

# MEDICIÓN DE LA ENERGÍA ENTREGADA POR EL PISÓN, EN LA EJECUCIÓN DE LOS ENSAYOS DE S.P.T. QUE SE EJECUTAN EN LA REPÚBLICA ARGENTINA

Augusto J. Leoni<sup>(1)</sup>, Dardo Guaraglia, Alejandro Bielecki, Joaquín Cánchero

<sup>(1)</sup>Dirección: Laboratorio de Mecánica de Suelos, Facultad de Ingeniería UNLP Calle 1 y 47 La Plata, Buenos Aires, Argentina.

e-Mail: [ajleoni@ing.unlp.edu.ar](mailto:ajleoni@ing.unlp.edu.ar)

## Resumen

En este trabajo se presentan los resultados de las mediciones de la velocidad de impacto del pisón normalizado para la ejecución del Ensayo Normal de Penetración, conocido universalmente como SPT, cuando, mediante la aplicación de distintas metodologías y elementos de izaje, se lo deja caer sobre la cabeza de golpeo.

A los efectos de evaluar la energía entregada por el pisón, en los ensayos que se ejecutan en nuestro país, se efectuaron mediciones simples y directas con las cuales se determinaron los valores de las velocidades de impacto. Luego se relacionaron con las velocidades teóricas para calcular la energía real entregada por las distintas metodologías.

En este estudio se pone especial atención a la metodología que se aplica en la ejecución de éste ensayo con el pisón de caída libre utilizado mayoritariamente en nuestro país, la cual se aparta de la metodología estándar recomendada por las Normas ASTM D 1586. Por lo tanto, se requiere determinar su energía a efectos de poder corregir los resultados del ensayo cuando se tienen que reducir los resultados encontrados a valores de  $(N_1)_{60}$ , en arenas susceptibles de experimentar procesos de licuefacción.

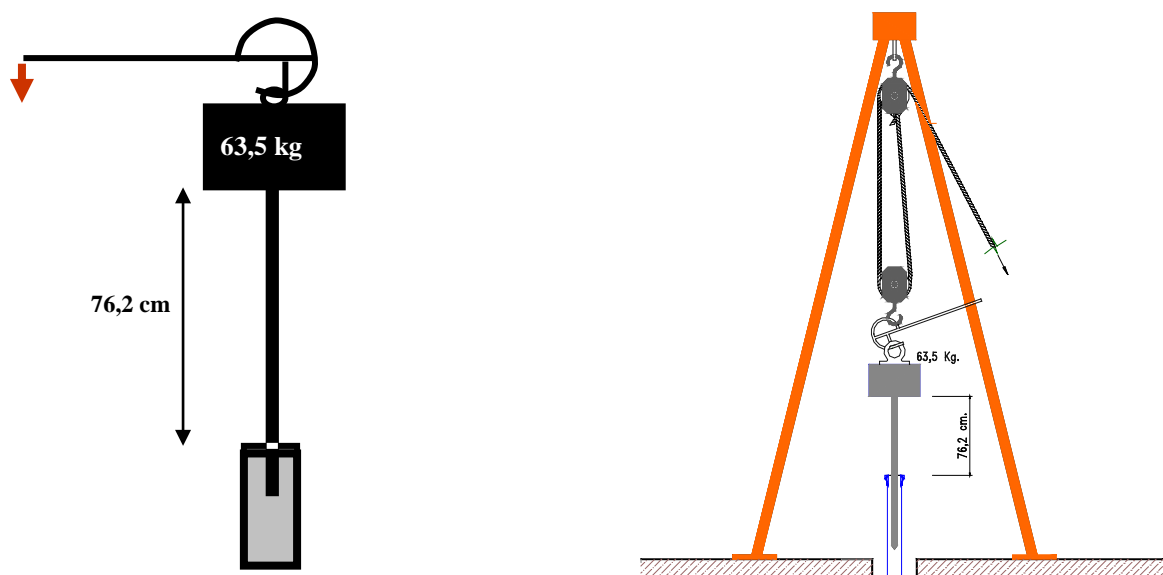
En nuestro país, se pensaba que la energía entregada por la metodología utilizada con el pisón en caída libre, se ubicaba en el orden del 90% de la teórica (Ref. 3). En el presente trabajo se deja claramente determinado éste valor.

