

**UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES
VALPARAÍSO - CHILE**



**“CORRELACIÓN ENTRE EQUIPOS
ESTÁNDAR Y EQUIPO ROLATEC RL-48 DE
ALTA EFICIENCIA, EN EL ENSAYE DE
PENETRACIÓN ESTÁNDAR”**

MIGUEL ANDRÉS FARÍAS NAVARRETE

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
CONSTRUCTOR CIVIL**

Profesor Guía: Miguel Petersen Acevedo

2019

*A mis padres, Mónica y Moisés,
por su amor incondicional.
A mi hermana, Evelyn,
que este trabajo sirva de inspiración.*

*"Cuando no se tiene el coraje de vivir como se piensa,
se termina pensando como se vive"*

AGRADECIMIENTOS

Agradecer al Profesor Miguel Petersen, por su paciencia, disposición y voluntad para con mi trabajo de título. Agradecer también a los profesores de la comisión, Sres. Sergio Carmona y Jaime Musso, por sus aportes en la revisión de la memoria.

Agradecer al Laboratorio LEMCO de la Universidad y a sus operarios por el buen ambiente y la cordialidad mientras pude trabajar ahí. También agradezco al Sr. Paul Gálvez, por su paciencia y gran motivación.

Agradecer a las enormes personas que tuve la suerte de conocer y compartir durante mi experiencia en la Universidad (académicos, estudiantes, trabajadores). Me llevo las amistades y el recuerdo de todos los buenos momentos.

RESUMEN

El ensaye de penetración estándar (Nch 3364-2014) mide la resistencia de terreno a través del rechazo NSPT, contabilizado como n° de golpes sobre pie de avance de una serie de barras de acero huecas terminadas en un cilindro muestreador (*split-spoon* o cuchara partida) al ser golpeadas repetidamente por una masa de 63,5 kg de peso cayendo desde 76 cm de altura.

Los equipos usuales no automáticos para ejecutar estos tipos de sondajes presentan una eficiencia en su desempeño del orden del 60%. Para nuevos equipos tales como el equipo ROLATEC RL 48 y la sonda *Acker Drill* que posee el laboratorio LEMCO de la UTFSM, se presenta una eficiencia bastante mayor en la ejecución del ensaye.

Este trabajo pretende describir los equipos y el ensaye propiamente tal, y a través de resultados reales comparar eficiencias, además de presentar el típico análisis estratigráfico del sondaje SPT comparado con los resultados del ensayo ReMi realizados en una misma locación por el LEMCO, ensaye este último basado en microtemores, y que mide la velocidad de la onda de corte V_s del terreno

ABSTRACT

The standard penetration is the measure resistance of soil strata to penetration through the N_{SPT} , which corresponds to the number of hits that a series of steel bars ending in a cylinder advances as they are repeatedly struck by a 63,5 kg mass falling from 76 cm in height.

The usual equipment to execute these types of drilling has an efficiency of 60%. For new equipment such as the ROLATEC RL 48 L or equipment Acker-Drill that the LEMCO laboratory of the UTFSM has, it presents a much greater efficiency in the execution of the assay.

The purpose of this paper is to describe the equipment and the test itself, and, through results, to compare efficiencies. Also presented is the stratigraphic analysis of SPT drilling compared to the results of the micro refraction fear (ReMi) method performed at the same location by LEMCO to estimate the cut wave velocity profiles in the soil.

GLOSARIO

ASTM	:	Sigla en inglés para “ <i>Americam Society for Testing and Materials</i> ”
AW	:	Tipo de barra utilizada para penetración de 4,44 cm de diámetro y 6,53 kg/m de peso
BW	:	Tipo de barra utilizada para penetración de 5,40cm de diámetro y 6,23 kg/m de peso
Cuchara	:	Cilindro muestreador normalizado con medidas estandarizadas
DCDMA	:	Sigla en inglés para “ <i>Diamond Core Drill Manufacturers Association</i> ”
HQ3	:	Sistema de perforación con diámetro de penetración 96 mm, diámetro del testigo 61,1 mm
INN	:	Instituto Nacional de Normalización
LEMCO	:	Laboratorio de Ensaye de Materiales y Control de Obras
Liner	:	Tubo muestreador en interior de barra de perforación
Minvu	:	Ministerio de vivienda y urbanismo
Napa freática	:	Es la primera capa de agua subterránea que se encuentra al realizar una perforación
NCh	:	Norma chilena
NEHRP	:	Sigla en inglés para “ <i>National Earthquake Hazards Reduction Program</i> ”
N _m	:	Valor medido del índice de penetración
N _{SPT}	:	Numero de golpes relacionado con la resistencia del suelo
ReMi	:	Sigla en inglés para “ <i>Refraction micro-temor</i> ”
SPT	:	Sigla en inglés para “ <i>Standard penetration test</i> ”
UTFSM	:	Universidad Técnica Federico Santa María

INDICE DE CONTENIDOS

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 2: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	3
2.1. INTRODUCCIÓN	3
2.2. HISTORIA DEL ENSAYO SPT	3
2.3. DEFECTOS DEL ENSAYO SPT	6
CAPÍTULO 3: EL ENSAYO SPT	12
3.4. EQUIPO	12
3.4.1. Martillo.....	12
3.4.2. Equipo de perforación	12
3.4.3. Barras de perforación	12
3.4.4. Cuchara normalizada.....	13
3.5. ANÁLISIS TEÓRICO	14
3.5.1. Medida de la energía aplicada en el ensayo	14
3.5.2. Índice de penetración N_m	15
3.5.3. Factores de corrección.....	15
3.5.3.1. Cálculo del porcentaje de recuperación	16
3.5.3.2. Corrección por energía	16
3.5.3.3. Resistencia a la penetración normalizada a un nivel de tensión de 1 kg/cm^2	16
3.5.3.4. Factor de corrección de acuerdo con el diámetro del sondaje (C_B)	19
3.5.3.5. Factor de corrección C_R . de acuerdo con el largo de las barras de ensayo:	20
3.5.3.6. Factor de corrección C_s para cuchara	20
3.5.4. Correlaciones.....	20
3.5.4.1. Correlación densidad relativa.....	21
3.5.4.2. Angulo de fricción interna	22
3.5.4.3. Velocidad de la onda de corte	23
CAPÍTULO 4: RESULTADOS ENSAYOS	25
4.1. ENSAYO SPT, VIÑA DEL MAR.....	25
4.1.1. ENSAYO REMI, VIÑA DEL MAR.....	27
4.2. ENSAYO SPT, Reñaca	28

4.3.	MEDICIÓN ENERGÍA TRANSMITIDA ENSAYO SPT.....	31
4.3.1.	Sonda ACKER DRILL MS135 con Martillo Automático	32
4.3.2.	Equipo perforador marca ROLATEC RL-48 con martillo automático	34
	CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES	36
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	38
	ANEXOS	40
A.1.-	Anexo Sondajes SPT 6 Norte – Libertad, VIÑA DEL MAR.	41
A.2.-	Método de interpretación geofísica ReMi (V_s)	45

INDICE DE FIGURAS

Figura 2-1: Esquema del ensayo de penetración estándar SPT (Kovacs y Salomone, 1982).	6
Figura 2-2: Tipos de martillos de ensayos SPT (Schnaid,2005).....	8
Figura 2-3: Esquema de elevación de martillo con la ayuda de un torno giratorio (Kovacs y Salomone, 1982).....	9
Figura 2-4: Resultados ensayo SPT en estrato de arcilla blanda, utilizando dos tipos de martillos. (a) datos no corregidos del recuento de golpes; (b) datos del contenido de humedad.	11
Figura 3-1.- Cuchara normalizada (ASTM D 1586).....	13
Figura 3-2.- Canastillo de retención de muestra.	13
Figura 3-3.- Factor C_N según diferentes investigadores	19
Figura 3-4.- Correlación Densidad relativa con el N_1	21
Figura 4-1.- Plano ubicación sondajes SPT.	25
Figura 4-2.- Sonda ACKER DRILL MS135 con martillo automático	26
Figura 4-3 .- Modelo de tendido para colocación de tendido de geófonos.....	27
Figura 4-4.- Arreglo de tendido de geófonos para ensayo ReMi.....	27
Figura 4-5.- Velocidad de onda de corte v/s profundidad del modelo (geófonos 1-24)..	28
Figura 4-6.- Esquema ubicación de sondajes.....	29
Figura 4-7.- Equipo de sondaje LEMCO, marca ROLATEC.....	29
Figura 4-8.- Maquina ROLATEC y equipo SPT automático.	34

INDICE DE TABLAS

Tabla 2.1: Resultados de estudios de Casagrande & Casagrande (Kovacs et al.1977)	7
Tabla 3.1.- Valores del factor de corrección C_B (Nch3364)	19
Tabla 3.2.- Factor de corrección C_R para martinete manual:	20
Tabla 3.3.- Factor de corrección C_R para martinete automático.	20
Tabla 3.4.- Valores factor de corrección de acuerdo a la cuchara.	20
Tabla 3.5.- Valores empíricos de correlación de N_{SPT} (Bowles, 1995).	22
Tabla 3.6.- Clasificación sísmica del terreno de fundación, DS 61. Minvu (2011)	24
Tabla 3.7.- Algunas correlaciones existentes entre V_s y N_{SPT}	24
Tabla 4.1 Velocidad de onda de corte, modelo geófonos 1-24.....	28
Tabla 4.2.- Resultados de índice SPT registrado en sondaje S1.....	30
Tabla 4.3.- Resultados de índice SPT registrado en sondaje S2.....	31
Tabla 4.4.- Resultados SPT.....	32
Tabla 4.5.- Resumen de Parámetros medidos con el Analizador SPT.	33
Tabla 4.6.- Valores SPT Corregidos por C_N	33
Tabla 4.7.- Ensayos SPT realizados con maquina Rolatec.....	34
Tabla 4.8.- Resultados de medición de energía.	35

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

El SPT o sondaje de penetración estándar (*Standard Penetration Test*) es, sin duda, el sondaje más utilizado en el mundo de la ingeniería geotécnica. Su simplicidad y robustez, combinadas con un bajo costo de equipo y experiencia empírica acumulado en la ejecución de la prueba y su interpretación hacen de este tipo de prospección geotécnica una herramienta esencial para la práctica de la ingeniería.

El ensayo que normalmente se aplica en la actualidad, ha sido criticado por la comunidad académica, en aspectos relacionados con la dispersión de resultados, la dependencia de un operador y la diversidad de equipos y procedimientos. Estas limitaciones motivaron el desarrollo de estudios a partir de la década de los 70' sobre la medición de la energía con el objetivo de estandarizar el ensayo, con numerosas contribuciones en esta área (por ejemplo, Schmertmann & Palacios, 1979; Kovacs, 1979, 1980, 1981). Estos estudios buscaron identificar la influencia en la medición de la penetración de N_{spt} de los factores asociados con las diferencias encontradas en las especificaciones geométricas de los componentes mecánicos utilizados en los ensayos, así como en los sistemas de elevación y liberación de martillos. Estas diferencias implican distintas energías transferidas a las varillas o barras y, por consiguiente, utilizadas en la porción de muestra, lo que da lugar a resultados distintos. La consistencia de los resultados se ha orientado a la corrección del valor del rechazo N_{spt} para un único valor de energía, siendo el valor de energía de referencia adoptado según el consenso internacional de un 60% de la energía teórica producida por la caída del martillo (International Society of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (1988); Skempton, 1986).

Este nuevo enfoque de interpretación de la prueba no sólo tiene por objeto determinar la energía contenida en la onda que atraviesa el vástago generada por la acción del golpe, sino también determinar la energía efectivamente entregada al suelo y, por lo tanto, el conocimiento del valor de la fuerza resultante de la reacción del suelo que actúa contra el tubo o cilindro muestreador. El conocimiento de esta fuerza abre un rango de alternativas para la estimación de las propiedades del comportamiento del suelo basado en los resultados de las mediciones de SPT.

Es importante destacar que todos los resultados de esta memoria, así como los enfoques de interpretación propuestos, se refieren a pruebas realizadas estrictamente de acuerdo con las recomendaciones de la norma chilena NCh 3364, las especificaciones y procedimientos descritos en la norma internacional ASTM D1586.

