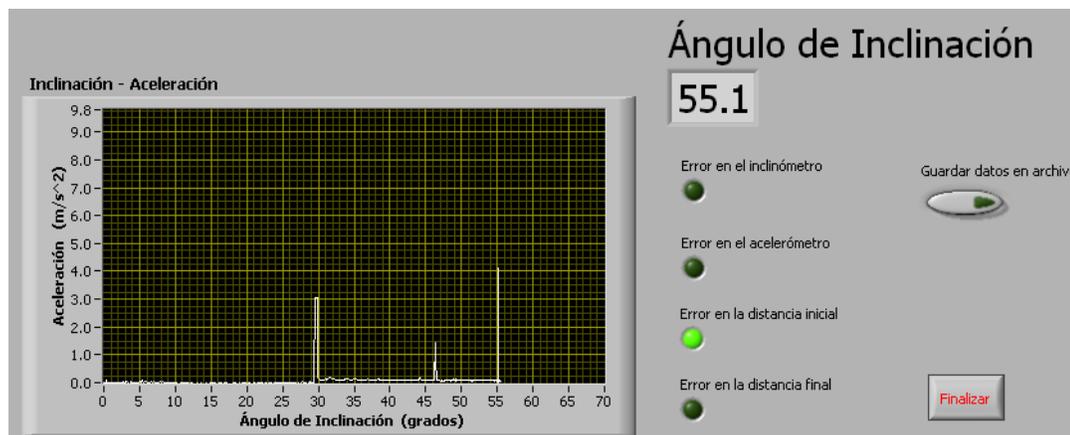


Figura 4.7. Segunda prueba sobre una lija del número 60

Como tercer experimento nuevamente se mantuvieron constantes los factores mencionados con anterioridad y se procedió a elevar el plano. Los resultados obtenidos se muestran en la figura 4.8, de ahí podemos observar que el material se movió al encontrarse a  $44.7^\circ$  y a  $30^\circ$  aproximadamente.

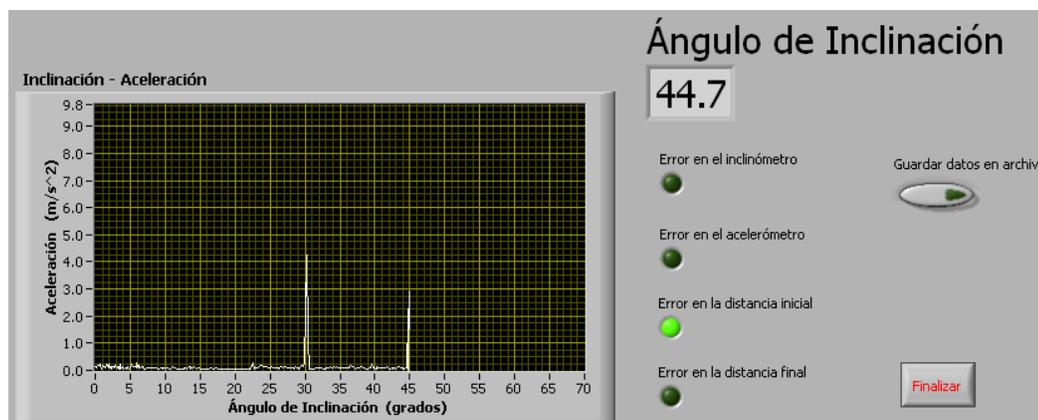


Figura 4.8. Tercera prueba sobre una lija del número 60

### 4.1.2 Pruebas sobre tela

Como segunda prueba se decidió utilizar una superficie recubierta con tela y sobre ella, se montó el acelerómetro. En esta ocasión se realizaron también 3 experimentos y se obtuvieron resultados.

La figura 4.9 muestra el primer experimento realizado, se puede observar que el material registró aceleración al encontrarse a 41° y a 31° aproximadamente.