**Palabras claves:** SPT, rendimiento, energía.

## ENCUADRE DEL PROBLEMA.

En el presente trabajo, se mide la velocidad que tiene el pisón utilizado para el ensayo de SPT, al momento de impactar contra la cabeza de golpeo de la cañería. El pisón que se estudiará es el que comúnmente se utiliza en los estudios realizados en nuestro país. Posee un vástago central que hace las veces de guía y es disparado en caída libre mediante un disparador manual como el que se destaca en la figura N° 1.

Para las mediciones se utilizaron tres alturas de caídas del pisón que fueron fijadas en 71 cm, 76 cm y 81 cm.



**Figura 1:** Pisón de 0,622 kN utilizado comúnmente en Argentina para ejecutar el ensayo de SPT.

## ANÁLISIS TEÓRICO DEL PROBLEMA Y ESQUEMA DE LA SOLUCIÓN ADOPTADA

Cuando la velocidad del movimiento de una masa es constante, la velocidad instantánea ( $V_i$ ) coincide con la velocidad promedio ( $V_p$ ).

En el caso en estudio se requiere analizar el movimiento uniformemente acelerado de una masa utilizando un sistema de medición real. Como no es posible medir un tiempo infinitesimal para determinar la velocidad instantánea, es necesario encontrar un método que permita conocer  $V_i$  con un bajo error a partir de  $V_p$  que es la que se puede medir.

Para estimar aproximadamente el error en la determinación de la velocidad de impacto del martillo, se grafica la velocidad teórica de una masa en función de la altura de caída libre (Fig. 2) para  $g = 9,7975 \text{ m/s}^2$ , que es la aceleración de la gravedad para la ciudad de La Plata, Argentina.

Para medir  $V_p$  se define una distancia ( $\Delta h$ ), en el entorno de la altura de caída del martillo ( $H$ ) y se mide el tiempo ( $\Delta t$ ) que el mismo requiere para recorrer el espacio  $2 \times \Delta h$  como se detalla en la figura N° 3.

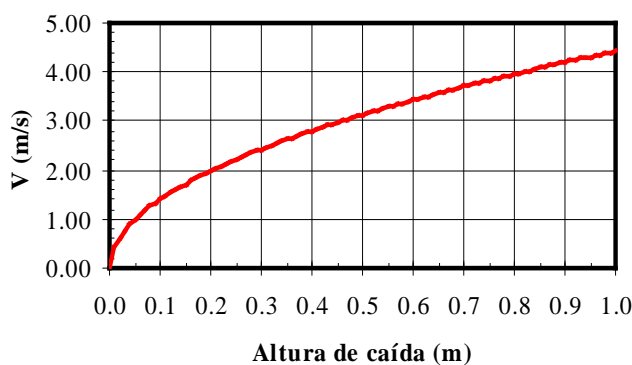


Figura N° 2: Velocidad teórica de un elemento en caída libre

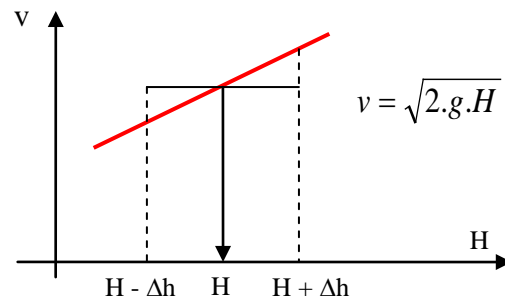


Figura N° 3: Detalle del cálculo de la velocidad promedio en el entorno de H

Cuando  $\Delta h$  es muy pequeña, el incremento de velocidad debido a la aceleración de la gravedad es pequeño y podría considerarse que la velocidad instantánea es aproximadamente igual a la velocidad promedio. Lamentablemente, cuando más pequeña es  $\Delta h$ , más aumentan los errores en la medición de la distancia y el tiempo, y en el cálculo del error de la velocidad estos errores se suman.

