

**ANÁLISIS COMPARATIVO DE ESTIMACIÓN ENERGÍA PARA EL CÁLCULO  
DE EFICIENCIA EN ENSAYOS SPT**

**MARÍA ALEJANDRA RUIZ GONZÁLEZ**

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
BOGOTÁ, D. C.,  
2020**

**ANÁLISIS COMPARATIVO DE ESTIMACIÓN ENERGÍA PARA EL CÁLCULO  
DE EFICIENCIA EN ENSAYOS SPT**

MARÍA ALEJANDRA RUIZ GONZÁLEZ

CÓDIGO: 506173

Trabajo de grado para optar para el título de Ingeniera Civil

**DOCENTE ASESOR:**

Mario Alexander Castañeda López

Ingeniero civil MSc.

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE CIVIL  
BOGOTÁ**

**2020**



## Atribución-NoComercial-SinDerivadas 2.5 Colombia (CC BY-NC-ND 2.5)

La presente obra está bajo una licencia:  
**Atribución-NoComercial-SinDerivadas 2.5 Colombia (CC BY-NC-ND 2.5)**

Para leer el texto completo de la licencia, visita:  
<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.5/co/>

### Usted es libre de:



Compartir - copiar, distribuir, ejecutar y comunicar públicamente la obra

### Bajo las condiciones siguientes:



**Atribución** — Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el autor o el licenciante (pero no de una manera que sugiera que tiene su apoyo o que apoyan el uso que hace de su obra).



**No Comercial** — No puede utilizar esta obra para fines comerciales.



**Sin Obras Derivadas** — No se puede alterar, transformar o generar una obra derivada a partir de esta obra.

**Nota de Aceptación**

---

---

---

---

Presidente del Jurado

---

Jurado

Bogotá 22 de mayo de 2020



## **Agradecimientos**

A la Universidad Católica de Colombia por su excelente formación profesional y otorgar la posibilidad de poder realizar un enfoque transferencia tecnológica internacional

A mi tutor y Mario Castañeda por aportar conocimientos con su amplia experiencia internacional y en general por su tiempo y dedicación en la totalidad del proyecto

A Mis padres, Edgar Ruiz y Esperanza González por inculcar valores y principios creando una fortaleza en mi formación personal y profesional

Natalia Camacho, David Cruz y Rodrigo Vargas por ser mis compañeros de viaje en la visita a Brasil y durante mi carrera

A mis compañeros, Alexander Márquez, Andrés Ramos, Jeison Espinosa y Jeisson Suarez por su apoyo incondicional en todo mi proceso educativo

En General a las personas que aportaron de manera directa o indirecta en la realización de este trabajo

## RESUMEN

A nivel internacional se adopta el ensayo SPT como el predilecto para la exploración de suelos, con el fin de determinar las propiedades y el comportamiento del mismo dadas sus condiciones particulares. A partir de este, se obtiene el índice de resistencia a la penetración ( $N_{SPT}$ ) y muestras alteradas para su caracterización y así estimar la capacidad de carga del suelo y el diseño de cimentaciones tanto superficiales como profundas.

El índice de resistencia a la penetración es función de la energía entregada al muestreador a partir de un trabajo generado por el golpe del martillo, con una altura de caída específica. De acuerdo con la normalización del ensayo, se determina internacionalmente una eficiencia del 60%, como valor de referencia para generar corrección por energía al número de golpes en campo ( $N_f$ ), los estimativos de eficiencia para el equipo son generalizados y varían según el país, ya que depende de las características propias en la configuración del equipo, estos valores se encuentran en un rango del 45% al 72% de eficiencia esperada. Dada la importancia del cálculo de la energía entregada y la eficiencia real del equipo, autores brasileros desarrollan la metodología EFV, que racionaliza los datos de energía potencial a través del trabajo generado por el sistema de caída y la propagación de las ondas mecánicas en un intervalo de tiempo definido, teniendo en cuenta las fuerzas no conservativas que actúan en el sistema. Por consiguiente, se realiza una transferencia tecnología para implementar esta metodología, con el fin de poder determinar la energía y la eficiencia del sistema en un estudio de caso en Colombia, Se determina la sensibilidad en los resultados de la cuantificación de la energía, según la configuración del equipo y la variabilidad del peso del martillo y la longitud del varillaje ante el poco control de las especificaciones de los equipos. Respecto a una comparación directa entre los valores de referencia que se estipulan por norma colombiana y los valores de energía real entregada al muestreador por la metodología EFV se determina la influencia que tiene la corrección por energía en el estimativo de ángulo de fricción interna del suelo y directamente en la capacidad de carga para cimentaciones superficiales.

## ABSTRACT

Summary the SPT test is adopted internationally as the preferred test for soil exploration, in order to determine the properties and behavior of the soil given its particular conditions. From this, the penetration resistance index (NSPT) and altered samples are obtained for their characterization and thus estimate the load capacity of the soil and the design of both superficial and deep foundations. The penetration resistance index is a function of the energy delivered to the sampler from work generated by the hammer blow, with a specific fall height. According to the standardization of the test and the general characteristics of the equipment, an efficiency of 60% is determined internationally, as a reference value to generate energy correction to the number of hits in the field (Nf). The efficiency estimates for the equipment are generalized and vary according to the country, since it depends on the own characteristics in the configuration of the equipment, these values are in a range of 45% to 72% of expected efficiency. Given the importance of calculating the energy delivered and the real efficiency of the equipment, Brazilian authors developed the EFV methodology, which rationalizes the potential energy data through the work generated by the fall system and the propagation of mechanical waves in a defined time interval, taking into account the non-conservative forces acting on the system. Therefore, a technological transfer is made to implement this methodology, in order to be able to determine the energy and the efficiency of the system, in a case study in Colombia. The sensitivity in the results of the energy quantification is determined, according to the configuration of the equipment, the variability of the hammer weight and the length of the rod in the face of the little control of the specifications of the equipment. With respect to a direct comparison between the reference values, which are stipulated by Colombian standard and the real energy values delivered to the sampler, by the EFV methodology, the influence that the energy correction has on the estimation of the angle of internal friction of the soil and directly on its load capacity is determined.

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1 - Conferencias Visita Técnica Internacional.....	5
Tabla 2 Factores que influyen en el ensayo SPT Fuente: propia .....	16
Tabla 3 - Dimensiones Normativas equipo SPT.....	20
Tabla 4- Corrección por longitud de varilla –.....	21
Tabla 5 - Estimación de CN -.....	23
Tabla 6 Resumen Eficiencia Energía-.....	25
Tabla 7 Eficiencias Promedio y Corrección por energía E ref. =60% .....	26
Tabla 8 - Factores de Capacidad De Carga Según Angulo de Fricción interno del suelo –	27
Tabla 9 - Coeficientes de calibración del equipo SPT para la obtención de energía .....	36
Tabla 10 - análisis corrección de energía para sondeo 1.....	50
Tabla 11 - Resumen datos metodología convencional 45% eficiencia – N1 60 corregido - ángulo de fricción.....	52
Tabla 12 - Resumen datos metodología EFV – N1 60 corregido - ángulo de fricción.....	53

## LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 Grupo de Ingeniería -Segunda visita técnica Brasil.....	- 4 -
Ilustración 2 Visita Faber-Castell.....	5
Ilustración 3 Visita Usina Furnas .....	5
Ilustración 4 Visita laboratorios geotecnia - D. P. Edmundo Esquivel.....	7
Ilustración 5 Esquema general del equipo de perforación – Fuente propia .....	19
Ilustración 6- Valores de Cn – Fuente [17].....	23
Ilustración 7 Ubicación predio caso de estudio.....	38
Ilustración 8 Perfil estratigráfico Fuente: Caso de estudio .....	39

## LISTA DE GRAFICAS

Gráfica 1 - Fuerza y Velocidad aplicados en un intervalo de tiempo ( $t_1-t_2$ ).....	29
Gráfica 2 Energía SPT a partir del producto de la fuerza por la distancia sin perdidas	30
Gráfica 3 - Energía SPT a partir del producto de la fuerza por la distancia considerando perdidas .....	30
Gráfica 4 - Representación Gráfica Método EFV.....	33
Gráfica 5 - Resultados de exploración caso de estudio - Numero de golpes en campo Nf .....	40
Gráfica 6 Eficiencia Vs N de Campo - Variación Peso del martillo.....	45
Gráfica 7 Eficiencia Vs N de Campo - Variación Longitud de las varillas .....	45
Gráfica 8- Corrección del Nf - Variación de Wm.....	46
Gráfica 9- Corrección de Nf - Variación en Longitud de Varillas.....	46
Gráfica 10 - Energía entregada - Variación de longitud de varillas y Peso de Martillo - Sondeo 1 - $Z = 1.50$ Nf = 16 golpes.....	48
Gráfica 11 Eficiencia del equipo – Variación de características del sistema – Longitud de varilla y peso del martillo.....	49
Gráfica 12 N60 y N60 EFV - Sondeo 3 .....	51
Gráfica 13 N60 y N60 EFV - Sondeo 4 .....	51
Gráfica 14 N60 y N60 EFV - Sondeo 2 .....	51
Gráfica 15 N60 y N60 EFV - Sondeo 1 .....	51
Gráfica 16 Abaco de diseño- Capacidad portante en Ton – Variación en base de la cimentación – Zapatas Cuadradas – Método EFV - $\Phi 35^\circ$ .....	54
Gráfica 17 Abaco de diseño- Capacidad portante en Ton – Variación en base de la cimentación – Zapatas Cuadradas – Método Convencional - $\Phi 32^\circ$ .....	54

## LISTA DE ANEXOS

1. Registro Fotográfico.....	81
2. Estudio de suelo – caso de estudio .....	87
3. Análisis de energía y eficiencia – Caso de estudio.....	125
4. Análisis de datos – Variación del sistema .....	126
5. Angulo de fricción interno del suelo .....	127

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS SÍMBOLOS

### SIGLAS

<b>ASTM</b>	American Society for Testing Materials
<b>EESC</b>	Escuela de Ingeniera de Sao Carlos
<b>EFV</b>	Energía, Fuerza, Velocidad
<b>INV</b>	Instituto nacional de vías
<b>NBR</b>	Norma Brasileira
<b>SCG</b>	sociedad colombiana de geotecnia
<b>SCI</b>	sociedad colombiana de ingenieros
<b>SPT</b>	Standard Penetration Test
<b>UNE</b>	Una Norma Española
<b>USP</b>	Universidad de Sao Pablo

### LETRAS LATINAS

<b>a</b>	Corrección por longitud del varillaje
<b>A</b>	área de la sección transversal del elemento
<b>B</b>	Base cimentación
<b>C</b>	Cohesión del suelo
<b>c</b>	Velocidad de propagación de onda en acero
<b>Cn•</b>	factor de corrección por tensión vertical por sobrecarga en el terreno
<b>DF</b>	Depth Foundation – Nivel de cimentación
<b>E</b>	Energía
<b>E(EFV)</b>	Energía calculada a partir del método EFV
<b>E1-E2</b>	Energías de referencia



<b>Er</b>	Energía de referencia
<b>F</b>	Fuerza aplicada
<b>Fd</b>	Fuerza dinámica de penetración del muestreador al suelo
<b>g</b>	Aceleración de la gravedad
<b>h</b>	Altura de caída del martillo
<b>N</b>	Indicen de penetración del suelo
<b>N (60)</b>	Valor del número de golpes normalizado para una energía potencial nominal de caída libre
<b>N (60) EFV</b>	Valor del número de golpes normalizado para una energía potencial calculada partir de la metodología EFV
<b>N.F.</b>	Corrección por nivel freático
<b>N1(60)</b>	Corrección del Numero de golpes en campo según metodologías convencionales
<b>N1(60) EFV</b>	Corrección del Numero de golpes en campo según metodologías EFV
<b>N1-N2</b>	Numero de golpes de referencia
<b>Nc</b>	Factores de Capacidad de Carga según Cohesión del suelo
<b>Nf</b>	Number Field – Número de golpes en campo
<b>NF</b>	Nivel Freático
<b>Nq</b>	Factor capacidad de carga según producto de DF y peso específico del suelo
<b>N<math>\gamma</math></b>	Factores de Capacidad de Carga según peso unitario del suelo
<b>Pa</b>	Presión Atmosférica
<b>PE</b>	Energía potencial teórica
<b>PE(m+v)</b>	Máxima energía potencial teórica a partir del método EFV
<b>q</b>	Producto entre nivel de cimentación y peso unitario del suelo
<b>qu</b>	Capacidad de carga del suelo en fuerza
<b>Rs</b>	Esfuerzo vertical de referencia

<b>(t1-t2)</b>	Intervalo de tiempo en la realización del ensayo SPT
<b>t</b>	Tiempo
<b>T</b>	Energía cinética total del sistema
<b>v</b>	Velocidad
<b>V</b>	Energía potencial del sistema
<b>Wm</b>	Peso del martillo
<b>Wm</b>	Peso del martillo
<b>wns</b>	Trabajo efectuado por fuerzas no conservativas del sistema
<b>ws</b>	Trabajo no conservativo a partir del sistema suelo muestreador
<b>Wv</b>	Peso de las varillas

#### **LETRAS GRIEGAS**

<b><math>\eta_1</math></b>	Coeficiente de eficiencia del martillo
<b><math>\eta_2</math></b>	Coeficiente de eficiencia de las varillas
<b><math>\eta_3</math></b>	Coeficiente de eficiencia del sistema
<b><math>\gamma</math></b>	Peso Unitario del Suelo
<b><math>\Delta P</math></b>	Incremento de penetración del muestreador al suelo
<b><math>\sigma'_v</math></b>	Esfuerzo Vertical Efectivo del Suelo
<b><math>\Phi</math></b>	Ángulo de fricción interna del suelo

## TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	VI
ABSTRACT .....	VII
LISTA DE TABLAS .....	VIII
LISTA DE ILUSTRACIONES.....	IX
LISTA DE GRAFICAS .....	X
LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS SÍMBOLOS .....	XII
1.INTRODUCCIÓN .....	- 1 -
2. OBJETIVOS .....	- 3 -
<b>3.1. General</b> .....	- 3 -
<b>3.2. Específicos</b> .....	- 3 -
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	- 4 -
<b>3.1. Visita técnica internacional</b> .....	- 4 -
<b>3.2. Justificación</b> .....	8
<b>3.3. Problema de investigación</b> .....	10
4. ANTECEDENTES Y LIMITACIONES .....	12
<b>4.1. Inicio y desarrollo del SPT</b> .....	12
<b>4.2. Correcciones del factor “N”</b> .....	13
<b>4.3. Limitaciones</b> .....	15
5.MARCO TEÓRICO.....	18
<b>5.1. Generalidades SPT en Colombia</b> .....	18
<b>5.2. Equipo de perforación ensayo SPT</b> .....	19
<b>5.2-1 Longitud del varillaje (“A”)</b> .....	21
<b>5.3. Sobre carga del terreno (CN)</b> .....	22
<b>5.4 Energía de referencia</b> .....	24

<b>5.5 Capacidad de carga</b> .....	26
<b>6. ESTADO DEL ARTE</b> .....	28
<b>6.1. Ondas y propagación de energía</b> .....	28
<b>6.2. Método EFV</b> .....	29
<b>6.2.1.-Energía Muestreador - Sistema suelo-muestreador (SCHNAID, ODEBRECHT, ROCHA, &amp; BERNARDES, 2009)</b> .....	34
<b>7. METODOLOGÍA</b> .....	37
<b>7.1. Revisión bibliográfica</b> .....	37
<b>7.2. Estudio de caso</b> .....	38
<b>7.3. Comparación entre teorías semiempíricas y método EFV</b> .....	42
<b>7.5. Valores de Angulo de ficción interno</b> .....	43
<b>8.RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS</b> .....	44
<b>8.1 Análisis de eficiencia a partir de variaciones en el equipo</b> .....	44
<b>8.2 Análisis energía - caso de estudio</b> .....	48
<b>9. CONCLUSIONES</b> .....	56
<b>10.RECOMENDACIONES NUEVAS INVESTIGACIONES</b> .....	59
<b>11. BIBLIOGRAFÍA</b> .....	60

## 1. INTRODUCCIÓN

El ensayo de penetración estándar (SPT) es de los ensayos in-situ más utilizados en el mundo, su amplia utilización en la Ingeniería Geotécnica se debe a su practicidad y facilidad para obtener parámetros de resistencia del suelo por medio del índice de resistencia a la penetración  $N_{SPT}$ . Los valores obtenidos a partir del ensayo dependen de factores intrínsecos del suelo en exploración, como su compacidad a la configuración del equipo y su eficiencia, al ser un ensayo dinámico. Estos factores influyen en la energía entregada por el martillo al muestreador.

El valor del número de golpes en campo ( $N_f$ ) sufre una serie de correcciones como lo son: la presencia del nivel freático, la sobre carga del terreno, la longitud de las varillas y la eficiencia del equipo. El análisis de energía y la determinación de la eficiencia del equipo son datos estandarizados que asumen valores convencionales para su corrección, estos valores dependen de la configuración del sistema y varían según el país.

En los últimos años se han retomado las investigaciones por parte de autores brasileros como Odebrecht (2009) que cuantifican la energía y analizan las características según la configuración equipo para poder racionalizar estos parámetros y así disminuir esa incertidumbre en los datos. (SCHNAID, ODEBRECHT, ROCHA, & BERNARDES, 2009) Este análisis parte del trabajo realizado por la fuerza aplicada y velocidad de las ondas a través del sistema de varillas y cuantificar la energía real que se entrega al muestreador, se plantea que la energía potencial real entregada es el área bajo la curva entre una fuerza dinámica y la velocidad de la onda mecánica, esta metodología lleva el nombre de EFV.

El presente trabajo realiza una transferencia tecnológica gracias a la visita técnica internacional en USP, a partir de un estudio de caso en Colombia, por medio la empresa MVC AMERICANA DE CONSTRUCCIONES que realiza el estudio de suelos ubicado en la AV. KR 50 # 1 D -23 – BOGOTÁ, fue realizado en 2019 para un edificio de cuatro (4) pisos por medio de perforación manual, respecto a el perfil estratigráfico del sitio y según la caracterización del suelo aportada , se encuentra un depósito aluvial que a su vez se compone por arenas finas y pequeños lentes de arena arcillosa. Como objetivo principal se busca realizar el análisis y posterior comparación entre las correcciones por energía semiempíricas, y las metodologías racionales basadas en el principio de conservación de energía y el método EFV. Obteniendo así valores de parámetro de resistencia dinámica ( $N_{SPT}$ ) y ángulo de fricción interna del suelo. Ya que en el presente trabajo no se utilizarán equipos especializados como acelerómetros para medir velocidad de ondas como lo necesitan las teorías racionales, se tomarán resultados obtenidos por investigaciones anteriores realizados en la USP, por autores brasileros en la disertación de maestría en Geotecnia que realizan un análisis detallado de la reacción dinámica entre el suelo y el muestreador.

Por medio de las correcciones que sufre el número de golpes  $N_f$  se determina el  $N_1(60)$  y así se obtiene el ángulo de fricción interna del suelo tanto para la metodología convencional como para la metodología EFV, este es el principal parámetro para la obtención de la capacidad de carga para cimentaciones superficiales en estudio. De acuerdo con análisis comparativo entre las eficiencias se determina la influencia del análisis en la capacidad portante de cimentaciones superficiales

## **2. OBJETIVOS**

### **3.1. General**

- Comparar valores de eficiencia convencionales y los obtenidos mediante análisis de energía por el método EFV en ensayos SPT para un suelo granular, y su influencia sobre el diseño de cimentaciones superficiales

### **3.2. Específicos**

- Estudiar y aplicar metodologías verificadas en investigaciones de origen brasilero para el cálculo de eficiencia de equipos para SPT
- Calcular parámetros de resistencia a partir de las metodologías mencionadas
- Evaluar la influencia de consideraciones de energía en la estimación de capacidad de carga en cimentaciones superficiales

### 3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

De acuerdo con la visita técnica internacional a Brasil y a las conferencias asistidas en la EESC se establece un planteamiento del problema con el fin de realizar una transferencia tecnológica a Colombia en el área de Geotecnia.

#### 3.1. Visita técnica internacional

A través del programa de movilidad estudiantil se realizó la segunda visita de la Universidad Católica de Colombia a Brasil, donde se ejecutan recorridos técnicos en grandes multinacionales con sedes en el país para los estudiantes de Ingeniería Civil e Industrial, a su vez se realiza visita a la Universidad de Sao Pablo en su sede de Ingeniería en el estado de Sao Carlos, donde se lleva a cabo una serie de conferencias en las diferentes áreas de posgrados dirigidas por los docentes investigadores de la USP abriendo la oportunidad de movilidad estudiantil y tomar recursos para proyecto de grado para el pregrado actualmente cursado por medio de transferencias tecnológicas de acuerdo a las investigaciones desarrolladas por la USP

Ilustración 1 Grupo de Ingeniería -Segunda visita técnica Brasil



Fuente: El autor



Entre las actividades planteadas se realizó la visita guiada a la Hidroeléctrica Usina de Furnas en Río Grande, la Planta Sao Martinho productora de azúcar, etanol y energía eléctrica más grande del mundo que genera sus productos a partir del procesamiento de caña de azúcar y la visita a la Planta de Faber-Castell en Sao Carlos. Todas estas visitas con el objetivo de conocer la infraestructura y los procesos industriales involucrados.

*Ilustración 2 Visita Faber-Castell*



*Fuente: El autor*

*Ilustración 3 Visita Usina Furnas*



*Fuente: El autor*

Uno de los objetivos de estas actividades fue conocer una de las mejores Universidades de América Latina, tener acceso a las conferencias de alto nivel dictadas por masters y directores, conocer las instalaciones y laboratorios de la USP y el acceso directo a semillero y grupos de investigación.

*Tabla 1 - Conferencias Visita Técnica Internacional*

Conferencia	Fecha
<b>Vías y Transportes</b>	22 – Julio - 2019
<b>Estructuras en madera</b>	23 – Julio - 2019
<b>Gestión y construcción de obras</b>	22 – Julio - 2019
<b>Recursos Hídricos y Ambientales</b>	22 – Julio – 2019
<b>Geotecnia</b>	23 – Julio – 2019
<b>Visita Laboratorios</b>	23 – Julio - 2019

*Fuente: El autor*

La USP que es la universidad más grande de Brasil y se encuentra entre las 3 mejores universidades de América Latina, actualmente cuenta con varios reconocimientos dados por investigaciones y hallazgos en diferentes áreas y es líder en diferentes campos de investigación (World University Ranking, 2019).

A partir de 1977 el curso de Posgrado en Geotecnia se encuentra acreditada por el Consejo de Educación de Brasil, y su objetivo principal es el desarrollo en investigaciones de gran envergadura, capacitando en un ámbito científico a profesionales especializados y recién graduados. Dentro de las líneas generales de investigación están: la Ingeniería Geológica, Mecánica de Suelos y Mecánica de Rocas, que se complementan con uno de los laboratorios más completos del país.

En las ramas específicas de investigación en Geotecnia se encuentran: la Ingeniería de Cimentaciones, Aplicación en Rocas Granularas y Materiales en Ingeniería Civil, Geotecnia Ambiental, Mapeo Geotécnico, Mejoramiento de Suelos, Modelación Numérica y Física de Problemas Geotécnicos, Propiedades Geotécnicas de Suelos Naturales y Compactados y el desarrollo de equipos para pruebas Geotécnicas de campo y laboratorio. Todos dirigidos por coordinadores de programa que cuentan con amplio recorrido tanto en Ingeniería como en investigaciones.

Entre los coordinadores del programa y conferencista, en la visita técnica se encuentra el Profesor Doctor Edmundo Rogelio Esquivel, quien es docente del programa de posgrado en Geotecnia y responsable de laboratorios de mecánica de suelos. Dentro de sus líneas específicas de investigación se encuentra liderando pesquisas desde el 2009 en desarrollo de

pruebas de campo en Geotecnia y laboratorio con el objetivo de abordar métodos racionales a partir de medidas de energía, conforme a los métodos tradicionales utilizados en estos.

*Ilustración 4 Visita laboratorios geotecnia - D. P. Edmundo Esquivel*



*Fuente: El autor*

Los resultados de las investigaciones son utilizados para estimar parámetros de resistencia y deformabilidad de los suelos, además la eficiencia de los equipos de SPT y determinar los resultados de cargas estáticas. Estas investigaciones actualmente tienen como participantes 4 estudiantes de maestría y 1 de doctorado (Currículo Lattes, 2019)

La conferencia en Geotecnia realizada por el Dr. Profesor Edmundo Rogelio Esquivel se basó en los avances de las investigaciones dirigidas en la USP dando como resultados métodos de racionalización para la eficiencia de los equipos de perforación para el SPT, la importancia de la misma en cuanto a las correcciones del ensayo y su afectación directa a los parámetros de resistencia del suelo. Las diversas investigaciones y los hallazgos de estos métodos han

sido un precedente para investigaciones de temas que se tenían a un lado en la investigación geotécnica por los avances en los equipos y laboratorios del mismo

La gran utilización de los métodos convencionales para la exploración de suelo, como lo es la realización del ensayo SPT de manera manual, o con equipos poco especializados, es una problemática escasamente afrontada tanto en Colombia como en Brasil, ya que no se tiene un control total del mismo y los insumos tecnológicos tienen altos costos.

La transferencia tecnológica se basa en poder implementar las teorías probadas por medio de los avances, específicamente en la línea de “desarrollo de equipos para pruebas geotécnicas de campo y laboratorio”, donde se han comprobado metodologías para la obtención de parámetros como eficiencia del equipo y correcciones por energía del mismo.

Las necesidades de la investigación en el SPT nacen a partir su gran utilización y el poco control en los procedimientos ya que a pesar de la normalización se suelen cambiar las configuraciones de los equipos cambiando la dinámica del ensayo que es basado en la energía potencial entregada al suelo. El enfoque se realiza en la utilización de nuevos equipos, pero dadas las altas tasas de utilización del ensayo es imprescindible mejorar las técnicas del mismo y su análisis para disminuir los porcentajes de error.

