

## Diseño e Implementación de un Sistema Electrónico para la Automatización de un Aparato VICAT Convencional

*Design and Implementation of an Electronic System for the Automation of a Conventional VICAT Device*

Investigación

M.C. Mario Salvador Esparza-González<sup>1</sup>, Dr. Carlos Sánchez-López<sup>2</sup>, Dr. Francisco Javier Villalobos- Piña<sup>1</sup>,  
Dr. Carlos Humberto Saucedo-Zárata<sup>2</sup>, Dr. Juan José Soto-Bernal<sup>1</sup>.

TecNM/Instituto Tecnológico de Aguascalientes, Departamento de Ingeniería Eléctrica- Electrónica<sup>1</sup>, Departamento de Ingeniería Metal Mecánica<sup>2</sup>

Av. Adolfo López Mateos No.1801 Ote. Fracc. Bona Gens, Aguascalientes, Ags., México. C.P. 20256, Tel: 01(449) 9105002, Fax: 01 (449) 9700423, msespa@ieee.org

### Resumen

Este artículo presenta el desarrollo de un sistema automatizado para la obtención del tiempo de fraguado de una muestra de cemento en un aparato VICAT convencional de operación manual. El proceso automático se desarrolla con base en la norma ASTM-C191-04 que define el procedimiento estándar para determinar dicho tiempo. Se ha desarrollado la etapa de instrumentación para medición de distancias con alcance de 80 [mm]. El movimiento de la probeta y aguja de prueba se realiza con un automatismo de 2 ejes de desplazamiento lineal y un eje rotacional. El sistema tiene capacidad de tomar 37 lecturas en intervalos de 15 minutos, para el análisis de una muestra en un tiempo máximo de fraguado de 9.25 horas. Se obtiene un mecanismo que determina el tiempo de fraguado inicial y final de una pasta de cemento empleando un equipo manual normalizado. Los resultados se muestran en una interface gráfica desarrollada con el programa comercial LabVIEW; se concluye que es posible evitar la generación manual del reporte, eliminar el error visual y tiempos diferentes entre muestras aprovechando un VICAT convencional.

**Palabras Clave:** VICAT, fraguado, automatización.

### Abstract

This paper presents the development of an automated system for obtaining the setting time of a cement sample in a conventional VICAT device with manual operation. The automatic process is developed based on the ASTM-C191-04 standard that defines the standard procedure to determine this time. The instrumentation stage for distance measurement with a range of 80 [mm] has been developed. The movement of the test specimen and needle is carried out with a 2-axis linear displacement automatism and a rotational axis. The

system has the capacity to take 37 readings in intervals of 15 minutes, for the analysis of a sample in a maximum setting time of 9.25 hours. A mechanism is obtained that determines the initial and final setting time of a cement paste using standardized manual equipment. The results are shown in a graphical interface developed with the commercial program LabVIEW; it is concluded that it is possible to avoid the manual generation of the report, eliminate the visual error and different times between samples taking advantage of a conventional VICAT

**Keywords:** VICAT, setting, automation.

### Introducción

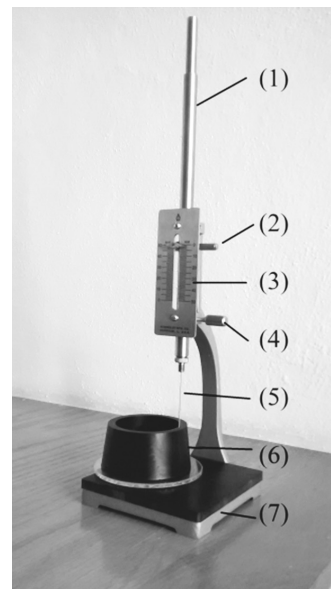


Figura 1. Vicat Convencional

Un aparato VICAT es un sistema manual para medición del tiempo de fraguado de una muestra de cemento graduado en milímetros (ver Figura 1); está compuesto

por una varilla normalizada de 300 [g] de masa (1), perilla de calibración para ajuste a cero (2), escala gráfica graduada en milímetros (3), perilla de liberación de barra (4), aguja (5), molde para la pasta de cemento a evaluar (6) y una base o soporte (7).