Se observa que alrededor de la altura de interés (0,70 m a 0,80 m) la velocidad varía prácticamente en forma lineal (Fig 2). Es posible evaluar en forma aproximada, los errores que se producen cuando se calcula la velocidad instantánea como promedio de los valores instantáneos, en dos puntos ubicados en el entorno. Para ello, se eligen arbitrariamente dos puntos en la zona de impacto,  $x_1 = 0.70 \text{ m}$ ,  $V_{t1} = 3,703579 \text{ m/s}$  y  $x_2 = 0.76 \text{ m}$ ,  $V_{t2} = 3,859041 \text{ m/s}$ , ( $h = 0,06 \text{ m}$ ). La velocidad promedio aproximada (asumiendo variación lineal de la velocidad) entre esos dos puntos es  $V_p = 3,78131 \text{ m/s}$  mientras que la velocidad teórica para  $x_3 = 0,73 \text{ m}$  es de  $V_{t3} = 3,782109 \text{ m/s}$ . El error que se comete al aproximar la velocidad instantánea en el punto central entre los valores de  $x_1$  y  $x_2$  ( $V_{t1}$  y  $V_{t2}$ ) por la velocidad promedio es de 0,02112 % lo cual resulta despreciable.

Para evaluar la eficiencia se desea que el método permita obtener la velocidad instantánea con un error menor que el  $\pm 2 \%$ , por lo cual se diseñará un esquema experimental que permita trabajar dentro de esos límites.

## COMPROBACIÓN EXPERIMENTAL DE LABORATORIO

### Diseño experimental

Una forma económica y sencilla de implementar el método se obtiene con un par óptico de transmisor y receptor con un haz de luz estrecho. El mismo se implementa mediante la utilización de un puntero láser y un fototransistor sensible a la longitud de onda del láser ( $\lambda = 650 \text{ nm}$ ). El fototransistor se instala aproximadamente a una distancia de 8 cm del punto de emisión, donde el haz de luz posee un diámetro de aproximadamente 2 mm.

Para poder corroborar los resultados en condiciones de laboratorio, se considerará, en lugar del pisón, una esfera con velocidad inicial nula de diámetro  $D$  que cae desde una altura  $x$  (punto 0). Al final del recorrido se disponen dos puntos de medición (1 y 2) separados una distancia  $h$ , y se medirá el tiempo  $\Delta t$  que tarda la esfera en pasar de uno a otro (Fig. 4 y 5).

Se deseaba que las fuerzas de roce del aire sobre la esfera fuesen despreciable frente a su peso, que los errores en la medición de la distancia entre los haces de luz pudiesen despreciarse, y que el esquema de medición fuese fácil de montar y tuviese en cuenta las dimensiones físicas de los dispositivos utilizados (láser y foto transistores). Con estos criterios se adoptó una esfera de acero de  $D = 0,065 \text{ m}$  de diámetro y un peso de 8,739 N.

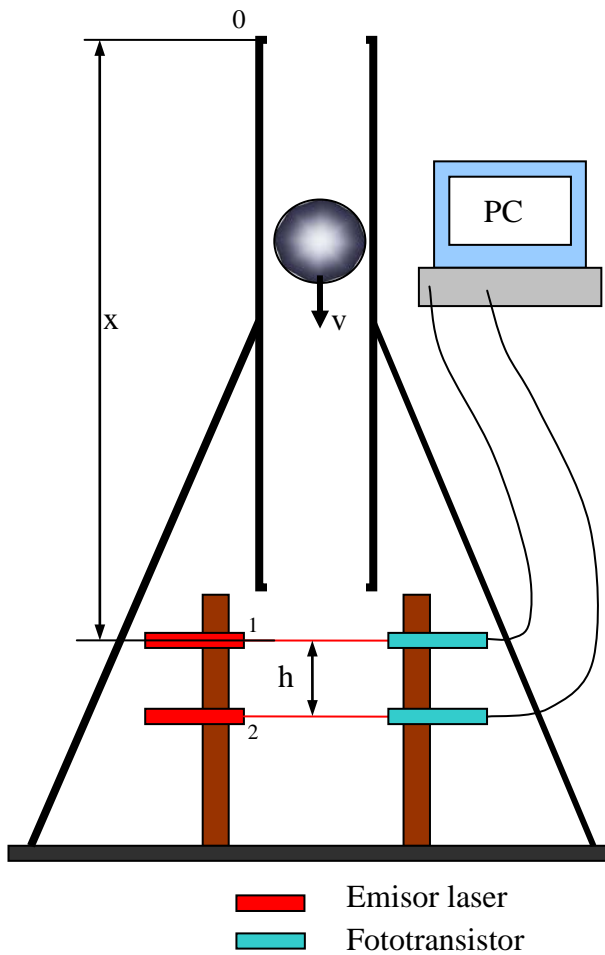
También se estudió que, teniendo en cuenta el diámetro de la esfera, existía cierta separación de los haces luminosos que minimizaban los errores en la medición de la velocidad instantánea en el punto de cruce con el rayo lumínico.