### **3.2. Justificación**

A través de los recursos otorgados por el programa de movilidad estudiantil y el contacto con los coordinadores de la USP en la línea de investigación en Geotecnia, son aportadas las bases para una transferencia tecnología por medio de conferencias sobre investigación actual en maestrías “interpretación de resultados en ensayos SPT con base en la energía” a cargo

del Doctor Profesor Edmundo Rogerio Esquivel, quien encamino su catedra a la importancia de la investigación e implementación en Colombia. Esto animó a realizar la investigación teórica sobre la temática, dada su importancia no solo a nivel Latino América sino global en el campo de la Geotecnia.

La utilización de este ensayo es una de las herramientas más utilizadas en el mundo por sus bajos costos y gran practicidad, pero la incertidumbre crece al observar que estos parámetros son obtenidos por medio de un índice de resistencia dinámica “Nf” que sufre correcciones empíricas y semiempíricas que parten de una base experimental donde se toman en cuenta características propias de la zona de exploración y que dadas las condiciones intrínsecas del suelo y del equipo de perforación, pueden variar de manera considerable los resultados.

En la actualidad se han realizado varias investigaciones centrándose en la eficiencia del equipo y la energía entregada al muestreador con diferentes teorías basadas en la dinámica del ensayo generando así conciencia y desarrollo en el tema. De esta manera, la utilización de equipos mecánicos de perforación y herramientas adicionales generan una racionalización de los datos, avance importante en el campo ya que disminuye el error y entrega resultados cada vez más certeros.

Ya que durante más de 50 años se han utilizado las primeras correcciones sin sufrir mayores cambios, la racionalización de los resultados del ensayo aporta datos certeros que junto a la aplicación teorías de transferencia de energía arrojaran parámetros de diseños que se acercan más a la realidad. Es aquí donde se hace importante la comparación entre el índice de resistencia dinámica “N” y la aplicación de las correcciones por eficiencia conforme a valores de teorías empíricas y semiempíricas, teorías de eficiencia basados en el potencial de energía

y ensayos con equipos especializados que cuantifican y racionalizan los valores. El análisis de los valores y sus diferencias podrá dar un valor comparativo para cuantificar el porcentaje de error con el que se ha trabajado en años anteriores ya sea por subestimar o sobreestimar los parámetros de resistencia del suelo y el diseño en cimentaciones superficiales.

### **3.3. Problema de investigación**

A partir del programa visita técnica internacional de la Universidad Católica de Colombia y visita a la USP, de las conferencias más interesantes fue el método de análisis racional para las correcciones de energía el ensayo de penetración estándar (SPT) considerando variables como; las condiciones del equipo, la interacción del suelo-martillo y la transferencia de energía potencial a partir del golpe del martillo. La necesidad de recolectar dichos avances y de tomar estos análisis de energía en los ensayos SPT nace de la gran influencia que tiene este ensayo en el mundo y la mala práctica en la corrección por eficiencia ya que se toman valores teóricos y convencionales sin tener en cuenta la energía entregada a la hora de realizar el ensayo.

Incluso, es recurrente la adopción de valores por correlación provenientes de tablas de referencia o de experiencias internacionales que pueden no ser representativos de las condiciones particulares del entorno geológico y geomorfológico local.

Conjuntamente, en Colombia resulta habitual el empleo de equipos fabricados de forma no certificada, variando parámetros como longitud del muestreador, diámetros, longitudes de tuberías e incluso altura de caída y peso del mismo, esto hace que se presenten variaciones con relación a los valores estándar estipulados en norma.

Este hecho, sumado a unas condiciones intrínsecas de ensayo muchas veces poco vigilado conllevan a una falta de control sobre los resultados obtenidos en campo e inherentemente la estimación de parámetros de resistencia para diseño inexactos.

*¿Qué influencia tiene las metodologías para la corrección por eficiencia sobre el valor de los parámetros de resistencia del suelo y su incidencia sobre el diseño de cimentaciones superficiales?*

## **4. ANTECEDENTES Y LIMITACIONES**

El principal alcance de este proyecto es identificar las teorías empíricas, semiempíricas y racionales en cuanto la corrección por energía en el ensayo SPT tomando como base los resultados de investigaciones de maestría de la USP. Realizando así comparaciones entre los valores de resistencia del suelo y su utilización para obtener parámetros de capacidad portante del suelo.

### **4.1. Inicio y desarrollo del SPT**

La invención, normalización y posterior de desarrollo del SPT tienen como principales exponentes a Charles R. Glow, Carl Terzagui, Hvorslev y Arthur, quienes se encargan del inicio y posterior estandarización del ensayo para dar pie a los avances tecnológicos según la época y las correcciones para determinar el parámetro “N” con el fin de establecer factores de resistencia del suelo.

El ensayo SPT tiene inicio en 1902 en estados unidos por Charles R. Glow, quien introdujo la toma de muestras hincadas de acuerdo a la estratigrafía del suelo realizando los primeros muestreos dinámicos de los suelos, posteriormente entre 1920 y 1940 se realiza la estandarización del muestreo por medio exploraciones en las ciudades de Boston, nueva york y filadelfia realizadas por G. A. Fletcher,

En 1930 Harry Mohr realiza un progreso significativo en la exploración dinámica recolectando datos del número de golpes para hincar un muestreador de longitud específica, todo esto con el fin de estandarizar este procedimiento se establecido en 1937 (MOHR, 1940).



A lo largo de las décadas de los 30 s y 40 s diferentes investigadores como Carlos Proctor, Jull Hvorslev, Raymond y Henwood, realizan avances respecto a la instrumentación en el trabajo por la Universidad de Harvard University Press siendo autoridades en el campo de investigaciones subterráneas (HVORSLEV, 1940) El método se estandarizo desde 1958 según la ASTM (ASTM D-5686)

#### 4.2. Correcciones del factor “N”

El principal parámetro que se obtiene por medio del ensayo de penetración estándar es el número de golpes en campo (Nf) para penetrar una profundidad específica en el suelo, que por medio de correlaciones determina el ángulo de fricción interna del suelo. Este ensayo es establecido a partir de la energía potencial entregada desde el martillo que transfiere la energía por un varillaje hasta él toma muestras y con base a la energía potencial se sabe que se generaran pérdidas de esta energía, de ahí parten investigaciones que intervienen este “Nf” para tomar un valor que se asemeje a la realidad de acuerdo a la eficiencia del equipo.

Respecto al sistema de elevación y caída inicialmente se realizaba de manera manual mediante poleas y cuerdas donde se obtiene Ecuación 1 - Energía aplicada 100% de allí se desarrolla la teoría de energía teórica según Er (porcentaje de energía de golpeo) donde se tienen en cuenta estos factores tomando el peso del martillo, la distancia de caída y la gravedad entregando la energía en términos de trabajo (julios).

$$\text{Energía potencial aplicada} = W_m * g * h = (63.5 \text{ Kg}) * \left(9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right) * (0.76\text{m}) = 473 \text{ J}$$

*Ecuación 1 - Energía aplicada 100%*

Evidentemente existen perdidas por rozamiento, donde la energía del golpe que se suministra al suelo no corresponde al 100% por medio de diferentes investigaciones de Skempton, Seed

y Cestary (Skempton, 1986) se demuestra que método manual usado desarrollan una energía hasta del 60% tomándolo como una referencia para realizar correcciones por energía.

Con el paso del tiempo se empezaron a implementar sistemas automáticos de elevación y caída que dadas las condiciones del ensayo aumentaban la eficiencia y la energía entregada, eliminando así errores como el rozamiento y fricción del equipo.

Para el cálculo de correlaciones del SPT se continúa aplicando una energía de referencia del 60% realizando normalizaciones en la corrección del N de campo ( $N_f$ ), este factor corregido lo toman como  $N_{60}$  que se refiere a la energía entregada a el suelo tomando como referencia las teorías del 60% de la energía.

$$(N1)_{60} = N_f * Er/60 * C_n * a * N.F.$$

*Ecuación 2 - N corregido -*

Donde:

- $N_f$  = número de golpes medidos en campo
- $Er$  = Porcentaje de energía de golpeo
- $a$  = factor de corrección por tensión vertical según el varillaje del terreno
- $C_n$  = factor de corrección por tensión vertical por sobrecarga en el terreno
- $N.F.$  = factor de corrección por presencia de nivel freático

Respecto a la Ecuación 2 - N corregido - se toma la relación entre el 60% de energía teórica propuesta y la energía entregada obtenida de métodos automáticos lo que da como resultado la corrección por energía, esta corrección se inicia al final de la década de los 90 según la necesidad de interpretar los resultados con metodologías automáticas, sin embargo se conoce que hay aspectos que se deben tener en cuenta que directamente modifican la energía transmitida de allí vienen las correcciones por longitud del varillaje ( $a$ ), efecto de sobrecarga del suelo ( $C_n$ ), nivel freático ( $N.F.$ ) y el uso de puntaza (para suelo granular grueso)

### 4.3. Limitaciones

El análisis del proyecto está limitado a evaluar teorías empíricas vs teorías racionales tomando como referencias autores que han validado tales teorías en el entorno brasilero con miras a establecer las proximidades de conclusiones a nivel local.

Al no contar con los equipos especializados para la cuantificación de energía tal como lo necesita la racionalización de los datos, se toma como referente las investigaciones brasileras, donde con ayuda de estos equipos obtienen los datos a analizar

El ensayo SPT no tiene en cuenta aspectos del estado del suelo como saturación y exige una investigación geología previa para poder realizalo, ya que se trabaja solo en suelos arenosos y con algunas correcciones puede abarcar cierto tipo de suelos cohesivos, esto limita el tipo de suelo en exploración ya que está diseñado para suelos que no sufran un proceso de litificación, es decir, suelos que no estén sometidos a procesos físicos o mecánicos como compactación (IRIONDO, 2007)

En Colombia se toma como referencia las correcciones teóricas teniendo en cuenta desde el 45 al 60% según Tabla 7, no solo por su falta de avances tecnológicos el equipo de perforación sino también por la falta de divulgación de dichas teorías evaluando respecto a valores conservadores como lo es una eficiencia del 45%

A pesar de utilizar el término “estándar” se sabe que el ensayo depende de varios factores que pueden alterar los resultados de la investigación in-situ entre estos están los equipos de perforación que, según su fabricante, configuración de martillo y el muestreador, altura de caída, el revestimiento interno y externo de la tubería, diámetro de la perforación y la presión

de confinamiento efectiva. Todos estos factores afectan el ensayo dinámico por lo cual el valor de la energía entregada al suelo sufre cambios significativos y a lo largo del progreso del ensayo.

La norma INV. E 111 no especifica unos valores para los equipos de perforación lo cual deja un rango de posibilidades como los diámetros y revestimientos del equipo dejando notas en la norma que especifican que el “N” de campo puede sufrir alteraciones según el equipo de perforación

*Tabla 2 Factores que influyen en el ensayo SPT Fuente: propia*

Variable	Ensayo	Humano
Desequilibrios Hidrostáticos	X	
Frecuencia de los golpes		X
Errores en medidas y anotaciones		X
Intervalo de penetración		X
Equipo y fabricantes	X	
Configuración del martillo	X	
Control de altura de caída		X
Longitud de la varilla golpe - toma muestras	X	
Diámetro de la perforación	X	
Presión de confinamiento efectiva a él toma muestras	X	

*Fuente: El autor*

Tanto en los métodos de ensayos in-situ como en los procesos de laboratorio se tienen una serie de factores que intervienen en la toma de datos y resultados, en el caso del ensayo SPT estos factores inciden en la energía transferida y puede ser divididos en dos subgrupos:

errores de naturaleza humana o del procedimiento del ensayo, presentando una lista de los factores en la Tabla 2 Factores que influyen en el ensayo.

Las variables tienen factores de corrección a la energía teórica de referencia  $E_r$  (Energía) se debe corregir según Ecuación 2 - N corregido - teniendo en cuenta variables como longitud de varilla, nivel freático y sobre carga del terreno que alteran significativamente los resultados.

Por otro lado, la racionalización de la energía entregada por medio de la metodología analizada EFV, depende de coeficientes de corrección propios del equipo y su configuración como lo son  $\eta_1$ ,  $\eta_2$  y  $\eta_3$ , estos valores son proporcionados por investigaciones de gran envergadura y a nivel internacional, pero siguen siendo valores propios que se deben determinar por medio del análisis exhaustivo según las condiciones específicas del equipo. Con fines comparativos se determinan estos valores según los propuestos por Odebrecht (ODEBRECHT, 2003) asumiendo un margen de error en los resultados.

## **5. MARCO TEÓRICO**

El presente marco teórico abarca conceptos básicos para el entendimiento de las teorías, investigaciones y transferencias tecnológicas en el tema expuesto de corrección por energía en el ensayo SPT, dejando en claro las variables necesarias para realizar comparaciones entre el  $N_{1(60)}$  según teorías semiempíricas, recomendadas por normativa y últimas tecnologías basadas teorías brasileras de ecuación y de onda y disipación de energía según Odebrecht (SCHNAID, ODEBRECHT, ROCHA, & BERNARDES, 2009)

### **5.1. Generalidades SPT en Colombia**

El ensayo de penetración estándar SPT es el más utilizado para el diseño de cimentaciones en todo el mundo y tiene como objetivo obtener medidas de resistencia a la penetración en un suelo no cohesivo tomando valores del número de golpes en campo ( $N_f$ ) para penetrar una profundidad específica, hallando así la compacidad del suelo y su ángulo de fricción interno y por medio de tablas y ábacos se determinan los valores para el cálculo de capacidad portante

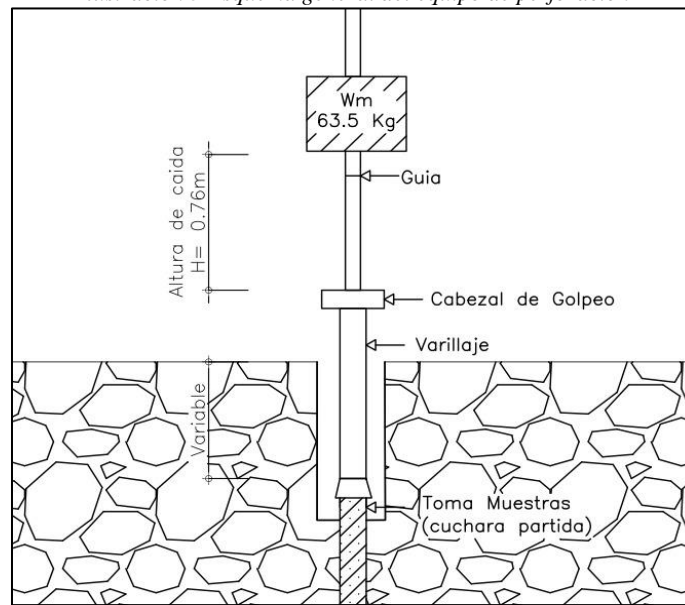
La normalización del ensayo la realiza ASTM desde 1958, en Colombia es normalizado por la norma INVE-111 y en Brasil por la NBR 648. Cada país adopta sus propias normativas para el ensayo y tiene las mismas características generales, cada una determina la interpretación de resultados de manera similar, la exigencia de realizar correcciones a el número de golpes " $N_f$ " se determina a partir de la eficiencia del ensayo, las propiedades de equipo y algunas propiedades específicas del suelo como lo es el nivel freático y la sobre carga del terreno, teniendo en cuenta los esfuerzos verticales efectivos.

Para las correlaciones de energía y eficiencia del equipo la norma INVIAS E- 111 remite directamente a la ASTM D 6066, que presenta métodos para convertir los valores “N” medidos según una energía normalizada. “La resistencia a la penetración se ajusta a una relación de energía de 60% de la varilla de perforación usando un sistema de martillo con una entrega de energía estimada o midiendo la energía de las líneas de esfuerzo sobre tuberías de perforación” (INVIAS , 2013)

## 5.2. Equipo de perforación ensayo SPT

Las generalidades del ensayo están dadas según las normativas de cada país, al estar estandarizadas las dimensiones y sus procedimientos, no se sufren cambios en sus especificaciones. Sin embargo, hay pequeñas diferencias conforme el país. Colombia se rige por su norma INVIAS en la sección 100 que especifica los suelos tiene su norma INV. E 111 que trata específicamente los parámetros del SPT en Brasil la normativa es NBR que trata de sus características en su sección NBR 6184

Ilustración 5 Esquema general del equipo de perforación



Fuente: El autor

La Ilustración 5 muestra cada una de partes del equipo de perforación para el ensayo de penetración estándar generando recomendaciones en su dimensión como se describe en la Tabla 3 - Dimensiones Normativas. El peso del martillo, el sistema de caída, lo accesorios como muestreadores pueden utilizarse a conveniencia

Tabla 3 - Dimensiones Normativas equipo SPT

EQUIPO	INV. E 111	NBR 6484
<b>Equipo perforación</b>	• Adaptable cualquier equipo	• Adaptable cualquier equipo
<b>Brocas, cincel, estrella etc.</b>	• 5.6 cm < diámetro <16 cm >	• 5 cm < diámetro < 7 cm
<b>Equipo de perforación</b>	• Perforación percusión y lavado • Rotatorio abrir orificio	• Perforación percusión y lavado • Rotatorio
<b>Varillas para muestreo Tipo "A"</b>	• Tubos de acero con uniones • Peso: No especificado • Longitud: no especificada • Diámetro Int.: 1 1/8" • Diámetro Ext.: 5/8"	• Tubos de acero con uniones • Peso: 32 N/m • Longitud: 1 – 2 m • Diámetro Int.: 2.72" • Diámetro Ext.: 3.00"
<b>Muestreador (tubo partido)</b>	• Diámetro interior constante 41.2 mm • (opcional)Camisa superior delgada aumentan 10% a 30% los valores de $N_f$ • Diámetro interior constante=28.5 mm'	• Diámetro Int.: 34.9 mm • Diámetro Ext.: 50.08 mm • Forma y dimensión específicas
<b>Martillo y cabezote</b>	• Peso martillo • 63,5 +- 1 kg = 140 +- 2 lb • Capacidad libre de levantamiento = 0.75 m • Caída del martillo 100 mm	• Peso del martillo • 63.5 Kg • Capacidad libre de levantamiento = 0.75 m • Masa nominal 3.5 – 4.5 Kg • Caída del martillo 100 mm
<b>Accesorios</b>	• Marcadores • Recipientes para muestras • Parafinas • Hojas de datos	• Marcadores • Recipientes para muestras • Hojas de datos

Fuente: Modificación INVE E11 – NBR 6484



La INV. E- 111 determina características para el equipo de perforación, realización del ensayo y estimativa de resultados, aun así, no exige unos parámetros específicos y deja rangos de aceptación que afectan indirectamente los resultados

La norma brasilera NBR 6484/80 donde describe procedimiento para realizar el ensayo, hincar el muestreador de cuchara partida (*Split-spoon*) y la obtención de muestras para posterior identificación de parámetros re resistencia del suelo.

### 5.2-1 Longitud del varillaje (“A”)

La longitud de la varilla influye por su peso ya que afecta directamente al elemento de golpeo, de esta forma a mayor profundidad mayor relación entre la masa del martillo y la masa golpeada. Como teoría inicial se toma que el terreo es homogéneo por lo cual el valor de “N” aumentaría con la profundidad, a pesar de la estandarización del ensayo se sabe que la longitud de la varilla puede cambiar y se toman valores con base

*Tabla 4- Corrección por longitud de varilla –*

Longitud del varillaje	Factor de Corrección (a)
<b>&gt;10</b>	1.00
<b>6 - 10 m</b>	0.95
<b>4 - 6 m</b>	0.95
<b>3 - 4 m</b>	0.75

*Fuente: modificación de norma UNE*

De acuerdo con la Tabla 2 los valores de corrección por el varillaje aplican para longitudes de varillas menores a 10 m se aplica el valor de corrección, dichos valores son propuestos por UNE (Skempton, 1986) si las varillas son mayores a 10 metros no se aplica corrección

### 5.3. Sobre carga del terreno (CN)

Los efectos de sobre carga el en terreno se determinan de acuerdo a las propiedades los suelos granulares, debido a su confinamiento, estos son identificados por Gibbs y Holtz, donde se incrementa a partir la profundidad de exploración, a medida que aumenta la profundidad y dadas las condiciones de energía potencial es necesario un mayor número de golpes. (GOBBS & HOLTZ, 1957)

$$N1 = N(\text{campo}) * Cn$$

*Ecuación 3 - N1 Corrección por confinamiento (CN)*

De acuerdo con Ecuación 3 - N1 Corrección por confinamiento (CN), se realiza corrección conforme a las tensiones efectivas del suelo y su profundidad. La corrección por sobre carga del terreno lleva por nombre N1 que hace referencia a un esfuerzo vertical  $\sigma'_{vr=1} \text{ kg/cm}^2 = 1 \text{ atm} = 1 \text{ Pa}$  y se han desarrollado diferentes formulaciones para determinar su factor de corrección partiendo de la siguiente ecuación

$$Rs = \frac{\sigma'_{vr}}{Pa}$$

*Ecuación 4 - Parámetro Rs suelo*

A partir de Ecuación 3 - N1 Corrección por confinamiento (CN) y de Ecuación 4 - Parámetro Rs suelo se obtiene una estimación para la corrección por confinamiento según diferentes autores

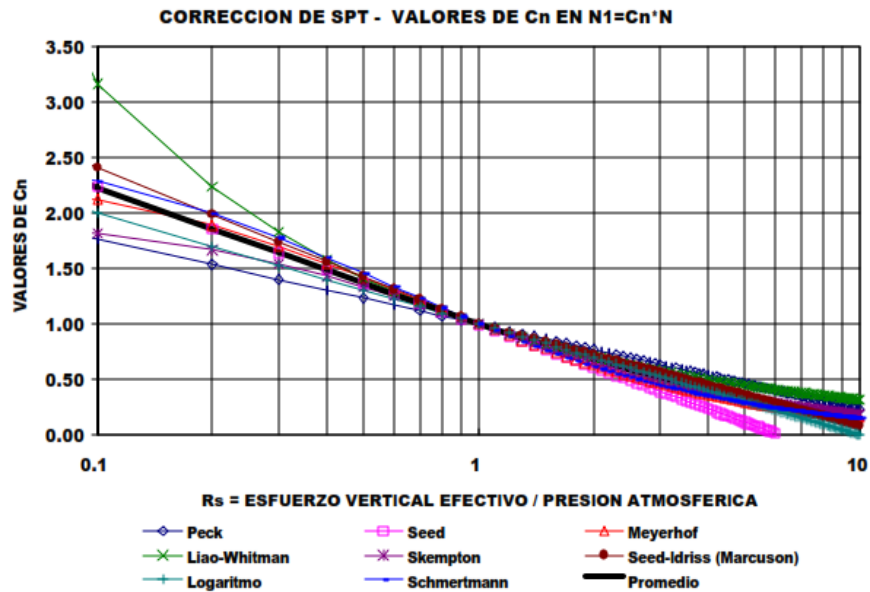
Tabla 5 - Estimación de CN -

Autor	CN	
(TERZAGHI & PRECK, 1948) Terzagui	$\text{Log}(20/R_s)/\text{Log}(20)$	Ecuación 5
(ALI, 1985) Seed	$1-1.25(\text{Log}(R_s))$	Ecuación 6
(METERHOF, 1957) Meyerhof	$1.7/(0.7 + R_s)$	Ecuación 7
(LIAO, S.S.C. & WHITMAN, 1986) Liao Whitman	$(1/R_s)^{0.5}$	Ecuación 8
(SKMPTON, 1986) Skempton	$2/(1 + R_s)$	Ecuación 9

Fuente: Modificada de SCI - SCG - 1999

Se recomienda que  $C_n < 2.0$  por lo cual la formulación de Skempton es la única que cumple exactamente con esta recomendación para  $R_s = 0$  (GONZALEZ G., 1999)

Ilustración 6- Valores de  $C_n$  -



Fuente: Gozales D - Álvaro J 1999

La Ilustración 6- Valores de  $C_n$  - determina de manera gráfica la variación conforme a las formulaciones de la

Tabla 5 - Estimación de CN - siendo por exceso la Ecuación 8 de Liao Whitman para  $RS < 1$  y para  $5 < RS < 10$ , mientras que por defecto las que más se apartan son la Ecuación 5 y la Ecuación 6 de Peck para  $RS < 1$  (GONZALEZ G., 1999)

Los valores para la corrección por confinamiento (CN) son adoptadas según criterio lo que deja un margen de error

#### **5.4 Energía de referencia**

Existe una normalización también energía de referencia a partir de las investigaciones de Schertmann y Palacios donde prueba que el número de golpes es inversamente proporcional a la energía entregada Ecuación 10 (PALACIOS, 1979)

$$\frac{N1}{N2} = \frac{E1}{E2}$$

*Ecuación 10 – número de golpes (N) y Energía Entregada*

Tomando en cuenta la energía de referencia E1 como energía real entregada o valores normalizados (45% a 72%), N2 como el número de golpes tomados en campo ( $N_f$ ) y la E2 la energía estrada (60%) podemos llegar a disminuir los valores esperados respecto a la eficiencia del equipo. Es decir, entre más eficiente sea el equipo los valores de ( $N_f$ ) serán más bajos.

Una de las investigaciones más trascendentes es la de la tesis de doctorado de Belincanta (1985) donde muestra la eficiencia de energía dinámica en SPT y los resultados típicos de

medición de energía respecto a las prestaciones del suelo y el equipo utilizado. Como conclusión de la investigación se tiene la transferencia de energía correspondiente a una variación de altura de hasta 14 m donde los resultados se encuentran en un rango de 69.4% y 83.4% de energía real entregada. Estos resultados son a partir de teorías empíricas. Teorías que se normalizaron internacionalmente. (A., 1985)

*Tabla 6 Resumen Eficiencia Energía-*

Tipo de martillo	Tipo de condicionamiento	Número de registros	Eficiencia media de energías 100(energía media/474 J)
			Media
			L=14 m
Pino Guia	Cuerda/manual	178	69.4
	Cuerda/eléctrica	195	75.5

*Fuente: Modificación - Disertación Doctorado Belincanta (A., 1985)*

De acuerdo a los valores demostrados según Belincanta en su investigación de eficiencia del sistema resumida en Tabla 6, se demuestra que la eficiencia esperada para los equipos SPT manuales se encuentran en un aproximado de 69% y para equipos eléctricos una eficiencia del 75%. Este parámetro se interpreta en la Ecuación 10 como energía E2 lo que comprueba la energía de referencia para la corrección del valor de  $N_f$ . Incidiendo directamente en los parámetros de resistencia del suelo. llevando la ecuación a términos generales se podría expresar

$$N(60) = \frac{E1}{60} * Ncampo$$

*Ecuación 11 - N (60)*

A través del desarrollo del ensayo se realizan diferentes pruebas dependiendo del tipo de suelo y el equipo utilizado, las normativas de cada país adoptan un equipo estándar para poder controlar los valores del  $N_f$  a partir las variaciones del procedimiento en los sondeos

ya que dependiendo el país de cambia parte de la instrumentación sobre todo en el tipo de martillo.