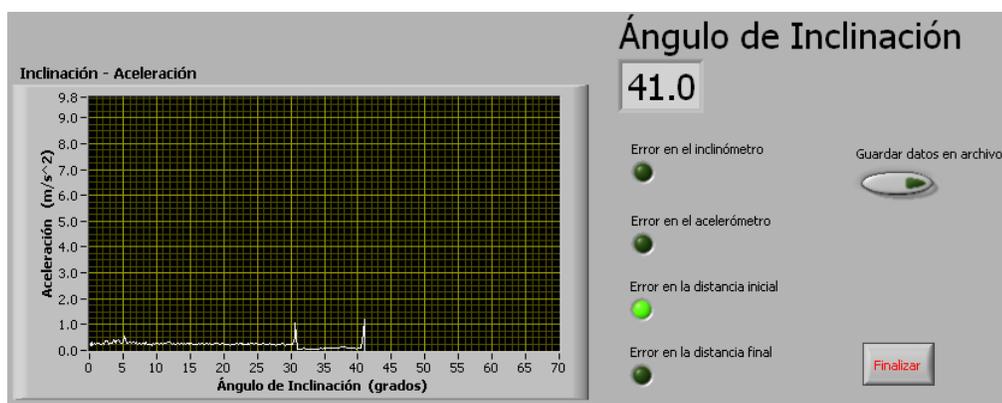


Figura 4.9. Primera prueba sobre tela

En la figura 4.10 se muestran los resultados del segundo experimento. En éste caso el comportamiento del material fue distinto al observado en la figura 4.9. El material registró aceleración al encontrarse a 37.5° y a 27.5° aproximadamente.

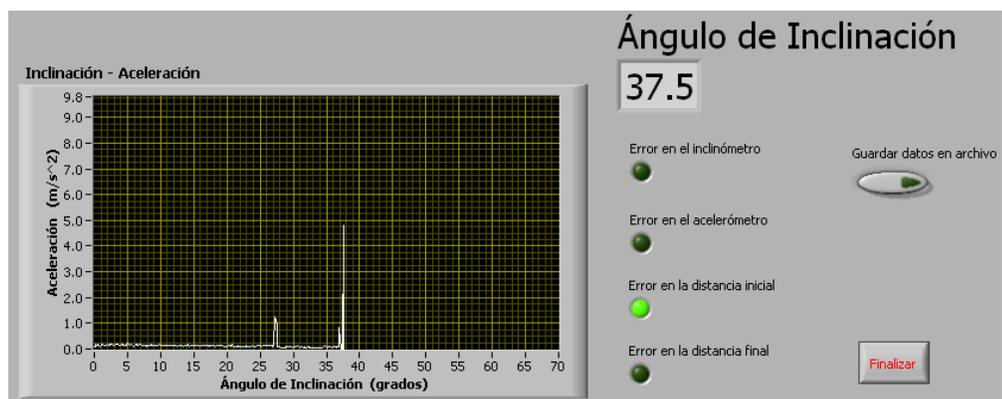


Figura 4.10. Segunda prueba sobre tela

El tercer experimento se muestra en la figura 4.11, en éste caso se observa que el material se aceleró al encontrarse en 41.7°. Dicho resultado se asemeja al de la figura 4.9, pero en éste caso se observó una aceleración mayor.