CAPÍTULO 2: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1. INTRODUCCIÓN

La historia del ensayo SPT (Standard Penetration Test) ha sido documentada en la literatura internacional (Fletcher, 1965; Kovacs et al, 1981; Broms y Flodin, 1988; entre otros). El sondaje SPT, según los autores citados, data de principios de siglo, atravesando una fase de gran desarrollo hasta finales de los años cincuenta, cuando se produjo el primer intento de normalización. En los años sesenta, hubo un período de descrédito del SPT, después de la publicación al respecto de un trabajo de Casagrande y Casagrande (1968). Sin embargo, en la década de 1970 se inició una nueva fase, en la que se reconoció la importancia de la energía existente en el martillo en el momento del impacto, así como su transferencia a la varilla y de ahí al cilindro muestreador con las obras de Kovacs (1977, 1979, 1981), Palacios (1977), Schmertmann y Palacios (1979). Estos estudios demostraron que el valor de N_{spt} está directamente asociado a las características del equipo utilizado, principalmente con respecto a la forma de liberación del martillo, y llevó a Seed et al (1985) y Skempton (1986) a proponer un factor de corrección en el valor de N_{SPT} que tiene en cuenta la energía efectivamente transferida a la varilla. La importancia de esta corrección se reconoce ahora y se ha ido incorporando gradualmente a la práctica de la ingeniería. (por ejemplo, Clayton 1993).

En este capítulo se presenta una breve reseña histórica de ensayo SPT, una descripción de los equipos utilizados en la práctica de la prueba, se citan las recomendaciones para la estandarización y se presentan algunos equipos y metodologías utilizadas a lo largo de la historia con respecto a las mediciones de energía.

2.2. HISTORIA DEL ENSAYO SPT

El primer registro del ensayo SPT se remonta a 1902, cuando el Coronel Charles R. Gow desarrolló un cilindro de acero hueco muestreador de 25 mm de diámetro, accionado dinámicamente con la ayuda de un peso de 50 kg de masa, en el fondo del sondaje. Con este muestreador fue posible obtener muestras denominadas "*Dry Sample*", lo que permitió una

mejor descripción del tipo de suelo y sus propiedades que las obtenidas previamente a partir del agua circulante utilizada en la perforación de los sondajes.

En 1927, Harry A. Mohr, gerente de *The Gow Company*, una subsidiaria de *Raymond Concrete Pile Company* y G.F.A. *Fletcher*, desarrolló el muestreador compuesto de tres partes (cabeza, cuerpo y zapata a cuchara partida) con un diámetro externo de 51 mm, llamado muestreador tipo *Raymond*. En ese momento, la empresa *Sprague & Henwood* de *Scranton* desarrolló un muestreador similar.

En 1930 Mohr y Fletcher presentaron las primeras especificaciones del sondaje, y comenzaron a ser interpretadas como un ensayo, donde el resultado fue el número de golpes necesarios para empujar el muestreador, en un segmento de 305 mm, hacia el suelo, con la ayuda de un martillo de 63,5 kg, cayendo desde una altura de 762 mm. La masa del martillo de 63,5 kg fue adoptada por Mohr, a partir de la media de las masas de los martillos utilizados para impulsar el muestreador utilizado en Boston, en la década de 1920, que fueron levantados manualmente con la ayuda de una cuerda, pasando a través de una polea, trabajando dos ayudantes del sondaje. La geometría del martillo, inicialmente de hormigón, era prismática. Este martillo se llama "*pin guided hammer*".

Con el alto uso de sondajes en investigaciones geotécnicas, y con su creciente mecanización, se encontró que las varillas utilizadas de 25,4 mm de diámetro interno nominal, con un peso de 3,2 kg/m, eran frágiles y alrededor de 1945 comenzaron a ser sustituidas por varillas de mayor rigidez, como las del tipo A utilizadas en el sondaje rotativo.

Terzaghi y Peck publicaron en 1948, el procedimiento de ejecución del sondaje con perforación por circulación de agua, utilizando una camisa de 63,5 mm de diámetro, varillas de 25,4 mm y muestreador de 51 mm y 35 mm de diámetro externo e interno, respectivamente, del tipo de las de *Raymond*. En este libro, los autores destacan que una forma sencilla de estimar el grado de compactación in situ del suelo sería contar el número de golpes necesarios para impulsar el muestreador 305 mm, tras una precipitación inicial de 152 mm. Este procedimiento se denominó ensayo de penetración estándar (SPT). El término "Ensayo de Penetración Estándar" fue probablemente utilizado por primera vez por Terzaghi en 1947 en su artículo "*Recent Trends in Subsoil exploration*", el cual fue presentado en la 7ª Conferencia de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Fundaciones efectuada en Texas, USA.

A pesar de la publicación de Terzaghi y Peck a finales de la década de 1940, Hvorslev (1949) destacó la falta de estandarización como la principal restricción del ensayo de SPT. En New England e incluso la propia División *Gow de Raymond Concrete Pile Company* se utilizaron muestreadores de 25,4 mm de diámetro interno y un revestimiento de 51 mm de diámetro, en lugar del muestreador de Raymond. Otro problema de normalización estaba relacionado con el número de golpes, que comenzó desde el punto de apoyo del muestreador.

En 1954, Parson propuso registrar el número de golpes para cada uno de los tres intervalos de 152 mm de penetración del muestreador, con la resistencia a la penetración dada por la suma mínima de los golpes de dos intervalos. Su intención era minimizar las perturbaciones en el valor de N_{SPT} debido principalmente a la presencia de piedras. Según Kovacs et al (1981), a partir de la propuesta de Parson y al inicio de la fase de estandarización del ensayo, la definición de la resistencia a la penetración se estableció a mediados de los años 50 como el número de golpes necesarios para impulsar 305 mm del muestreador tras su asentamiento inicial de 152 mm.

En 1958 se publicó la primera norma ASTM D1586-58T. Esta norma especifica el ajuste del muestreador con el ajuste inicial de 152 mm, pero no define claramente la resistencia a la penetración; sólo determina que se registran los golpes necesarios para el ajuste del segundo y tercer segmento 152 mm. La norma D1586-63 T, que es la sucesora de la de 1958, define claramente la resistencia a la penetración como la suma de los números de carreras para la segunda y tercera 152 mm. En 1967, el D1586-67 se convirtió en un estándar definitivo.

Fletcher (1965) publica la obra "*Standart Penetration Test: Its uses and Abuses*". En este trabajo el autor enumera una serie de factores que intervienen en el SPT, que se complementa con el de Mohr (1966). En este momento, preguntas como: ¿Es el SPT lo suficientemente fiable? ¿Se considerarían suficientes las experiencias previas para garantizar el uso presente y futuro del SPT? Además de estas dudas, aparecieron los primeros martillos automáticos como el tipo "pilcon", de los que no se conocía su funcionamiento, dividiendo opiniones sobre su uso.

En Chile la norma NCh 433 y el decreto D.S. n° 61 del MINVU, utiliza el valor de N_{SPT} para la clasificación sísmica del terreno de fundación, en el diseño sísmico de edificios. En el año 2014 se publica en Chile la norma NCh3364:2014 "Geotecnia – Ensayo de Penetración

Estándar”, que fue aprobada en octubre de 2014 por el INN en un trabajo llevado a cabo por el Comité Mecánica de Suelos del Instituto de la Construcción. Esta norma tiene por objetivo actualizar y estandarizar el ensayo de penetración estándar, normalmente llamado “ensayo SPT”, y está dirigido a las entidades que realizan sondajes y estudios geotécnicos.

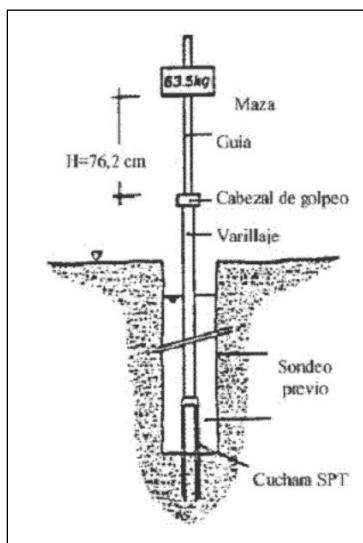


Figura 2-1: Esquema del ensayo de penetración estándar SPT (Kovacs y Salomone, 1982).

2.3. DEFECTOS DEL ENSAYO SPT

En 1968, Casagrande & Casagrande invitaron a dos empresas de perforación tradicionales de USA, Raymond y Sprague-Henwood, a llevar a cabo perforaciones en un área relativamente pequeña, en el mismo depósito de arena. En estas perforaciones se utilizaron procedimientos y equipos comunes en la época y los resultados se presentaron en la Tabla 2.1. No hay más detalles sobre la ubicación a nivel del agua, pero se sabe que la perforación original tipo Raymond se realizó con circulación de agua y accionamiento manual del martillo. Las discrepancias en los resultados corroboran el descrédito del SPT.

Tabla 2.1: Resultados de estudios de Casagrande & Casagrande (Kovacs et al.1977)

	Tipo de equipamiento			
	<i>“Original Raymond”</i>	<i>“Flight Auger Raymond”</i>	<i>“Rotary equipment Sprague-Henwood”</i>	<i>“Hollow stem flight auger”</i>
Accionamiento del martillo	Manual	Cuerda (<i>cathead</i>)	Torno con cable de acero	Cuerda (<i>cathead</i>)
Numero de golpes / 305 mm (N)	10	15	45	10

En el año 1965 Fletcher y posteriormente Ireland et al en 1970, criticaron el ensayo por considerar que existía una gran cantidad de factores que pueden afectar los resultados. Adicionalmente, para muchos autores el término “Estándar” no debiera ser aplicable a este ensayo por las diferencias que han sido detectadas al comparar diferentes procedimientos de ejecución, en diferentes países, todos aparentemente regidos bajos los preceptos de la norma ASTM. A continuación, se enumeran algunas de las diferencias detectadas.

A. Tipo de martillo y energía de hincado

La norma ASTM indica que se debe utilizar un martillo de 140 lb (63,5 kg) y que debe dejarse caer desde una altura de 30 pulg (760mm). Sin embargo, se ha detectado diferencias en estos valores asociados quizás al traspaso a unidades métricas. A título de ejemplo, en Japón el martillo pesa 63,5 kg, pero la altura de caída es de 750 mm y, en la India, el peso del martillo es de 65 kg y se deja caer desde una altura de 750 mm. También existen diferencias en el tipo de martillo utilizado, los cuales aparentemente cumplen los requisitos de peso y altura de caída, pero se ha medido que la energía de hincado es distinta.

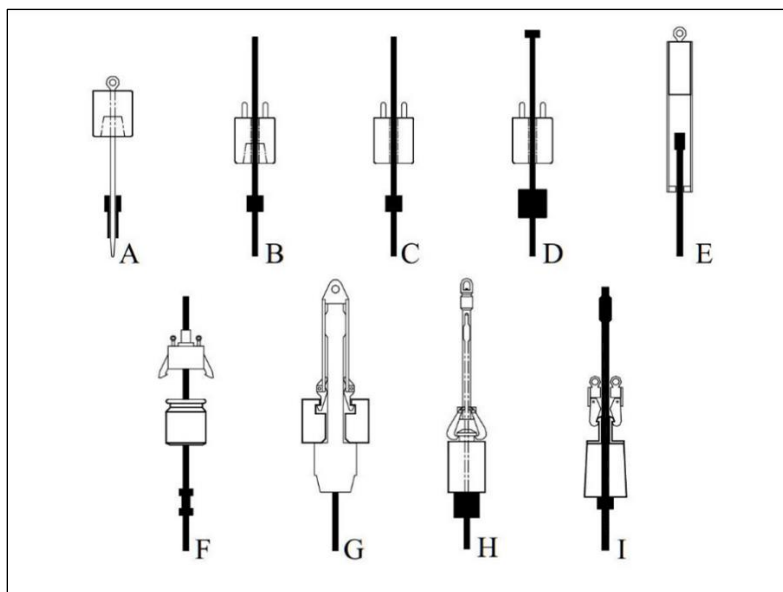


Figura 2-2: Tipos de martillos de ensayos SPT (Schnaid,2005)

En la

Figura 2-2, muestra los distintos tipos de martillos utilizados en los ensayos SPT, siendo A y B: martillos *Donut* brasileños, C y D: martillos *Donut* de USA y E: martillo de seguridad o *safety hammer* de USA, F: Booros Co Ltda *darp hammer*, G: USA *Pilcon trip hammer*, H e I: martillos automáticos inglés y japonés, correspondientemente. (Schnaid, 2005). En la actualidad existen tres tipos de martillos más comunes: martillo “aguja” (*pinweight hammer*), martillo de seguridad (*safety hammer*) y martillo tipo rosca (*donut hammer*). Siendo el último de estos el más utilizado por las empresas de sondajes en Chile, aunque éste junto con el segundo son los que más problemas de ejecución presentan, debido a que depende en gran medida del operador del ensayo, por lo que el golpeteo del martillo no se mantiene constante a través del ensayo (Figueroa y Jaramillo, 2014).