El procedimiento para la obtención del tiempo de fraguado queda definido por la norma ASTM-C191-04 [1] para Norteamérica, y para la Unión Europea por la norma UNE-EN 196-3:2005+A1:2008 [2]. El aparato VICAT normalizado es de uso manual, el operador una vez que prepara y coloca la muestra en el recipiente debe posicionar la varilla normalizada, esperar 15 minutos y aflojar la perilla de liberación. Cuando cae la barra en la pasta de cemento, de manera visual toma la lectura en la escala graduada para luego registrar el tiempo transcurrido y la profundidad de penetración en milímetros. Levanta la barra a la posición inicial y limpia la aguja. Por último mueve la muestra para que en el siguiente ensayo la aguja caiga en una nueva posición [1]. Dentro de la problemática que se presenta se tiene que al finalizar un ensayo dispone de aproximadamente 10 minutos para otra actividad que deberá interrumpir nuevamente; en ocasiones por distracción o conclusión de la actividad alterna para un tiempo mayor a los 15 minutos entre muestras. Por otro lado la lectura depende de la agudeza visual y cansancio de quién la toma, adicionalmente debe capturar los datos y procesarlos para generar el reporte.

En la actualidad existen algunos equipos comerciales que pueden realizar esta prueba de manera automática, mediante un sistema computarizado local que muestra información en una pantalla de cristal líquido (LCD), cuenta con conectividad a la computadora y los datos pueden obtenerse mediante un programa específico [3-6]. Estos equipos incluyen tecnología extranjera, lo que implica un costo elevado comparado a un equipo convencional. El objetivo del proyecto es desarrollar un sistema automatizado para la toma de lecturas y presentación de resultados de una prueba normalizada de fraguado de cemento mediante VICAT convencional, que cumple la norma ASTM-C91-04; con la finalidad de que los laboratorios que ya cuentan con el dispositivo manual puedan llevar a cabo las pruebas de manera automática, como es el caso del Laboratorio de Optoelectrónica del Instituto Tecnológico de Aguascalientes donde desarrollan tecnología para evaluar cementos con fibras plásticas.

En la tabla 1 se muestra una comparación de los parámetros del tiempo de fraguado en ambas normas. Las principales diferencias se encuentran en el tiempo indicado para la toma de la lectura, y el punto de definición del tiempo de fraguado inicial; que para la norma ASTM-C191-04 se considera cuando la aguja

penetra 25 [mm]. Ambas normas indican distancias de separación entre muestras y al límite de la probeta.

El proyecto se desarrolló en el espacio de trabajo del Cuerpo Académico de Automatización y Control con financiamiento del Tecnológico Nacional de México entre junio de 2016 y julio de 2017. El artículo está organizado de la siguiente manera: En el apartado de Fundamentos teóricos se muestran los criterios normativos con los cuales se desarrolló el prototipo, así como la aproximación lineal empleada para calibrar el sensor de distancia. En el apartado materiales y métodos se describe el sistema electrónico y el algoritmo de control. Finalmente se muestran los resultados obtenidos con el prototipo desarrollado y la interfaz gráfica desarrollada con el programa Labview de National Instrument<sup>TM</sup>.

**Tabla 1.** Normativas para evaluación del tiempo de fraguado.

Parámetro	UNE-EN-196-3:2005+A1:2008	ASTM 191-04 <sup>a</sup>
Equipo de Prueba:	VICAT estandarizado	
Condición de prueba:	20°C ± 1	20°C ± 1
Tiempo sugerido entre lecturas:	15 min, (tipo 3, 10 min)	15 min
Tiempo para tomar lecturas:	30s o 5s después de no movimiento	30s o no movimiento
Separación entre muestras:	≥ 5 mm y ≥ 10mm anterior	≥5mm
Separación al límite probeta:	≥ 8mm	≥10mm
Tiempo inicial de fraguado en:	34 mm (6mm ± 3 a la base)	25mm
Tiempo final de fraguado en:	0 mm	<0.5mm