De acuerdo a los procedimientos normalizados en Colombia se utiliza martillo de golpeo tipo *donut*, según Tabla 7 Eficiencias Promedio y Corrección por energía E ref. =60% adoptando de manera conservativa la eficiencia de transmisión de energía de 45%

Tabla 7 Eficiencias Promedio y Corrección por energía E ref. =60%

País	Tipo	Accionamiento	E (%)	Referencia
<b>Argentina</b>	<i>Donut</i>	Polea – Soga	45	Seed et al
<b>Brasil</b>	Guía interna	Manual	72	Déncout
<b>Colombia</b>	<i>Donut</i>	Polea – Soga	45	Seed et al
<b>Paraguay</b>	Guía interna	Manual	72	
<b>Reino Unido</b>	<i>Donut</i>	Caída Libre	60	Skempton
<b>EUA</b>	Seguridad	Polea-Soga	60	Seed et al
<b>Venezuela</b>	<i>Donut</i>	Polea-Soga	43	

Fuente: Modificación de L.d Decourt 2002

De acuerdo con estas investigaciones empíricas y basados en la normativa Colombina INVE y Brasileira NBR- con propósitos comparativos se tomara una energía entrega del 60% ,tomando como referencia la corrección (N1-(60)), sustituyendo el valor de la eficiencia energética propuesta se obtiene la ecuación de N60 Ecuación 2 - N corregido -

### 5.5 Capacidad de carga

La capacidad de carga de una cimentación superficial se puede definir como el valor máximo con el cual ningún punto del subsuelo se alcanza la condición de rotura (ANI) A partir del desarrollo de Terzagui se tiene que el cálculo de capacidad de carga para cimientos cuadrados está dado por la siguiente ecuación

$$qu = (1.3 * C * Nc) + (q * Nq) + (0.4 * \gamma * B * N\gamma)$$

*Ecuación 12 - Capacidad de carga*

Para hallar los parámetros de capacidad de carga se necesita el ángulo de fricción interna del suelo siguiendo diferentes teorías

*Tabla 8 - Factores de Capacidad De Carga Según Angulo de Fricción interno del suelo –*

Factor	Ecuación	Autor
<b>N<sub>c</sub></b>	$Cot\Phi(Nq - 1)$	<i>Ecuación 13 - factor de capacidad de carga N<sub>c</sub></i>
<b>N<sub>q</sub></b>	$\frac{e^{2(\frac{3}{4}\pi - \Phi/2)\tan\Phi}}{2Cos^w(45 + (\frac{\Phi}{2}))}$	<i>Ecuación 14 factor de capacidad de carga N<sub>q</sub></i>
<b>N<sub>γ</sub></b>	$1 \frac{1}{2} \left( \frac{k}{Cos^2\Phi} - 1 \right) Tan\Phi$	<i>Ecuación 15 Factor capacidad de carga N<sub>γ</sub></i>

*Fuente Principios de ingeniería de cimentaciones (DAS, 2001)*

## **6. ESTADO DEL ARTE**

El presente estado del arte se basa en las teorías desarrolladas en los últimos años respecto a la interpretación de datos por medio de equipos especializados en cuantificar la energía entregada a él muestreador para la obtención de eficiencia del equipo y posterior corrección por energía, las principales teorías analizadas son de autores brasileros que encabezan la línea de investigación y proponen teorías ampliamente reconocidas en el mundo

### **6.1. Ondas y propagación de energía**

La determinación y cuantificación de la energía en el ensayo SPT se determina respecto a la teoría de ecuación de onda donde se toman dos formas de energía, primera es la energía contenida en una onda mecánica y su deformación elástica y la segunda la energía cinética proveniente de la velocidad de las partículas

Las ondas son propagación de energía a través de un espacio, al cambiar sus propiedades físicas y se han establecido diferentes tipos de ondas: ondas electromagnéticas que no requieren un medio y se propagan en el vacío y ondas mecánicas donde se producen en un medio elástico donde requieren de condiciones como temperatura y presión La propagación de las ondas depende específicamente de su naturaleza

De acuerdo con las propiedades de los materiales de las barras para el ensayo se pueden identificar los tipos de ondas y vibración, en el caso de las barras metálicas del SPT se puede evidenciar vibraciones longitudinales que causan efectos de contracción y expansión a medida que las ondas recorren la misma (ECHEVERRY PINTO, 2008)



La racionalización de los datos se realiza a través de la interpretación del comportamiento de las ondas mecánicas en un medio infinito a partir las características controladas del ensayo como martillos semiautomáticos, softwares para el análisis de la propagación de onda y la calibración del equipo.

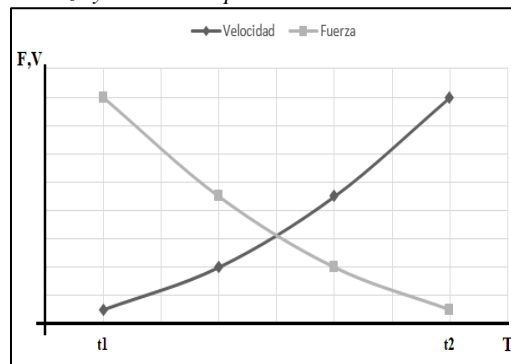
## 6.2. Método EFV

La cuantificación de la energía se puede interpretar como el trabajo realizado por el sistema SPT a partir de una fuerza aplicada y una distancia recorrida en un intervalo de tiempo definido. Cuando la longitud es constante se interpreta a partir de la velocidad

$$W = (F * X) = (F * V)$$

Representado gráficamente se puede interpretar el trabajo realizado como el producto de las dos curvas en Gráfica 1 - Fuerza y Velocidad aplicados en un intervalo de tiempo (t1-t2) donde el trabajo es constante debido a los cambios producidos por la pérdida de energía indirectamente proporcional a la velocidad

Gráfica 1 - Fuerza y Velocidad aplicados en un intervalo de tiempo (t1-t2)

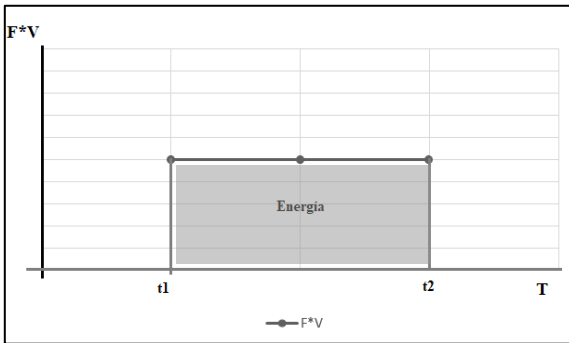


Fuente: El autor

Si la función entre la fuerza y la distancia no considerara las pérdidas en el sistema, no se presentaría un área bajo la curva al representar una energía constante y su interpretación sería

como se plantea en la a Ecuación 16 el área estaría definida por valores constantes, por lo cual se considera necesario determinar la diferencia de energía según las variables.

Gráfica 2 Energía SPT a partir del producto de la fuerza por la distancia sin pérdidas



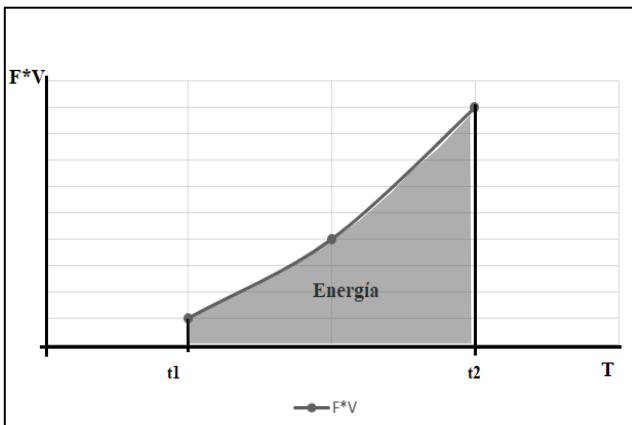
$$W = F * V * T$$

Ecuación 16- área bajo la curva – trabajo  $F*V$  sin considerar pérdidas

Fuente: El autor

El método EFV plantea la energía como el área bajo la curva que genera el trabajo como el producto de la fuerza aplicada por el matillo y la velocidad de propagación de onda en el medio, en un intervalo de tiempo definido por la velocidad que tiende a cero.

Gráfica 3 - Energía SPT a partir del producto de la fuerza por la distancia considerando pérdidas



$$\int_0^{\infty} f(t) \frac{dx}{dt} dt = \int_0^{\infty} f(t) dx$$

Ecuación 17 área bajo la curva – trabajo  $F*V$  considerando pérdidas

Fuente: El Autor

La Gráfica 3 - Energía SPT a partir del producto de la fuerza por la distancia muestra la función a partir del producto de la fuerza por la velocidad del sistema, se considera que la energía presenta pérdidas en el intervalo de tiempo analizado por eso su dispersión en los datos su variación.

La norma técnica D 4633-10 (ASTM, 2010) indica el método EFV como un método adoptado en estudios relacionados con la energía en ensayos de penetración dinámica dando una estimativa de la energía total en el golpe del martillo del SPT

$$EFV = E = \int_0^t f(t)v(t)dt$$

*Ecuación 18 MÉTODO EFV*

De acuerdo con la Ecuación 18 MÉTODO EFV la energía se cuantifica por medio del producto de la fuerza por la velocidad a partir de las pérdidas generadas por el trabajo de fuerzas no conservativas.

La energía entregada al suelo se mide en Julios, la medición de la fuerza y la velocidad son tomadas a partir de equipos especializados. Los límites de integración de 0 hasta que la medición de la fuerza y la velocidad tiendan a 0.

Este avance tecnológico desarrolla nuevos ensayos que dan confiabilidad a los resultados. En el año 2005 un grupo de investigadores de la Universidad Federal de Rio Grande del Sur retomando la energía de deformación en una barra elástica creando dos hipótesis: (ODEBRECHT, 2003)

- El trabajo de deformación debido a esfuerzos internos provocados por la compresión y el trabajo de deformación provocado por fuerzas externas

- Un aumento infinitesimal de la fuerza y el trabajo de fuerza deformación aumenta con un incremento infinitesimal

A partir del principio de conservación de energía en el método EFV se determina las energías conservativas del sistema como la diferencia entre la energía potencial (sistema de caída) y la energía cinética (velocidad de propagación de onda).

A partir de las características propias del ensayo se reescribe igualan las diferencias conservativas determinando las pérdidas reales por medio de las fuerzas que actúan en el sistema llamadas energías no conservativas que sugieren perdidas a partir de la interacción entre el sistema de caída y el muestreador

$$\int_{t_1}^{t_2} d [ T(t) - V(t) ] dt = \int_{t_1}^{t_2} [ Ws(t) + Wnc(t) ] = 0$$

*Ecuación 19 - Perdidas de energía del sistema por fueras conservativas y fuerzas no conservativas*

Dónde: T(t) es la energía cinética en función del tiempo; V(t) = Energía potencial, Ws(t) = Trabajo no conservativo entre la acción del sistema suelo-muestreador; Wnc = otras perdidas de energía a través de fuerzas no conservativas y t1 y t2 = intervalo de tiempo desde la libración del, martillo hasta la penetración del muestreador en el suelo.

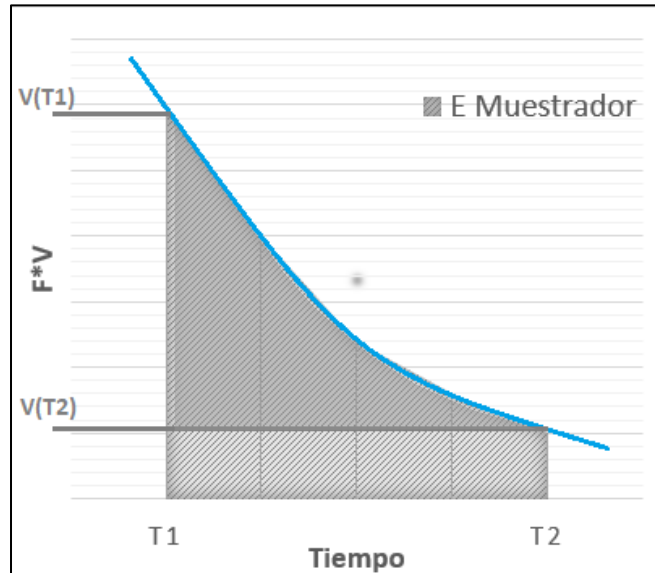
Llegado el punto en el que la energía cinética es totalmente disipada se determinan las pérdidas por medio de la energía potencial igualándolo en la suma de las fuerzas no conservativas rescrito en siguiente ecuación

$$\int_{t_1}^{t_2} d [ V(t) ] dt = \int_{t_1}^{t_2} d [ Ws(t) + Wnc(t) ] = 0$$

*Ecuación 20 Variación de energía potencial según fuerzas no conservativas*

A partir de la Ecuación 20 se tiene la variación de la energía potencial en el sistema respecto a las fuerzas actuantes, que a través del intervalo de tiempo no se conservan, es decir la acción del sistema del suelo-muestreador y las pérdidas de energía no conservativas.

Gráfica 4 - Representación Gráfica Método EFV



Fuente: El autor

A partir de la representación gráfica del metro EFV se puede observar de una manera simple que la curva producto de la fuerza por la distancia genera un trabajo (energía), evaluando desde el tiempo 1 hasta el tiempo 2 se puede determinar la diferencia entre la energía potencial entregada al muestreador a partir de las fuerzas que no se conservan en el sistema suelo-muestreador. El resultado del área bajo la curva de estos datos, genera una racionalización de la energía real entregada en el ensayo SPT, teniendo en cuenta las pérdidas en el sistema.

### 6.2.1.-Energía Muestreador - Sistema suelo-muestreador (SCHNAID, ODEBRECHT, ROCHA, & BERNARDES, 2009)

La energía transferida al muestreador es función de la energía potencial, el peso del martillo y el peso de las varillas retomando primeras teorías del ensayo Ecuación 1, la calibración de los equipos determina factores importantes del equipo como ya se ha comprobado.

La energía potencial del sistema se toma como  $PE_{m+v}$  que está en función de la energía nominal entregada al muestreador, se suma la energía aportada por el sistema y la energía por la penetración del muestreador expresándose, así como

$$PE_{m+v} = (H + \Delta P)W_m + \Delta P * W_v$$

*Ecuación 21 - Máxima Energía Potencial Teórica - Factores de Sistema*

Donde

- $H =$  Altura de caída
- $\Delta P =$  Penetración permanente
- $W_v =$  Peso del varillaje
- $W_m =$  Peso del martillo

La energía nominal representada en la Ecuación 1 es la energía transmitida por el martillo y el sistema de caída al suelo. Según las condiciones del suelo y la disipación de la energía potencial se llega a reescribir la ecuación en Ecuación 21 separando la energía potencial entregada por las varillas y la energía potencial nominal, adicionalmente las pérdidas por energía y las ondas mecánicas generadas a través del varillaje se tienen en cuenta con factores que dependen de la configuración del equipo

La Ecuación 21 representa la relación ideal del sistema determinando variables y reemplazando según la configuración del equipo, a partir de esta se obtiene una energía potencial máxima a partir del principio de conservación de energía aplicado al ensayo SPT.

La máxima energía potencial entregada ( $PE_{m+v}$ ) es considerada como un trabajo o transmisión de energía en el sistema y es asociado directamente con la penetración del muestreador en el suelo por cada golpe ( $\Delta P$ ).

La interpretación de la máxima energía potencial teórica se puede conceptualizar partir del desarrollo de la ecuación entendiéndose que; el primer término de la ecuación, la fuerza aplicada a la hora del impacto asumiendo variables de altura de caída como la distancia y el peso del martillo como la fuerza aplicada, sumando las pérdidas del sistema por la propagación de las ondas dada la penetración permanente y el peso de las varillas. Esta energía no tiene en cuenta la calibración del equipo ni las pérdidas por esas características.

A partir de la necesidad de calcular las pérdidas asociadas por la calibración de los equipos y la velocidad de propagación de la onda mecánica el autor sigue la Ecuación 22 y se determinan los factores del equipo que se establecen a partir de la configuración del equipo, dependiendo estrictamente del peso del martillo y la longitud de las varillas utilizadas.

$$E_{muestreador} = \eta_3 [\eta_1(H + \Delta P) * (Wm) + \eta_2(\Delta P * Wv) ]$$

*Ecuación 22 – Energía potencial EFV – Energía Muestreador*

Dónde:  $\eta_1$  = pérdidas en el sistema según sistema de caída;  $\eta_2$  = depende de la configuración de los equipos brasileros;  $\eta_3$  = relación entre las pérdidas ocasionadas por la longitud de las varillas

Los factores de calibración del equipo son fijados según la configuración convencional de los equipos brasileros, teoría que es sustentada por las investigaciones de Odebrecht (ODEBRECHT,

2003) estos valores son fijados a partir de la Tabla 9 donde  $\eta_1$  y  $\eta_2$  toman valores constantes y  $\eta_3$  varía según la longitud de las varillas

Tabla 9 - Coeficientes de calibración del equipo SPT para la obtención de energía

$\eta_1 =$	0.75
$\eta_2 =$	1
$\eta_3 =$	$1-0.0042*L_v$

Fuente: Odebrecht 2013

De acuerdo con las condiciones planteadas en la Ecuación 22 respecto a los factores de calibración del equipo y analizando el trabajo realizado en el ensayo, se determina una igualdad entre Ecuación 20 y la Ecuación 22 donde se comprenden la energía potencial como la suma de las pérdidas de energía no conservativa por el sistema suelo-muestreador

$$E_{muestreador} = W_s + W_{ns}$$

Ecuación 23- Energía muestreador a partir de fuerzas no conservativas

De acuerdo con la Ecuación 22 se tiene en cuenta la pérdida de energías por acción de energías no conservativas por lo cual se obtiene la igualdad entre la energía de muestreador y la energía del sistema ( $W_s$ )

$$Fd = W_s = Fd\Delta P$$

Ecuación 24- Fuerza de Reacción Dinámica

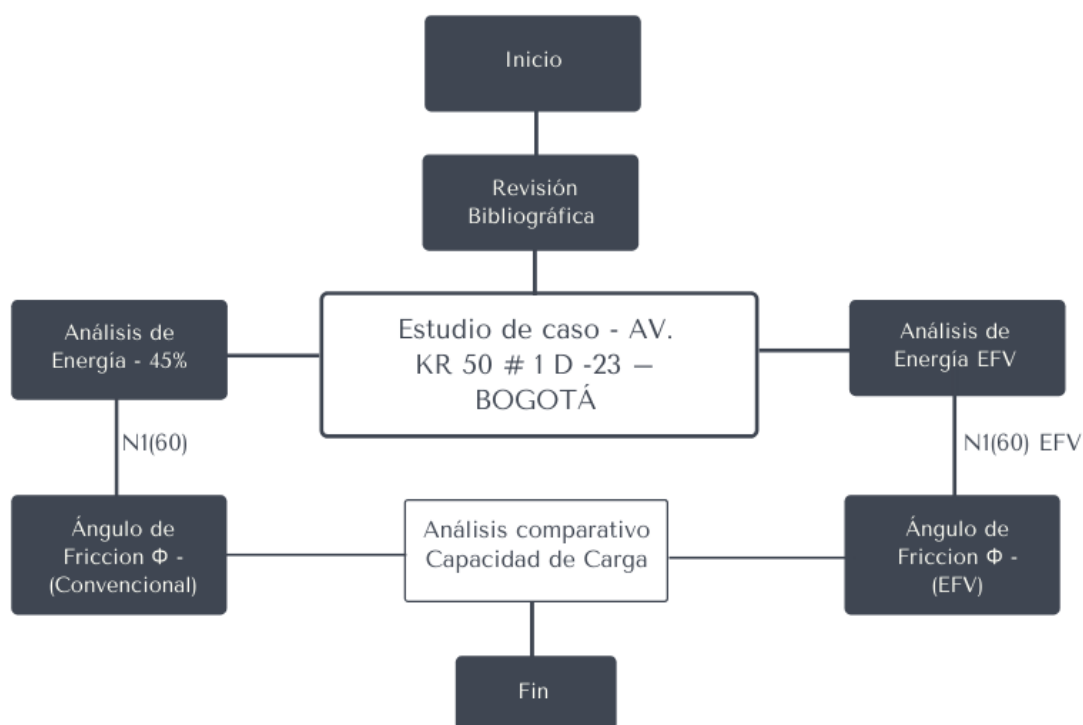
Esta estimación de la fuerza de reacción dinámica Ecuación 24 (SCHNAID, ODEBRECHT, ROCHA, & BERNARDES, 2009) estima la variación de la energía según los cambios del sistema, específicamente del martillo-y las varillas don el trabajo obtenido genera los cambios importantes y de gran importancia para hallar parámetros de resistencia al suelo. De acuerdo con los cambios derivados del contacto del sistema con el suelo se obtiene la energía de referencia



## 7. METODOLOGÍA

Como objetivo principal se busca comparar valores de eficiencia convencionales y teorías racionales a partir de los resultados obtenidos mediante este análisis de energía y eficiencia para ensayos SPT, y su influencia sobre el diseño de cimentaciones superficiales y se plantea la siguiente metodología que se muestra por medio de 5 etapas:

Ilustración 7 Mapa conceptual - Metodología de trabajo



Fuente: El autor

### 7.1. Revisión bibliográfica

Por medio de revisión bibliográfica y la estructuración del trabajo de grado se determinan las generalidades del ensayo a nivel local e internacional Tabla 2, estableciendo valores de corrección para el número de golpes “N” Tabla 3

Se determinan las variables a trabajar y su corrección dentro del ensayo. Se establece la corrección por longitud del varillaje a partir de la Tabla 4 y las ecuaciones para determinar la sobre carga del terreno

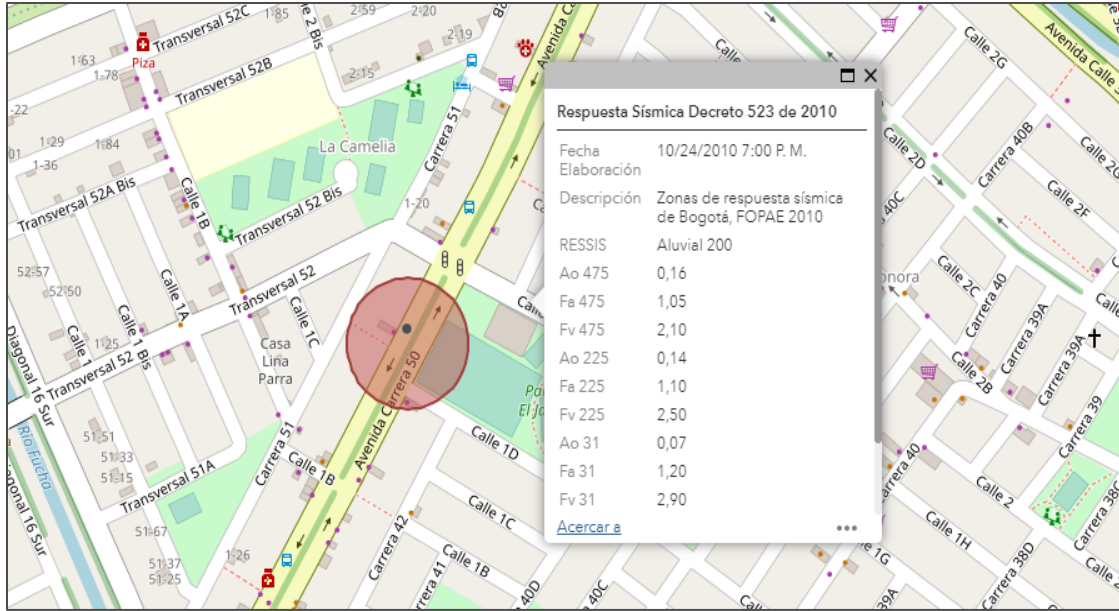
#### Tabla 5

A partir de las generalidades del equipo de perforación y las características de sus elementos en Colombia como se establece en la Tabla 7 se determina una eficiencia convencional del 45% con fines comparativos

### **7.2. Estudio de caso**

En colaboración con la empresa colombiana MVC – AMERICANA DE CONSTRUCCIONES se obtienen los resultados del estudio de suelos “VIVIENDA MULTIFAMILIAR” en la ubicación “AV. KR 50 # 1 D -23 – BOGOTÁ” Realizado en 2019 para un edificio de cuatro (4) pisos por medio de perforación manual (ANEXO 2)