El esquema experimental se muestra en la Fig. 4 y 5. Durante las determinaciones efectuadas se varió la altura de caída con distintas longitudes del caño en 8 pasos desde 0,43 a 0,88 m. La resolución temporal de la base de tiempo utilizada fue de 77,6  $\mu\text{s}$ . (0,0000776 seg)

### Validación del método

En la Fig.6 se muestran las velocidades medidas en función de las velocidades teóricas para las distintas alturas de lanzamiento. Se puede observar una relación bastante lineal y que los apartamientos son pequeños.

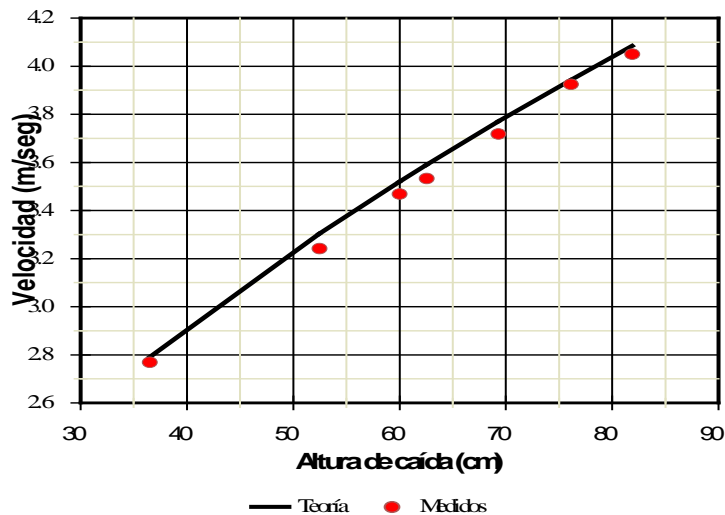
Los errores en las mediciones se deben principalmente a inexactitudes en la estimación de las distancias del punto inicial al primer láser y entre los haces, a las variaciones en la verticalidad del tubo, a los pequeños roces que existieron entre la bocha y el tubo en algunos ensayos, a que el centro de la bocha se apartaba levemente del plano que contiene a los haces, a las imprecisiones en la medición del tiempo a partir de los registros, etc. No obstante, la suma de todos estos factores, producen errores inferiores al 1,17 %, un valor que se considera aceptable para la aplicación deseada.



**Figura N° 4:** Esquema de medición de la velocidad en el laboratorio



**Figura N° 5:** Fotografía del esquema de medición implementado en el laboratorio



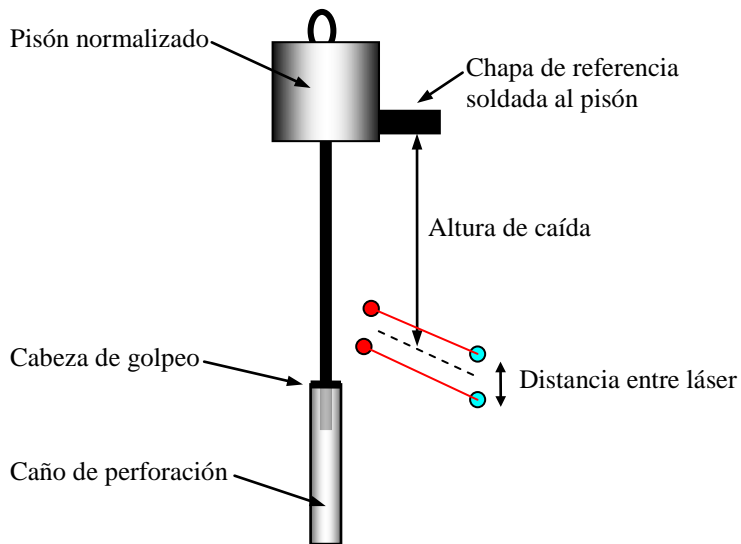
**Figura 6:** Verificación de las mediciones efectuadas, en comparación con la línea teórica en el modelo de laboratorio

**MEDICIONES A ESCALA NATURAL.**

**Esquema de aplicación.**

Para la ejecución a escala natural de las mediciones se utilizó el mismo esquema aplicado para la verificación del método, pero utilizando un pisón real de 0,62 kN de peso y barriendo un rango de altura de caídas de 71 cm, 76 cm y 81 cm respectivamente.