Si bien los tipos de martillos aparentemente cumplen los requisitos de peso y altura de caída, se ha medido que la energía de hincado son distintas. Kovacs y Salomone (1982) encontraron que la energía de hincado puede variar entre un 30% a un 80% de la energía teórica (475 J), Riggs et al (1983) obtuvieron variaciones de energía entre 70% a 100%. Además del tipo de martillo utilizado, las otras causas que interviene en las variaciones son:

- Algunos equipos presentan un sistema automático que controla la caída del martillo en un rango de ± 25 mm. Otros equipos usan un sistema de polea-torno para levantar el martillo (ver

- Figura 2-3), en cuyo caso la energía de hincado dependerá de: diámetro y condición de la polea, número de vueltas que se aplican para levantar la masa.
- Altura real de caída libre de la masa con el sistema polea-torno. Riggs (1986) postula que el operador comúnmente levanta un promedio de 50 mm más de lo deseado, es decir, la altura real de caída en promedio sería de 810 mm.

B. Muestreador de cuchara partida.

En algunas ocasiones se utiliza una “camisa” al interior del cilindro muestreador o “cuchara partida” (*Split spoon*), a objeto de mejorar la recuperación de la muestra. La presencia de esta camisa aumenta el roce lateral al hincado, aunque actualmente es común no utilizarlo.

Los muestreadores que se utilizan en Norteamérica tienen en general 3 mm más de diámetro interior en el cuerpo de la cuchara, que en el extremo inferior del muestreador (zapata); en cambio, en Asia y Europa el diámetro interior es el mismo en toda la longitud de la cuchara. Esta diferencia puede afectar la resistencia a la penetración entre un 10% a 30% (Seed et al. 1985).

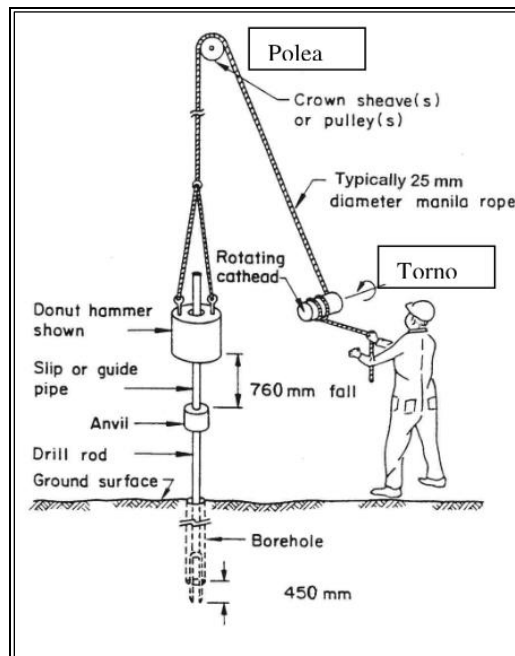


Figura 2-3: Esquema de elevación de martillo con la ayuda de un torno giratorio (Kovacs y Salomone, 1982)

C. Diámetro de la perforación.

La importancia del diámetro de la perforación ha sido discutida por Fletcher (1965), quien propone que el diámetro máximo de la perforación debe ser de 100 mm. Sen Gupta y Aggarbal (1965) han reportado variaciones de hasta un 30% en el valor de la resistencia por efecto del diámetro de la perforación.

D. Técnicas de perforación.

Granger (1963) ha postulado que el uso de lodos para estabilizar las paredes durante la perforación incrementa la resistencia a la penetración en forma significativa.

El nivel de agua al interior del sondaje debe ser igual al nivel freático, de modo de no generar una subpresión en el fondo del sondaje que suelte el suelo y con ello disminuya la resistencia a la penetración. También una inadecuada limpieza del fondo del sondaje, antes de efectuar el ensayo, puede incidir a que éste se realice en suelo perturbado.

E. Longitud de barras de perforación

Gibbs y Holtz (1957), McLean et al. (1957) y otros, han demostrado que el valor de la resistencia a la penetración es inferior a la real, cuando la longitud de las barras es mayor a 10 m y el valor de N_{SPT} es inferior a 30. Por otra parte, algunos autores postulan que la validez del ensayo es hasta 20 m de profundidad, ya que a profundidades mayores, la transmisión de la energía a través de las barras se ve fuertemente afectada.

Los efectos por perturbación durante la perforación pueden generar los mayores errores en la determinación de N_{SPT} , tienden a subestimar el valor de la resistencia a la penetración. En la Figura 2-4 se muestra un ejemplo que ilustra las diferencias que se pueden manifestar al utilizar 2 tipos de martillos distintos, en un mismo tipo de suelo.

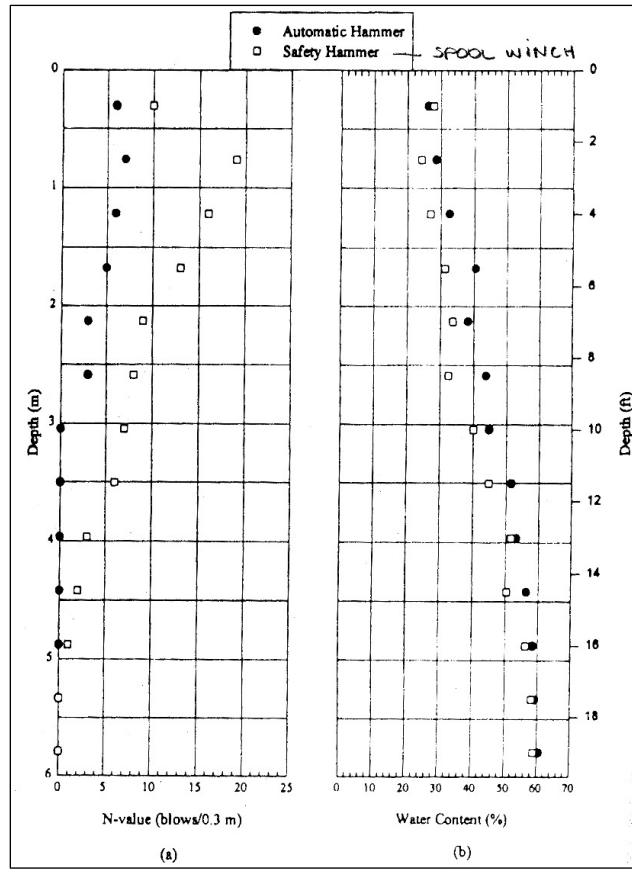


Figura 2-4: Resultados ensayo SPT en estrato de arcilla blanda, utilizando dos tipos de martillos. (a) datos no corregidos del recuento de golpes; (b) datos del contenido de humedad.

CAPÍTULO 3: EL ENSAYO SPT

3.4. EQUIPO

3.4.1. Martillo

Cuerpo de acero que pesa $(63,5 \pm 0,5)$ kgf, que se deja caer sucesivamente desde una altura de 0,76 m para proporcionar la energía de impacto al ensayo

3.4.2. Equipo de perforación

Para el ensayo SPT se deben utilizar métodos de perforación rotativos con estabilización mediante lodos o aditivos según corresponda, esto para minimizar la perturbación de terreno durante la perforación. No está permitido el lavado de la perforación con lanza de agua, ni el avance de la camisa de perforación con métodos de hincado a golpes, debido a la perturbación que pueden generar en el terreno a ensayar. La norma NCh3364 recomienda que es siempre preferible estabilizar el sondaje vía la utilización de lodo o aditivo según corresponda. Es de vital importancia mantener en todo momento el nivel del fluido de perforación por sobre el nivel de la napa freática. Para mayor control se recomienda mantener a nivel de boca del sondaje, lodo o aditivo según corresponda. Esto es especialmente crucial durante la extracción de la herramienta de perforación, pues se puede producir el fenómeno de ebullición o sifonamiento de la arena a ensayar, perturbándose completamente por el flujo ascendente de agua hacia el sondaje. Para evitar lo anterior, el levantado del muestreador se debe realizar en forma lenta.

3.4.3. Barras de perforación

La mayoría de los casos de licuación históricos que conforman la base de datos han sido obtenidos con barras de conexión pequeñas. Para mantener la consistencia, el tamaño de las barras de conexión se debe limitar a barras AW o AWJ (según DCDMA), con una masa de 4,5 kgf/m a 7,5 kgf/m (3 lb/pie a 5 lb/pie). Para profundidades mayores que 15 m (50 pies), se prefieren las barras más grandes, como BW a NW, esto para evitar coletazos y/o pandeo.

3.4.4. Cuchara normalizada

El muestreador debe tener las dimensiones indicadas en la Figura 3-1.- Cuchara normalizada (ASTM D 1586). La punta del muestreador debe ser de acero endurecido y ésta debe ser remplazada o reparada cuando esté abollada o deformada. La cuchara normalizada debe estar equipada con una bolilla de retención y ventilación. Para el caso de arenas sueltas y saturadas, la cuchara normalizada debe estar equipada con canastillo (ver Figura 3-2.- Canastillo de retención de muestra.)

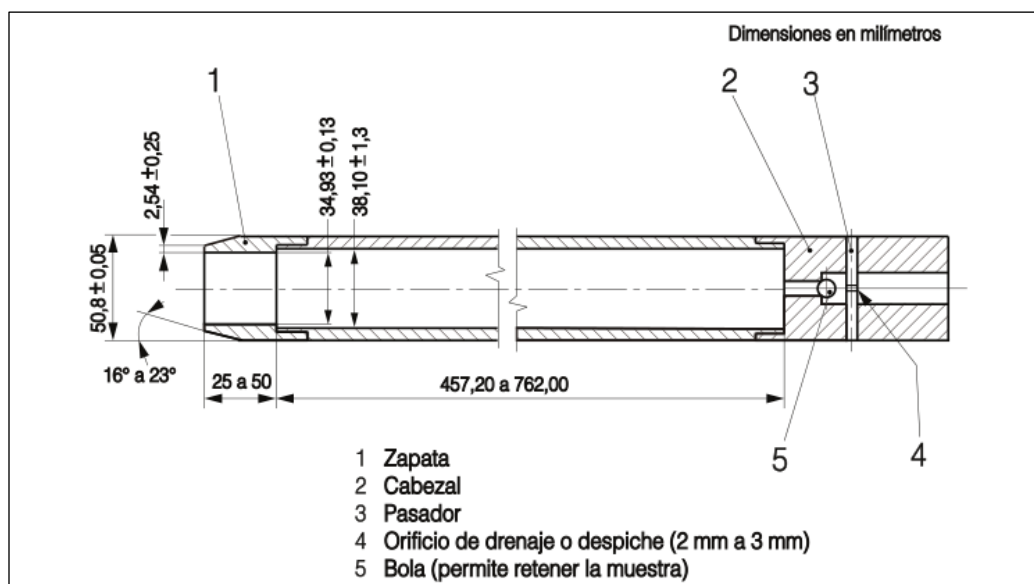


Figura 3-1.- Cuchara normalizada (ASTM D 1586).