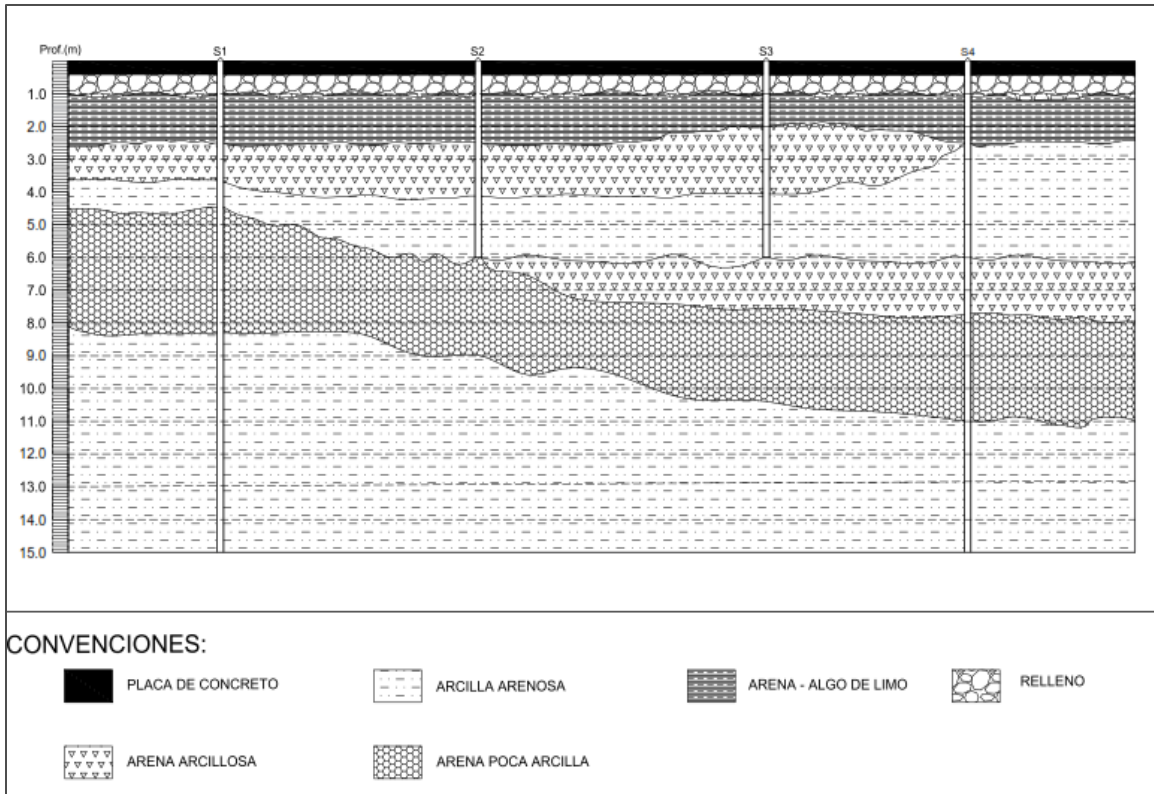
*Ilustración 8 Ubicación predio caso de estudio - AV. KR 50 # 1 D -23 - Microzonificación según decreto 523 - de 2010*



Fuente: <https://idiger.maps.arcgis.com/apps/webappviewer>

De acuerdo con la microzonificación sísmica de Bogotá la ubicación del predio se encuentra en un depósito aluvial, Respecto a la Geología se encuentra una Terraza Baja – Aluvial y Complejo de Conos Aluviales; la Geomorfología es Planicie, la Velocidad onda promedio 50 m Vs (m/s) es de 175 - 300 y la Humedad Promedio 50 m Hn (%) 25 – 50 ver Ilustración 9 Perfil estratigráfico con un espesor del depósito de 100 a 200 metros, se esperan suelos con arenas arcillosas sueltas a compactas y posiblemente arenas limpias, con una capacidad de carga poco mediana a alta, y suelos inestables y susceptibles a la licuefacción por lo cual se espera encontrar nivel freático a poca profundidad. (2010, 2010)

Ilustración 9 Perfil estratigráfico

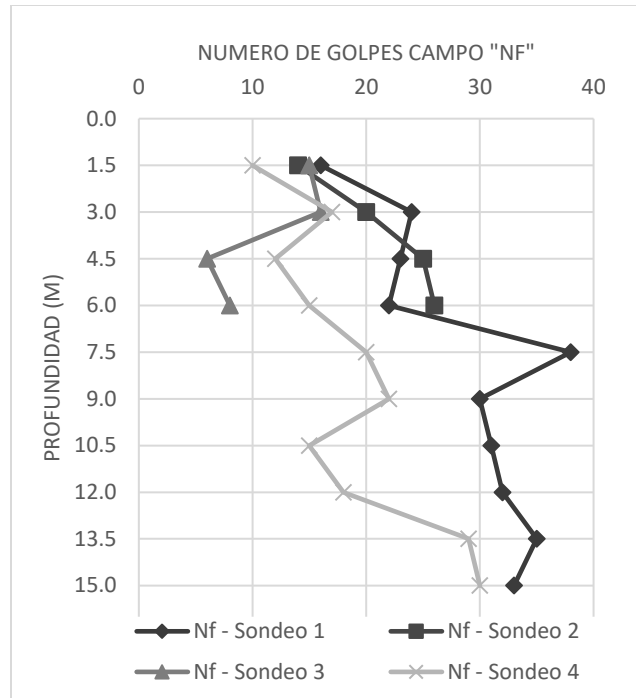


Fuente: Caso de estudio

El estudio geotécnico comprende un análisis geomorfológico de la zona y la exploración del suelo se realiza a partir de un ensayo SPT manual, se realiza un total de 4 perforaciones, 2 de ellas a 6 metros y las otras 2 a 15 metros utilizando barrenos manuales y tomando muestras alteras con tubo partido (*Split Spoon*) resumido en la Gráfica 5.

El suelo es caracterizado como un depósito aluvial conformado arenas arcillosas de compacidad media y lentes de arenas limpias encontrando nivel freático entre las cotas 3 y 4 metros.

Gráfica 5 - Resultados de exploración caso de estudio - Numero de golpes en campo Nf



*Fuente: El Autor*

Dadas las características generales del perfil estratigráfico el primer estrato y estrato de cimentación se comprende entre 1.00 m hasta 3.00 m de profundidad y encuentra una capa de arena con algo de limo color habano, de humedad media y consistencia compacta, el promedio de los golpes (Nf) se encuentra en 14 Golpes, confirmando por índice de penetración una consistencia blanda. Los estratos siguientes presentan un aumento considerable de consistencia analizando el número de golpes que es proporcional a la profundidad.

Se analizan los perfiles del suelo, resultados de laboratorios y el registro de perforación con Nf según INV.-EE y los detalles del equipo de perforación para el análisis de los datos y las comparaciones entre teorías semiempíricas y racionales.

### 7.3. Comparación entre teorías semiempíricas y método EFV

Teniendo en cuenta las características del equipo en Colombia Tabla 7 y según el análisis entre energía teórica potencial aplicada Ecuación 1 y la corrección por energía Ecuación 10 se determina una energía de referencia del 45% para la corrección  $N(60)$

$$N(60) = Nf * \left(\frac{45}{60}\right)$$

*Ecuación 25 -  $N(60)$  – Conservativo – 45% eficiencia*

Los valores de referencia convencional que se evaluarán serán determinados por número de golpes en campo ( $Nf$ ) que es igual a el número de golpes in-situ serán corregidos por un factor de 0.75, valor conservativo por Colombia

Los valores corregidos por el método racional de EFV serán tomados a partir de la Ecuación 22 donde la energía entregada del sistema queda de la siguiente forma

$$\text{Energía EFV} = \eta_3 \eta_1 (0.75 * Wm * g) + \eta_3 \eta_1 (\Delta P * Wm * g) + \eta_3 \eta_2 (\Delta P * Wv * g)$$

*Ecuación 26- Energía entregada EFV*

Donde

- $\eta_1 = \frac{\int_0^{\infty} f(t) * v(t) dt}{(0.76 + \Delta P) * Wm * g}$
- $\eta_2 = \beta_2 + \alpha_2 = 1$
- $\eta_3 = 1 - 0.0042 L$  = eficiencia del sistema, L es longitud total del varillaje

Se determinan los valores de las variables por calibración del equipo (SCHNAID, ODEBRECHT, ROCHA, & BERNARDES, 2009) e interpretando el trabajo en condiciones óptimas según asumiendo los valores: como  $\eta_1 = 0.76$ ,  $\eta_2 = 1$ ,  $e = 1$  y  $\eta_3 = (1 - 0.0042 L)$  siendo L la longitud de la varilla,  $\Delta P$  se toman valores de (30 cm/ $N_f$ )

Según un primer análisis se tendrán en cuenta las variaciones del sistema según el peso del martillo y las longitudes de las varillas con el fin de determinar la influencia de estos datos en la energía entregada al muestreador y la eficiencia de los sistemas

Las variables que se trabajaran serán: el peso del martillo con variaciones de  $\pm 1$  kg en su peso y la longitud del varillaje que se trabajara según las especificaciones del equipo de perforación así poder determinar una eficiencia real del equipo por medio de la energía real entregada.

Realizando el mismo proceso según ecuaciones Ecuación 10 se determina el factor de corrección por energía dando como resultado N60 EFV -:Ecuación 27

$$N(60)EFV = Nf * \left(\frac{E(EFV)}{60}\right)$$

*Ecuación 27- N60 EFV*

Teniendo en cuenta las correcciones por longitud de varillaje y sobre carga del terreno y con los valores de N60 convencionales y N60 EFV se determina la corrección del número de golpes (Nf) según Ecuación 2

### **7.5. Valores de Angulo de ficción interno**

Conforme a los resultados de Ecuación 2 con las energías convencionales y el método EFV se determina el ángulo de fricción interno del suelo por medio de la siguiente ecuación (DAS, 2001)

$$\phi = 27.1 + 0.30 * N1(60) - 0.0054 * N1(60)^2$$

*Ecuación 28- ángulo de fricción*

El cálculo de capacidad portante se determina a partir de la Ecuación 12 estos los resultados dependen de los pasos anteriores y una vez determinados los valores de esfuerzo se realiza una comparación a el parámetro inicial para el diseño de cimentaciones superficiales

## **8. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS**

En consistencia con la metodología plantada se analizan las variaciones del equipo SPT para analizar el comportamiento del sistema y las pérdidas de energía a partir de las diferencias en su configuración, se determina que el peso del martillo y la longitud de las varillas influyen directamente en la energía potencial entregada y la eficiencia del equipo, por lo cual se realiza el análisis a partir de los cambios en estos.

Para el estudio de caso se realizan ábacos de diseño para la capacidad de resistencia del suelo tomando los valores de SPT entregados con el fin de determinar el comportamiento del suelo y su ángulo de fricción interna a partir de las correcciones por energía realizando una comparación directa entre el  $N1(60)$  y  $N1(60)$  EFV.

### **8.1 Análisis de eficiencia a partir de variaciones en el equipo**

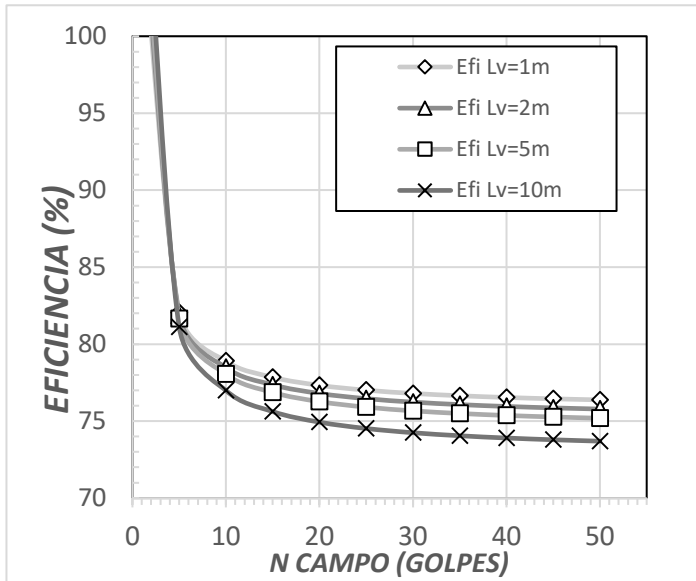
El desarrollo de las ecuaciones presentadas en el método EFV según el caso ideal de calibración del equipo deja abiertas las posibilidades de configuración del sistema en cuanto la longitud de las varillas y el peso del martillo, a pesar de tener especificaciones en las normativas de cada país se deja un rango de incertidumbre lo cual genera cambios significativos en la eficiencia del sistema.

(ANEXO 4)

Con el fin de determinar las pérdidas de eficiencia en el sistema, dependiendo de su configuración se crean tablas de análisis según las variables de la ecuación y se resumen en las gráficas presentadas

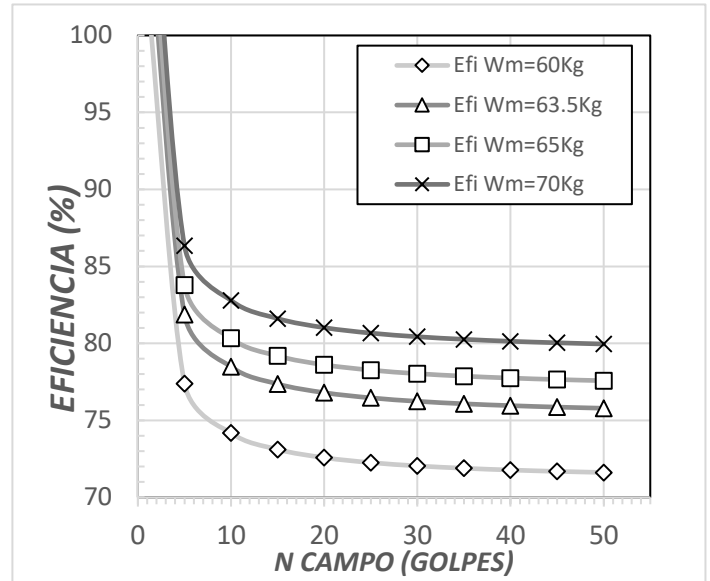


Gráfica 7 Eficiencia Vs N de Campo - Variación Longitud de las varillas



Fuente: El autor

Gráfica 6 Eficiencia Vs N de Campo - Variación Peso del martillo



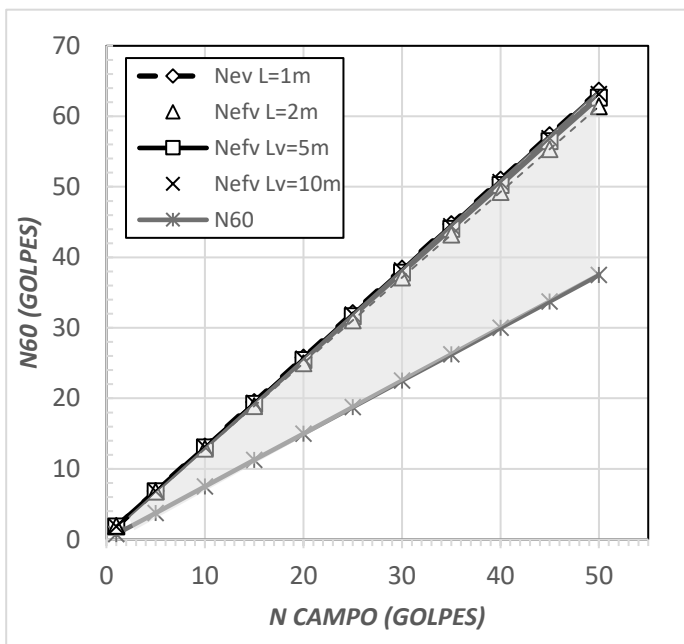
Fuente: El autor

Como análisis general respecto al número de golpes en campo (Nf) y su eficiencia se analizan las gráficas 1 y 2 donde se observa una caída considerable en los primeros golpes esto dado a la compacidad del suelo. Se evidencia que en los estratos más sueltos con índices de penetración menores a 20 hay menores pérdidas de energía en el sistema, por lo tanto, el equipo llega a ser más eficiente en arenas sueltas. El índice de penetración que tienen un comportamiento inversamente proporcional, a menor compacidad del suelo mayor eficiencia

Respecto a la variación en la configuración del sistema en Gráfica 7 y Gráfica 9 se analizan los datos según longitudes de 1, 2, 5, y 10 metros con un peso del martillo de 63.5 kg como se estipula en la norma, se plantea un segundo escenario en Gráfica 6 y Gráfica 9 considerando una longitud de varilla estándar de 3 m y se varían los pesos en 60, 63,5, 65 y 67 Kg.

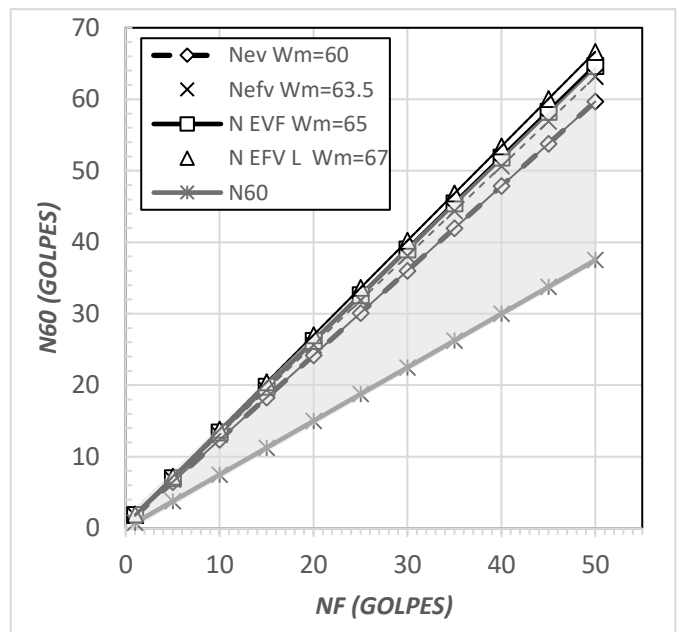
En la Gráfica 7 se observa que el comportamiento de la energía y su eficiencia no sufre mayores cambios por las longitudes de las varillas ya que se mantiene una línea de tendencia en la que la eficiencia varía en pequeños porcentajes. Caso contrario, la Gráfica 8 donde se realiza la variación en los pesos del martillo, se observa que al aumentar el peso la eficiencia del sistema es mayor generando menores pérdidas y generando mayor estabilidad en los datos, considerando pesos menores se observan menores eficiencias y una diferencia de eficiencias significativas a medida de que el suelo se compacta, considerando estas variaciones en la eficiencia del sistema se observan grandes diferencias en las líneas de tendencia, estas amplias separaciones producen un cambio en la eficiencia hasta del 10% a partir de los pesos analizados

Gráfica 9- Corrección de Nf - Variación en Longitud de Varillas



Fuente: El autor

Gráfica 8- Corrección del Nf - Variación de Wm



Fuente: El autor

Conforme a los casos planteados en la configuración de los equipos, se realiza la corrección por energía dando como resultado series de datos de N60 EFV según las diferentes configuraciones para Nf desde 1 hasta 50 golpes

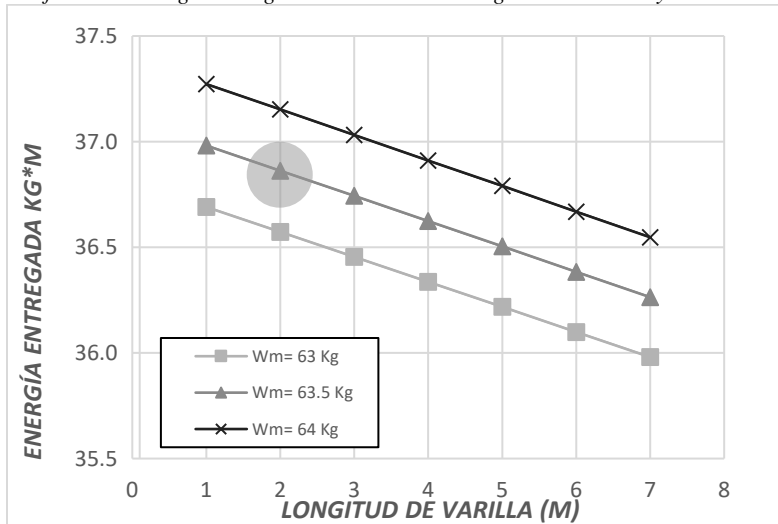
Analizando las metodologías planteadas, una corrección convencional N60 considerando una eficiencia del 45% y la corrección por el método N60 EFV que considera una eficiencia real entregada a partir del análisis de la energía potencial, se observa que independientemente de la configuración del sistema, la diferencia entre las dos correcciones es proporcional al número de golpes de campo esto por la pérdida de eficiencia que se refleja en Gráfica 6 y la Gráfica 7, correlacionando el número de golpes con la resistencia a la penetración y a su vez esta con propiedades de compacidad del suelo, a mayor compacidad mayor energía entregada

Considerando el caso ideal en el que se asegura un equipó SPT con las especificaciones según normativas, es decir, el sistema de caída y el peso del martillo de 0.75 m y 63.5 Kg se pueden calcular los valores de N60 EFV a partir de Gráfica 9 donde muestra una línea a de tendencia definida por las posibles longitudes de las varillas, es posible leer con claridad los datos corregidos por energía, pero solo en su caso específico

## 8.2 Análisis energía - caso de estudio

Desarrollando la Ecuación 26- Energía entregada EFV propuesta por Odebrecht (ODEBRECHT, 2003) y considerando los valores de peso del martillo y longitud de las varillas para el ensayo del estudio de caso se realizan graficas de energía entregada con dos series extras que varían la longitud de la varilla y el peso del martillo con el fin de analizar el comportamiento de la energía según el sistema. Se presenta los resultados a partir de los resultados para el Sondeo 1 Profundidad 1.50 m

Gráfica 10 - Energía entregada - Variación de longitud de varillas y Peso de Martillo - Sondeo 1 - Z = 1.50 Nf = 16 golpes



<b>Longitud varillas (m)</b>	3
<b>Peso del Martillo (kg)</b>	63.5
<b>Sondeo</b>	1
<b>Profundidad (m)</b>	1.5
<b>Nf</b>	16
<b><math>\Delta P</math> (m)</b>	0.0018

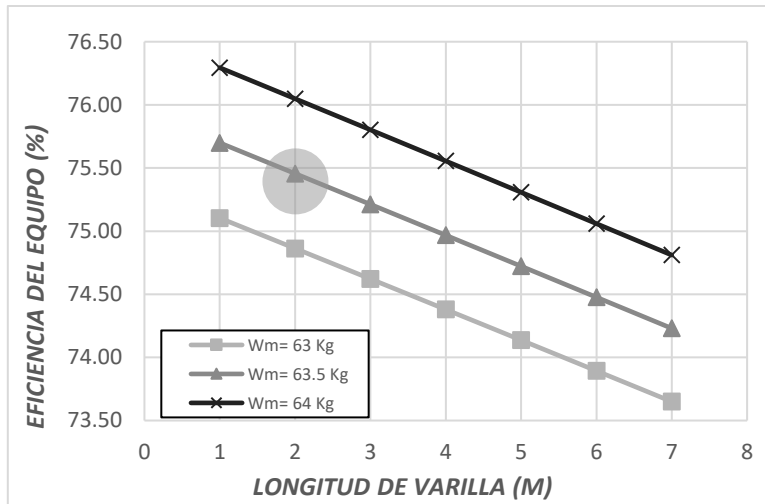
<b>W martillo / Long varilla</b>	<b>63 kg</b>	<b>63.5 kg</b>	<b>64 kg</b>
<b>1 m</b>	36.69	36.98	37.27
<b>2 m</b>	36.57	36.86	37.15
<b>3 m</b>	36.45	<b>36.74</b>	37.03

Fuente: El autor

El análisis a partir los datos del primer sondeo a profundidad de 1.50 m determina 16 golpes que generan una penetración permanente ( $\Delta P$ ) de 0.018 m, considerando las variables de eficiencia del sistema  $\eta_1 = 0.76$  y  $\eta_2 = 1$   $\eta_3 = 0.9$ , se genera una energía entregada de 36.74 Kgf, para hallar la eficiencia del sistema se tiene como referencia la máxima energía potencial considerada en la Gráfica 10 como 48.85 Kgf para los datos analizados

El análisis de la Gráfica 10 y la Gráfica 9 muestra un comportamiento lineal y una pérdida de energía proporcional a la longitud de la varilla, es decir, a mayor longitud de varilla mayor pérdida de energía por medio de las ondas mecánicas generadas en el golpe

Gráfica 11 Eficiencia del equipo – Variación de características del sistema – Longitud de varilla y peso del martillo



W martillo / Long varilla	63 kg	63.5 Kg	64 kg
1 m	75.10	75.70	76.29
2 m	74.86	75.46	76.05
3 m	74.62	<b>75.21</b>	75.80
4 m	74.38	74.97	75.56
5 m	74.14	74.72	75.31

Fuente: El autor

La eficiencia del sistema de acuerdo con las consideraciones tomadas es igual al 75.21%, en comparación con los valores conservativos según el sistema de caída expuesto en Colombia Tabla 7 de un valor de 45% de la eficiencia esperada.

Se llega a considerar notoria la sensibilidad de los datos al realizar cambios en el peso del martillo tal como se expone Gráfica 8, en el caso particular de los datos analizados se determina un rango de  $\pm 1$  Kg en el peso del mismo tal como lo estipula la Norma Colombiana esto causa variaciones en un rango aproximado del 1.2% en la eficiencia del equipo sin contar con los cambios abruptos en el mismo cuando no se cuenta con la calibración adecuada en el peso. Esto puede generar pérdidas de energía aún mayores que no se tienen en cuenta a la hora de analizar los resultados de la eficiencia.

La corrección por energía se realiza a través de la Ecuación 11 - N (60) donde se toma como energía de referencia 60% y la energía máxima la calculada por el método EFV Eficiencia=75.2%, en el caso específico del sondeo 1 a profundidad 1.50 se tiene los siguientes resultados para los datos específicos.