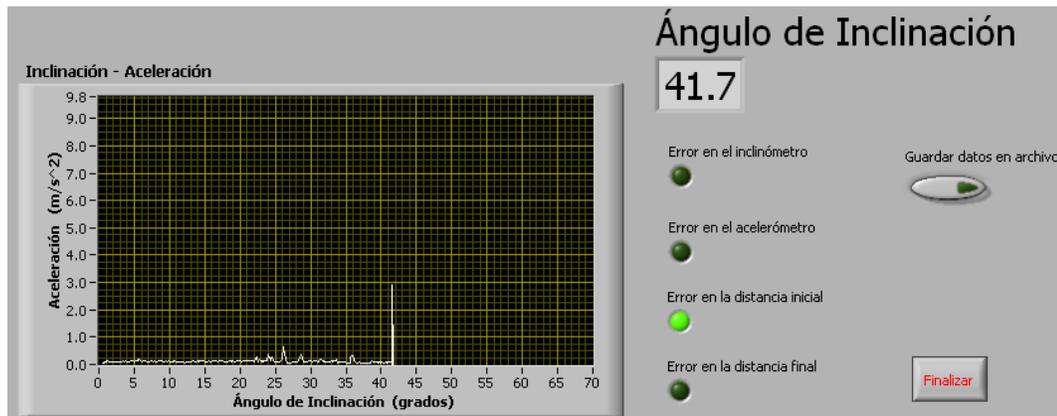


Figura 4.11. Tercera prueba sobre tela

#### 4.1.3 Pruebas sobre un bloque de concreto

Como experimento final, se utilizó un bloque de concreto y sobre dicho material se situó el acelerómetro. Al igual que en las secciones 4.1.1 y 4.1.2, se elevó el plano con poca velocidad y los resultados se observaron en la pantalla del programa. En la figura 4.12 se muestra la primera prueba realizada.

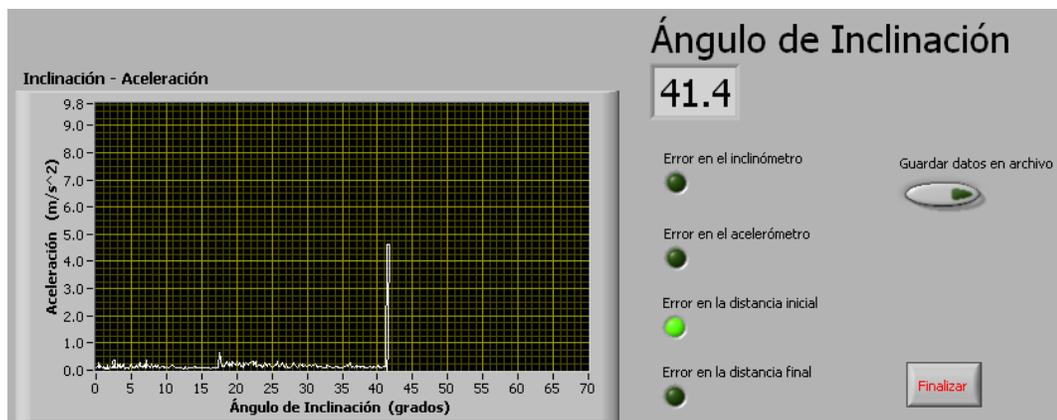


Figura 4.12. Primera prueba sobre un bloque de concreto

Se realizó una segunda prueba sobre el mismo material, dichos resultados se muestran en la figura 4.13, se alcanzan a observar dos picos de aceleración, uno en 33.4° y otro en 22° aproximadamente.

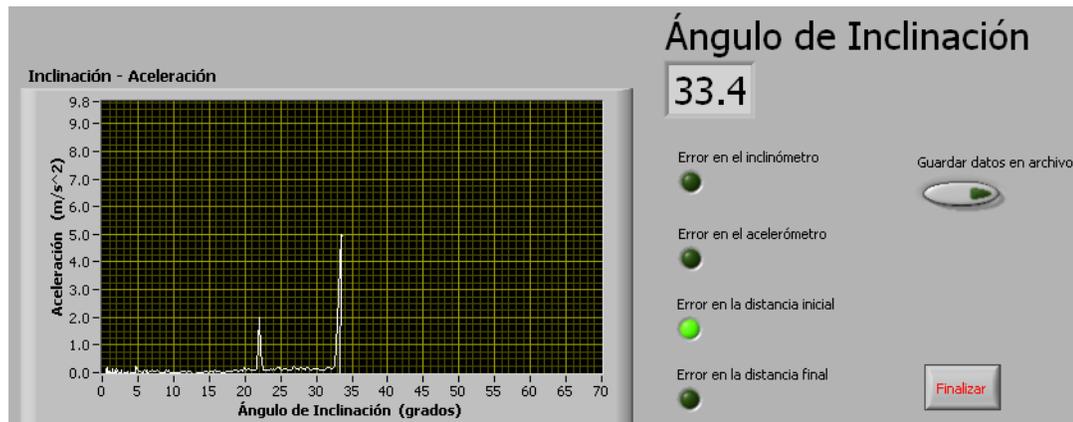


Figura 4.13. Segunda prueba sobre un bloque de concreto

En la figura 4.14 se observa el resultado obtenido al realizar la prueba una tercera vez, en éste caso se observa que el resultado es similar al obtenido en la figura 4.13.