Para ello, al pisón real se le fijó un dial de referencia materializado por una chapa soldada como la que se muestra en la figura N° 7.

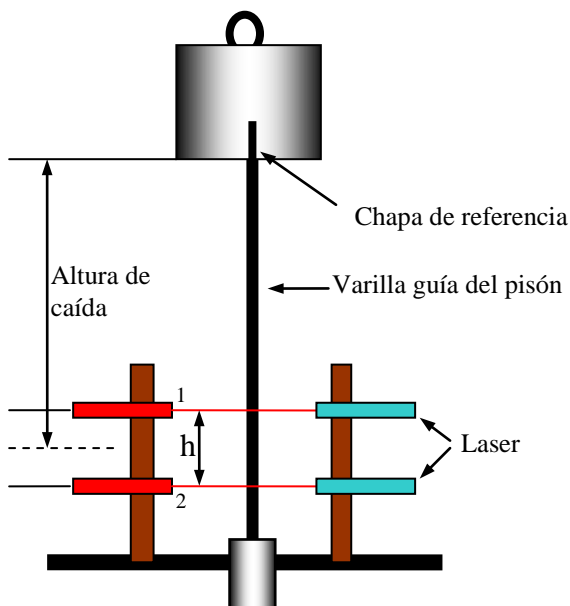


**Figura 7:** Corte con la disposición de los elementos de medición

Para estos ensayos, se fijó mediante soldaduras, un caño de perforación a una base metálica sólida, de forma de asegurar que el mismo se mantuviera en forma vertical durante la secuencia de las mediciones.

Sobre una viga rígida, se dispusieron los dos rayos láser mencionados en el ensayo de validación con la esfera metálica (Figuras N° 4 y 5).

A los efectos de interrumpir la recepción de los rayos láser y así poder medir el tiempo, se utilizó la planchuela metálica. Al caer el pisón la misma pasa entre los rayos e interrumpe la recepción de los mismos, tal como se puede apreciar en la figura N° 8 y en la fotografía N° 9.



**Figura 8:** Vista con la disposición de los elementos de medición

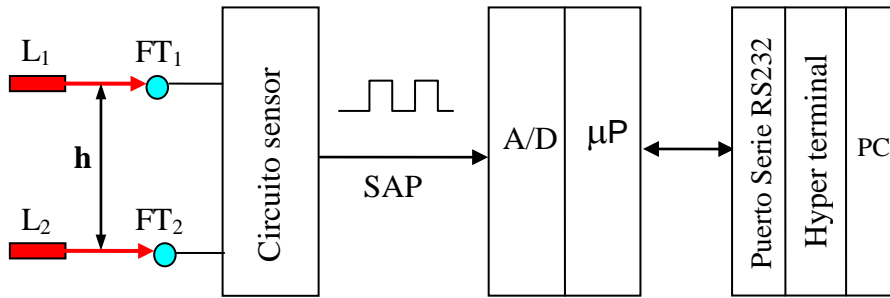


**Figura 9:** Fotografía de los elementos de medición al momento del ensayo.

#### **Esquema general del sistema de medición:**

Se implementó un circuito electrónico con un microprocesador y memoria como el que se detalla esquemáticamente en la figura N° 10 para registrar los tiempos en que se producían los cortes de los rayos láser (emitido por los punteros  $L_{1/2}$ ) separados una distancia de  $h = 6,50$  cm.

El circuito se conecta a la PC utilizando el puerto Serie RS 232 e ingresa al programa Hyperterminal. Con este esquema se pueden registrar 12.886 mediciones por segundo. Ello permite detectar con precisión los tiempos en que el indicador fijado al pisón corta los rayos de luz. Esto se logra mediante la medición de la tensión eléctrica en los fototransistores  $FT_{1/2}$  cuando dejan de recibir luz.