Se observa que conforme a la metodología de EFV se obtiene una diferencia de 8 golpes respecto a los valores conservativos tomando una eficiencia del 45%

Con respecto a la eficiencia del resto de los datos del estudio de caso se observa que, a pesar de los cambios en el número de golpes, según la configuración del equipo se tiene una eficiencia entre el 75.1% y el 75.2% independiente del índice de penetración  $\Delta P$  por lo cual la corrección por energía de todo el ensayo se realiza con esta eficiencia correspondiente

Tabla 10 - análisis corrección de energía para sondeo 1

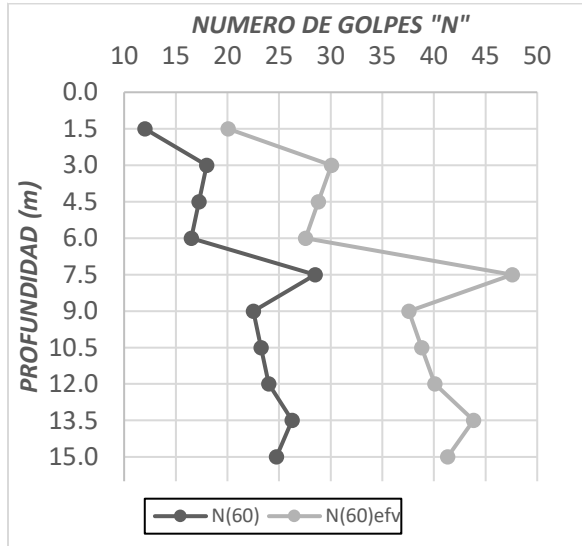
Sondeo	Profundidad (m)	Convencional		EFV					
		Nf Golpes	N (60) Golpes	$\Delta P$ (cm)	Pe*	E entregada	Eficiencia %	N (60)	$\Delta N$
1	1.5	16	12	1.88	48.85	36.743	75.21	20	8
	3	24	18	1.25	48.44	36.409	75.16	30	12
	4.5	23	17.25	1.30	48.48	36.438	75.16	29	12
	6	22	16.5	1.36	48.52	36.469	75.17	28	11
	7.5	38	28.5	0.79	48.14	36.162	75.11	48	19
	9	30	22.5	1.00	48.28	36.275	75.13	38	15
	10.5	31	23.25	0.97	48.26	36.257	75.13	39	16
	12	32	24	0.94	48.24	36.241	75.13	40	16
	13.5	35	26.25	0.86	48.19	36.198	75.12	44	18
	15	33	24.75	0.91	48.22	36.226	75.13	41	17

Fuente: El autor

A través del análisis de la totalidad del ensayo (ANEXO 3) se interpretan los valores de resistencia del suelo en correspondencia con el número de golpes, los resultados de la corrección por EFV, en los picos de resistencia lo cual concuerda con la descripción del subsuelo aportada por el estudio de caso. Donde se observa mayor resistencia la suelo en las profundidades de 3 y 7 metros.

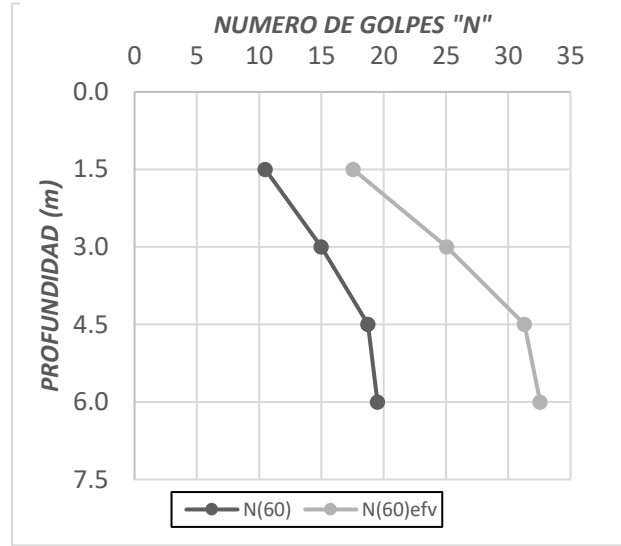
Por medio de la Gráfica 13, Gráfica 12, Gráfica 15 y Gráfica 14 se realiza la comparación entre el N60 y el N60 EFV de manera simultánea , donde se aprecian los picos de resistencia que a su vez concuerdan con la descripción dada en el informe geotécnico aportado.

Gráfica 15 N60 y N60 EFV - Sondeo 1



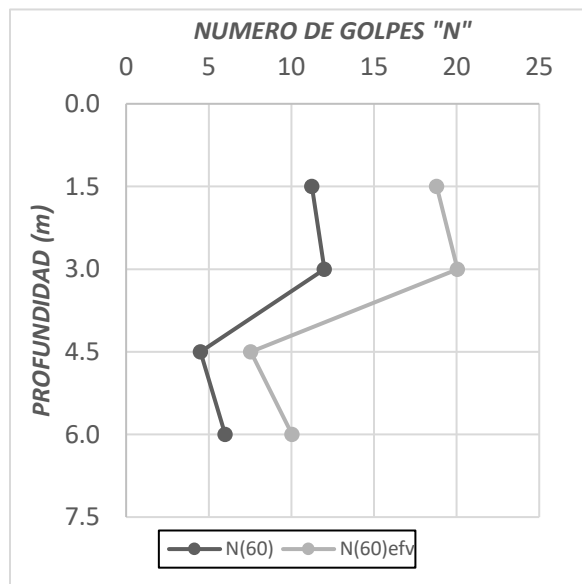
Fuente: El autor

Gráfica 14 N60 y N60 EFV - Sondeo 2



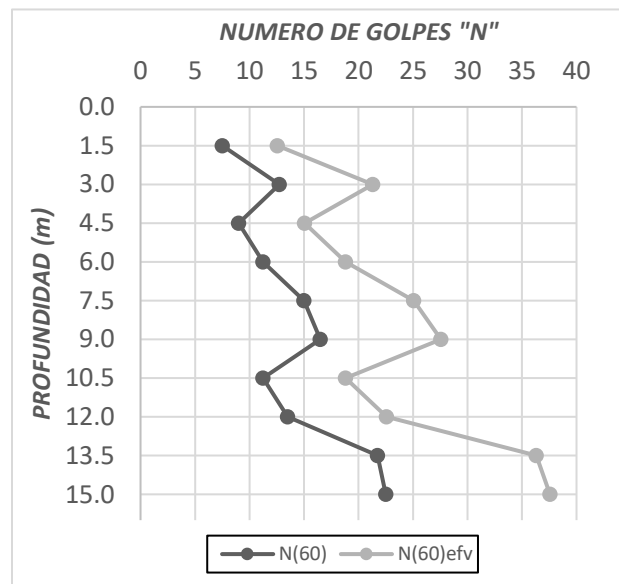
Fuente: El autor

Gráfica 12 N60 y N60 EFV - Sondeo 3



Fuente: El autor

Gráfica 13 N60 y N60 EFV - Sondeo 4



Fuente: El autor

Se observa una diferencia importante entre el N60 EFV y el N60 proporcional a la resistencia a la penetración que presenta el suelo, a mayor número de golpes mayor diferencia entre los datos analizados lo cual se observan en las siguientes graficas

Los cambios significativos en el número de golpes se encuentran en los estratos más compactos donde la diferencia entre los datos llega a ser hasta de 20 golpes, a diferencia primeros estratos del suelo en donde se realizará el nivel de cimentación que sufren cambios menores en la corrección del suelo en donde se realizará el nivel de cimentación que sufren cambios menores en la corrección

### 8.2.-1 Angulo de fricción interna del suelo y capacidad de carga

De acuerdo con los datos obtenidos a través de la corrección por energía y con los correspondientes valores de N60 y N60 EFV para el primer estrato a 1.50 m, se realiza el cálculo del N1(60) a partir de la Ecuación 2 considerando una corrección por longitud de varilla (Tabla 4) de 3 metros , a =0.75, una corrección por nivel freático N.F = 1 y se realiza el cálculo de sobre carga del terreno (Cn) según Liao Whitman - Ecuación 8. Por último, se determina el ángulo de fricción interna del suelo a partir de la  $\phi = 27.1 + 0.30 * N1(60) - 0.0054 * N1(60)^2$

Ecuación 28- ángulo de fricción.

Tabla 11 - Resumen datos metodología convencional 45% eficiencia – N1 60 corregido - ángulo de fricción

SONDEO	Profundidad (m)	$\gamma$	Nf	N (60)	CN	N.F.	a	N1 60	$\Phi$
		(t/m3)	g/pie					golpes	
1	1.5	1.63	16	12	2.00	1	0.75	18	32
2	1.5	1.56	14	11	2.00	1	0.75	16	
3	1.5	1.67	15	11	2.00	1	0.75	17	
4	1.5	1.56	10	8	2.00	1	0.75	11	



Fuente: El autor

Tabla 12 - Resumen datos metodología EFV – N1 60 corregido - ángulo de fricción

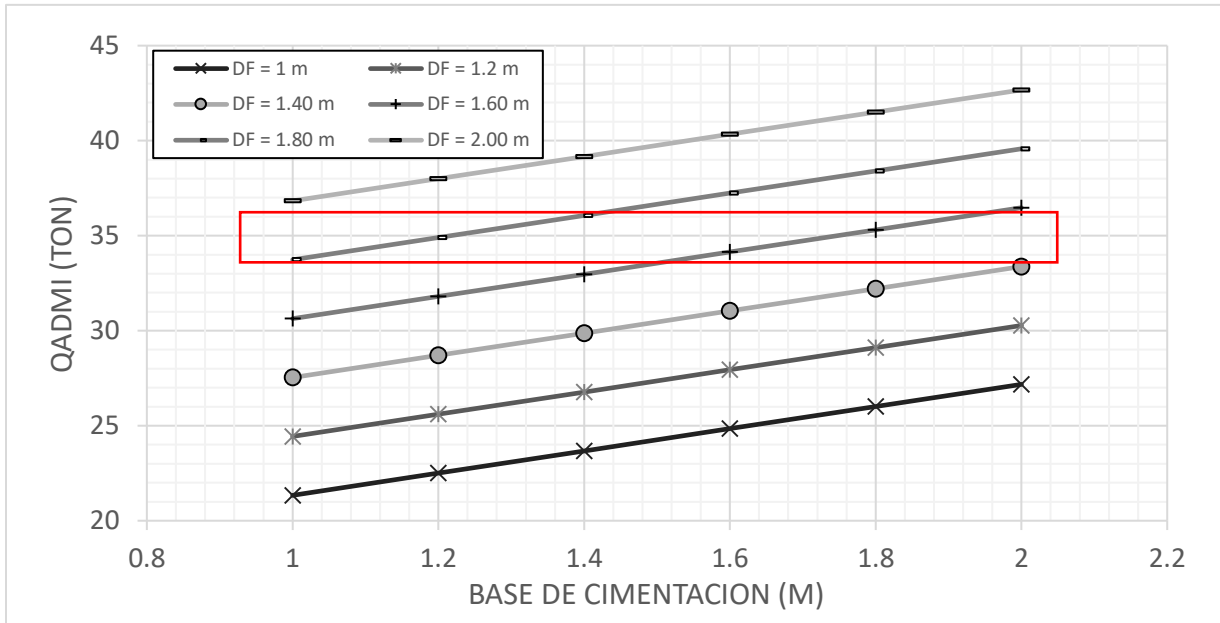
SONDEO	Profundidad (m)	$\gamma$	Nf.	N60 (EFV)	CN	N.F.	a	N1 60	$\Phi$
		(t/m <sup>3</sup> )	g/pie					EFV	(EFV)
								golpes	°
1	1.5	1.63	16	21	2.00	1	0.75	31	35
2	1.5	1.56	14	18	2.00	1	0.75	27	
3	1.5	1.67	15	19	2.00	1	0.75	29	
4	1.5	1.56	10	13	2.00	1	0.75	19	

Fuente: El autor

A partir de la corrección del número de golpes N1 (60) se determina un ángulo de fricción para el método EFV de 35° y para el método convencional un ángulo de fricción de 32°, aparentemente y pese a la gran diferencia entre la corrección por energía el ángulo de fricción es una variable sensible a los pequeños cambios ya que los factores de corrección (Tabla 8) dependen de este ángulo por ende la capacidad de carga del suelo sufre cambios significativos.

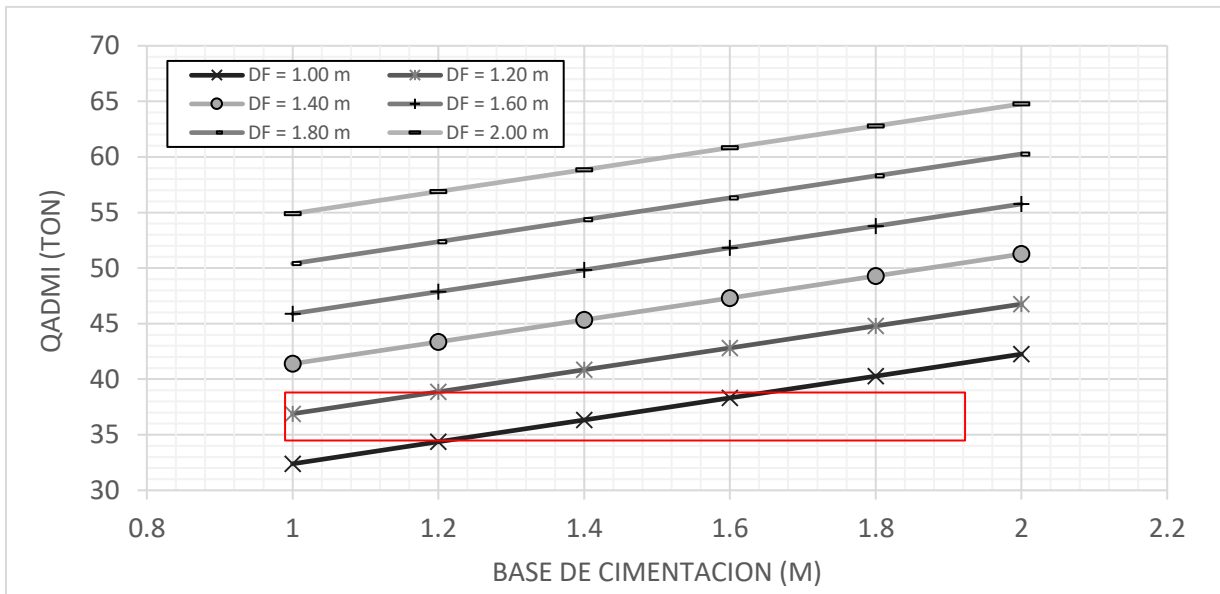
Para el análisis de capacidad de carga se realiza un análisis de datos por medio de ábacos de diseño que contempla diferentes alternativas para la cimentación superficial, el cálculo se realiza partir de la Ecuación 12 - Capacidad de carga inicialmente y con fines comparativos se determinan los factores del suelo como nivel de desplante y peso unitario del suelo tal cual los datos aportados por el estudio de caso, tomando un nivel de desplante de 1.2 m y un peso unitario de 16.3 Ton/m<sup>3</sup>.

Gráfica 16 Abaco de diseño- Capacidad portante en Ton – Variación en base de la cimentación – Zapatas Cuadradas – Método EFV -  $\Phi$  35°



Fuente: El autor

Gráfica 17 Abaco de diseño- Capacidad portante en Ton – Variación en base de la cimentación – Zapatas Cuadradas – Método Convencional -  $\Phi$  32°



Fuente: El autor

A partir de los ábacos de diseño, se determina una capacidad de carga para cimientos cuadrados de 1 m x 1 m, Para el análisis EFV se obtiene una capacidad de 36.88 Ton y para la metodología convencional una capacidad de 24.43.

La relación entre Gráfica 16 y la Gráfica 17 muestra una carga máxima para las configuraciones analizadas (máximo de zapata 2 x 2 ) por el método convencional ( $\Phi=32$ ) una carga máxima de 42 Ton con una desplante de 2 m, para el método EFV ( $\Phi=35$ ) los rangos son mayores y para la misma característica es decir una carga máxima de 65 Ton, una diferencia del 64%

Con fines comparativos se asume una carga de proyecto de 35 Ton, para determinar la influencia en la capacidad portante según el estimativo de eficiencia y a su vez del ángulo de fricción por ambas metodologías, se observa que para la carga proyectada la Gráfica 16 la posible configuración de la zapata cuadrada con anchos de 1.20 m hasta 2 metros y la profundidad de desplante se puede tomar un valor mínimo de 1.00 m ya que los rangos de capacidad del suelo son mayores, contrario la metodología convencional en el ábaco de diseño (Gráfica 17) arroja valores menores de capacidad de carga y para el mismo ejercicio para zapatas pequeñas de 1 x 1 m se necesita un mínimo de 1.60 metros de desplante para soportar la carga impuesta y para dimensiones mayores, profundidades de mínimo 1,40 m.

De acuerdo a lo anterior, se observa una diferencia del 66.24% de una metodología respecto a la otra, si bien es cierto que tomando valores convencionales e interpretando una eficiencia del equipo del 45% se llega a considerar un factor de seguridad subestimando la capacidad del suelo, se puede incurrir en sobrecostos a la hora de la construcción, un análisis detallado de entrega de energía como lo es el método EFV puede arrojar valores asociados a la realidad según los parámetros del suelo y su resistencia, disminuyendo costos por área neta de la zapata o por excavación.

## 9. CONCLUSIONES

A partir del desarrollo de la metodología plantada y por medio de los análisis de resultados del estudio de caso para la eficiencia y racionalización de energía entregada al muestreador según valores semiempíricas y el método EFV, es posible llegar a las siguientes conclusiones:

### **Energía y eficiencia según configuración del equipo SPT**

- Para la configuración convencional del equipo se observa una caída significativa en la eficiencia del sistema a medida que el índice de penetración aumenta, el número de golpes en campo y la eficiencia son indirectamente proporcionales lo que puede llegar a causar cambios significativos en la eficiencia del sistema. Según el índice de resistencia a la penetración  $N_f$  para valores menores a 20 golpes se evidencian pequeñas variaciones en el sistema en cuanto a su eficiencia, para valores mayores a 20 se evidencian cambios significativos en la eficiencia lo cual está relacionado con el grado de compacidad en el suelo.
- Realizando una comparación directa entre los valores del índice de resistencia a la penetración y realizando la corrección por energía por los métodos convencionales y la metodología racional del EFV. Se evidencia un aumento en la diferencia entre los valores de  $N$  (60) a medida que el suelo presenta mayor grado de compacidad, esto debido a que el método EFV tiene en cuenta energías no conservativas en la entrega de energía potencial al muestreador. Caso contrario, los métodos convencionales no tiene en cuenta los cambios de compacidad en el suelo ya que se basan en leyes de conservación de energía
- Según el análisis de energía entregada al muestreador a partir de cambios en la configuración del equipo en función del peso del martillo y longitud de las varillas, se

encuentra una mayor sensibilidad debido al peso del martillo provocando diferencias significativas en la energía potencial entregada al muestreador ya que la eficiencia es directamente proporcional a el peso del martillo. Por otro lado, los cambios en las longitudes de las varillas no aportan mayor dispersión en los resultados.

### **Estudio de Caso**

- Los resultados de eficiencia encontrados en el análisis del equipo convencional por medio de la metodología EFV establece un valor del 75.2% comprobado que los parámetros utilizados para la corrección por energía en Colombia (45%) son conservadores por ende se castiga el índice de penetración subestimando la resistencia del suelo lo cual genera un factor de seguridad indirecto en la obtención de parámetros.
- A partir de la determinación de  $N1(60)$  y el cálculo del ángulo de fricción interna del primer estrato de suelo no se encuentran cambios drásticos en el este parámetro ya que a partir de los métodos convencionales se obtiene un ángulo de  $32^\circ$  y por la metodología EFV un ángulo de  $35^\circ$ , dada esta diferencia de  $3^\circ$  que aparentemente no se observa un cambio significativo en la interpretación de consistencia del suelo
- El cálculo de capacidad de carga del suelo depende de factores altamente sensibles a la variable ángulo de fricción interna del suelo, por lo cual pequeñas variaciones generan gran dispersión en los datos. Esto se evidencia en el cálculo de la capacidad de carga para cimientos superficiales según los datos obtenidos, donde para un nivel de cimentación recomendado por el estudio de caso ( $Df=1.20$  m) se presenta de manera convencional una fuerza de 36.88 Ton y para la metodología convencional una capacidad de 24.43/Ton. Una diferencia del 66.24% para el estudio de caso

- La diferencia de corrección por energía en el índice de penetración de SPT por métodos convencionales y por métodos racionales a simple vista es insignificante ya que no genera mayor diferencia en el resultado de ángulo de fricción interna del suelo, pero dada la sensibilidad de las ecuaciones de capacidad de carga se puede observar que esos pequeños cambios generan diferencias importantes en la estimación de carga. Lo cual genera una gran influencia a la hora del diseño de cimentaciones superficiales generando un subdimensionamiento de la cimentación.

## 10. RECOMENDACIONES NUEVAS INVESTIGACIONES

1. Al tratarse de transferencia tecnológica se adoptan valores de equipos calibrados según las normativas brasileras, es necesaria la validación de la fuerza dinámica y la velocidad de onda a partir de equipos especializados como acelerómetros que permitan obtener los parámetros locales y genere la validación de los parámetros  $\eta_1$ ,  $\eta_2$  y  $\eta_3$
2. Validar experimentalmente el estudio en suelos granulares y por medio equipos especializados determinar la fuerza dinámica ejercida en los equipos convencionales cuantificando la energía real entregada al muestreador a partir del método EFV
3. Realizar estudios teniendo en cuenta la saturación del suelo y la influencia del nivel freático en los posibles resultados
4. Complementar el análisis con fines comparativos según nuevas investigaciones

## 11. BIBLIOGRAFÍA

2010, D. 5. (2010). *Microzonificación sísmica de Bogotá D.c.* Bogota: Alcaldía Mayor de Bogotá D.C.

A., B. (1985). *Energia Dinamica no SPT - resultados de uma investigacao teorico experimental, Dissertacao de Mestadado.* Escuela Politecnica, Universidad De Sao Pablo.

ALI, S. E. (1985). *Modulos de suelo y factores de amortiguacion dinamica.* California.

ANI. (s.f.). *Calculo de Capacidad De Carga y Asentamientos de Cimentaciones Supeficiales.*

BROWLES, J. E. (1988). *Analisis, fundacion y diseño.* New jersy: Mcraw-Hill Book.

CARMONA ALVARES, J., & RUGE CARENDAS, J. C. (2016). *Analisis de la Correlaciones Existentes para el angulo de friccion efectivo para suelos del piedemonte oriental de bogota usando ensayos in situ.* Bogota: Tecno Logicas.

Curriculo Lattes. (2019). *EDMUNDO ESQUIVEL.* Consejo Nacional de Desenvolvimento Cientifico y Tecnologico.

DA SILVA OLIVEIRA, T. (2014). *Interpretacao racional de resultados de ensaios SPT com base en conceitos de energia - Tese Maestrao.* Escola de Engenharia de Sao Carlos da Universidade de Sao Pablo.

DAS, B. M. (2001). *Principios de ingenieria de cimentaciones.* PWS PUBLISHING.



- ECHEVERRY PINTO, N. (2008). *Obtencion de rigidez dinamica del suelo a partir de la medicion de energia transferida en el ensayo SPT - Tesis Pregrado Ingenieria Civil*. Bogota: Pontificia Universidad Javeriana.
- GOBBS, & HOLTZ. (1957). *research on determining the density of sands by spoon penetration testing*. Londres: Int. Conf. Soil Mech.
- GONZALEZ G., A. J. (1999). *ESTIMATIVOS DE PARAMETROS EFECTIVOS DE RESISTENCIA CON EL SPT*. BOGOTA.
- HVORSLEV. (1940). *THE PRESENT STATUS OF DE ART OF OBTAINING UNDISTURBED SAMPLES OF SOIL*. CAMBRIDGE: HARVAR UNIVERSITY PRESS.
- INVIAS . (2013). *INV E-111*. Bogota.
- IRIONDO, M. H. (2007). *Introduccion a la geologia*. Brujas.
- LIAO, S.S.C., & WHITMAN, R. V. (1986). *Overburden correction Factors for SPT in sand*.
- LOBO. (2009). *Mecanismo de penetracao dinamica em solos granulares. tese de Doutorado*. Porto Alegre: Escola de engenharia, Universidad Federal do Rio Grande do sulm.
- M, D., & N, F. (2004). *Ensayos Geotecnicos In Situ su interpretacion*. Girona.
- MATAR, A. , & GLOBE, G. (1997). *SPT Dinamic analiysis and measurement*. Journald of geotechnical and geoenvironmental engineering.
- METERHOF. (1957). *la discucion sobre la densidad de la arena por cuchara de penetracion*. ICSMFE.

- MOHR, H. (1940). *Exploration of Soil Conditions and Sampling Operations*. Cambridge: Harvard University.
- NBR 6484. (1997). *Solos - Sondagens simples reconhecimento com SPT*. Comitê Brasileiro de construção civil.
- ODEBRECHT, E. (2003). *Medidas de energia no ensaio SPT. Tese de doutorado*. Porto Alegre: Universidade do rio grande do sul.
- PALACIOS, S. Y. (1979). *Energy Dynamic of SPT*. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering.
- RESTREPO, & RODRIGUEZ. (2006).
- SCHMERTMANN. (1975). *Measurement of in-situ shear strength*.
- SCHNAID, F., ODEBRECHT, E., ROCHA, M., & BERNARDES, G. (2009). *Prediction of soil properties from the concepts of energy transfer in dynamic penetration tests*.
- SGC, S. . (1999). *X JORNADAS GEOTECNICAS DE LA INGENIERIA COLOMBIANA*. BOGOTA.
- Skempton. (1986). *Standard Penetration test procedures and effects in sands overburden pressure, relative density, particle size .*
- SKEMPTON, A. W. (1986). *standard penetration tests procedures and the effects in sands of overburden pressure, relative density, particle size, ageing, and over consolidation*.

SMITH. (1960). *Pile-Driving analysis by the wave equation - journal of the soil mechanics and foundation division*. ASCE.

Symonds, Q. (Julio de 2019). *World University Ranking*. Obtenido de <https://www.topuniversities.com/university-rankings/world-university-rankings/2020>

TERZAGHI, K., & PRECK, R. B. (1948). *soil mechanics in engineering practice*. New York.

VENTAYOL LAZARON, A., & FERNANDEZ RADERO, C. (s.f.). *Medida de energia del ensayo spt. correcciones a aplicar*. Barcelona.