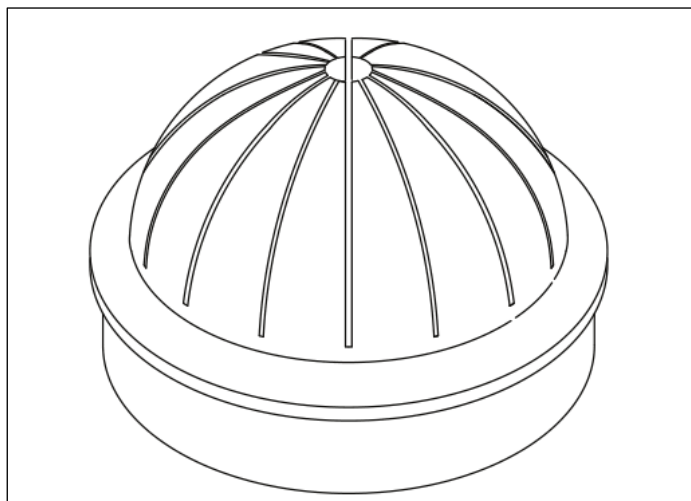


Figura 3-2.- Canastillo de retención de muestra.

3.5. ANÁLISIS TEÓRICO

3.5.1. Medida de la energía aplicada en el ensayo

El ensayo SPT consiste en la introducción en el fondo de un sondeo geotécnico de un muestreador normalizado (tipo cuchara partida) unido a varillas de diámetro AW. Esto mediante el golpeo, en la cabeza de la varilla, de un martillo con una masa de 63,5 kg, el cual cae desde una altura de 76 cm. El golpeo se contabiliza en tres tramos de 15 cm de avance cada uno, totalizando 45 cm. Se denomina al valor N, a la suma del número de golpes de los últimos 30 cm de avance en el ensayo.

El método más común de izaje y caída del martillo de 63,5 kg es de tipo manual, el cual consiste principalmente de un sistema de poleas y cuerdas. Evidentemente la energía de golpeo que suministraba este método no corresponde al 100% de la energía teórica producto de una caída totalmente libre (E_t) por pérdidas producidas principalmente por el rozamiento y el operador que ejecuta el ensayo, además de otros factores, disminuyen la energía teóricamente disponible.

Existen diferentes propuestas respecto al valor al cual se debe normalizar los resultados del ensayo SPT. Por ejemplo, Schmertmann (1983) sugiere usar E_{55} , es decir, suponer que la energía efectiva del ensayo es de un 55% de la teórica; Seed et al (1985) y Skempton (1986) proponen usar N_{60} , por otra parte, Riggs (1986) y Bowles (1995) proponen usar N_{70} . Afortunadamente, el hecho de usar una u otra base de energía no implica mayores inconvenientes.

La energía teórica se establece a partir de:

$$E_t = 63,5kg \times 9,81g \times 0,76m = 473Nm = 0,473kN \times m = 473 J \quad (3.1)$$

En la actualidad existen martillos automáticos, estos anulan el efecto producido sólo del operador quien ejecuta el ensayo, pero no de los rozamientos producidos en el sistema de izaje y caída. Este tipo de martillo produce menores pérdidas de energía en comparación a martillos manuales.

Estudios (Seed et al., 1985 y Skempton, 1986) han demostrado que la mayoría de los SPT realizados, desarrollan una energía del orden del 60% de la teórica. Las correlaciones de parámetros de suelo han sido propuestas a partir de esta energía, lo que hace necesario

normalizar los valores de N del SPT al N₆₀. De acuerdo con la Norma ASTM D6066-11, esta normalización puede ser ejecutada a través de la siguiente ecuación:

$$N_{60} = N \times \frac{ETR}{0,60} = N \times \frac{EMX}{0,60 \times E_{(t)}} \quad (3.2)$$

Donde,

- N₆₀ : Número de golpes de un martillo operando al 60% de eficiencia.
- N : Numero de golpes de los últimos 30 cm de avance en el ensayo.
- ETR : Razón de energía transmitida, con respecto a la teórica.
- EMX : Máxima energía transmitida, calculada a través de la medición de la fuerza velocidad.
- E_(t) : Energía teórica producto de una caída totalmente libre.

3.5.2. Índice de penetración N_m

El valor medido del índice de penetración, N_m, se determina mediante la expresión:

$$N_m = (N^\circ \text{ de golpes para penetrar desde 15-30 cm}) + (N^\circ \text{ de golpes para penetrar desde 30-45 cm}) \quad (3.3)$$

El valor N_m es calculado sólo si la penetración ha alcanzado completamente el intervalo de ensayo de 30 cm. La norma NCh 3364 no permite extrapolar valores de N_m cuando la penetración es menor a 30 cm. En dicho caso, se debe informar el número de golpes y la distancia penetrada.

3.5.3. Factores de corrección

Existen múltiples factores que hacen que el resultado del ensayo pueda ser cuestionable. Sin embargo, y con el propósito de establecer una base adecuada de comparación, se han propuesto diferentes factores de corrección o ajuste.

La fórmula general de corrección es la siguiente:

$$(N_1)_{Erb} = N_m \times C_N \times C_E \times C_B \times C_R \times C_S \quad (3.4)$$

Donde,

N₁ : Índice de penetración estándar normalizado por presión de confinamiento de 1 kgf/cm² aplicables sólo a suelos que clasifican como arena

$(N_1)_{Erb}$: Índice de penetración estándar normalizado por presión de confinamiento de 1 kgf/cm^2 y corregido a la energía $(N_1)_{60}$, sólo a suelos que clasifican como arena

C_N : Factor de normalización a presión confinante de 1 kgf/cm^2

C_E : Factor de corrección para llevar al 60% de la energía teórica del ensayo

C_B : Factor de corrección por diámetro del sondaje

C_R : Factor de corrección por largo de barras

C_S : Factor de corrección para cucharas con o sin liner

3.5.3.1. Cálculo del porcentaje de recuperación

$$\% \text{ de recuperación} = 100 \times \frac{(\text{largo de muestra recuperada (cm)})}{(\text{largo perforado (cm)})} \quad (3.5)$$

3.5.3.2. Corrección por energía

De acuerdo con la norma chilena NCh 3364 indica que es usual realizar esta corrección para obtener la resistencia a la penetración normalizada al 60%. Para esto se debe corregir el valor medido, N_m , a una razón equivalente al 60% de la N_{60} , mediante la ecuación (3.6).

$$N_{60} = N_m \times C_e \quad (3.6)$$

en que,

$$C_E : \frac{ER_i}{60}$$

ER_i : razón de la energía transmitida por las barras de perforación, expresado como porcentaje (%)

Para pasar de una base a otra, ésta realiza en forma proporcional, al ser la energía por número de golpes constante, es decir:

$$E_{r1} \times N_1 = E_{r2} \times N_2 \quad (3.7)$$

3.5.3.3. Resistencia a la penetración normalizada a un nivel de tensión de 1 kg/cm^2 .

Calcular el valor $(N_1)_{60}$ como se indica a continuación:

$$(N_1)_{60} = C_N \times N_{60} \quad (3.8)$$

Donde:

C_N : Factor de corrección por confinamiento.

$$C_N = (P_a / \sigma'_V)^n \quad (3.9)$$

Donde:

P_a : Presión atmosférica (1 kgf/cm²).

σ'_V : Tensión efectiva vertical a la profundidad de ensayo.

n : Exponente que depende del material

Para $P_a = 1 \text{ kg/cm}^2$

$$C_N = (1/\sigma'_V)^n \quad (3.10)$$

Para $n = 0,5$

$$C_N = (1/\sigma'_V)^{0,5} = \sqrt{(1/\sigma'_V)} \quad (3.11)$$

La tensión vertical efectiva es calculada a partir de la presión hidrostática y tensiones totales del terreno. La tensión vertical efectiva es la diferencia entre el esfuerzo vertical total y la presión hidrostática:

$$\sigma'_V = \sigma_V - u_0 \quad (3.12)$$

Donde:

$$\sigma_V = \sum(h_{us} \cdot \gamma_{t o sat}) \quad (3.13)$$

$\gamma_{t o sat}$ = Peso unitario húmedo o saturado del suelo por sobre la zona de ensayo.

La magnitud de la presión hidrostática puede ser estimada como:

$$u_0 = \text{Presión de poros} = h_i \times \gamma_w \quad (3.14)$$

Donde:

h_i = La altura de agua estimada a partir de las condiciones del sitio.

γ_w = Peso unitario del agua.

En suelos estratificados, con múltiples acuíferos colgados, puede ser un error asumir una posición única de la superficie freática. Usualmente el nivel de agua al interior del sondaje es poco confiable para estimar la presión de agua en la zona de ensayo. Adicionalmente, pueden requerirse mediciones piezométricas precisas que permitan asegurar la magnitud real de la presión de poros.

Para el caso de un único acuífero, la tensión efectiva es la suma de las tensiones totales sobre el nivel freático y de las tensiones boyantes bajo dicho nivel:

$$\sigma_v' = \sum(h_{us} \cdot \gamma_t) + \sum(h_s \cdot (\gamma_{sat} - \gamma_w)) \quad (3.15)$$

Donde:

- h_{us} = Espesor de estratos individuales por sobre el Nivel Freático.
- γ_t = Peso unitario húmedo de los estratos de suelo por sobre el nivel freático.
- h_s = Espesor de los depósitos de suelo saturado bajo la napa freática.
- γ_{sat} = Peso unitario saturado de los estratos de suelo.
- γ_w = Peso unitario del agua

La determinación de la tensión vertical efectiva requiere un detallado conocimiento de las condiciones del sitio. Bajo condiciones de acuíferos colgados o artesianos, se puede dificultar la estimación de la presión de poros. El nivel de agua al interior del sondaje puede no dar información fiable de la presión de poros. En ciertas condiciones geológicas, como zonas cementadas, que sobre yacen a zonas normalmente consolidadas, la tensión total puede ser difícil de estimar. La estimación de la tensión vertical efectiva requiere de un juicio ingenieril experto.

El exponente n (valor que depende del material) se ha derivado a partir de ensayos de cámara y depende de la teoría de expansión de una cavidad. El valor del exponente varía con la densidad, tamaño de partícula, razón de preconsolidación y el envejecimiento del suelo. Además, los efectos de borde no son considerados normalmente en los ensayos de cámara. Valores típicos del exponente n en arenas limpias, que se usan actualmente en la práctica, se encuentran en el rango de 0,45 a 0,60. La revisión de ensayos de penetración hechos en cámara, indican que el exponente n es menor en arenas densas (tan bajo como 0,40). El valor típico utilizado en la práctica es $n = 0,5$. La escasa evidencia disponible de penetración en arenas con finos (C.F. > 15%), sugiere que el valor de n es cercano a 1,0, a menos que se produzca drenaje durante la penetración. En tal caso, la selección de $n = 0,60$ ó $0,70$ puede

ser apropiada para esos suelos. En la Figura 3-3 se presentan las tendencias del factor C_N sugeridas por diversos investigadores. Notar que el factor C_N puede alcanzar valores considerables a bajas profundidades. Algunos investigadores han recomendado limitar los valores de C_N a aproximadamente 1,6 a muy bajas profundidades.

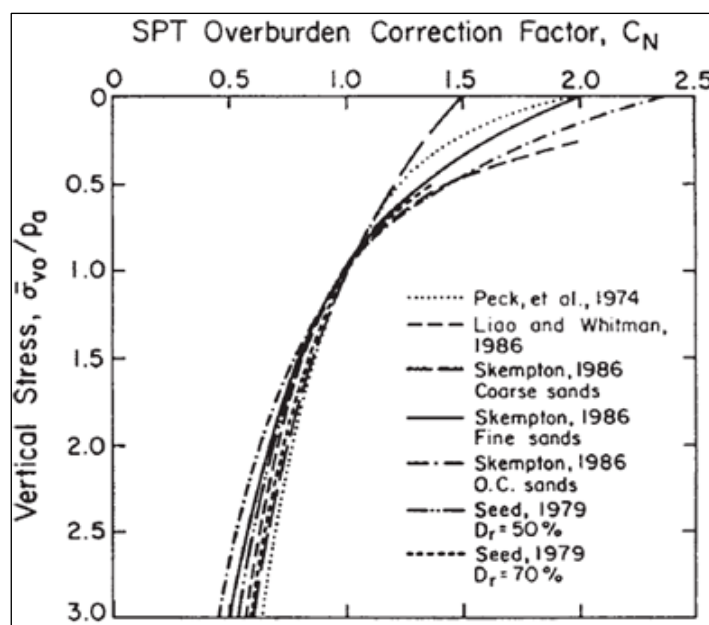


Figura 3-3.- Factor C_N según diferentes investigadores

La norma NCh3364 indica que el factor C_N , se acota tanto superior e inferiormente a 1,7 y 0,5 respectivamente.