### Fundamentos teóricos

#### A) Procedimiento para obtención del tiempo de fraguado.

El tiempo de fraguado se determina observando la penetración de una aguja en una pasta de cemento de consistencia normal, hasta que alcanza un valor especificado [2]. Existen básicamente dos puntos importantes en la determinación de este tiempo, el tiempo inicial de fraguado y el tiempo final de fraguado, ambos se determinan a partir de la distancia de penetración de la aguja que se deja caer libremente [1-2]. Dependiendo de la norma aplicada, se define en 34 [mm] para la UNE-EN 196-3 y 25 [mm] para la ASTM-C191-04.

El procedimiento para llevar a cabo la prueba que determina el tiempo de fraguado [1] se resume de la siguiente manera:

- Ajuste del dispositivo VICAT. La aguja debe estar a una altura igual al borde del recipiente de prueba, y colocar el indicador de escala a 0.
- Preparar la mezcla a evaluar y llenar el recipiente hasta el borde.
- Esperar 30 minutos para iniciar la toma de muestras que después se realizarán cada 15 minutos.
- Liberar el opresor y dejar caer la aguja libremente; esperar 30 segundos o hasta que la aguja no se mueva y tomar la lectura de la distancia que penetró en la muestra.
- Repetir la toma de lecturas hasta que se obtenga una penetración menor o igual a 25mm.
- En caso de que sea menor a 25mm calcular tiempo inicial de fraguado mediante interpolación a este valor.
- Continuar con la toma de muestras hasta que la distancia sea menor a 0.5mm y registrar el tiempo de fraguado final.

En [1] se propone un método para calcular el tiempo inicial de fraguado, mediante:

$$T_{if} = \left( \frac{H - E}{C - D} \right) * (C - 25) + E \quad (1)$$

Dónde:

$T_{if}$  = Tiempo inicial de fraguado [s].

$E$  =Tiempo de última penetración mayor a 25mm [s].

$H$  = Tiempo de última penetración menor a 25mm [s].

$C$  =Distancia de penetración en tiempo  $E$  [mm].

$D$  =Distancia de penetración en tiempo  $H$  [mm].

### B) Aproximación lineal de funciones.

Un método para obtener una aproximación lineal de una curva dados cuatro puntos de la misma, puede encontrarse mediante el polinomio de interpolación de Lagrange de tercer grado [7] definido por:

$$P(x) = a_0 y_0 + a_1 y_1 + a_2 y_2 + a_3 y_3 \quad (2)$$

con:

$$a_0 = \frac{(x - x_1)(x - x_2)(x - x_3)}{(x_0 - x_1)(x_0 - x_2)(x_0 - x_3)},$$

$$a_1 = \frac{(x - x_0)(x - x_2)(x - x_3)}{(x_1 - x_0)(x_1 - x_2)(x_1 - x_3)},$$

$$a_2 = \frac{(x - x_0)(x - x_1)(x - x_3)}{(x_2 - x_0)(x_2 - x_1)(x_2 - x_3)},$$

$$a_3 = \frac{(x - x_0)(x - x_1)(x - x_2)}{(x_3 - x_0)(x_3 - x_1)(x_3 - x_2)},$$

donde,

$x_0, x_1, x_2, x_3$ , representan las coordenadas de los cuatro puntos de la curva a lo largo del eje;  $y_0, y_1, y_2, y_3$  representan las coordenadas de los cuatro puntos de la curva a lo largo del eje  $y$ .

### Materiales y métodos

Para el desarrollo y definición de parámetros de los ensayos, primeramente se revisó exhaustivamente la norma ASTM-C91-04 en relación a la secuencia de evaluación de la muestra, extrayendo los tiempos entre un ensayo y otro, el tiempo que debe pasar una vez que cae la aguja antes de tomar la lectura y las condiciones para determinar el tiempo de fraguado inicial y final. En la segunda fase se revisaron las dimensiones del VICAT convencional para determinar los desplazamientos necesarios para las diferentes operaciones y diseño del sistema mecánico. En la tercera etapa se seleccionaron los componentes para la implementación del sistema de control concluyendo con el desarrollo del sistema electrónico y la programación del algoritmo de control y la interfaz gráfica en LabVIEW.