# ANEXOS

# ANEXO 1 – REGISTRO FOTOGRÁFICO VISITA TÉCNICA INTERNACIONAL

## Visita Usina de Furnas

*Ilustración a - Grupo de ingeniería - Usina de Furnas*



*Fuente: El autor*

*Ilustración b - Usina de Furnas - Compuerta tipo oruga*



*Fuente: El autor*

*Ilustración c - Recorrido túneles Usina de Furnas*



*Fuente: El autor*

*Ilustración d - Usina de Furnas - Muro de contención*



*Fuente: El autor*



# Visita São Matião y Faber Castell

*Ilustración e - Fabrica Sao Mariño*



*Fuente: El autor*

*Ilustración f - Charla procesos industriales Faber-Castell*



*Fuente: El autor*

*Ilustración g Grupo de Ingeniería - Visita Faber Castell*



*Fuente: El autor*



## Universidad São Paulo – Escuela de ingeniería de São Carlos – Ciclos de conferencias

*Ilustración h - Campus USP - Escuela de Ingeniería São Carlos*



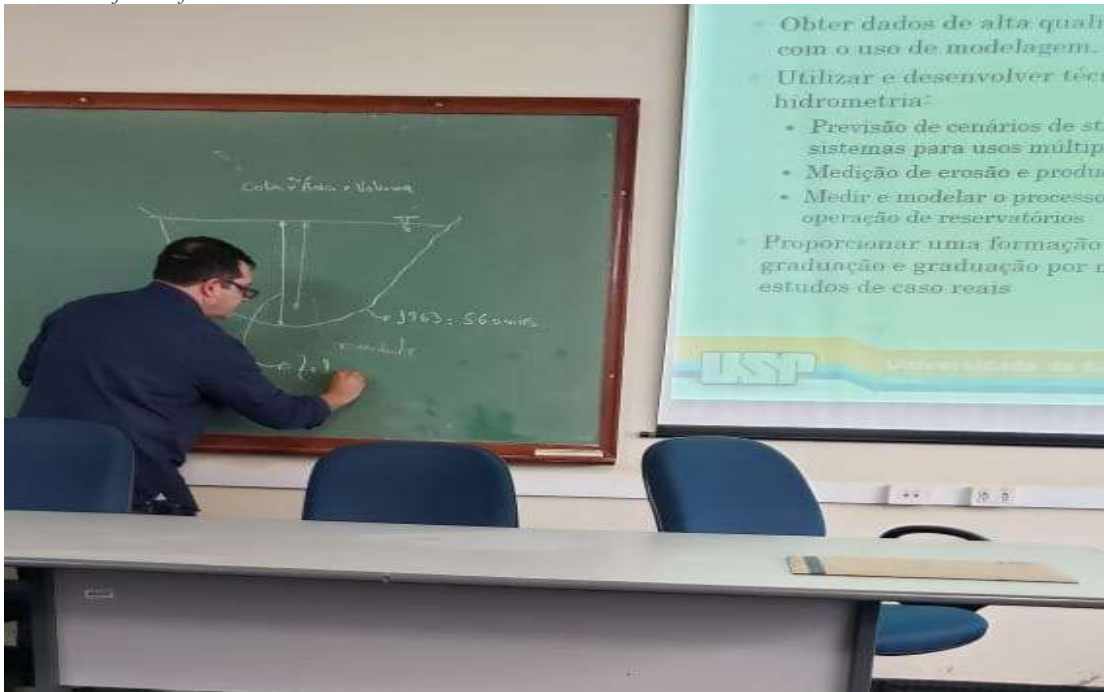
*Fuente: El autor*

*Ilustración i Sala de conferencias - EESC*



*Fuente: El autor*

Ilustración j - Conferencia Recursos Hídricos EESC



Fuente: El autor

Ilustración k - Recorrido Laboratorios de Geotecnia de la EESC



Fuente: El autor

# ESTUDIOS DE SUELOS

UBICACION: AV KR 50 # 1D – 23 - BOGOTA

PROYECTO: VIVIENDA MULTIFAMILIAR



Se proyecta construir una estructura para  
vivienda ubicada en Puente Aranda de  
CUATRO (4) PISOS

GRACIAS POR COTIZAR  
MVC AMERICANA DE CONSTRUCCIONES CRA 148 # 94-51 LA CASTELLANA BOGOTA  
TELÉFONO 057 (1) 8058749 – 057 (8) 6621020 – 3164615908



*Información protegida por las leyes de derechos de autor, propiedad industrial y tratados internacionales. Prohibida su reproducción parcial o total bajo cualquier medio conocido o por conocerse. Se advierte al receptor de la información que ésta tiene carácter confidencial y de secreto empresarial. La información acá contenida no puede ser usada o distribuida a terceros sin previa autorización por escrito del titular.*

*El desconocimiento de los compromisos descritos, otorga la facultad al titular de ejercer las acciones legales correspondientes, ya sean civiles, penales y/o administrativas, para el caso de violación a los derechos de propiedad intelectual, incluyendo el delito de revelación de secretos contemplado en el Código Penal.*



## INTRODUCCION

El señor JONNI RINCON en representación del inmueble de la obra en mención (Vivienda/La Camelia), contrató al ingeniero DIEGO FERNANDO MARTINEZ identificado con matricula profesional N° 25202217599 CND y reside en la ciudad, para que elaborara el estudio de suelos y recomendara la cimentación más conveniente para el proyecto que se ejecutará en la AV KR 50 # 1D – 23 de la nomenclatura urbana de la ciudad de Bogotá DC.



<http://apps.sire.gov.co/GeoPortalV2/mapa.jsf>

El presente informe contiene el resumen de las actividades de campo y de oficina, realizadas, los análisis, resultados, conclusiones y recomendaciones, asociadas a la alternativa técnica y económica más favorable para la ejecución del proyecto en referencia.

El objeto del estudio es el de determinar las características geo mecánicas del suelo con base en lo cual definir el nivel apropiado para la cimentación de la obra, así como también calcular la capacidad portante admisible del suelo; características evaluadas en función del tipo de estructura y de las cargas que estas transmiten al

terreno de fundación.

Igualmente se presentan los resultados de la investigación del subsuelo, los análisis de ingeniería, las conclusiones y recomendaciones para el diseño y la construcción de la cimentación.

## 1. OBJETO.

Para determinar las condiciones del subsuelo en el predio ubicado en Av Kr 50 # 1D - 23 del barrio La Camelia de la ciudad de Bogotá DC, donde se proyecta construir una estructura a porticada en concreto reforzado de **CUATRO (4) PISOS**, se adelantaron investigaciones de campo de las cuales se obtuvieron muestras representativas para ensayos, cuyos resultados fueron la base para las recomendaciones del presente informe.

## 2. ALCANCE.

Se ha establecido como alcance general del presente informe el diseño de la cimentación técnica económicamente más conveniente para la estructura proyectada, para lo cual se satisfacen los siguientes alcances específicos:

- Realización de un completo programa de exploración del subsuelo, que permita la caracterización física y mecánica de los materiales que conforman el perfil estratigráfico en el área estimada para la ampliación del predio.

- Identificación de las propiedades físicas y mecánicas de los diferentes estratos que conforman el subsuelo dentro del área del proyecto.
- Planteamiento de modelo estratigráfico y ejecución de los análisis de capacidad portante y deformación asociadas a la determinación del sistema de cimentación más conveniente para la estructura que se proyecta construir.

### 3. DESCRIPCION DEL PROYECTO

Se proyecta construir una estructura para vivienda ubicada en Puente Aranda de **CUATRO (4) PISOS** y cubierta en placa; el sistema estructural proyectado está compuesto por columnas y vigas de concreto con placa de entrepiso y luces entre columnas de 3.73 m en el sentido corto y de 4.90 m en la dirección contraria; se esperan cargas máximas a nivel de pedestal de **50 Ton/col.** El área del lote es de aproximadamente 127.80 m<sup>2</sup>.

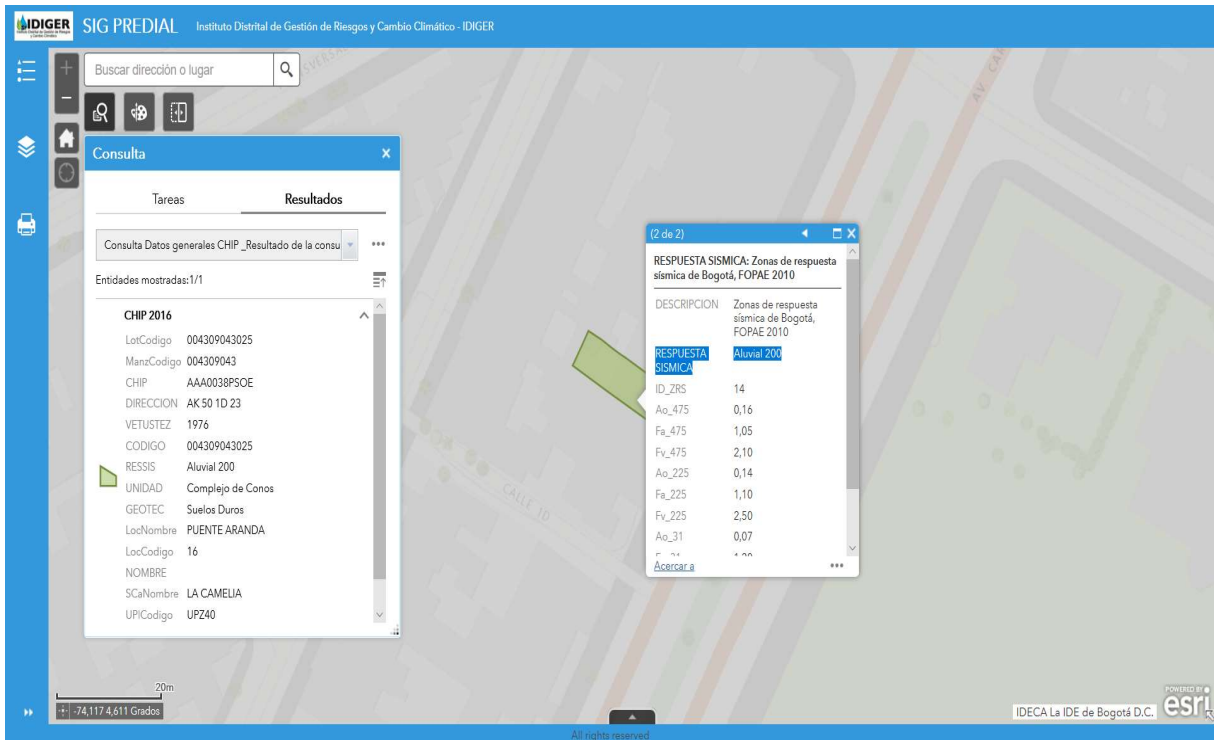
**Tabla H.3.1-1**  
**Clasificación de las unidades de construcción por categorías**

<b>Categoría de la unidad de construcción</b>	<b>Según los niveles de construcción</b>	<b>Según las cargas máximas de servicio en columnas (kN)</b>
<b>Baja</b>	Hasta 3 niveles	Menores de 800 kN
<b>Media</b>	Entre 4 y 10 niveles	Entre 801 y 4,000 kN
<b>Alta</b>	Entre 11 y 20 niveles	Entre 4,001 y 8,000 kN
<b>Especial</b>	Mayor de 20 niveles	Mayores de 8,000 kN

### 4. PARAMETROS SISMICOS.

De acuerdo a decreto 523 de 2010 por el cual se adopta la microzonificación de Bogotá, el perfil del suelo clasifica como **ALUVIAL 200** (perfil **TIPO F**) y por tanto el coeficiente de diseño es  $F_a = 1.05$ ,  $F_v = 2.10$ ,  $T_c = 1.28$ ,  $T_L = 3.50$ ,  $A_o = 0.16$ .



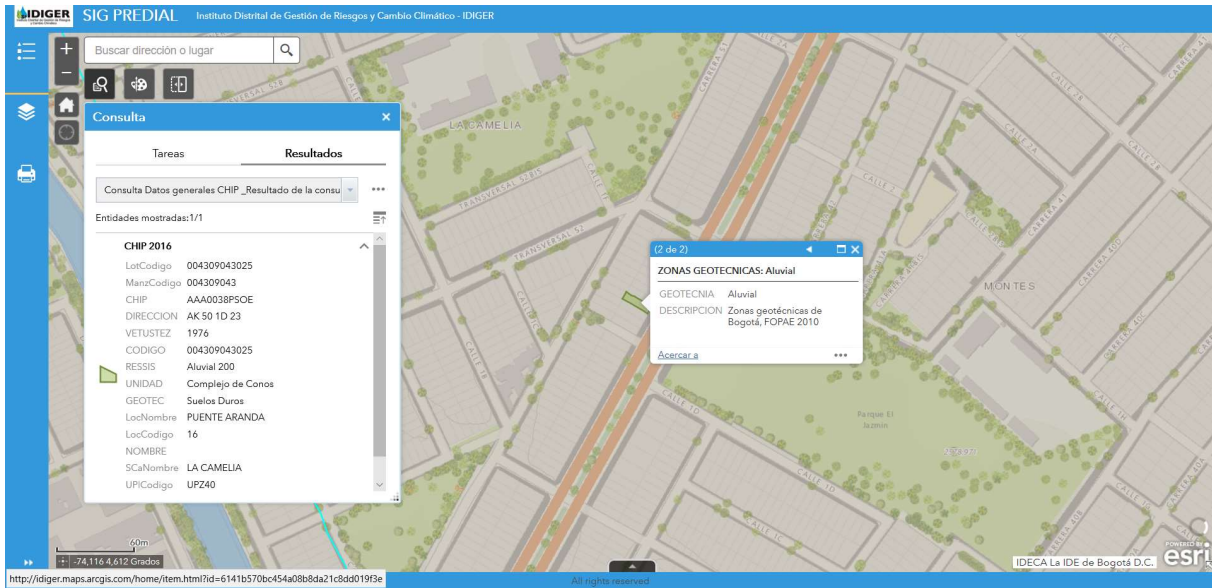


<http://apps.sire.gov.co/GeoPortalV2/mapa.jsf>

Microzonificación Sísmica = **SI** Bogotá D.C.  
 Zona Geotecnica = **ALUVIAL**  
 Zona de Respuesta Sísmica = **ALUVIAL 200**  
 Grupo de uso = **I**

Coef. de Importancia, I = 1,00  
 Aceleración Terreno, Ao = 0,16  
 Período corto, Tc = 1,28 s  
 Período largo, T<sub>L</sub> = 3,50 s  
 Aceleración de diseño, A<sub>v</sub> = 0,20 g  
 Aceleración de diseño, A<sub>a</sub> = 0,15 g  
 Factor de amplif. acel., Fa = 1,05  
 Fact. de amplif. acel.(rango vel.), Fv = 2,10  
 Máx. acel. en el espectro = 0,39 g

La estructura NO se encuentra en una franja de transición dentro de las zonas de microzonificación definidas:



<http://apps.sire.gov.co/GeoPortalV2/mapa.jsf>

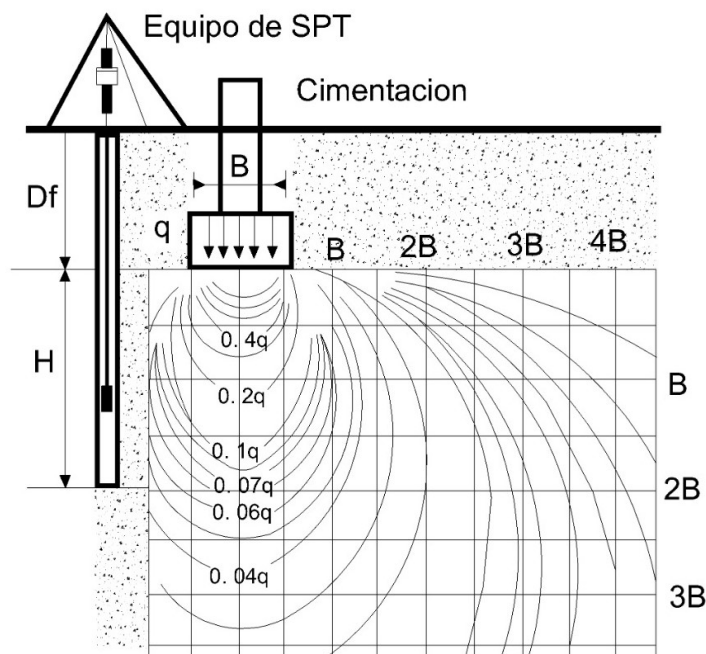
Según el Decreto 523 del 2010, la zona aluvial 200 está conformada principalmente por Suelo aluvial duro: Arcillas limosas o arenas arcillosas o limos arenosos en algunos sectores se encuentran lentes de arenas limpias. Respecto a la Geología encontramos Terraza Baja – Aluvial y Complejo de Conos Aluviales; la Geomorfología es Planicie, la Velocidad onda promedio 50 m Vs (m/s) es de 175 - 300 y la Humedad Promedio 50 m Hn (%) 25 – 50

Respecto al *potencial de licuefacción de los suelos*, se puede afirmar que es prácticamente nulo, ya que se trata de suelos granulados y cohesivos y el fenómeno de licuefacción se produce en arenas finas en medio saturado donde en determinado momento la onda sísmica genera un fenómeno de ebullición en las arenas y deja sin soporte (momentáneamente) una estructura.

## 5. EXPLORACIÓN Y CARACTERÍSTICAS DEL SUBSUELO.

### A.-Exploración y Ensayos.

Con el propósito de conocer las características del subsuelo en el lote de la referencia, se adelantaron **CUATRO (4) PERFORACIONES** a una profundidad entre 6.00 m y 15.00 m, localizadas como se indica en el esquema de "Localización de Sondeos" del Anexo adjunto.



*Ilustración 1 ESQUEMA DE VULVOS DE PRESION*

Las perforaciones se realizaron usando barrenos manuales y en cada una de ellas se tomaron muestras alteradas en tubo partido (Split-Spoon), con el fin de realizar ensayos de identificación y clasificación, así como también, resistencia al ensayo de penetración Standard, a intervalos de 1.50 m. y se tomaron muestras inalteradas en

tubos Shelby.

De cada perforación se llevó un registro detallado donde se consignó el tipo de muestra, profundidad y descripción visual correspondiente, definiendo el tipo de material, los cambios de estrato, resultados de los ensayos de penetración Standard, resistencia del subsuelo con el penetrómetro de bolsillo, resistencia a ensayos de veleta y profundidades del agua en cada una de las perforaciones de investigación.

Las muestras tomadas en los sondeos, fueron debidamente empacadas, rotuladas y enviadas al laboratorio para su posterior análisis. Los resultados de estos ensayos se resumen y anexan al final del informe.

## 6. DESCRIPCIÓN DEL SUBSUELO

Un análisis de los perfiles estratigráficos registrados y de las condiciones del subsuelo nos indica que el subsuelo presenta las siguientes características:

a.- En la primera capa se registró una placa de concreto de 7 cm que llega hasta la cota -0.40 m, que descansa sobre un relleno de arena amarilla que va hasta la cota -1.00 m.

b.- Luego hasta la cota -2.60 m se registró arena con algo de limo color habano claro, de humedad media y consistencia compacta. La resistencia promedio es de 0.75 Kg/cm<sup>2</sup> al ensayo de compresión inconfiada, de 2.89 Kg/cm<sup>2</sup> al ensayo de

penetrómetro de bolsillo y de 17 golpes/pie para el ensayo de penetración estándar.

c.- Después hasta la cota -3.60 m se registró arena arcillosa color amarillo claro, de humedad alta y consistencia muy compacta. La resistencia promedio es de 0.81 Kg/cm<sup>2</sup> al ensayo de compresión inconfiada, de 2.72 Kg/cm<sup>2</sup> al ensayo de penetrómetro de bolsillo y de 17 golpes/pie para el ensayo de penetración estándar.

d.- El siguiente estrato es arcilla con algo de arena, color café claro y habano claro, de humedad alta y consistencia muy compacta, el cual se encontró hasta -4.50 m. La resistencia promedio es de 0.98 Kg/cm<sup>2</sup> al ensayo de compresión inconfiada, de 2.51 Kg/cm<sup>2</sup> al ensayo de penetrómetro de bolsillo y de 18 golpes/pie para el ensayo de penetración estándar.

e.- A continuación, se registra hasta -6.20 m arena arcillosa de color café claro, de humedad media y consistencia muy compacta. La resistencia promedio es 2.57 Kg/cm<sup>2</sup> al ensayo de penetrómetro de bolsillo y de 20 golpes/pie para el ensayo de penetración estándar.

f.- Después hasta la cota -8.10 m se registra arena arcillosa de color café oscuro, de humedad media y consistencia dura. La resistencia promedio es de 2.75 Kg/cm<sup>2</sup> al ensayo de penetrómetro de bolsillo y de 23 golpes/pie para el ensayo de penetración estándar.

g.- Luego se registra hasta la cota -12.00 un estrato de arcilla arenosa de color café claro, de humedad media y consistencia muy compacta. La resistencia promedio es

de 1.36 Kg/cm<sup>2</sup> al ensayo de compresión inconfiada, de 2.98 Kg/cm<sup>2</sup> al ensayo de penetrómetro de bolsillo y de 26 golpes/pie para el ensayo de penetración estándar.

h.- Por último, hasta la máxima cota de exploración de -15.00 m se registró arena de color amarillo oscuro con vetas cafés, de humedad media y consistencia muy compacta. La resistencia promedio es de 1.24 Kg/cm<sup>2</sup> al ensayo de compresión inconfiada, de 3.33 Kg/cm<sup>2</sup> al ensayo de penetrómetro de bolsillo y de 30 golpes/pie para el ensayo de penetración estándar.

## 7. NIVEL FREÁTICO.

Los sondeos 1 y 3 indicaron presencia de agua libre entre las cotas 3.00 y 4.00 m, los resultados de los ensayos de humedad a las muestras obtenidas nos dejan ver que son muestras con altos contenidos de humedad. Es importante anotar que el nivel de agua está sujeto a cambios ocasionados por fluctuaciones de las condiciones climáticas. Se recomienda durante la construcción mantener un equipo de bombeo para evacuar el agua que pueda fluir hacia las excavaciones.

## 8. CONCLUSIONES

Como se puede observar en los resultados de las perforaciones, ensayos de campo y de laboratorio, los suelos superficiales hasta la cota **-1.20 m** no son aptos para

trabajar como mantos de fundación, en razón a sus características de relleno.

A partir de este nivel existen estratos con las características de resistencia media a firme, que dan las condiciones para pensar en un Sistema de Cimentación Superficial constituido por zapatas aisladas y/o Cimientos corridos que trabajen a presión de contacto directo sobre dichos mantos ya que las cargas que se manejarán están en promedio de 50 Ton/col.

## 9. RECOMENDACIONES.

### 9. a.-RECOMENDACIONES PARTICULARES

#### 1.- Sistema de Cimentación y Presión Admisible

Para este proyecto se pueden diseñar zapatas aisladas de sección rectangular y/o cuadrada, del área necesaria para producir sobre estrato de apoyo una presión máxima de  $19.58 \text{ T/m}^2 = 1.989 \text{ kg/cm}^2$ .

Es posible también el diseño de cimientos corridos de las dimensiones requeridas para fatigar el estrato de apoyo a una presión máxima de  $15.12 \text{ T/m}^2 = 1.534 \text{ kg/cm}^2$ .

Factores De Seguridad Básico o Directos:

Es la relación entre el esfuerzo cortante último resistente o el esfuerzo cortante a la falla y el esfuerzo cortante actuante

**Tabla H.4.7-1**  
**Factores de Seguridad Indirectos  $F_{SICP}$  Mínimos**

Condición	$F_{SICP}$ Mínimo
	Diseño
Carga Muerta + Carga Viva Normal	3.0
Carga Muerta + Carga Viva Máxima	2.5
Carga Muerta + Carga Viva Normal + Sismo de Diseño Seudo estático	1.5

**Tabla H.2.4-1**  
**Factores de Seguridad Básicos Mínimos Directos**

Condición	$F_{SBM}$		$F_{SBUM}$	
	Diseño	Construcción	Diseño	Construcción
Carga Muerta + Carga Viva Normal	1.50	1.25	1.80	1.40
Carga Muerta + Carga Viva Máxima	1.25	1.10	1.40	1.15
Carga Muerta + Carga Viva Normal + Sismo de Diseño Seudo estático	1.10	1.00 (*)	No se permite	No se permite
Taludes – Condición Estática y Agua Subterránea Normal	1.50	1.25	1.80	1.40
Taludes – Condición Seudo-estática con Agua Subterránea Normal y Coeficiente Sísmico de Diseño	1.05	1.00 (*)	No se permite	No se permite

Para el cálculo de la capacidad de carga se utilizará un factor de seguridad mayor al exigido por la norma, de acuerdo con la tabla H.4.7-1 factores de seguridad indirectos mínimos para la etapa de diseño, tomando como condición de acuerdo con análisis estructural; CARGA MUERTA + CARGA VIVA NORMAL, siendo a su vez mayor al mínimo permitido para el  $F_{sbm}$  directo obtenido en la tabla H.2.4-1 de la NSR 10 Título H.

Factor de Seguridad Indirecto = 3.02

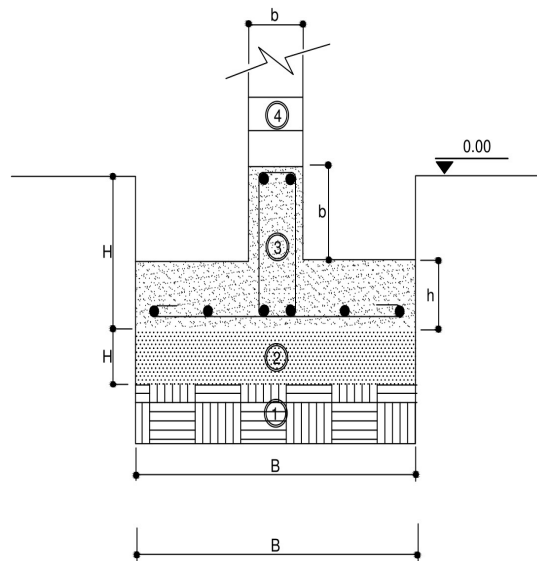
Factor de Seguridad Básico Directo = 1.83



## 2.- Estrato de Apoyo y Cota de Cimentación

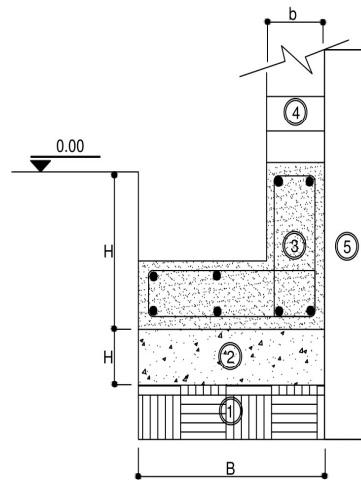
El estrato de apoyo existente corresponde a una arena con algo de arcilla rojiza con vetas amarillas y blancas, de humedad y consistencia media, localizado aproximadamente a **-1.20 m** del nivel del terreno.