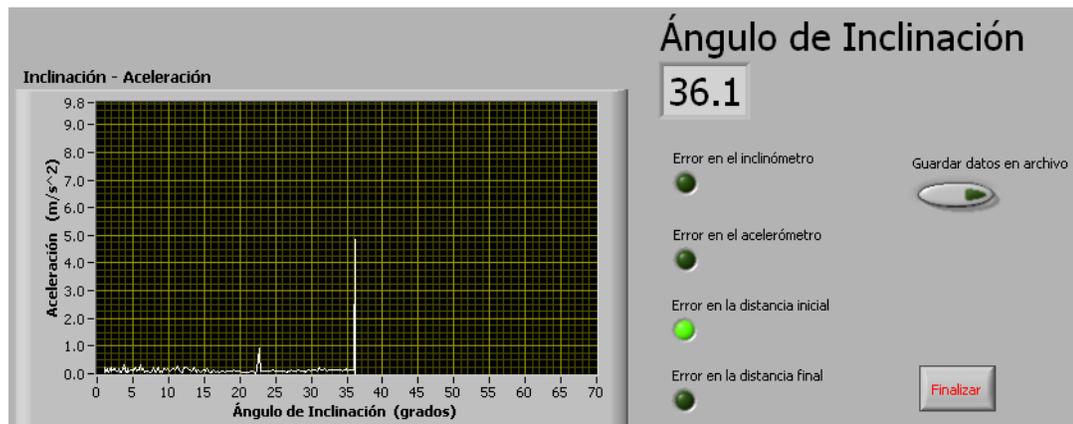


Figura 4.14. Tercera prueba sobre un bloque de concreto

Un aspecto importante a mencionar es que la planta, por su propio diseño y construcción, genera vibraciones al ir cambiando la inclinación. Dichas vibraciones se trataron de disminuir ajustando y lubricando todos los puntos móviles (flechas, tornillo sinfín, etc.), los resultados mejoraron, pero algunas vibraciones siguen siendo perceptibles.

En los experimentos realizados se pudo observar que en ocasiones el acelerómetro llegó a medir dichas vibraciones y por lo tanto esos cálculos los podemos considerar no certeros.

Además es muy importante la correcta instalación del acelerómetro. Éste debe de estar completamente fijo sobre el material a ser probado y la velocidad de inclinación del plano debe de ser baja para evitar vibraciones. En las secciones 4.1.1, 4.1.2 y 4.1.3 se puede ver que en algunas ocasiones el material a prueba se comporto de distintas formas, dichas variaciones deberán ser interpretadas con mayor detalle por el departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad de las Américas Puebla.

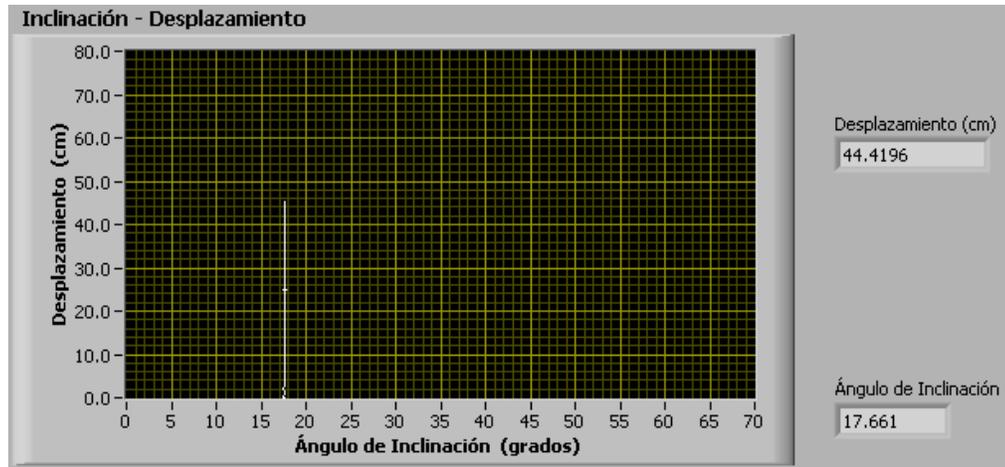
Para las pruebas de las secciones 4.1.1, 4.1.2 y 4.1.3 se observa además que está prendido el indicador de “Error en la distancia inicial”, esto debido a que el material debe de llevar una placa metálica sobre él y precisamente en dicha placa es donde el haz ultrasónico incide. El diseño y construcción de dicha placa metálica corrió a cargo del departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad de las Américas Puebla y al momento de finalizar este proyecto, aún no había sido construida.