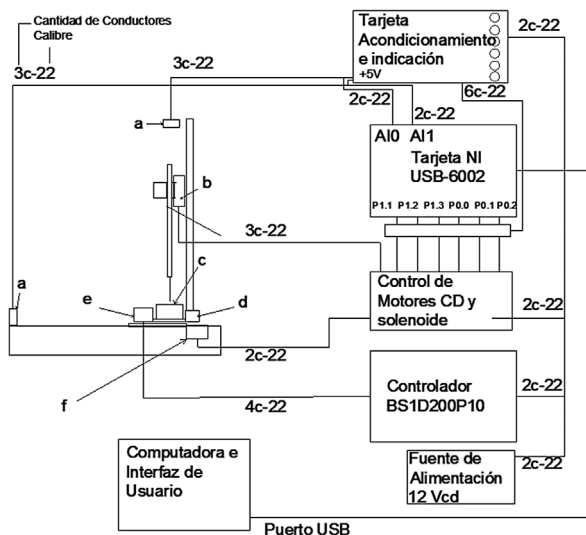


Figura 2. Esquema de prototipo desarrollado

La Figura 2 muestra un diagrama esquemático del sistema automático desarrollado en el que se puede observar la tarjeta de acondicionamiento e indicación mediante LED, la tarjeta de adquisición de datos USB-6002 por contar con canales analógicos y digitales [8], el sistema VICAT. Dos sensores de distancia Sharp 0A41SK; (a) cuya salida es en tensión (0.7 a 2 [V]). Uno de estos sensores para medir la distancia de penetración de la aguja (a1), y el otro para la posición del eje horizontal (a2). El sistema de elevación (b), la ubicación de la muestra (c), el depósito de limpieza (d), un motor de pasos para el sistema de rotación (e)

y un motor de CD para el desplazamiento horizontal (f) controlados mediante un circuito BA6229 para cada eje. La computadora que tiene la función de control e interface con el usuario.

El sistema de rotación de la muestra es accionado mediante un motor de pasos de alta resolución 103H5204 con su controlador marca SANYO, modelo BS1D200P10 [9]. Se calculó el número de pasos del motor para el giro de 15° y 30° considerando respetar el espaciamiento entre muestras y al borde de la probeta indicado en la norma. El solenoide de liberación se controla mediante un relevador de la marca SUN HOLD, modelo RAS24-10. El sistema de control y potencia es alimentado a partir de una fuente de 12 [V] de corriente directa (VCD).

El sensor de distancia se instaló a 60 [mm] del borde de la barra de ensayo (Ver Figura 2) ya que la distancia mínima especificada por el fabricante [10] es de 40 [mm]. La respuesta del sensor es no lineal, para su caracterización se posiciona la aguja al borde del recipiente 0 [mm] [1]; cambiando la posición de la aguja a 20 [mm], 30 [mm] y 50 [mm], se tomaron lecturas de la tensión de salida empleando la interfaz gráfica. Los resultados se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Muestreo para calibración de sensor.

Punto de la curva	Distancia (mm)	Lectura (V)
	<i>x</i>	<i>y</i>
P0	0	1.370551
P1	20	0.8965
P2	30	0.74
P3	50	0.55

Con estos valores empleando la ecuación (2), el polinomio de Lagrange para la distancia de penetración es:

$$Distancia = -103.5319x^3 + 345.7533x^2 - 421.1349x + 194.2589$$

Donde *x* representa la lectura de voltaje obtenido en el canal analógico.



Figura 3. Calibración del sensor de distancia.

Los coeficientes se programan en LabVIEW para escalar adecuadamente la profundidad de penetración que define el nivel de fraguado del cemento (Figura 3).