2.1.- Se requiere la verificación de vigas de amarre y de enlace, que deben tener 40 cm de altura mínima y deberán calcularse para no permitir una deformación mayor a  $L/480$  de la luz libre entre ejes de columnas. Estas vigas también pueden ser calculadas para tomar una transferencia de carga del 10% de la diferencia de cargas entre columnas contiguas.

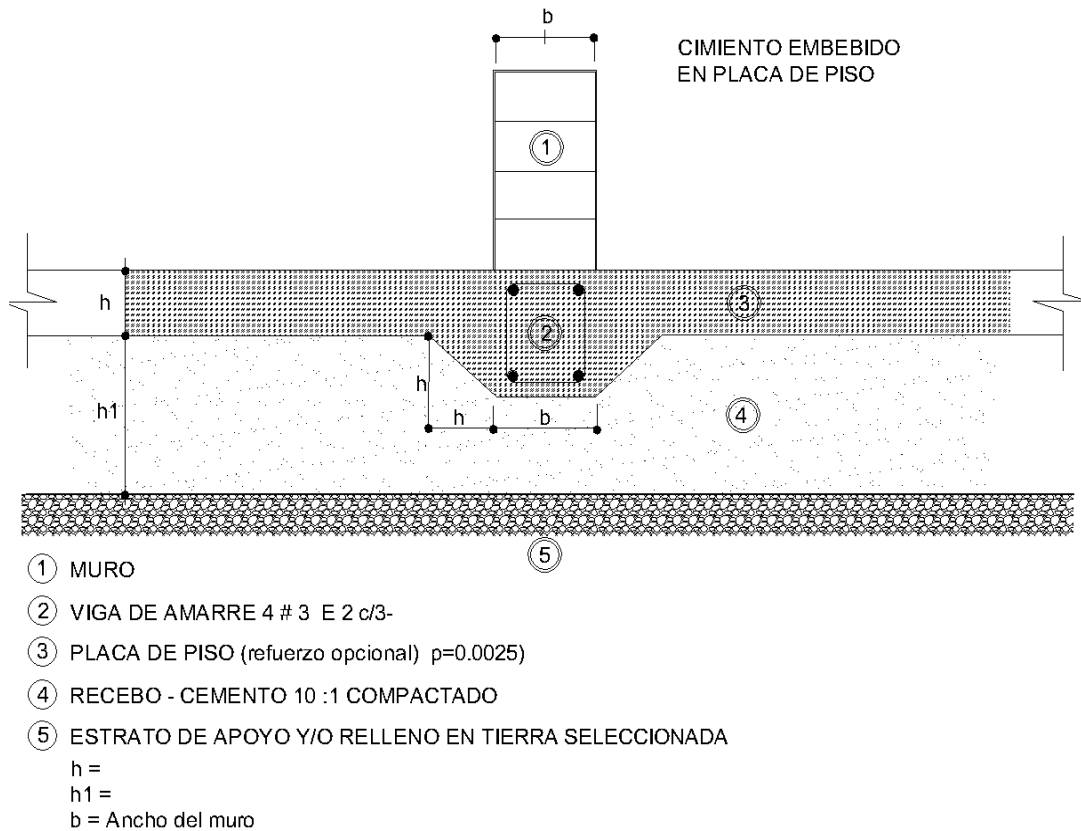


- ① ESTRATO DE APOYO
- ② RECEBO - CEMENTO 10: 1 COMPACTADO AL 95 % ENSAYO PROCTOR
- ③ VIGA DE AMARRE CONCRETO 3.000 PSI SECCION T VoL
- ④ SOBRECEMENTO LADRILLO RECOCIDO IMPERMEABILIZADO
- ⑤ CIMENTO VECINO

ESQUEMA DE CIMENTACIÓN  
CIMENTO CORRIDO DE VIGA  
T INVERTIDA Y/O L



2.2.- Si se existen cimientos corridos, éstos deberán tener vigas de amarre perpendiculares a los mismos y se debe chequear su centro de gravedad para evitar esfuerzos adicionales producidos por volcamiento y/o asentamiento diferencial.



2.3.- Los cimientos de muros perimetrales podrán calcularse sobre cimientos corridos del tipo vigas L apoyadas sobre el estrato descrito en el numeral 2.

2.4.- Los muros interiores que no coincidan con vigas de amarre se pueden apoyar sobre la placa de piso, dejando un pequeño sobre ancho y usando refuerzo nominal.

2.5.- Las placas de piso se reconstruirán en concreto reforzado con mallas electro soldadas o con refuerzo nominal a criterio del Ingeniero Calculista y apoyadas sobre 1 capa de 25 cm en recebo compactado.

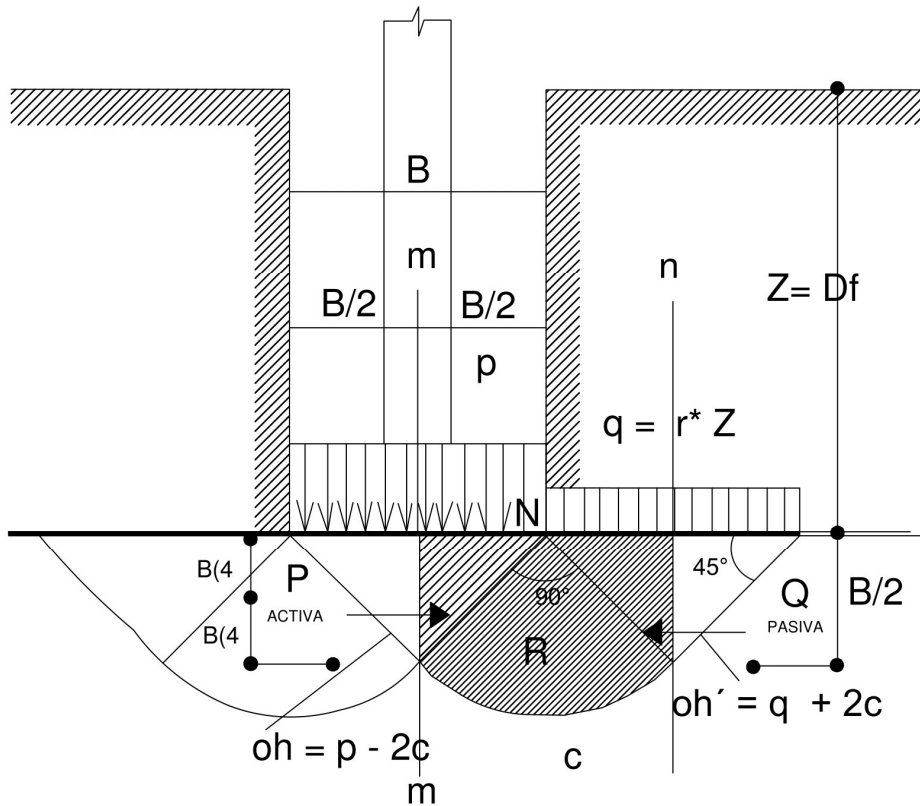


Ilustración 2 POTENCIA ACTIVA

### 3.- Asentamientos

Para el cálculo de los asentamientos se tuvieron en cuenta las cargas aplicadas a los estratos en la profundidad de influencia de la estructura.

En estas condiciones el asentamiento es de aproximadamente 2.28 cm el cual se producirá en un mayor porcentaje durante el proceso de construcción.

El efecto de recompresión elástica producido en el fondo de la excavación es muy bajo y se puede estimar en 1.40 cm el cual sumado al asentamiento de consolidación dará un total de 3.68 cm.

**Tabla H.4.9-1**  
**Valores máximos de asentamientos diferenciales calculados, expresados en**  
**función de la distancia entre apoyos o columnas $l$**

Tipo de construcción	$\Delta$ max
<b>(a)</b> Edificaciones con muros y acabados susceptibles de dañarse con asentamientos menores	$\frac{l}{1000}$
<b>(b)</b> Edificaciones con muros de carga en concreto o en mampostería	$\frac{l}{500}$
<b>(c)</b> Edificaciones con pórticos en concreto, sin acabados susceptibles de dañarse con asentamientos menores	$\frac{l}{300}$
<b>(d)</b> Edificaciones en estructura metálica, sin acabados susceptibles de dañarse con asentamientos menores	$\frac{l}{160}$

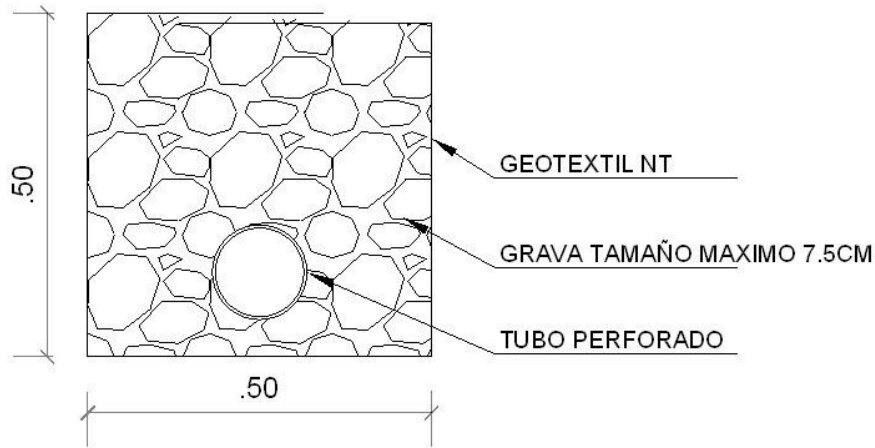
## 9. b.-- Recomendaciones Generales

### 9.b.1.-Excavaciones

Las excavaciones para cimientos se pueden ejecutar a cielo abierto. Es importante que transcurra el menor tiempo posible en el proceso de excavación, relleno de sustitución y aplicación del concreto de limpieza para evitar que el estrato de apoyo se deteriore por acumulación de agua lluvia y/o de escorrentía.

### 9.b 2.-Impermeabilización y Drenaje

Teniendo en cuenta que existe presencia de arenas, se recomienda la construcción de cañuelas y filtros en grava al exterior de los grupos de viviendas para evitar que se infiltren aguas lluvias bajo las placas de cimentación del edificio.



**DETALLE FILTRO**  
 ESC: 1\_25

Ilustración 4. ESQUEMA DE DRENAJE

Diseñar y construir obras de drenajes y protecciones para aislar la humedad. Las instalaciones hidráulicas deben quedar sin fugas. El agua no debe caer cerca de la construcción, colocando: canales en techos y pisos, bajantes y tubos, andenes perimetrales con bombeo hacia afuera y obras para recoger el agua. El diseño de drenajes debe considerar el efecto de aportes de agua de las zonas aledañas.

Se debe verificar el funcionamiento de las redes de hidráulicas, las cuales deben operar correctamente.

Las obras de drenaje: filtros o sub-drenes y canales, deben tener entregas, y deben ir dentro y alrededor de la obra. Las entregas o descoles no deben producir erosión o socavación del suelo.

En la ilustración 4 se muestra un esquema de sub-drenaje, formado por una zanja del ancho mínimo constructivo (0.50 a 0.50 metro) y la profundidad requerida, con una tubería perforada de diámetro mínimo de 0.075 metro (3 pulgadas) con los huecos hacia abajo, con un relleno de grava a su alrededor de 0.05 metro de espesor y en el resto, un relleno de arena y grava sin arcilla ni limo. En la parte superior del sub-dren debe colocarse un plástico para evitar el paso de agua lluvia, porque este solo es para la subterránea, puede ir un canal de concreto o un relleno con un material impermeable de espesor mínimo de 0.3 metro. Revisar la pendiente de la tubería, preferiblemente debe ser mayor o igual a 1%.

### **9.b.3. Control de efectos en construcciones vecinas**

Se recomienda que se instalen mojones topográficos, en la zona frontal del predio y en las construcciones vecinas, con el objeto de hacer lecturas periódicas durante la construcción y verificar que no se presenten hundimientos o deformaciones, que puedan deteriorar la estructura del pavimento. Para los cual se deberá hacer un levantamiento topográfico, antes de comenzar con la construcción de la estructura.

Se recomienda hacer actas de vecindad y registrar las condiciones de las estructuras vecinas, incluyendo agrietamientos, medida de asentamientos diferenciales, registro fotográfico, entre otros.

### **9.b 4. Potencial de expansión**

Como característica especial, todas las arcillas tienen, de una forma u otra, la

propiedad de contraerse cuando pierden humedad y de expandirse cuando la ganan de nuevo según las condiciones ambientales. Como minerales activos se reconocen la montmorilonita, la vermiculita y algunas variedades de haloisita; la particularidad de éstos radica en que tienen la propiedad de "absorber" moléculas de agua dentro de su propia estructura molecular. Las investigaciones actuales están encaminadas a encontrar métodos indirectos que permitan obtener la curva característica suelo-agua a partir de las propiedades básicas del suelo, como la relación de vacíos, saturación, gravedad específica, límite líquido, granulometría y densidad seca.

**Tabla H.9.1-1**  
**Clasificación de suelos expansivos**

Potencial de expansión	Expansión (%) medida en consolidómetro bajo presión vertical de 0.07 kgf/cm <sup>2</sup>	Límite líquido LL, en (%)	Límite de contracción en (%)	Índice de plasticidad, IP, en (%)	Porcentaje de partículas menores de una micra (μ)	Expansión libre EL en (%), medida en probeta
Muy alto	> 30	> 63	< 10	> 32	> 37	> 100
Alto	20 – 30	50 – 63	6 – 12	23 – 45	18 – 37	> 100
Medio	10 – 20	39 – 50	8 – 18	12 – 34	12 – 27	50 100
Bajo	< 10	< 39	> 13	< 20	< 17	< 50

Debido al potencial de expansión "MEDIO" según la NSR 10, del material arcillosos que se encuentra en el suelo de fundación, se deben considerar todas las medidas necesarias para contrarrestar el efecto de una posible expansión en las arcillas, realizando la alteración de dicho material, con la aplicación de Cal mezclada superficialmente o en su defecto inyectada a presión, pero para estar más seguros presentamos diferentes métodos y recomendaciones

Método para determinar si un suelo es muy compresible. - Es a través del límite líquido (LL). Se determina el Índice de Compresión C<sub>c</sub>, con la fórmula aproximada dada por Terzaghi:



$$C_c = 0.009 \text{ (LL - 10\%)}$$

Luego clasificamos la compresibilidad con la siguiente tabla dada por Crespo Villalaz:

<b>Cc</b>	<b>Compresibilidad</b>
0.00 a 0.19	Baja
0.20 a 0.39	Media
0.40 a más	Alta

Curva de compresibilidad en escala logarítmica.

También a través del Coeficiente de variación volumétrica  $m_v$ :

a) Realice la Curva de compresibilidad (presión X vs relación de vacíos Y) en escala aritmética

b) Determine la pendiente del tramo virgen:

$$a_v = \Delta e / \Delta p = \text{coeficiente de compresibilidad} = \text{cm}^2/\text{kg}$$

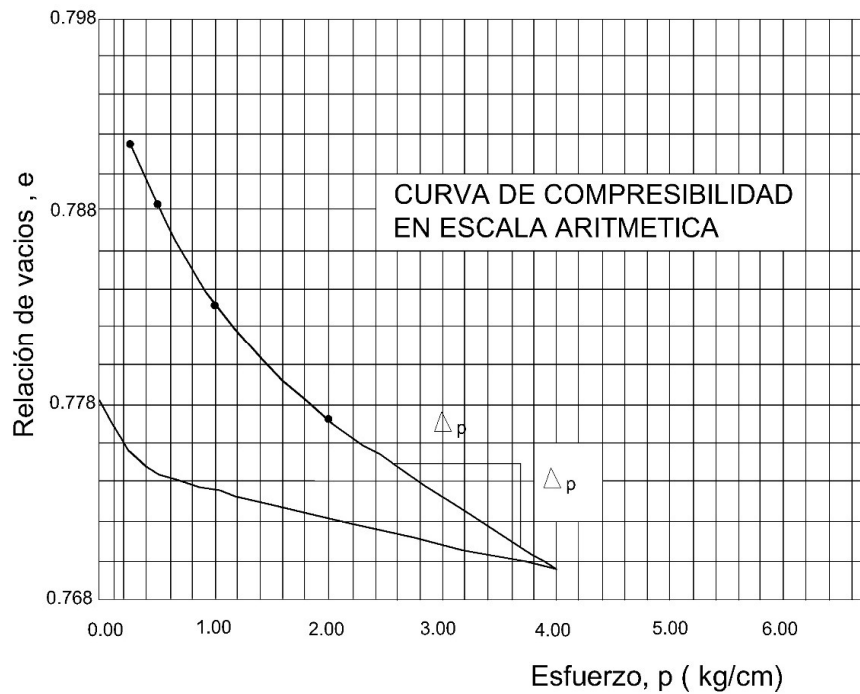
c) Calcule  $m_v = \text{coeficiente de variación volumétrica}$ .

$$m_v = a_v / (1 + e) = \text{cm}^2/\text{kg}$$

$e = \text{relación de vacíos}$

d) Luego clasifique la compresibilidad según la tabla dada por m. J. Tomlinson:

Compresibilidad	$m_v$ (cm <sup>2</sup> /kg)
Muy baja	Menor que 0.005
Baja	0.005 - 0.010
Media	0.010 - 0.030
Alta	0.030 - 0.150
Muy alta	Mayor que 0.150



#### 9.b.4.1.-Medidas preventivas

Con el fin de alterar lo menos posible el equilibrio dinámico del subsuelo y reducir los potenciales cambios de humedad/succión, y por tanto las expansiones/contracciones del subsuelo las siguientes acciones preventivas son útiles:

Cubrir el terreno sobre el cual se proyectan las edificaciones con membranas impermeables que impidan la filtración de agua hacia el suelo expansivo.

- **Barreras de humedad** — Colocadas perimetralmente a la estructura pueden coadyuvar al equilibrio; debe evitarse, sin embargo, que se establezcan canales de humedecimiento como fenómenos termo osmóticos que hagan inútil la precaución.
- **Drenaje de las aguas de escorrentía** — Debe proveerse un adecuado drenaje alrededor de las estructuras por medio de pendientes perimetrales (2-10%), cunetas revestidas, áreas pavimentadas y canalizaciones de las aguas lluvias.
- **Sub-drenajes** — para interceptar los flujos de aguas subterráneas, así como para disipar las presiones artesianas de los o cauces existentes.

#### 9.b.4.2.-Puede lograrse por cualquiera de los siguientes métodos:

- **Reemplazo** — Consiste en la excavación y el reemplazo de la capa expansiva, cuando su espesor y profundidad no lo hacen prohibitivamente costoso.
- **Tratamiento con cal** — La mezcla superficial de cal con el suelo potencialmente expansivo o su inyección a presión es benéfica, según el estado del suelo (agrietado o no) y el método de aplicación (inyección a presión o mezcla mecánica). Se debe disponer del equipo adecuado para pulverizar el suelo en el sitio del tratamiento, o para realizar inyecciones a presión.
- **Pre humedecimiento** — El pre humedecimiento supone la expansión previa a

la colocación de la estructura y el mantenimiento de esa humedad bajo una placa o un recubrimiento impermeable. Se debe tener presente que generalmente se requiere mucho tiempo para lograr que el agua penetre en la zona activa. Adicionalmente, la pérdida de capacidad de soporte dificulta las operaciones de construcción.

**9.b.4.3.-Elusión de los suelos expansivos** Se puede intentar por los siguientes procedimientos:

- **Profundizar los cimientos** — Hasta pasar, al menos parcialmente, la profundidad de la zona crítica donde la expansión es más severa.
- **Pilotes pre excavados** — A la profundidad necesaria para desarrollar la carga; puede completarse con el aislamiento del fuste del pilote en la zona activa. También puede considerarse el uso de micro pilotes para reducir la fricción del fuste en la zona activa
- **Placas aéreas** — Para evitar el contacto de los pisos con el suelo potencialmente expansivo y mantener el gradiente térmico existente en el subsuelo.

## 10. LIMITACIONES.

1.- Las recomendaciones de este informe se basan en la suposición de que las

condiciones del subsuelo no se desvían apreciablemente de aquellas obtenidas en los sondeos. Si durante la construcción se encuentra cualquier variación o condición Indeseable, se deberá notificar al Ingeniero de Suelos con el fin de dar las recomendaciones complementarias.

2.- Es recomendable que un Ingeniero supervise las etapas de excavación y apruebe el nivel de cimentación.

Gustosamente atenderemos en nuestras oficinas sus consultas respecto al presente informe.

## 11. ENSAYOS DE LABORATORIO.

De las muestras alteradas con cuchara hendida y del split spoon se obtuvieron los ensayos para clasificación correspondientes a Humedad Natural, Límites de Atterberg y Granulometría. Para ensayos de compresión inconfiada, peso unitario, peso específico consolidación y otros, se usaron las muestras inalteradas de los tubos shelby.

## 12. RESUMENES DE LABORATORIOS RESISTENCIA

IDENTIFICACIÓN			RESISTENCIA					OBSERVACIONES
Sondeo No.	Prof. (m)	Muestra No.	C.I. Kg/cm <sup>2</sup>	Cu Kg/cm <sup>2</sup>	P.B. Kg/cm <sup>2</sup>	& (t/m <sup>3</sup> )	N.S.P.T. g/pie	
1	1.50	1	1.22	0.61	3.00	1.63	16	<b>N.F. 3,00</b>
1	3.00	2	1.32	0.66	3.10	1.64	24	
1	4.50	3	1.00	0.50	2.50	1.61	23	
1	6.00	4			3.20		22	
1	7.50	5			3.50		38	
1	9.00	6	1.20	0.60	3.00	1.68	30	
1	10.50	7	1.57	0.79	3.00	1.66	31	
1	12.00	8	1.51	0.76	3.00	1.67	32	
1	13.50	9			3.50		35	
1	15.00	10	1.01	0.51	3.50	1.64	33	
2	1.50	11	0.48	0.24	3.00	1.56	14	
2	3.00	12	0.92	0.46	2.00	1.74	20	
2	4.50	13			3.00		25	
2	6.00	14	1.09	0.55	3.00	1.64	26	
3	1.50	15	0.30	0.15	3.00	1.67	15	<b>N.F.4,00</b>
3	3.00	16			3.00		16	
3	4.50	17	0.81	0.41	1.50	1.63	6	
3	6.00	18	1.04	0.52	1.50	1.63	8	
4	1.50	19	0.20	0.10	3.50	1.56	10	
4	3.00	20	0.83	0.42	2.50	1.58	17	
4	4.50	21	1.00	0.50	2.50	1.67	12	
4	6.00	22			2.50		15	
4	7.50	23	1.17	0.59	2.50	1.66	20	
4	9.00	24			2.80		22	
4	10.50	25			3.00		15	
4	12.00	26			3.00		18	
4	13.50	27	1.19	0.60	3.50	1.52	29	
4	15.00	28			3.50		30	

## CALCULO DE PESO UNITARIO

PROYECTO: VIVIENDA MULTIFAMILIAR

LOCALIZACION: AV KR 50 # 1D - 23

FECHA: 2/05/2020

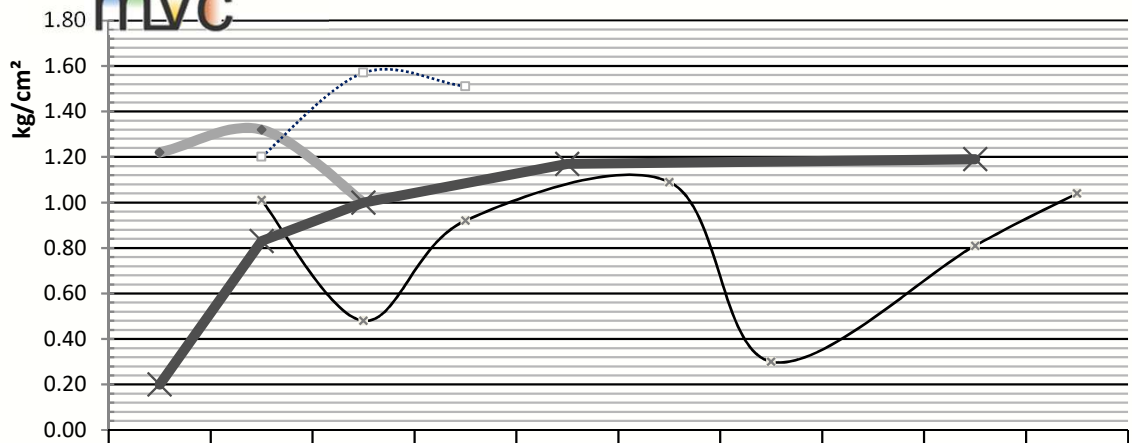
DIRIGIDO A:



SONDEO	PROF.	W. MUESTRA	W MUES PARAFINADA	W MUESTRA SUMERGIDA	HUMEDAD NATURAL	P.U.H	P.U.S.
	(m)	(g)	(g)	(g)	(%)	(t/m3)	(t/m3)
1	1.50	163.7	166.9	83.2	25.00%	2.04	<b>1.63</b>
1	3.00	164.5	167.6	82.5	22.88%	2.01	<b>1.64</b>
1	4.50	166.4	169.4	85.1	27.87%	2.05	<b>1.61</b>
1	6.00	169.4	171.1	85.5	23.82%	2.02	<b>1.63</b>
1	7.50	170.1	170.9	89.1	24.25%	2.10	<b>1.69</b>
1	9.00	161.1	163.9	80.1	19.01%	1.99	<b>1.68</b>
1	10.50	166.5	169.1	85.9	24.53%	2.07	<b>1.66</b>
1	12.00	159.0	161.8	80.0	20.62%	2.02	<b>1.67</b>
1	13.50	160.9	162.8	81.1	23.55%	2.02	<b>1.64</b>
1	15.00	164.2	166.9	87.9	31.51%	2.16	<b>1.64</b>
2	1.50	169.2	170.2	86.1	30.27%	2.04	<b>1.56</b>
2	3.00	185.1	188.2	97.3	21.62%	2.11	<b>1.74</b>
2	4.50	191.3	195.5	96.0	32.59%	2.02	<b>1.52</b>
2	6.00	188.6	190.1	92.9	20.36%	1.97	<b>1.64</b>
3	1.50	149.1	150.3	77.2	24.40%	2.08	<b>1.67</b>
3	3.00	188.2	190.1	97.1	21.06%	2.07	<b>1.71</b>
3	4.50	180.6	182.7	90.1	22.97%	2.00	<b>1.63</b>
3	6.00	181.2	190.8	90.9	23.89%	2.03	<b>1.63</b>
4	1.50	185.5	187.3	89.4	23.72%	1.93	<b>1.56</b>
4	3.00	180.1	185.4	85.5	21.15%	1.91	<b>1.58</b>
4	4.50	165.9	167.8	88.7	28.97%	2.15	<b>1.67</b>
4	6.00	169.8	171.9	85.6	26.05%	2.02	<b>1.60</b>
4	7.50	168.7	170.1	86.9	24.65%	2.07	<b>1.66</b>
4	9.00	165.4	178.9	85.1	30.58%	2.09	<b>1.60</b>
4	10.50	170.4	172.7	86.2	29.99%	2.03	<b>1.56</b>
4	12.00	175.4	176.9	83.9	23.98%	1.92	<b>1.55</b>
4	13.50	176.7	179.8	84.2	25.72%	1.92	<b>1.52</b>
4	15.00	169.9	180.1	84.9	23.74%	2.02	<b>1.63</b>