## **4.2 Graficación de inclinación-desplazamiento**

Se ajustó la distancia mínima de medición a 10cms y la distancia máxima a 80cms. Por lo tanto se tiene un rango de medición de 70cms, a lo largo del cual el voltaje a la salida del sensor va desde 0Volts a 10Volts.

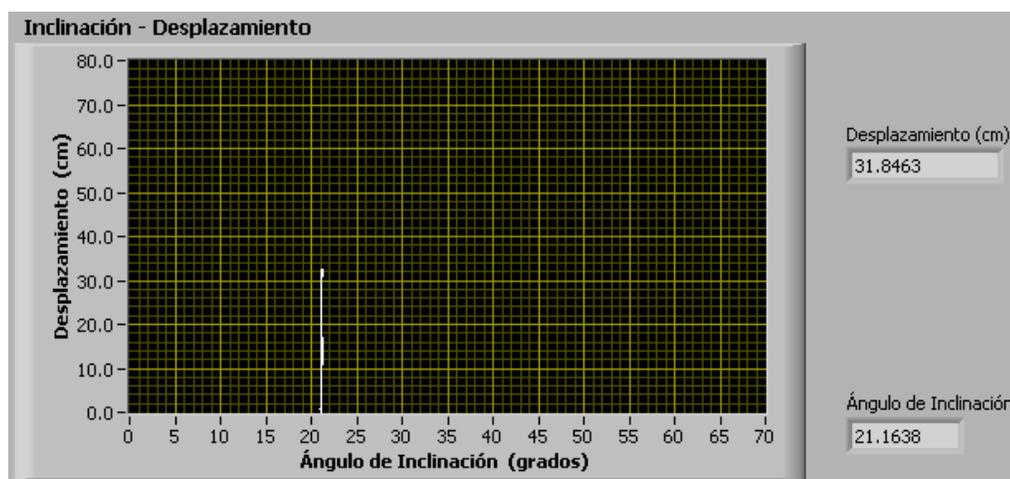
Hay que recordar que el sensor ultrasónico necesita una superficie en la cual la onda ultrasónica “rebota” y regresa a donde fue emitida. Para tal propósito el departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad de las Américas Puebla decidió fijarla sobre la placa metálica ubicada sobre la capa geo-sintética. Al momento de las pruebas, dicha placa aún no había sido construida, por lo tanto el sensor se probó utilizando una tabla de madera para que la señal emitida fuera detectada por el sensor.

Para la primera prueba se colocó la tabla de madera a 10cms del sensor ultrasónico y posteriormente se comenzó a aumentar el ángulo de inclinación. Al llegar a un ángulo de  $17^\circ$  se movió la tabla y el desplazamiento que se registró fue de 44.4cms. En la figura 4.15 se muestra el resultado de esta prueba.



**Figura 4.15. Desplazamiento registrado de 44.4cms**

Como siguiente paso se decidió repetir el experimento, nuevamente, la tabla de madera se colocó a 10cms del sensor y se comenzó a elevar el plano. En éste caso se registró el desplazamiento de la tabla al llegar a  $21^\circ$  y la distancia total que se desplazó fue de 31.8cms. La figura 4.16 muestra dicha medición.



**Figura 4.16. Desplazamiento registrado de 31.8cms**

Los resultados obtenidos se comprobaron midiendo con un flexómetro cada una de las distancias iniciales y posteriormente la distancia final. Después se calculó el desplazamiento y se comparó con el calculado a través de la instrumentación diseñada. Se obtuvieron mediciones satisfactorias, únicamente con diferencias perceptibles de  $\pm 10\text{mm}$ .