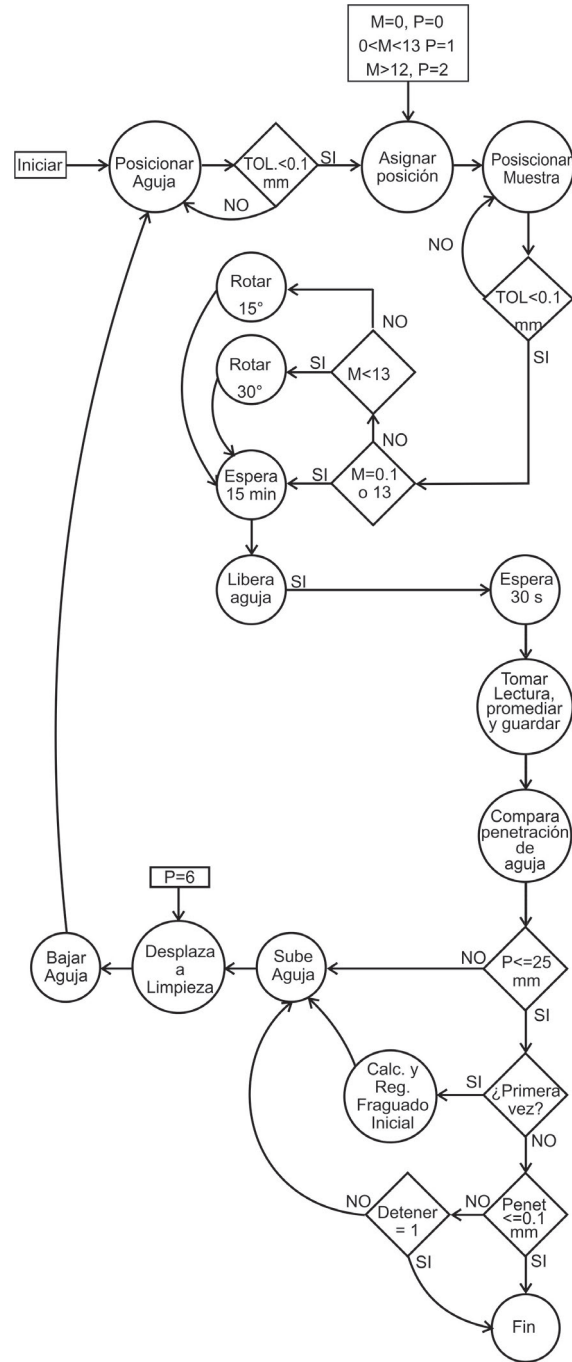


Figura 4. Algoritmo general.

La Figura 4 muestra el diagrama general de flujo del algoritmo desarrollado. Al inicio se posiciona la aguja en la localización de altura 0, considerando una precisión de 0.1 [mm]. En función de la muestra M, se asigna la posición P=0 (al centro de la muestra), P=1 (a 10 [mm] del centro de la muestra, con una rotación

de 0°) y  $P=2$  (a 10 [mm] del centro de la muestra con una rotación de 30°). Una vez asignada, se desplaza a esta posición con una tolerancia de 0.1 [mm]; al llegar, espera el tiempo asignado entre ensayos de 15 [min]. Al concluir el retardo envía un pulso al solenoide para que libere la aguja y caiga libremente. Espera 30 segundos indicados en [1]; empleando el sensor de distancia superior, se toman diez lecturas consecutivas y obtienen un promedio guardando este valor. En función de la distancia de penetración, se compara este valor contra 25 [mm] para buscar el tiempo de fraguado inicial. En caso de que no sea menor, sube la aguja a la posición 0 y asigna el valor de  $P=6$  para obtener un desplazamiento de 60 [mm] hasta el punto donde se encuentra el recipiente de limpieza, y se baja la aguja de manera controlada hasta una profundidad de 40 [mm]. En este punto se concluye un ensayo; se incrementa la variable  $M$  y se regresa al inicio a preparar la aguja en la posición de prueba siguiente. Cuando la distancia de penetración sea menor o igual a 25 mm si es la primera vez se calcula el tiempo de fraguado inicial y se registra continuando con el proceso de limpieza de la aguja. Si la distancia de penetración sea menor a 0.1 mm entonces se concluye el proceso y el automatismo se detiene. El usuario puede en cualquier momento detener la prueba a través de la interfaz gráfica presionando el botón de “Alto”.