3.5.3.4. Factor de corrección de acuerdo con el diámetro del sondaje (C_B)

Este factor considera los siguientes valores de acuerdo con el diámetro del sondaje:

Tabla 3.1.- Valores del factor de corrección C_B (NCh3364)

Diámetro de la perforación (mm)	Factor de corrección C_B
65 a 115	1,00
150	1,05
200	1,15

3.5.3.5. Factor de corrección C_R de acuerdo con el largo de las barras de ensayo:

Este factor considera los siguientes valores de acuerdo con el largo total de barras utilizadas hasta la profundidad del ensayo (L_t)

Tabla 3.2.- Factor de corrección C_R para martinete manual:

Largo total (L_t) m	C_R
≤ 3	0,75
150	1,00

Tabla 3.3.- Factor de corrección C_R para martinete automático.

Largo total (L_t) m	C_R
≤ 3	0,75
$3 < L_t \leq 4$	0,80
$4 < L_t \leq 6$	0,85
$6 < L_t \leq 10$	0,95
$10 < L_t \leq 30$	1,00

3.5.3.6. Factor de corrección C_S para cuchara

Tabla 3.4.- Valores factor de corrección de acuerdo a la cuchara.

Cuchara estándar	C_S
Con liner	0,75
Sin liner	1,1 – 1,3

3.5.4. Correlaciones

Durante la década de 1960 se realizaron numerosas investigaciones tendientes a encontrar relaciones entre la resistencia a la penetración N_{SPT} y propiedades geotécnicas de los suelos, tales como: densidad relativa (D_R), ángulo de fricción interna(ϕ), velocidades de onda de corte (G_o) compresibilidad de materiales granulares y resistencia no drenada de suelos cohesivos. A continuación, se resumen las correlaciones de los parámetros más usados en la

caracterización geotécnica de los materiales detectados, mediante los resultados del procesamiento del SPT.

3.5.4.1. Correlación densidad relativa

Skempton (1986) propone que la densidad relativa puede ser obtenida directamente del $(N_1)_{60}$.

$$D_R = \sqrt{\frac{\alpha (N_1)_{60}}{60}} \quad (3.16)$$

Donde el factor α varía dependiendo del tipo de arena, siendo $\alpha=0,92$ para arena fina, $\alpha=1$ para arenas medias y $\alpha=1,08$ para arenas gruesas.

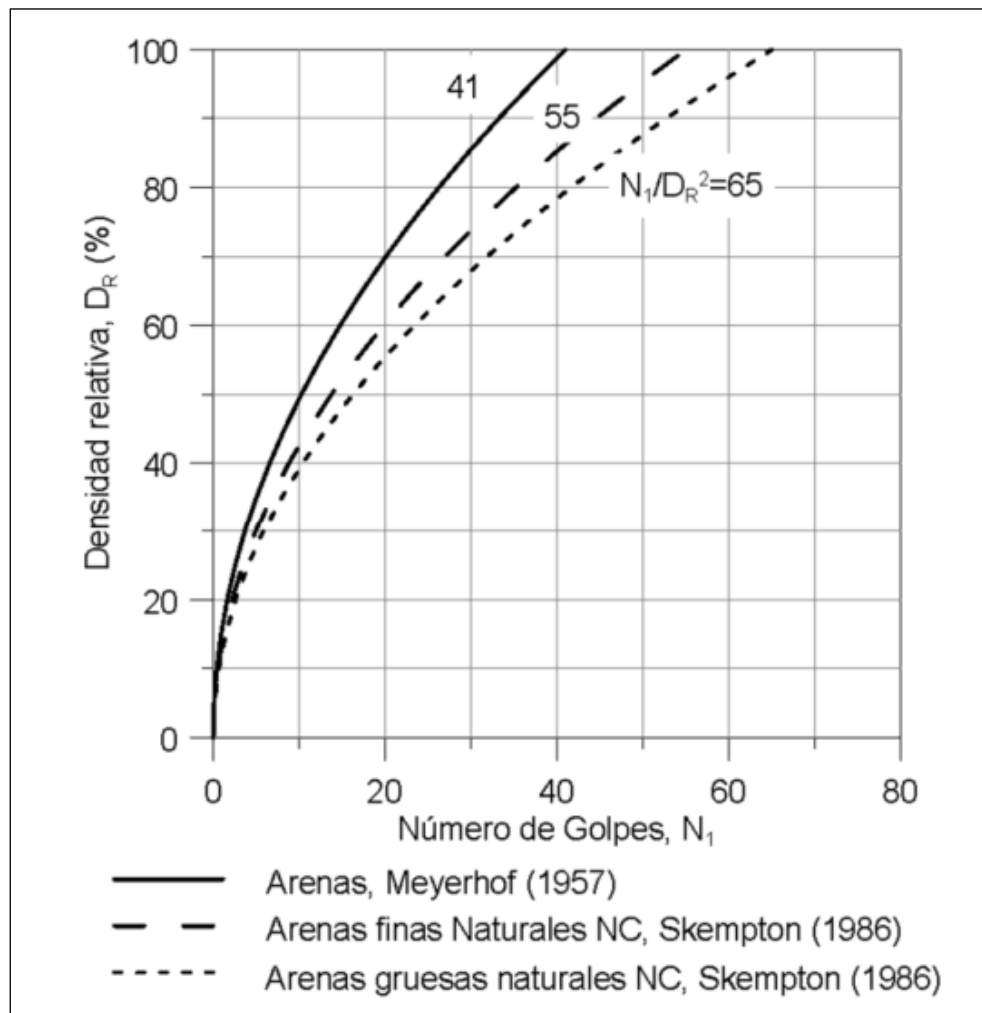


Figura 3-4.- Correlación Densidad relativa con el N_1

Yoshida and Ikemi (1988) propusieron la siguiente expresión:

$$Dr = 25 \times (\sigma'_{vo})^{-0,12} \times (N_{60})^{0,46} \quad (3.17)$$

Donde,

- σ'_{vo} : Presión vertical efectiva en kPa.,
- D_r : Densidad relativa

Bowles (1995) propone la correlación que se presenta en la Tabla 3.5, cuyos resultados empíricos están basados en suelos granulares normalmente consolidados de hasta 6m de espesor, con esto el autor acota bastante la aplicación de los resultados

Tabla 3.5.- Valores empíricos de correlación de N_{SPT} (Bowles, 1995).

Descripción	Muy Suelto	Suelto	Medio	Denso	Muy Denso
Dr (%)	0	15	35	65	85
(N_1)₇₀					
Suelo fino	1-2	3-6	7-15	16-30	
Suelo medio	2-3	4-7	8-20	21-40	>40
Suelo grueso	3-6	5-9	10-25	26-45	>45
ϕ					
Suelo fino	26-28	28-30	30-34	33-38	< 50
Suelo medio	27-28	30-32	32-36	36-42	
Suelo grueso	28-30	30-34	33-40	40-50	

3.5.4.2. Angulo de fricción interna

Bowles (1995) propone la correlación para el ángulo de fricción interna (ϕ) en la Tabla 3.5, cuyos resultados empíricos están basados en suelos granulares. Valores empíricos de la misma forma que para la densidad relativa (D_r).

Adicionalmente la *Japanese Railway Standards*, propone utilizar las siguientes expresiones:

$$\Phi = \sqrt{18 \times N_{60}} + 15 \quad (3.18)$$

$$\Phi = 0,36 \times N_{60} + 27 \quad (3.19)$$

$$\Phi = 4,5 \times N_{60} + 20 \quad (3.20)$$

Estas ecuaciones son de Shioi and Fukui (1982), que las obtuvo desde *Japanese Railway Standards*. La ecuación (3.18) se utiliza para caminos y puentes, y la ecuación (3.19) se utiliza para edificios. Utilizando generalmente la ecuación (3.20)

Muromachi et al. (1974) propone la ecuación (3.21) aunque para su aplicación y para estimar parámetros de diseño son bastante cuestionables en la actualidad, dado que carecen de la base de energía de comparación.

$$\Phi = 3,5 \times \sqrt{N_{SPT}} + 20 \quad (3.21)$$

Estas correlaciones están validadas por estudios realizados sobre casos reales, por lo que debe tenerse en consideración criterios de validez restringidos al entorno local o una formación geológica determinada.

3.5.4.3. Velocidad de la onda de corte

La estimación de las velocidades de onda de corte (V_s) se divide según los tipos de suelos. En el documento “*Comparison between results of dynamic and static moduli of soil determined by different methods*” (Hamman y Eliwa, 2013) se incluye una recopilación de diversas correlaciones para estimar la velocidad de onda de corte. Algunas de estas correlaciones están incluidas en la Tabla 3.7. Existen diferencias significativas entre las diversas correlaciones publicadas, lo que probablemente se deba en parte a diferencias en la geología, pero también a errores en las mediciones de N_{SPT} y V_s .

En Chile, en el año 2011 se publicó el DS N°61 del Minvu. Decreto que estableció la clasificación del terreno de fundación para el diseño de edificación, clasificación que se adjunta en la Tabla 3.6

Tabla 3.6.- Clasificación sísmica del terreno de fundación, DS 61. Minvu (2011)

Tipo de suelo		Vs ₃₀ (m/s)	(N ₁) (golpes/pies)
A	Roca, suelo cementado	≥ 900	<i>Sin definir</i>
B	Roca blanda o fracturada, suelo muy denso o muy firme	≥ 500	≥ 50
C	Suelo denso o firme	≥ 350	≥ 40
D	Suelo medianamente denso, o firme	≥ 180	≥ 30
E	Suelo de compacidad, o consistencia mediana	< 180	≥ 20
F	Suelos especiales	<i>Sin definir</i>	<i>Sin definir</i>
Nota: Solo para suelos granulares, en suelos finos se utiliza q _u y S _u para clasificación sísmica			

Tabla 3.7.- Algunas correlaciones existentes entre Vs y N_{SPT}

Autor(es)	I.D.	Todo tipo	Arena	Limo	Arcilla
Shibata (1970)	A	-	$V_s = 31.7 N^{0.54}$	-	-
Ohba and Toriuma (1970)	B	$V_s = 84 N^{0.31}$	-	-	-
Imai and Yoshimura (1975)	C	$V_s = 76 N^{0.33}$	-	-	-
Ohta et al (1972)	D	-	$V_s = 87.2 N^{0.36}$	-	-
Fujiwara (1972)	E	$V_s = 92.1 N^{0.337}$	-	-	-
Ohsaki and Iwasaki (1973)	F	$V_s = 81.4 N^{0.39}$	-	-	-
Imai et al (1975)	G	$V_s = 89.9 N^{0.341}$	-	-	-
Imai (1977)	H	$V_s = 91 N^{0.337}$	$V_s = 80.6 N^{0.331}$	-	$V_s = 80.2 N^{0.292}$
Ohta and Goto (1978)	I	$V_s = 85.35 N^{0.348}$	-	-	-
Seed and Idriss (1981)	J	$V_s = 61.4 N^{0.5}$	-	-	-
Imai and Tonouchi (1982)	K	$V_s = 96.9 N^{0.314}$	-	-	-
Sykora and Stokoe (1983)	L	-	$V_s = 100.5 N^{0.29}$	-	-
Jinan (1987)	M	$V_s = 116.1 (N+0.3185)^{0.202}$	-	-	-
Okamoto et al (1989)	N	-	$V_s = 125 N^{0.3}$	-	-
Lee (1990)	O	-	$V_s = 57.4 N^{0.49}$	$V_s = 105.64 N^{0.32}$	$V_s = 114.43 N^{0.31}$
Athanasopoulos (1995)	P	$V_s = 107.6 N^{0.36}$	-	-	$V_s = 76.55 N^{0.445}$
Sisman (1995)	Q	$V_s = 32.8 N^{0.51}$	-	-	-
Iyisan (1996)	R	$V_s = 51.5 N^{0.516}$	-	-	-
Kanai (1966)	S	$V_s = 19 N^{0.6}$	-	-	-
Jafari et al (1997)	T	$V_s = 22 N^{0.85}$	-	-	-
Kiku et al (2001)	U	$V_s = 68.3 N^{0.292}$	-	-	-
Jafari et al (2002)	V	-	-	$V_s = 22 N^{0.77}$	$V_s = 27 N^{0.73}$
Hasancebi and Ulusay (2006)	W	$V_s = 90 N^{0.309}$	$V_s = 90.82 N^{0.319}$	-	$V_s = 97.89 N^{0.269}$
Ulugergerli and Uyanik (2007)	X	$^a V_{SU} = 23.291 \ln(N) + 405.61$	-	-	-
Ulugergerli and Uyanik (2007)	Y	$^b V_{SL} = 52.9 e^{-0.011N}$	-	-	-
Dikmen (2009)	Z	$V_s = 58 N^{0.39}$	$V_s = 73 N^{0.33}$	$V_s = 60 N^{0.36}$	$V_s = 44 N^{0.48}$
Pitilakis et al. (1999)	AA	-	$V_s = 145(N_{60})^{0.178}$	-	$V_s = 132(N_{60})^{0.271}$
Hasancebi and Ulusay (2006)	AB	$V_s = 104.79(N_{60})^{0.26}$	$V_s = 131(N_{60})^{0.205}$	-	$V_s = 107.63(N_{60})^{0.237}$