**Figura 10:** Dispositivo electrónico de medición

**L<sub>1</sub>/L<sub>2</sub>:** Punteros láser rojo, 630 nm de long de onda

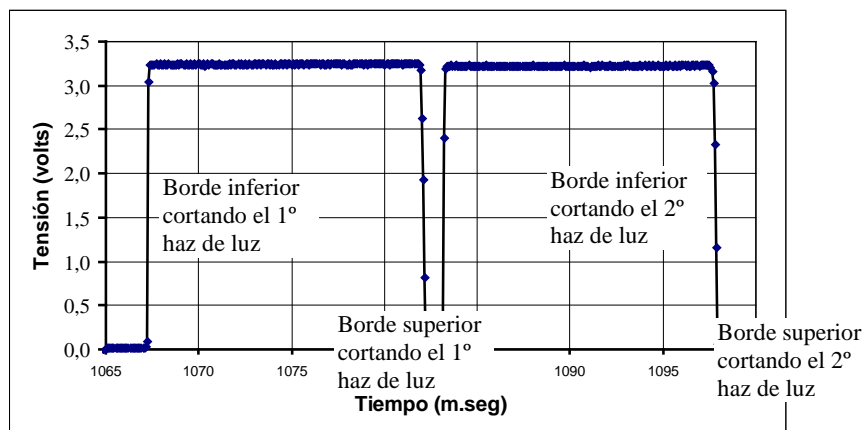
**FT<sub>1</sub>/FT<sub>2</sub>:** Sensores de luz (Fototransistor)

**SAP:** Salida analógica Pulsada

**A/D:** Conversor Analógico-Digital.

**µP:** Micro procesador

Un registro completo de una caída de pisón dura 4 segundos, con lo cuál en la PC quedan registrados 51.544 puntos de la tensión de salida de los fototransistores. Si se grafica esta variación de tensión en el tiempo, se puede obtener una gráfica como la que se muestra en la figura N° 11



**Figura 11:** Gráfico modelo que se genera en la PC por el corte de los rayos láser en el ensayo

Tomando el filo de la parte inferior de la planchuela, se logran medir los tiempos que la misma tarda en atravesar el láser superior y el láser inferior (representados en mili segundos en la Fig. 11). Como estos elementos se encontraban separados una distancia fija de 6,50 cm, es posible calcular la velocidad del pisón luego de recorrer las alturas de caída previamente establecidas de 71 cm, 76 cm y 81 cm. Estas distancias se miden desde el filo inferior de la planchuela al centro de los rayos láser como se indica en las figuras N° 7 y 8.

## RESULTADOS

Las determinaciones de las velocidades se efectuaron para cada una de las metodologías de lanzamiento planificadas que consistieron en:

- Lanzamiento del pisón con el disparados (Figura N° 12)
- Lanzamiento del pisón atado a la soga que pasa por un aparejo simple (Figura N° 13)
- Lanzamiento del pisón atado a una soga que pasa por un aparejo simple y que es izado por un reenvío con una vuelta de soga. (Figura N° 14)



**Figura 12:** Con disparador manual



**Figura 13:** Con aparejo simple



**Figura 14:** con aparejo simple y con una vuelta de sogá en el reenvío

Se calculó la energía teórica ( $E_t$ ) que entrega el pisón lanzado desde una altura “ $H$ ” al impactar con la cañería, con la ecuación 1.

$$E_t = \frac{1}{2}mv_t^2 \quad 1$$

Donde “ $m$ ” es la masa del pisón ( $m = 0,62$  kN) y “ $v_t$ ” es la velocidad teórica que se calcula con la ecuación 2. En la misma, para la aceleración de la gravedad se toma el valor de  $g = 9,7975$  m/s<sup>2</sup> que es el que le corresponde a la Ciudad de La Plata.

$$v_t = \sqrt{2gH} \quad 2$$

En el gráfico de la figura N° 15, se representan las velocidades medidas para cada uno de los tres sistemas de lanzamiento del pisón y para cada altura de caída. También se pueden apreciar en esta gráfica los valores teóricos de velocidad de caída libre del pisón.

Con los resultados reales de las velocidades medidas ( $v_m$ ) y utilizando la ecuación (1) se puede calcular también la energía real entregada ( $E_m$ ) por cada sistema de lanzamiento del pisón.