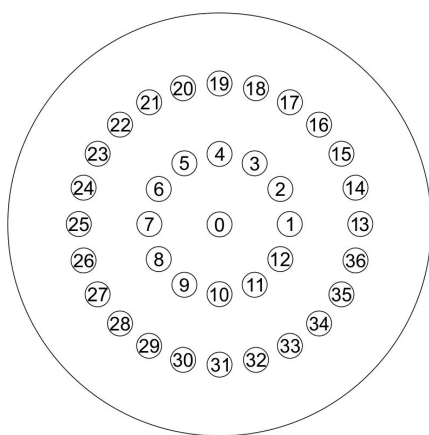


Figura 5. Patrón de muestras.

El patrón de puntos de ensayo que se produce con el algoritmo anterior se observa en la Figura 5. Se realiza un ensayo al centro, 12 ensayos en un radio de 10 [mm] y 24 ensayos a un radio de 20 [mm] por lo que en total se tienen 37 ensayos a intervalos de 15 minutos con un tiempo de evaluación total de 9.75 horas; considerando la espera inicial de 30 minutos.

El algoritmo se implementó en el programa LabVIEW de National Instrument™, empleando un ciclo “While” general para el proceso y una estructura

“case” donde se desarrolló un caso para cada punto de decisión mostrado en el diagrama de flujo (Figura 4). Para el almacenamiento de información se emplea una matriz donde mediante un índice se direcciona y almacena el tiempo y la distancia de penetración. En la Figura 6 se aprecia el bloque matriz y su enlace con las variables del proceso.

La ecuación (1) que define el tiempo inicial de fraguado se programó en LabVIEW obteniendo los valores almacenados en la matriz, empleando los operadores básicos almacenando el resultado en la variable de fraguado inicial (ver Figura 7).

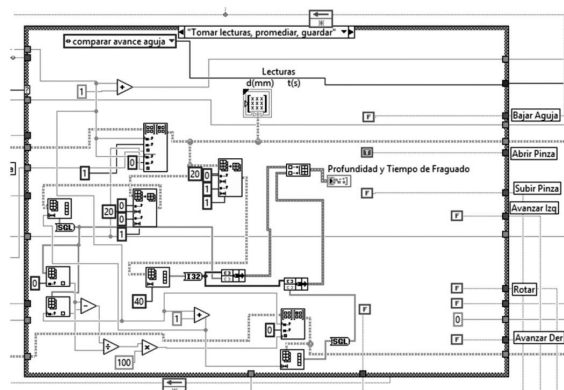


Figura 6. Segmento de programa para almacenamiento de información en matrices.

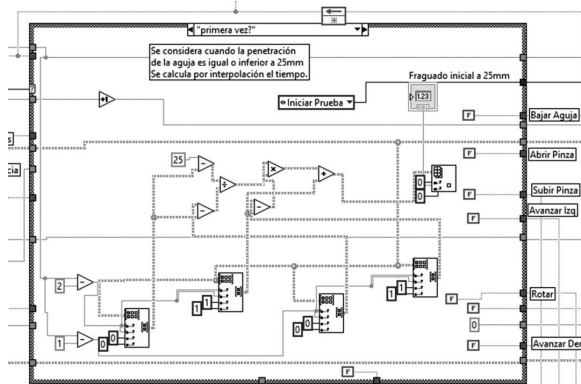


Figura 7. Cálculo del tiempo inicial de fraguado.

### Resultados y discusión

La Figura 8 muestra el sistema automatizado, se cuenta con un sensor de distancia para medir la penetración (1) soportado en una estructura. Un sensor para medir la posición en el eje horizontal de la muestra (2); una platilla base para sujetar el mecanismo y evitar un desplazamiento del VICAT manual, debajo de la muestra se instaló un engrane circular acoplado al motor de pasos (3); del lado derecho se muestra el recipiente de limpieza (4). Se indica la base de desplazamiento (5), (Figura 8).