CAPÍTULO 4: RESULTADOS ENSAYOS

4.1. ENSAYO SPT, VIÑA DEL MAR

En junio del año 2013 el laboratorio de Ensaye de Materiales y Control de Obras (LEMCO) de la UTFSM de Valparaíso realizó varios Sondaje de Prospección Geotécnica SPT, en el terreno ubicado en calle 6 norte (esquina Nor-Oriente) con Avda. Libertad (ver Figura 4-1), en la comuna de Viña del Mar. Se utilizó un martinete tipo automático, en sonda geotécnica *ACKER DRILL MS135* (ver Figura 4-2). A continuación, el detalle de las características del sondaje:

- Martillo utilizado corresponde a un tipo *Donut*
- Tubo revestimiento tipo *BW*
- Profundidad napa freática: 5,85 m
- Profundidad perforación: 45,12 m

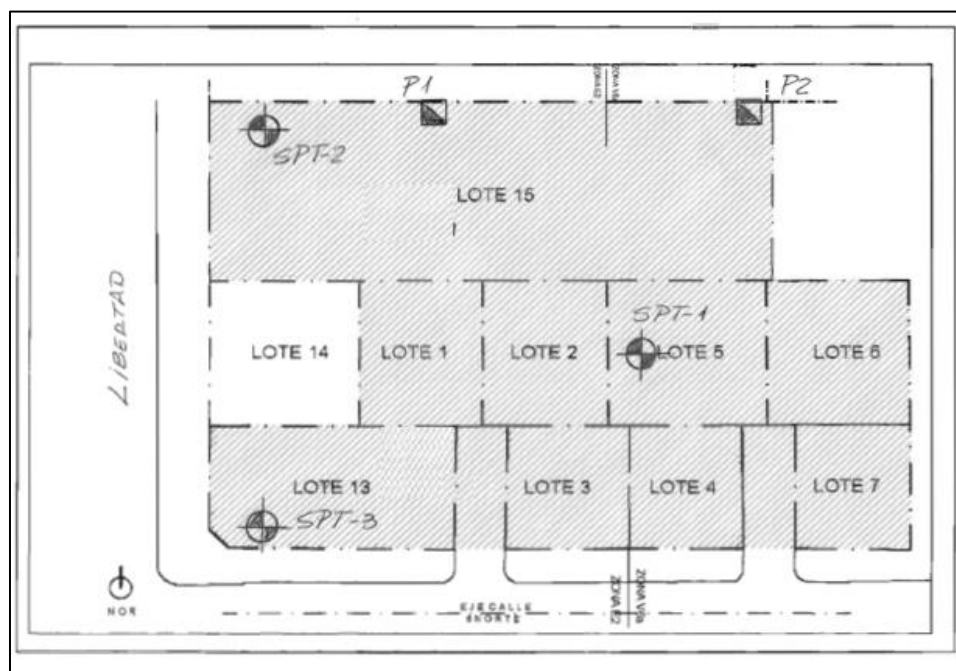


Figura 4-1.- Plano ubicación sondajes SPT.



Figura 4-2.- Sonda ACKER DRILL MS135 con martillo automático

En el “Anexo Sondajes SPT 6 Norte – Libertad, VIÑA DEL MAR., se indican los valores obtenido de cada sondaje. De acuerdo con el análisis de este sondaje, se concluyó lo siguiente:

Para el sondaje SPT-1:

- Arena gris o amarillo grisácea saturada, con napa de agua a 5,85 m de profundidad.
- Se calculó empíricamente $V_{s30} = 271$ m/s a través del sondaje.
- Rechazos de menos de 5 golpes/15 cm fueron desechados por darse en granos gravosos inmersos en la arena.
- Cuando el avance N_2 fue inferior a 15 cm y con más de 50 golpes se asumió que N_{SPT} mínimo era de 100 a 130 golpes/pie.

Para el sondaje SPT-2:

- Arena gris o amarillo grisácea saturada, con napa de agua a 5,85 m de profundidad.
- Se calculó empíricamente $V_{s30} = 284$ m/s a través del sondaje.

Para el sondaje SPT-3:

- Arena gris o amarillo grisácea saturada, con napa de agua a 5,85 m de profundidad.
- Se calculó empíricamente $V_{s30} = 284$ m/s a través del sondaje

4.1.1. ENSAYO REMI, VIÑA DEL MAR

En junio del año 2013 el laboratorio de Ensaye de Materiales y Control de Obras (LEMCO) de la UTFSM, Valparaíso, realizó las mediciones de exploración geofísica por medio del método de los microtemores (ReMi, ver A.2.-Método de interpretación geofísica ReMi (Vs)) en el terreno ubicado en calle 6 Norte con Av. Libertad, en la comuna de Viña del Mar. Cumpliendo con lo indicado en la norma ASTM D 5777 – 00.

Se llevó a cabo un estudio geofísico consistente en 2 tendidos con 3 modelos cada uno, según se detalla en Figura 4-3, empleados para la obtención de perfiles de Velocidades de Onda de corte Vs.



Figura 4-3.- Modelo de tendido para colocación de tendido de geófonos.



Figura 4-4.- Arreglo de tendido de geófonos para ensayo ReMi.

A continuación, se presentan los resultados de la Velocidad de Onda de Corte (Vs) según profundidad de cada estrato, para cada modelo del tendido 1. Correspondientes a la sección del tendido de 72 mts. de longitud, desde el primer hasta el vigésimo cuarto geófono. Esta sección corresponde al punto medio del modelo.

El valor obtenido en las mediciones corresponde a $V_{s30} = 262$ (m/s)

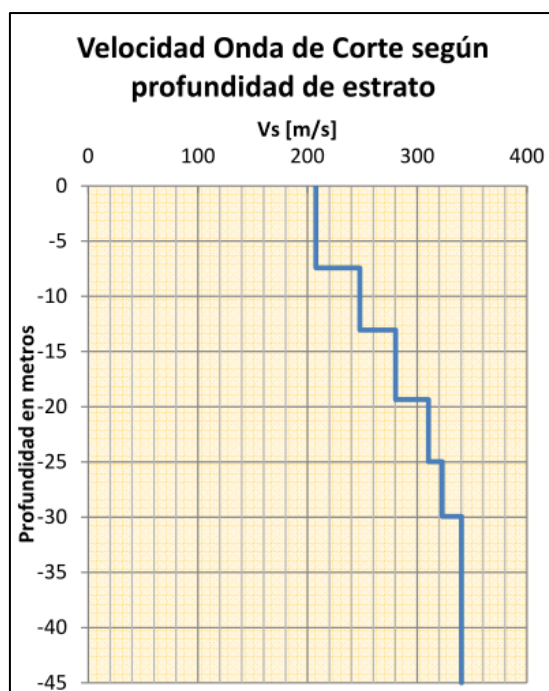


Figura 4-5.- Velocidad de onda de corte v/s profundidad del modelo (geófonos 1-24).

Tabla 4.1 Velocidad de onda de corte, modelo geófonos 1-24.

Profundidad (m)	V_s (m/s)
-7,43	208
-7,43	248
-13,05	248
-13,05	280
-19,35	280
-19,35	310
-24,98	310
-24,98	323
-29,93	323
-29,93	340
-45,00	340

4.2. ENSAYO SPT, REÑACA

Los sondajes se realizaron en dos puntos del terreno en estudio, cercanos a la calle Las Perlas, en el sector de Cochoa, Reñaca, comuna de Viña del Mar, Región de Valparaíso. La ejecución de los sondajes se realizó en el mes de Septiembre / 2015.



Figura 4-6.- Esquema ubicación de sondajes.



Figura 4-7.- Equipo de sondaje LEMCO, marca ROLATEC

El sondaje fue realizado con un equipo de perforación marca ROLATEC modelo RL 48 L (ver Figura 4-7), mediante sistema de rotación HQ3. En términos generales, este equipo cuenta con una unidad de rotación con velocidad que varía entre 0 a 900 [rpm], con un torque de 450 [kgf-m]. Los diámetros de perforación que dispone son: HQ-BQ-NQ-Hollow Stern Auger, con un máximo de 200 [mm]. Su mástil conjunto de avance posee un tiro máximo de 7000 [kgf], con un empuje regulado de 0 a 2500 [kgf], la carrera del cabezal es de 2250 [mm] y wire line de 6 [mm] a 200 [m]. Perforación Sondaje HQ con muestreo HQ3 (diámetro testigo 61,1 mm y diámetro del pozo 96 mm); Barras utilizadas AW de largo ≤ 3 m.; Método de muestro con cuchara sin liners.

Tabla 4.2.- Resultados de índice SPT registrado en sondaje S1

Profundidad (m)		Ensayo SPT-ASTM D 1586-99			
Desde	Hasta	N1	N2	N3	NF
0,55	1,00	5	5	6	11
1,55	2,00	5	9	11	20
2,55	3,00	8	10	11	21
3,55	4,00	7	9	13	22
4,55	5,00	9	15	16	31
5,55	6,00	10	15	12	27
6,55	7,00	12	19	22	41
7,55	8,00	13	17	21	38
8,55	9,00	11	17	19	36
9,55	10,00	13	19	21	40
10,55	11,00	14	18	22	40
11,55	12,00	10	22	22	44
12,55	13,00	21	27	38	65
13,55	14,00	27	39	43	82
14,55	15,00	25	34	40	74
15,55	16,00	20	32	30	62
16,55	17,00	13	23	26	49
17,55	18,00	5	14	22	36
18,55	19,00	17	32	47	79
19,55	20,00	11	24	35	59
20,55	21,00	20	21	41	62
21,55	22,00	19	28	50	78
22,55	23,00	28	50	R	R
23,55	24,00	31	R	R	R
24,55	25,00	32	R	R	R
25,55	26,00	35	50	R	R
26,55	26,70	R	R	R	R
27,55	27,98	21	34	50	84
28,62	29,05	34	R	R	R
29,60	30,00	26	40	R	R

Tabla 4.3.- Resultados de índice SPT registrado en sondaje S2

Profundidad (m)		Ensayo SPT-ASTM D 1586-99			
Desde	Hasta	N1	N2	N3	NF
0,55	1,00	5	7	9	16
1,55	2,00	6	10	10	20
2,55	3,00	9	11	14	25
3,55	4,00	9	11	14	25
4,55	5,00	8	13	14	27
5,55	6,00	11	15	17	32
6,55	7,00	10	14	19	33
7,55	8,00	10	15	17	32
8,55	9,00	16	22	30	52
9,55	10,00	16	22	24	46
10,55	11,00	10	22	26	48
11,55	12,00	16	22	25	47
12,55	13,00	16	21	27	48
13,55	14,00	14	24	27	51
14,55	15,00	25	32	40	72
15,55	16,00	20	32	30	62
16,55	17,00	15	25	30	55
17,55	18,00	34	50	R	R
18,55	19,00	23	43	50	93
19,55	20,00	24	50	R	R
20,55	21,00	20	31	41	72
21,55	22,00	25	35	38	73
22,55	23,00	28	R	R	R
23,55	24,00	21	34	38	72
24,55	25,00	30	43	50	93
25,55	26,00	13	30	40	70
26,55	27,00	22	40	50	90
27,55	28,00	19	29	32	61
28,55	29,00	20	31	R	R
29,55	30,00	24	39	41	80

4.3. MEDICIÓN ENERGÍA TRANSMITIDA ENSAYO SPT

Para Medición de Energía Transmitida durante ejecución de ensayos SPT, se utilizó el equipo fabricado por PILE DYNAMICS INC (PDI), denominado "SPT ANALYZER", el cual está compuesto básicamente por un (1) Computador/Convertidor Análogo-Digital (AD) y una (1) Barra Instrumentada, provista con 2 Acelerómetros y 2 Strain Gauges.