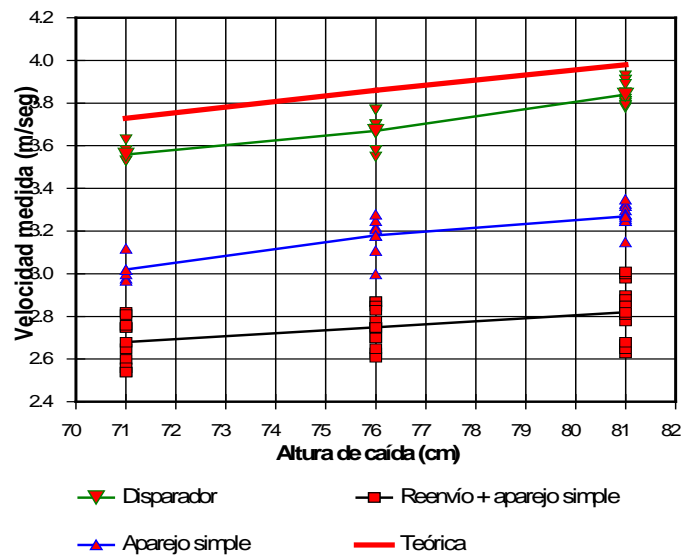
Finalmente con estos resultados se puede obtener el rendimiento de cada sistema ( $\eta$ ) que se calcula para las tres alturas de caída establecidas en este trabajo, aplicando la ecuación 3.

$$\eta(\%) = \frac{E_m}{E_t} \cdot 100 \quad 3$$

Para la evaluación de  $\eta$  basta conocer la velocidad a la cual el martillo impacta ( $v_m$ ) y reemplazar en la Ec. 3, obteniéndose la Ec. 4, donde vemos que el problema se reduce a conocer la velocidad media  $v_m$ .

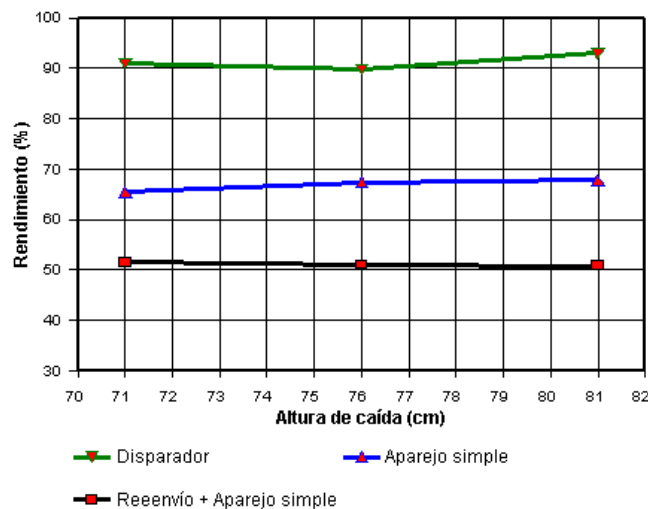
$$\eta(\%) = \frac{v_m^2}{v_t^2} \cdot 100 \quad 4$$





**Figura 15:** Gráfico que relaciona las velocidades medidas y los promedios calculados para cada sistema implementado y para cada altura de caída establecido

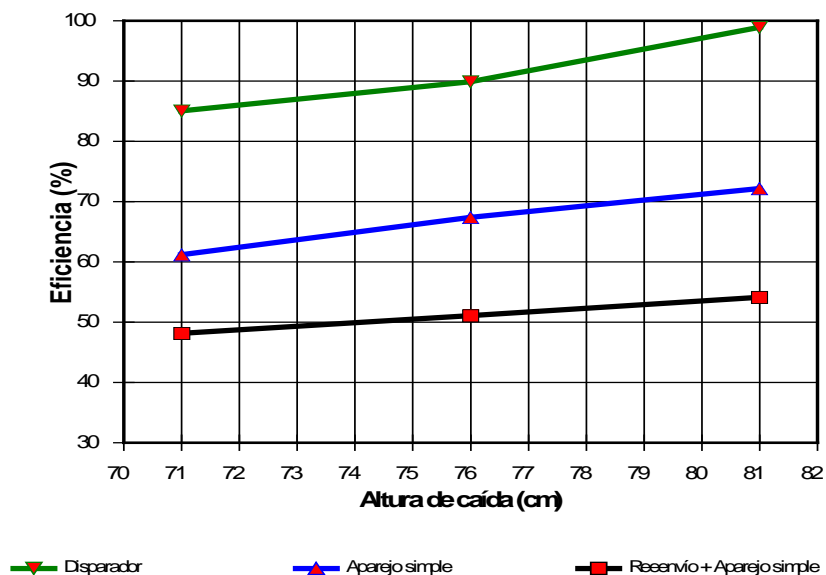
En la figura 16 se representan los rendimientos, tomando en cuenta la velocidad teórica para la caída libre en las tres altura consideradas. Éstas se comparan con las velocidades medidas para las mismas alturas con los distintos dispositivos de lanzamiento implementados. Se observa que los rendimientos medidos se mantienen aproximadamente constantes para las distintas alturas de caída y que varían solamente con el cambio de la metodología utilizada.