La Figura 9 muestra la mitad izquierda de la pantalla de la interfaz de usuario en LabVIEW. Se observa una gráfica que va mostrando el avance del fraguado, indicando por un lado la distancia de penetración de la aguja y por otro lado el porcentaje del tiempo de fraguado; considerando la penetración máxima de 40 [mm] para el recipiente utilizado. Al lado derecho de la gráfica se presentan en una tabla los valores de tiempo en segundos transcurridos y la distancia de penetración en milímetros. Debajo de la gráfica, se encuentran las instrucciones de uso del sistema automatizado que se ha desarrollado.

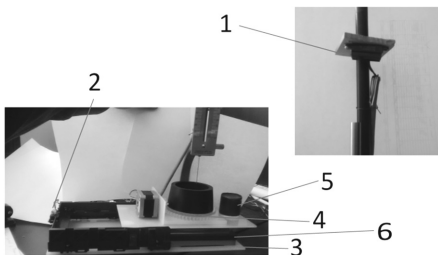


Figura 8. Aparato de VICAT: Sistema de automatizado.

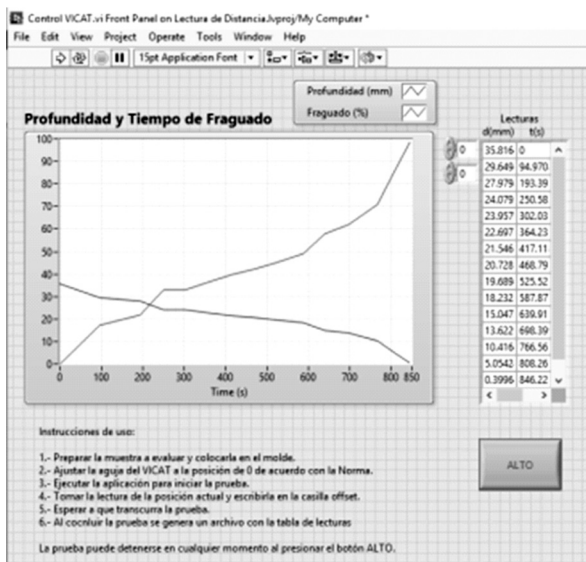


Figura 9. Pantalla de Interfaz de usuario (Lado izquierdo).

En la Figura 10 se tiene la mitad derecha de la interfaz de usuario. Aquí se informa la hora de inicio de la prueba, el tiempo transcurrido y el número de muestras que se han efectuado, el tiempo inicial y final de fraguado, la posición instantánea de la aguja y la muestra bajo evaluación. En la parte inferior se tiene una luz indicadora (mediante un LED), para dar a conocer al usuario la fase en que se encuentra en un momento determinado.

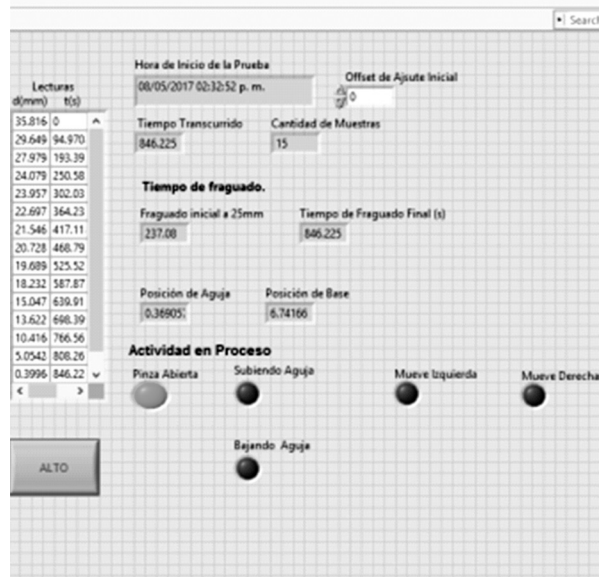


Figura 10. Pantalla de Interfaz de usuario (Lado derecho).