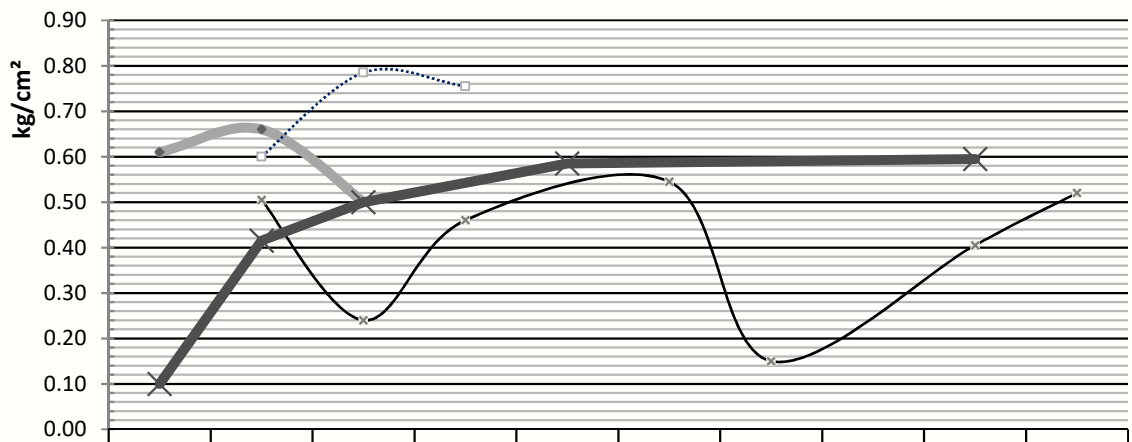


## RESISTENCIA C.I.



PROF. (m)	13.50	15.00	1.50	3.00	4.50	6.00	1.50	3.00	4.50	6.00
SONDEO 1	1.22	1.32	1.00							
SONDEO 2		1.20	1.57	1.51						
SONDEO 3		1.01	0.48	0.92		1.09	0.30		0.81	1.04
SONDEO 4	0.20	0.83	1.00		1.17				1.19	

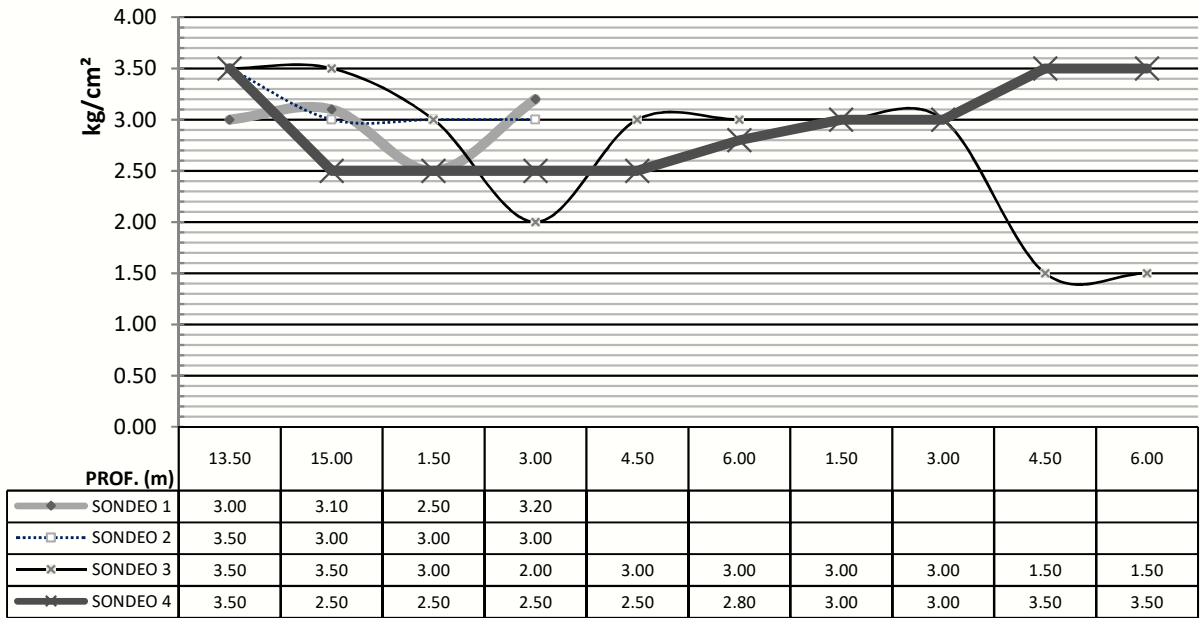
## RESISTENCIA Cu



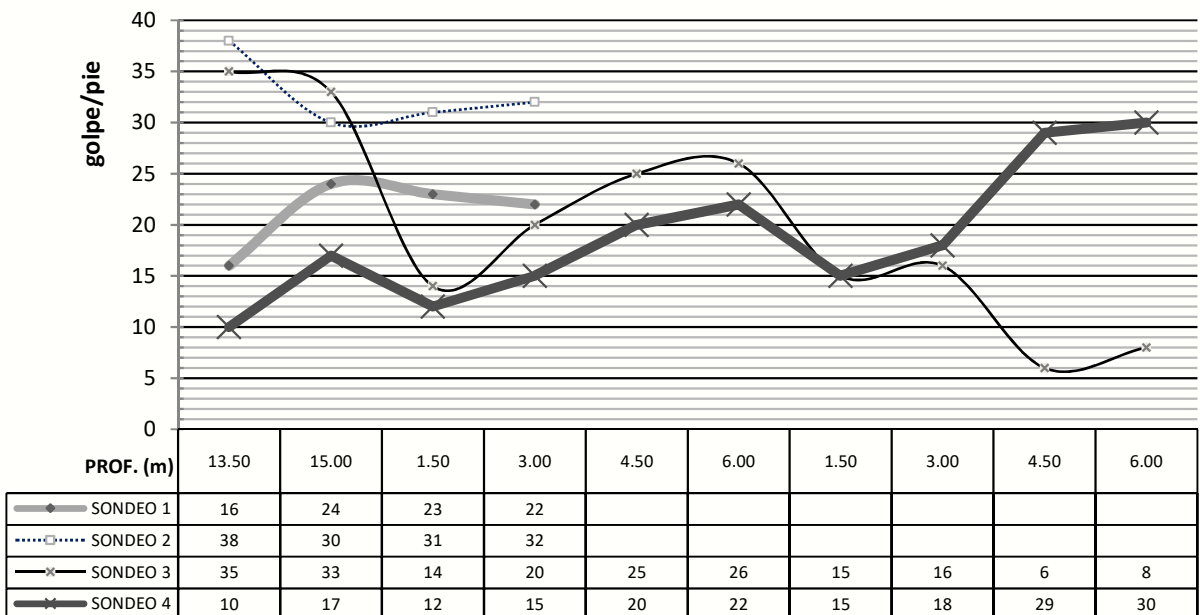
PROF. (m)	13.50	15.00	1.50	3.00	4.50	6.00	1.50	3.00	4.50	6.00
SONDEO 1	0.61	0.66	0.50							
SONDEO 2		0.60	0.79	0.76						
SONDEO 3		0.51	0.24	0.46		0.55	0.15		0.41	0.52
SONDEO 4	0.10	0.42	0.50		0.59				0.60	



## RESISTENCIA P.B.



## RESISTENCIA N.S.P.T.





**ENSAYOS DE HUMEDAD NATURAL**

SONDEO No.	PROF m	MUESTRA No.	PSH+R Gr.	PSC+R Gr.	PR Gr.	PA Gr.	PSC Gr.	W (%)
1	1.50	1	31.23	28.77	18.93	2.46	9.84	25.00%
1	3.00	2	31.87	29.20	17.53	2.67	11.67	22.88%
1	4.50	3	32.47	29.17	17.33	3.30	11.84	27.87%
1	6.00	4	32.90	29.97	17.67	2.93	12.30	23.82%
1	7.50	5	32.90	29.90	17.53	3.00	12.37	24.25%
1	9.00	6	33.40	31.10	19.00	2.30	12.10	19.01%
1	10.50	7	33.62	30.78	19.20	2.84	11.58	24.53%
1	12.00	8	33.55	31.15	19.50	2.40	11.65	20.62%
1	13.50	9	35.42	32.01	17.55	3.41	14.46	23.55%
1	15.00	10	34.15	30.39	18.45	3.76	11.94	31.51%
2	1.50	11	31.93	28.57	17.47	3.36	11.10	30.27%
2	3.00	12	32.40	30.00	18.90	2.40	11.10	21.62%
2	4.50	13	32.03	28.50	17.67	3.53	10.83	32.59%
2	6.00	14	31.97	29.73	18.73	2.24	11.00	20.36%
3	1.50	15	31.27	28.23	15.77	3.04	12.46	24.40%
3	3.00	16	34.00	31.13	17.50	2.87	13.63	21.06%
3	4.50	17	32.00	29.03	16.10	2.97	12.93	22.97%
3	6.00	18	32.90	30.20	18.90	2.70	11.30	23.89%
4	1.50	19	31.93	29.10	17.17	2.83	11.93	23.72%
4	3.00	20	31.50	29.30	18.90	2.20	10.40	21.15%
4	4.50	21	32.70	29.60	18.90	3.10	10.70	28.97%
4	6.00	22	33.40	30.30	18.40	3.10	11.90	26.05%
4	7.50	23	32.20	28.70	14.50	3.50	14.20	24.65%
4	9.00	24	33.95	29.50	14.95	4.45	14.55	30.58%
4	10.50	25	33.90	29.66	15.52	4.24	14.14	29.99%
4	12.00	26	32.85	29.48	15.43	3.37	14.06	23.98%
4	13.50	27	32.74	29.36	16.22	3.38	13.14	25.72%
4	15.00	28	33.26	30.14	17.00	3.12	13.15	23.74%



## CONTROL INDIVIDUAL DE SONDEOS

2.1 Versión Original

OBRA: **AV KR 50 # 1D - 23**

PERFORACION **1**  
HOJA **1 DE 2**

PROF. [m]	DESCRIPCION	HUMEDAD	CONSISTENCIA	TIPO MUESTRA	CLAS. U.S.C	MUESTRAS			
						PROF.	NIVEL FREATICO	PENETRACION ESTANDAR G/P	P.B. Kg/cm <sup>2</sup>
	PLACA DE CONCRETO			SS					
1	RELLENO DE ARENA AMARILLA			SS					
2	ARENA CON ALGO DE LIMO COLOR HABANO CLARO, DE HUMEDAD MEDIA Y CONSISTENCIA COMPACTA	M	C	SS	CL	1.50		16	3.00
3	ARENA ARCILLOSA COLOR AMARILLO CLARO, DE HUMEDAD ALTA Y CONSISTENCIA MUY COMPACTA	A	MC	SS	MH	3.00	N.F. 3,00	24	3.10
4	ARCILLA CON ALGO DE ARENA, COLOR CAFÉ CLARO Y HABANO CLARO, DE HUMEDAD ALTA Y CONSISTENCIA MUY COMPACTA	A	MC	SS	CL	4.50		23	2.50
5	ARENA ARCILLOSA DE COLOR CAFÉ CLARO, DE HUMEDAD MEDIA Y CONSISTENCIA MUY COMPACTA	M	MC	SS	SC				
6	ARENA ARCILLOSA DE COLOR CAFÉ CLARO, DE HUMEDAD MEDIA Y CONSISTENCIA MUY COMPACTA					6.00		22	3.20
7	ARENA ARCILLOSA DE COLOR CAFÉ OSCURO, DE HUMEDAD MEDIA Y CONSISTENCIA DURA	M	D	SS	SC	7.50		38	3.50
8									
9	ARENA DE COLOR CAFÉ CLARO, DE HUMEDAD MEDIA Y CONSISTENCIA MUY COMPACTA	M	MC	SS	CH	9.00		30	3.00
10									

OBSERVACIONES

SS: Split Spoon

SPT: Ensayo de Penetración Estándar

G/P: Golpes por Pie

L: Muestras por Lavado



# CONTROL INDIVIDUAL DE SONDEOS

2.1 Versión Original

OBRA: **AV KR 50 # 1D - 23**

PERFORACION **1**  
HOJA **2 DE 2**

PROF. [m]	DESCRIPCION	HUMEDAD	CONSISTENCIA	TIPO MUESTRA	CLAS. U.S.C	MUESTRAS			
						PROF.	NIVEL FREATICO	PENETRACION ESTANDAR G/P	P.B. Kg/cm <sup>2</sup>
11	ARCILLA ARENOSA DE COLOR CAFÉ CLARO, DE HUMEDAD MEDIA Y CONSISTENCIA MUY COMPACTA	M	MC	SS	CH	10.50		31	3.00
12						12.00		32	3.00
13	ARENOSA DE COLOR AMARILLO OSCURO CON VETAS CAFÉS, DE HUMEDAD MEDIA Y CONSISTENCIA MUY COMPACTA	M	MC	SS	CH	13.50		35	3.50
14						15.00		33	3.50
15									
16									
17									
18									
19									
20									

OBSERVACIONES

SS: Split Spoon

SPT: Ensayo de Penetración Estándar

G/P: Golpes por Pie

L: Muestras por Lavado



## CONTROL INDIVIDUAL DE SONDEOS

2.1 Versión Original

OBRA: **AV KR 50 # 1D - 23**

**PERFORACION 2**  
**HOJA 1 DE 1**

PROF. [m]	DESCRIPCION	HUMEDAD	CONSISTENCIA	TIPO MUESTRA	CLAS. U.S.C	MUESTRAS		
						PROF.	NIVEL FREATICO	PENETRACION ESTANDAR G/P
	PLACA DE CONCRETO			SS				
1	RELLENO DE ARENA AMARILLA			SS				
2	ARENA CON ALGO DE LIMO COLOR GRIS CLARO CON HABANO CLARO, DE HUMEDAD MEDIA Y CONSISTENCIA COMPACTA	M	C	SS	CL	1.50	14	3.00
3	LIMO ARCILLOSO DE COLOR GRIS CLARO, DE HUMEDAD MEDIA Y CONSISTENCIA MUY COMPACTA	M	MC	SS	ML	3.00	20	2.00
4	ARCILLA CON ALGO DE ARENA DE COLOR GRIS CON HABANO CLARO, DE HUMEDAD MEDIA Y CONSISTENCIA MUY COMPACTA	M	MC	SS	CL	4.50	25	3.00
5						6.00	26	3.00
6								
7								
8								
9								
10								

OBSERVACIONES

---



---



---



---

SS: Split Spoon  
 SPT: Ensayo de Penetración Estándar  
 G/P: Golpes por Pie  
 L: Muestras por Lavado



# CONTROL INDIVIDUAL DE SONDEOS

2.1 Versión Original

OBRA: **AV KR 50 # 1D - 23**

PERFORACION **3**

HOJA **1 DE 1**

PROF. [m]	DESCRIPCION	HUMEDAD	CONSISTENCIA	TIPO MUESTRA	CLAS. U.S.C	MUESTRAS			
						PROF.	NIVEL FREATICO	PENETRACION ESTANDAR G/P	P.B. Kg/cm <sup>2</sup>
	PLACA DE CONCRETO			SS					
1	RELLENO DE ARENA AMARILLA			SS					
2	ARENA GRIS DE HUMEDAD BAJA Y CONSISTENCIA COMPACTA	B	C	SS	CL	1.50		15	3.00
3	ARENA CON ALGO DE ARCILLA DE COLOR GRIS CLARO CON CAFÉ CLARO, DE HUMEDAD MEDIA Y CONSISTENCIA MUY COMPACTA	M	MC	SS	ML	3.00		16	3.00
4							N.F. 4,00		
5	ARCILLA CON ALGO DE ARENA DE COLOR CAFÉ CLARO, DE HUMEDAD ALTA Y CONSISTENCIA MEDIA	A	M	SS	CL	4.50		6	1.50
6						6.00		8	1.50
7									
8									
9									
10									

OBSERVACIONES

---

---

---

---

SS: Split Spoon

SPT: Ensayo de Penetración Estándar

G/P: Golpes por Pie

L: Muestras por Lavado



## CONTROL INDIVIDUAL DE SONDEOS

2.1 Versión Original

OBRA: **AV KR 50 # 1D - 23**

**PERFORACION 4**  
**HOJA 1 DE 2**

PROF. [m]	DESCRIPCION	HUMEDAD	CONSISTENCIA	TIPO MUESTRA	CLAS. U.S.C	MUESTRAS		
						PROF.	NIVEL FREATICO	PENETRACION ESTANDAR G/P
	PLACA DE CONCRETO			SS				
1	RELLENO DE ARENA AMARILLA			SS				
2	ARENA CON ARCILLA DE COLOR GRIS, DE HUMEDAD BAJA Y CONSISTENCIA COMPACTA	B	C	SS	CL	1.50	10	3.50
3	ARCILLA CON ALGO DE ARENA DE COLOR CAFÉ CLARO, DE HUMEDAD MEDIA Y CONSISTENCIA MUY COMPACTA	M	MC	SS	CL	3.00	17	2.50
4	ARCILLA ARENOSA DE COLOR CAFÉ CON GRIS CLARO, DE HUMEDAD MEDIA Y CONSISTENCIA COMPACTA					4.50	12	2.50
5						6.00		
6	LIMO ARCILLOSO COLOR AMARILLO CLARO, DE HUMEDAD MEDIA Y CONSISTENCIA MUY COMPACTA	M	MC	SS	MH	7.50	20	2.50
7	ARENA ARCILLOSA DE COLOR CAFÉ CLARO, DE HUMEDAD MEDIA Y CONSISTENCIA MUY COMPACTA					9.00	22	2.80
8						9.00		
9								
10								

OBSERVACIONES

---



---



---



---

SS: Split Spoon  
SPT: Ensayo de Penetración Estándar  
G/P: Golpes por Pie  
L: Muestras por Lavado



# CONTROL INDIVIDUAL DE SONDEOS

PERFORACION **4**  
HOJA **2 DE 2**

2.1 Versión Original

OBRA: **AV KR 50 # 1D - 23**

PROF. [m]	DESCRIPCION	HUMEDAD	CONSISTENCIA	TIPO MUESTRA	CLAS. U.S.C	MUESTRAS			
						PROF.	NIVEL FREATICO	PENETRACION ESTANDAR G/P	P.B. Kg/cm <sup>2</sup>
11	ARENA ARCILLOSA DE COLOR CAFÉ OSCURO, DE HUMEDAD MEDIA Y CONSISTENCIA COMPACTA	M	C	SS	SC	10.50		15	3.00
12	ARCILLA ARENOSA DE COLOR CAFÉ CLARO, DE HUMEDAD MEDIA Y CONSISTENCIA MUY COMPACTA	M	MC	SS	CH	12.00		18	3.00
13						13.50		29	3.50
14						15.00		30	3.50
15									
16									
17									
18									
19									
20									

OBSERVACIONES

SS: Split Spoon

SPT: Ensayo de Penetración Estándar

G/P: Golpes por Pie

L: Muestras por Lavado



**ANEXO 3 - CASO DE ESTUDIO - ANÁLISIS DE ENERGÍA Y EFICIENCIA**

Sondeo	Profundidad (m)	Nf	N(60)	$\Delta p$ (cm)	Pe*	E entregada	Eficiencia (%)	N (EFV)	$\Delta N$
1	1.5	16	12	1.88	48.85	36.743	75.21	20	8
	3	24	18	1.25	48.44	36.409	75.16	30	12
	4.5	23	17.25	1.30	48.48	36.438	75.16	29	12
	6	22	16.5	1.36	48.52	36.469	75.17	28	11
	7.5	38	28.5	0.79	48.14	36.162	75.11	48	19
	9	30	22.5	1.00	48.28	36.275	75.13	38	15
	10.5	31	23.25	0.97	48.26	36.257	75.13	39	16
	12	32	24	0.94	48.24	36.241	75.13	40	16
	13.5	35	26.25	0.86	48.19	36.198	75.12	44	18
	15	33	24.75	0.91	48.22	36.226	75.13	41	17
2	1.5	14	10.5	2.14	49.03	36.89	75.24	18	7
	3	20	15	1.50	48.61	36.54	75.18	25	10
	4.5	25	18.75	1.20	48.41	36.38	75.15	31	13
	6	26	19.5	1.15	48.38	36.36	75.15	33	13
3	1.5	15	11.25	2.00	48.93	36.81	75.22	19	8
	3	16	12	1.88	48.85	36.74	75.21	20	8
	4.5	6	4.5	5.00	50.90	38.42	75.48	8	3
	6	8	6	3.75	50.08	37.75	75.37	10	4
4	1.5	10	7.5	3.00	49.59	37.35	75.31	13	5
	3	17	12.75	1.76	48.78	36.68	75.20	21	9
	4.5	12	9	2.50	49.26	37.08	75.27	15	6
	6	15	11.25	2.00	48.93	36.81	75.22	19	8
	7.5	20	15	1.50	48.61	36.54	75.18	25	10
	9	22	16.5	1.36	48.52	36.47	75.17	28	11
	10.5	15	11.25	2.00	48.93	36.81	75.22	19	8
	12	18	13.5	1.67	48.72	36.63	75.19	23	9
	13.5	29	21.75	1.03	48.30	36.29	75.14	36	15
	15	30	22.5	1.00	48.28	36.27	75.13	38	15

## ANEXO 4 - ANÁLISIS DE DATOS - VARIACIÓN DEL SISTEMA

### N60 EFV - VARIACIÓN DE LA LONGITUD DE LAS VARILLAS

Nf	N	Δp (m)	Lv 1		Lv 3		Lv 5		Lv 10		
			campo	60	Eficiencia	N60 (evf)	Eficiencia	N60 (evf)	Eficiencia	N60 (evf)	Eficiencia
1	1	0.3000		107.30	2	108.88	2	110.42	2	114.09	2
5	4	0.0600		82.06	7	81.86	7	81.66	7	81.11	7
10	8	0.0300		78.90	13	78.49	13	78.06	13	76.99	13
15	11	0.0200		77.85	19	77.36	19	76.87	19	75.62	19
20	15	0.0150		77.33	26	76.80	26	76.27	25	74.93	25
25	19	0.0120		77.01	32	76.46	32	75.91	32	74.52	31
30	23	0.0100		76.80	38	76.23	38	75.67	38	74.25	37
35	26	0.0086		76.65	45	76.07	44	75.50	44	74.05	43
40	30	0.0075		76.54	51	75.95	51	75.37	50	73.90	49
45	34	0.0067		76.45	57	75.86	57	75.27	56	73.79	55
50	38	0.0060		76.38	64	75.78	63	75.19	63	73.70	61

### N60 EFV - VARIACIÓN DEL PESO DEL MATILLO

Nf	N	Δp (m)	60		63.5		65		70		
			campo	60	Eficiencia	N60 (evf)	Eficiencia	N60 (evf)	Eficiencia	N60 (evf)	Eficiencia
1	1	0.3000		103.09	2	108.88	2	111.37	2	114.68	2
5	4	0.0600		77.39	6	81.86	7	83.78	7	86.33	7
10	8	0.0300		74.18	12	78.49	13	80.33	13	82.79	14
15	11	0.0200		73.11	18	77.36	19	79.18	20	81.61	20
20	15	0.0150		72.57	24	76.80	26	78.61	26	81.02	27
25	19	0.0120		72.25	30	76.46	32	78.26	33	80.67	34
30	23	0.0100		72.04	36	76.23	38	78.03	39	80.43	40
35	26	0.0086		71.89	42	76.07	44	77.87	45	80.26	47
40	30	0.0075		71.77	48	75.95	51	77.74	52	80.13	53
45	34	0.0067		71.68	54	75.86	57	77.65	58	80.04	60
50	38	0.0060		71.61	60	75.78	63	77.57	65	79.96	67

**ANEXO 5 - ANGULO DE FIRCCION INTERNA DEL SUELO PROF 1.50M**

<b>DF</b>	1.2
<b>CLASIFICACION SUCS</b>	SC
<b>NIVEL FREATICO m</b>	3

SONDEO	Profundidad (m)	N.F.	$\gamma$	N.S.P.T	N (60)	CN	N.F	a	N1 60	$\Phi$
			(t/m3)	g/pie					golpes	°
1	1.5	3	1.63	16	12	2.00	1	0.8	18	32
2	1.5	0	1.56	14	11	2.00	1	0.8	16	
3	1.5	4	1.67	15	11	2.00	1	0.8	17	
4	1.5	0	1.56	10	8	2.00	1	0.8	11	

SONDEO	Profundidad (m)	N.F.	$\gamma$	N.S.P.T	N60 (EFV)	CN	Nf	a	N1 60 EFV	$\Phi$
			(t/m3)	g/pie					golpes	°
1	1.5	3	1.63	16	21	2.00	1	0.8	31	35
2	1.5	0	1.56	14	18	2.00	1	0.8	27	
3	1.5	4	1.67	15	19	2.00	1	0.8	29	
4	1.5	0	1.56	10	13	2.00	1	0.8	19	