**Figura 16:** Representación de los rendimientos de cada sistema implementado

Finalmente en la figura 17, se representa la eficiencia que se logra para distintas alturas de caída, con las diferentes metodologías de lanzamiento. La eficiencia se calcula con la Ecuación 4, y es útil para comparar la energía medida con la energía teórica del ensayo SPT que considera una caída libre del pisón normalizado desde una altura de 76 cm. Este gráfico permite estimar los errores que se tendrán si el operario que realiza el ensayo comete errores en la apreciación de la altura de lanzamiento del pisón. Es decir, un mismo método produce un cierto rango de energía si se tienen en cuenta los errores de apreciación del operario.





**Figura 17:** Eficiencia de las distintas metodologías aplicadas, teniendo en cuenta la energía normalizada del SPT

## CONCLUSIONES

Es posible asegurar con un margen de error reducido, que la energía entregada en los ensayos de SPT realizados en nuestro país, con el disparador manual indicado en la figura N° 1, es superior al 90 % de la teórica, antes de impactar sobre la cabeza de golpeo. Esta afirmación está basada en las determinaciones de ésta investigación y en la experiencia de observar la ejecución de este ensayo a muchos operadores de experiencia. Los mismos muy pocas veces dan un golpe de pisón con una altura menor de 76 cm. En la gran mayoría de los ensayos, los valores de  $H$  son mayores, ya que el operador espera que aparezca la marca de los 76 cm para accionar el disparador, con lo cuál la altura de caída ( $H$ ) es siempre superior a su valor teórico.

Los resultados que se presentan en este trabajo permiten establecer una mejor adecuación de los resultados de investigaciones geotécnicas realizadas en nuestro país al compararlos con los resultados ejecutados en otros países. Fundamentalmente las conclusiones que se obtienen son de mucha importancia para evaluar la licuefacción de los suelos granulares saturados, donde los valores del SPT deben ser referidos a una energía del 60% de la teórica para aplicar las recomendaciones que tienen en cuenta los resultados del ensayos SPT, para la evaluación de dicho fenómeno.

Este último aspecto se ve agravado cuando erróneamente se toma como referencia para cualquier sistema de ejecución del ensayo de SPT, el valor establecido en la publicación de B. Seed (Ref. 1) donde le atribuye a un método específico utilizado en Argentina (aparejo con reenvío y pisón en forma de anillo) una energía del 45% de la teórica.

## Bibliografía

- (1) Seed B. "Influence of SPT Procedures in Soil Liquefaction Resistance Evaluations", ASCE, Vol. 111, N° 12, diciembre 1985.
- (2) R. B. Seed, K. O. Cetin, R. E. S. Moss, A. M. Kammerer, J. Wu5, J. M. Pestana, M. F. Riemer, R.B. Sancio, J.D. Bray, R. E. Kayen, and A. Faris " Recent advances in soil liquefaction engineering a unified and consistent framework" 26th Annual ASCE Los Angeles Geotechnical Spring Seminar, Keynote Presentation, H.M.S. Queen Mary, Long Beach, California, April 30, 2003.
- (3) R. E. López Menardi "Determinación in situ de propiedades ingenieriles de los suelos y su relación con el ensayo normal de penetración" Sept. 2003.
- (4) E. Odebrecht, F. Schnaid, M. Maia Rocha, G. de Paula Bernardes "Energy Efficiency for Standard Penetration Tests"