La aplicación desarrollada almacena la información en archivo con formato de texto "Lecturas\_xxx.lvm", el cual puede leerse desde un editor de texto o bien a través del programa Excel de Microsoft Office™ para un trabajo más simple con los datos. La Figura 11 muestra la lista de algunos archivos generados y un segmento de uno de estos, abierto con el bloc de notas de Windows™; puede notarse una precisión en las lecturas de seis dígitos. La primera columna corresponde al tiempo transcurrido desde el inicio de la prueba y la segunda a la profundidad.

Archivo	Edición	Formato	Ver	Ayuda
0.000000		40.393992		
1800.414530		40.381318		
2700.305989		39.839362		
3600.740547		37.496773		
4500.652429		34.908396		
5400.218701		31.419702		
6300.542437		27.293793		
7200.331941		23.155563		

Figura 11. Archivo de datos generado.

Los resultados muestran que es posible desarrollar la prueba de manera automatizada generando gráficos y archivos de datos con las lecturas de tiempo y distancia; una prueba hecha de manera manual implica un procesamiento de información que no es necesario. Empleando un VICAT manual se produce una prueba automática.

### Conclusión

Se concluye que el sistema es capaz de obtener los resultados de tiempo de fraguado del cemento empleando un aparato VICAT de operación manual; con ello se elimina el error visual que generalmente se da en la toma de lectura al obtener el valor mediante un sensor. La interfaz gráfica muestra directamente el tiempo de fraguado inicial y final. Se evita la necesidad de capturar y procesar la información y un posible error de captura de la misma. Se evita la imprecisión por descuido del operador al estar ocupado en otra actividad, mientras transcurre el tiempo requerido entre los diferentes ensayos, que podrían producirse a intervalos no uniformes.

### Agradecimiento

Los autores agradecen el financiamiento otorgado al Cuerpo Académico de Control y Automatización del Instituto Tecnológico de Aguascalientes para el desarrollo de este trabajo de investigación y desarrollo, como parte del proyecto “Dispositivo para determinar la cuantía y orientación de cementos reforzados con fibras plásticas”, a través de la modalidad de redes académicas de colaboración en su convocatoria 2016.

### Referencias

- [1] ASTM C191-04, (2004) Standard Test Method for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [2] Norma UNE-EN-196-3 (2008) Métodos de ensayo de cementos. Parte 3: Determinación

del tiempo de fraguado y de la estabilidad de volumen.

- [3] Mertind, Bolivia, consultado 10/agosto/2017. <https://www.mertind.com/bolivia/index.php/aplicacioneshidrologia/404/cementos/aparato-de-vicat-autom%C3%A1tico-computarizado-con-grabaci%C3%B3n-autom%C3%A1tica-y-tropicalizado-detail>.
- [4] Utest, Turquía, consultado 10/agosto/2017. <http://www.utest.com.tr/es/25873/Aparato-Vicat-Autom-tico>.
- [5] Ibertest, España, consultado 10/agosto/2017. [http://www.ibertest.es/download/fichas\\_producto/ensayos\\_cemento/Autovicat.pdf](http://www.ibertest.es/download/fichas_producto/ensayos_cemento/Autovicat.pdf)
- [6] Tonitechnik, Alemania, Consultado 10/Ago/2017. <http://www.tonitechnik.com/en/products/instruments/setting-time-vicat/toniset-one/>
- [7] Neuhauser, C. (2004), *Matemáticas para Ciencias*, Pearson Education (México).
- [8] Guía de Usuario NI-USB6001/6002 (2014), National InstrumentTM.
- [9] SanMotion 2 phase, stepping system, Ver 1. (2012), SANYO DENKI.
- [10] Ficha técnica OP13008EN (2005), especificaciones de sensor GP2Y0A41SK0F, SHARP.

**Recibido:** 16 de agosto de 2017

**Aceptado:** 29 de noviembre de 2017