La metodología utilizada en ensayos SPT para evaluar Energía Transmitida, se sintetiza en las siguientes etapas:

- Conexión barra AW instrumentada a columna de barras AW, esta última acoplada a la Cuchara Normal en su extremo inferior al fondo del sondaje.
- Conexión de cabezal de golpes a barra AW instrumentada del equipo SPT Analyzer.
- Demarcación en la columna de barras AW de líneas cada 15 cm, que definen tres tramos de penetración dinámica, asociados al número de golpes N1, N2 y N3 del ensayo SPT.
- El operador acciona el comando hidráulico que da rotación al motor de izaje del martinete.
- Durante hinca dinámica del penetrómetro, cuando las marcas señaladas en el paso N°3 coinciden con el nivel, referencial de penetración, se registra el número de golpes N_i aplicados para el tramo de 15 cm correspondiente.

Para definir la eficacia del equipo SPT con una mayor confiabilidad, se siguió las recomendaciones que establece la Norma ASTM D4633. Es decir, que las mediciones se realizaron en un sondaje vertical, a una profundidad mayor a 9,0 m, en suelo idealmente con $10 < N_m < 50$, y en 3 a 5 ensayos SPT.

4.3.1. SONDA ACKER DRILL MS135 CON MARTILLO AUTOMÁTICO

Las mediciones fueron realizadas en el Sondaje SPT-02 el 23 de mayo de 2019, comenzaron a partir de los 9,00 m concluyendo a los 13,45 m de profundidad. Se efectuaron 4 ensayos SPT en propiedad ubicada en Concón (Región de Valparaíso).

Tabla 4.4.- Resultados SPT.

Resultados Ensayos SPT						
SPT	Profundidad (m)		Número de Golpes			
	Desde	Hasta	N1	N2	N3	$N_m = N2 + N3$
SPT N 01	9,00	9,45	15	30	35	65
SPT N 02	10,00	10,45	23	33	51	84
SPT N 03	11,00	11,45	39	33	27	60
SPT N 04	13,00	13,45	21	35	45	80

La evaluación considera los golpes para el segundo y tercer segmento de 15 cm de penetración de la cuchara normal. El valor promedio y desviación estándar de la energía transmitida es indicado en Tabla 4.5.

Tabla 4.5.- Resumen de Parámetros medidos con el Analizador SPT.

PARÁMETROS SPT ANALYZER - SONDA ACKER DRILL (MS135)	
ETR : Energy Transferred Ration, según ASTM D4633	71,9%
ERi : Razón de Energía Transmitida, según NCh3364	
Desviación Standard	1,8%
Valor máximo registrado	75,3%
Valor mínimo registrado	64,9%
C _N : Coeficiente de corrección de N _m	1,198
Frecuencia media de Golpes (golpes/min)	28,9

En siguiente Tabla 4.6 se entrega los valores de N₆₀, correspondientes a los ensayos SPT realizados para evaluar ETR, a los cuales se ha aplicado el coeficiente C_N indicado en Tabla 4.5.

Tabla 4.6.- Valores SPT Corregidos por C_N.

N₆₀ – SONDA ACKER DRILL (MS135)		
SPT	N_m	N₆₀
SPT N 01	65	77
SPT N 02	84	100
SPT N 03	60	71
SPT N 04	80	95

4.3.2. Equipo perforador marca ROLATEC RL-48 con martillo automático

El 28 de mayo del año 2016, fueron realizados ensayos de SPT con un martillo automático montado sobre una Maquina marca ROLATEC modelo RL-48. Los análisis de los datos fueron realizados con el software Pile Driving Analyzer Version 2016.125 y PDILOT2 Versión 2016.1.56.3. La

Tabla 4.8 muestra en resumen los resultados obtenidos. Cabe indicar que los valores indicados en esta tabla corresponden a los de todas las lecturas realizadas en cada ensayo SPT.



Figura 4-8.- Maquina ROLATEC y equipo SPT automático.

La Tabla 4.7 muestra en resumen los ensayos de SPT realizados

Tabla 4.7.- Ensayos SPT realizados con maquina Rolatec.

SPT	Profundidad (m)	N1	N2	N3
1	7,0	12	19	21
2	8,0	10	18	19
3	9,0	9	13	15
4	10,0	14	20	21
5	11,0	12	19	19
6	12,0	13	18	20
7	13,0	14	17	19
8	14,0	11	13	17

Tabla 4.8.- Resultados de medición de energía.

SPT	Profundidad (m)	ETR (%)			
		Max	Min	Desviación Estándar	Promedio
1	7,0	96,5	71,5	4,7	78,1
2	8,0	83,7	72,7	2,2	79,6
3	9,0	83,3	73,3	2,1	78,1
4	10,0	83,1	72,9	2,5	77,9
5	11,0	81,1	71,1	2,1	75,8
6	12,0	92,6	76,4	3,5	84,5
7	13,0	90,0	72,2	3,2	81,0
8	14,0	90,1	79,9	2,6	84,6
Valores Promedio				2,9	80,0

Al calcular el valor de CE, que finalmente es el valor utilizado para hallar el N_{60} , y de acuerdo a las mediciones llevadas a cabo el año 2016 (se debe hacer cada año) es $C_E=1,33$ que es la relación entre las energías (80/60).

Mediciones de energía que fueron ejecutadas el día 23 de mayo de 2019, hechas en el sistema SPT automático indican que el valor de energía transmitida (ER_i), considerando 5 mediciones en profundidad, fue de 90,7 % con una desviación estándar promedio de 2,3 %, por lo que el valor o factor de corrección es actualmente $C_E = 1,512$ que es la relación entre las energías (90,7/60).

CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES

A nivel mundial el ensayo SPT se encuentra desarrollado a su máxima capacidad en cuanto a tecnología, existe el martillo automático que controla con precisión la caída de la masa, la energía que entrega el equipo puede ser perfectamente medida y se puede controlar para que la perforación del sondaje sea óptima. Estos anulan el efecto producido sólo del operador que ejecuta el ensayo, pero no de los rozamientos producidos en el sistema de izaje y caída. Sin embargo, este tipo de martillo produce menores pérdidas de energía en comparación a martillos manuales.

La aplicación de factores de corrección y normalización de los resultados de las pruebas de terreno, contribuyen a estandarizar los ensayos y hacerlos comparables con otros, pero no a disminuir los errores que pudieran haberse cometido durante la ejecución de este, muchas de las correlaciones existentes fueron obtenidas de bases de datos incompletas, al no incluir estas la energía con la cual se realizaron, algunas fueron desarrolladas para suelos específicos y una base de datos pequeña; en cambio, otras fueron desarrolladas con una gran base de datos, pero con la interrogante de cuál fue la energía efectiva de los equipos con los cuales se ejecutó el ensayo. Se recomienda emplear solo aquellas correlaciones que explicitan la energía del ensayo.

En cuanto a la medición de energía de las sondas utilizadas por el LEMCO para el ensayo SPT, el valor promedio determinado de energía transmitida (ETR) por el martinete de la sonda *ACKER DRILL* (MS135) a la columna de barras del ensayo SPT, fue de 71,9%, con una desviación standard de 1,8% en 289 registros válidos. Para la sonda *ROLATEC* el valor promedio de energía transmitida (ETR) para el equipo, considerando 8 mediciones a diferentes profundidades, fue de 80,0%. En el año 2019 se realizó una nueva medición de energía para la sonda *ROLATEC* que estableció que el valor promedio de la energía transmitida (ETR), considerando 5 mediciones en profundidad, fue de 90,7 %.

Según la norma NCh3364, para calcular N_{60} , a partir de resultados de ensayos SPT que a futuro se realicen, se deberá amplificar los valores de terreno (N_M) por el coeficiente aquí determinado Para la sonda *ROLATEC*, en base a la medición realizada en 2016 se considera

un factor de corrección $C_E=1,33$, pero en base a la última medición de 2019, se propone un factor de corrección por energía $C_E= 1,512$. Para la sonda *ACKER DRILL* se considera un valor de corrección $C_E =1,198$. Estos valores tienen una validez de un (1) año a partir de la fecha de medición según la norma chilena antes indicada.

En conformidad con norma ASTM4633, para el instrumento de medición de energía en las sondas. Los transductores de Deformación (*Strain Gauges*) y de aceleración (Acelerómetros) deben ser calibrados con frecuencia máxima de tres (3) años.

El ensayo ReMi es un método de alto potencial en zonas urbanas e industriales. Resulta también particularmente útil en áreas donde no se puede usar explosivos o donde la configuración estratigráfica del suelo limita la aplicación de métodos tradicionales como refracción y reflexión sísmica (por ej., capas rígidas de poco espesor, o capas blandas entre estratos duros).

Las ventajas del ensayo ReMi, desde un punto de vista de adquisición de datos son: (i) requiere solamente de equipos estándar de refracción, (ii) no requiere de una fuente de energía de onda específica o fuerte, y (iii) trabaja mejor en ambientes con intenso ruido superficial, elemento de disturbio en ensayos de sísmica estándar. Dependiendo de las propiedades del material del subsuelo, el arreglo geométrico y tipos de sensores (distancia y frecuencia de los geófonos), el método ReMi puede identificar velocidades de ondas a profundidades mínimas de 30 metros y hasta un máximo de 500 metros.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Albert Ventayol Lázaro y Carlos Fernández Tadeo "*MEDIDA DE LA ENERGÍA DEL ENSAYO SPT. CORRECCIONES A APLICAR*"

ASTM D1586-*Standard Test Method for Standard Penetration Test (SPT) and Split-Barrel Sampling of Soils. ASTM Standard Test Method.*

Bowles J., *Foundation Analysis and Design*, 5ª Edición, editorial McGraw-Hill.

C.R. Daniel, J.A. Howie and R.G. Campanella, *Characterization of SPT grain size effects in gravels*, 2004.

Campaña Z., Jose Apuntes "*Ensayo de penetración estandar (SPT): Pasado, presente y futuro?*"

Cubrinovski, Misko & Ishihara, K. (2001). Correlation between penetration resistance and relative density of sandy soils.

Farrar J., *Standard Penetration Test Driller's/Operator's Guide DSO-98-17*. U.S. Department of Interior Bureau of Reclamation Dam Safety Office, 1999.

Hamman y Eliwa, "*Comparison between results of dynamic and static moduli of soil determined by different methods*", 2013.

Hatanaka, M. and Uchida, A. (1996). "*Empirical correlation between cone resistance and internal friction angle of sandy soils*", *Soils and Foundations*, Vol. 36(4): 1-10.

J. Brandenberg, Scott & Bellana, Naresh & Shantz, Thomas. (2010). *Shear wave velocity as function of standard penetration test resistance and vertical effective stress at California bridge sites. Soil Dynamics and Earthquake Engineering - SOIL DYNAM EARTHQUAKE ENG.* 30.

Kokusho T., Yoshida Y., *SPT N-value and S-wave velocity of gravelly soils with different particle gradings. Geotechnical Site Characterization, ISC'98 vol II*, pág. 933-938.

Liu, Y & Luke, Barbara & Pullammanappallil, Satish & Louie, John & Bay, J. (2005). *Combining Active and Passive-Source Measurements to Profile Shear Wave Velocities for Seismic Microzonation. Geotechnical Special Publication.*

Mujtaba, H., Farooq, K., Sivakugan, N. et al. *KSCE J Civ Eng (2018) 22: 572.*

NCh1508 Of2008 "Geotecnia- Estudio de Mecánica de Suelos", INN-Chile, Santiago, Chile

NCh3364:2014 "Geotecnia- Ensayo de Penetración Estándar", INN-Chile, Santiago, Chile.

Pullammanappallil, Satish & Honjas, William & Louie, John. (2003). *Determination of 1-D shear wave velocities using the refraction microtremor method*.

Riquelme, Jose Ignacio. *Estudio de correlaciones para densidad relativa y Resistencia al corte de suelos granulares gruesos*. Memoria título, Universidad de Chile. 2016.

Sykora, D. and Koester, J. *Correlations between shear resistance and standard penetration resistance in soils*". *Proceeding ASCE, Earthquake engineering and soil dynamics II-Recent advances in ground motion evaluation*, Park City, Utah, 1988.

Verdugo, Ramon "Diplomado Mecánica de Suelos Aplicada - Capítulo Exploración Geotécnica" Chile, 2012.

ANEXOS

CORRELACIÓN ENTRE EQUIPOS ESTÁNDAR Y EQUIPO ROLATEC RL-48 DE ALTA EFICIENCIA, EN EL ENSAYE DE PENETRACIÓN ESTÁNDAR

A.1.- ANEXO SONDAJES SPT 6 NORTE – LIBERTAD, VIÑA DEL MAR.

Tabla A - 1.- Análisis sondaje SPT-1, 6 Norte esq. Avda. Libertad, Viña del Mar

Prof. (m)	Nspt	σ_v (T/m ²)	Cn	N1	N60	(N1)60	Gmáx (T/m ²)	Vs (m/s)	hi/Vsi	Vs30
1,245	21	2,1	1,52	32	16	24	3858,8	155	0,008	
2,285	22	3,9	1,32	29	17	22	4042,5	159	0,007	
3,235	23	5,5	1,20	28	17	21	4226,3	163	0,006	
4,305	22	7,3	1,11	24	17	18	4042,5	159	0,007	
5,235	26	8,9	1,04	27	20	20	4777,5	173	0,005	
6,265	29	10,7	0,98	28	22	21	5328,8	182	0,006	
7,31	81	12,4	0,93	75	61	56	14883,8	305	0,003	
8,25	89	14,0	0,89	79	67	59	16353,8	320	0,003	
9,22	89	15,7	0,85	76	67	57	16353,8	320	0,003	
10,21	86	17,4	0,82	70	65	53	15802,5	314	0,003	
11,260	86	19,1	0,78	67	65	51	15802,5	314	0,003	
12,21	81	20,8	0,76	61	61	46	14883,8	305	0,003	
13,155	87	22,4	0,73	64	65	48	15986,3	316	0,003	
14,24	87	24,2	0,71	61	65	46	15986,3	316	0,003	
15,23	79	25,9	0,68	54	59	41	14516,3	301	0,003	
16,25	79	27,6	0,66	52	59	39	14516,3	301	0,003	
17,225	98	29,3	0,64	63	74	47	18007,5	335	0,003	
18,195	98	30,9	0,62	61	74	46	18007,5	335	0,003	
19,225	92	32,7	0,61	56	69	42	16905,0	325	0,003	
20,67	92	35,1	0,58	54	69	40	16905,0	325	0,004	
21,17	88	36,0	0,57	50	66	38	16170,0	318	0,002	
22,24	92	37,8	0,56	51	69	38	16905,0	325	0,003	
23,22	92	39,5	0,54	50	69	37	16905,0	325	0,003	
24,18	92	41,1	0,53	49	69	37	16905,0	325	0,003	
25,14	100	42,7	0,52	52	75	39	18375,0	339	0,003	
26,165	100	44,5	0,50	50	75	38	18375,0	339	0,003	
27,175	100	46,2	0,49	49	75	37	18375,0	339	0,003	
28,145	100	47,8	0,48	48	75	36	18375,0	339	0,003	
29,125	100	49,5	0,47	47	75	35	18375,0	339	0,003	
30,125	100	51,2	0,46	46	75	34	18375,0	339	0,003	
31,16	120	53,0	0,4	53	90	40	22050,0	371	0,003	
32,15	120	54,7	0,43	52	90	39	22050,0	371	0,003	271

Prof. (m)	Nspt	σ_v (T/m ²)	Cn	N1	N60	(N1)60	Gmáx (T/m ²)	Vs (m/s)	hi/Vsi	Vs30
33,14	120	56,3	0,42	51	90	38	22050,0	371	0,003	
34,12	120	58,0	0,41	50	90	37	22050,0	371	0,003	
35,16	120	59,8	0,40	48	90	36	22050,0	371	0,003	
36,11	120	61,4	0,39	47	90	36	22050,0	371	0,003	
37,105	120	63,1	0,39	46	90	35	22050,0	371	0,003	
38,125	120	64,8	0,38	45	90	34	22050,0	371	0,003	
39,125	120	66,5	0,37	44	90	33	22050,0	371	0,003	
40,11	120	68,2	0,36	43	90	32	22050,0	371	0,003	
41,17	120	70,0	0,35	42	90	32	22050,0	371	0,003	
42,15	120	71,7	0,34	41	90	31	22050,0	371	0,003	
43,065	120	73,2	0,34	40	90	30	22050,0	371	0,002	
44,115	130	75,0	0,33	43	98	32	23887,5	386	0,003	
45,07	130	76,6	0,32	42	98	31	23887,5	386	0,002	
									Vs45 =	296
								Vs30 =	296	m/s

Tabla A - 2.- Análisis sondaje SPT-2, 6 Norte esq. Avda. Libertad, Viña del Mar

Prof. (m)	Nspt	σ_v (T/m ²)	Cn	N1	N60	(N1)60	Gmáx (T/m ²)	Vs (m/s)	hi/Vsi	Vs30
1,245	19	2,1	1,52	29	14	22	3491,3	148	0,008	
2,265	22	3,9	1,32	29	17	22	4042,5	159	0,006	
3,245	28	5,5	1,20	34	21	25	5145,0	179	0,005	
4,235	48	7,2	1,11	53	36	40	8820,0	235	0,004	
5,335	50	9,1	1,03	52	38	39	9187,5	240	0,005	
6,265	33	10,4	0,99	33	25	25	6063,8	195	0,005	
7,275	46	11,4	0,96	44	35	33	8452,5	230	0,004	
8,265	48	12,4	0,93	45	36	34	8820,0	235	0,004	
9,245	71	13,3	0,91	64	53	48	13046,3	286	0,003	
10,21	101	14,3	0,88	89	76	67	18558,8	341	0,003	
11,250	98	15,3	0,86	84	74	63	18007,5	335	0,003	
12,195	96	16,3	0,84	81	72	60	17640,0	332	0,003	
13,24	76	17,3	0,82	62	57	47	13965,0	295	0,004	
14,26	77	18,4	0,80	62	58	46	14148,8	297	0,003	
15,215	78	19,3	0,78	61	59	46	14332,5	299	0,003	
16,195	80	20,3	0,77	61	60	46	14700,0	303	0,003	
17,225	93	21,3	0,75	70	70	52	17088,8	327	0,003	
18,19	80	22,3	0,73	59	60	44	14700,0	303	0,003	
19,175	80	23,3	0,72	58	60	43	14700,0	303	0,003	
20,225	77	24,3	0,70	54	58	41	14148,8	297	0,004	
21,24	107	25,3	0,69	74	80	55	19661,3	351	0,003	
22,19	136	26,3	0,68	92	102	69	24990,0	395	0,002	
23,17	136	27,3	0,67	91	102	68	24990,0	395	0,002	

Prof. (m)	Nspt	σ_v (T/m ²)	Cn	N1	N60	(N1)60	Gmáx (T/m ²)	Vs (m/s)	hi/Vsi	Vs30
24,175	187	28,3	0,65	122	140	92	34361,3	463	0,002	
25,16	300	29,3	0,64	193	225	145	55125,0	587	0,002	
26,12	300	30,2	0,63	190	225	142	55125,0	587	0,002	
27,14	300	31,2	0,62	186	225	140	55125,0	587	0,002	
28,16	300	32,3	0,61	183	225	137	55125,0	587	0,002	
29,21	300	33,3	0,60	180	225	135	55125,0	587	0,002	
30,12	300	34,2	0,59	177	225	133	55125,0	587	0,002	
								Vs30	297	m/s

Tabla A - 3.- Análisis sondaje SPT-3, 6 Norte esq. Avda. Libertad, Viña del Mar.

Prof. (m)	Nspt	σ_v (T/m ²)	Cn	N1	N60	(N1)60	Gmáx (T/m ²)	Vs (m/s)	hi/Vsi	Vs30
1,275	18	2,2	1,51	27	14	20	3307,5	144	0,009	
2,245	21	3,8	1,32	28	16	21	3858,8	155	0,006	
3,235	24	5,5	1,20	29	18	22	4410,0	166	0,006	
4,285	31	7,3	1,11	34	23	26	5696,3	189	0,006	
5,265	34	9,0	1,04	35	26	26	6247,5	198	0,005	
6,255	47	10,4	0,99	47	35	35	8636,3	232	0,004	
7,22	88	11,3	0,96	85	66	63	16170,0	318	0,003	
8,21	83	12,3	0,93	77	62	58	15251,3	309	0,003	
9,24	82	13,3	0,91	74	62	56	15067,5	307	0,003	
10,2	84	14,3	0,88	74	63	56	15435,0	311	0,003	
11,190	84	15,3	0,86	72	63	54	15435,0	311	0,003	
12,25	84	16,3	0,84	70	63	53	15435,0	311	0,003	
13,195	98	17,3	0,82	80	74	60	18007,5	335	0,003	
14,185	98	18,3	0,80	78	74	59	18007,5	335	0,003	
15,235	90	19,3	0,78	70	68	53	16537,5	321	0,003	
16,195	90	20,3	0,77	69	68	52	16537,5	321	0,003	
17,25	90	21,3	0,75	67	68	51	16537,5	321	0,003	
18,195	76	22,3	0,73	56	57	42	13965,0	295	0,003	
19,205	76	23,3	0,72	55	57	41	13965,0	295	0,003	
20,15	115	24,2	0,71	81	86	61	21131,3	363	0,003	
21,17	115	25,3	0,69	80	86	60	21131,3	363	0,003	
22,19	136	26,3	0,68	92	102	69	24990,0	395	0,003	
23,17	136	27,3	0,67	91	102	68	24990,0	395	0,002	
24,15	136	28,2	0,65	89	102	67	24990,0	395	0,002	
25,135	187	29,2	0,64	120	140	90	34361,3	463	0,002	
26,155	187	30,3	0,63	118	140	89	34361,3	463	0,002	
27,12	300	31,2	0,62	186	225	140	55125,0	587	0,002	

Prof. (m)	Nspt	σ_v (T/m ²)	Cn	N1	N60	(N1)60	Gmáx (T/m ²)	Vs (m/s)	hi/Vsi	Vs30
28,18	300	32,3	0,61	183	225	137	55125,0	587	0,002	
29,15	300	33,2	0,60	180	225	135	55125,0	587	0,002	
30,11	300	34,2	0,59	177	225	133	55125,0	587	0,002	
								Vs30	298	m/s

A.2.- Método de interpretación geofísica ReMi (V_s)

ReMi es un método para mediciones in situ de perfiles de velocidad de ondas de corte V_s que utiliza registros de ruido ambiental. Para la adquisición de datos se usa un sismógrafo convencional y los mismos geófonos verticales de ondas P usados en ensayos de refracción. Generalmente se disponen 24 geófonos de 4,5Hz a una distancia de 3,0m entre ellos. En el sismógrafo se graban entre 15 a 20 ventanas de ruido de entre 15 a 30 segundos cada una. Estos registros son posteriormente utilizados para construir la curva de dispersión del terreno. En el ensayo ReMi se suele utilizar expresar esta curva como lentitud- frecuencia, en donde la lentitud p (s/m) es simplemente el inverso de la velocidad de fase.

Esta técnica está basada en dos ideas fundamentales. La primera es que el equipo de adquisición de refracción sísmica (ver Figura A 2) puede efectivamente grabar ondas superficiales a frecuencias tan bajas como de 2 Hz (dependiendo de los tipos de geófonos utilizados). La segunda idea es que se pueden separar las ondas Rayleigh (ver Figura A 1) de otras ondas registradas por el equipo (Louie, 2001).

El procesamiento de los datos obtenidos en un ensayo con el método ReMi involucra tres pasos: Análisis espectral de velocidades (diagrama p - f); Selección de la curva de dispersión, e Inversión de la curva de dispersión.

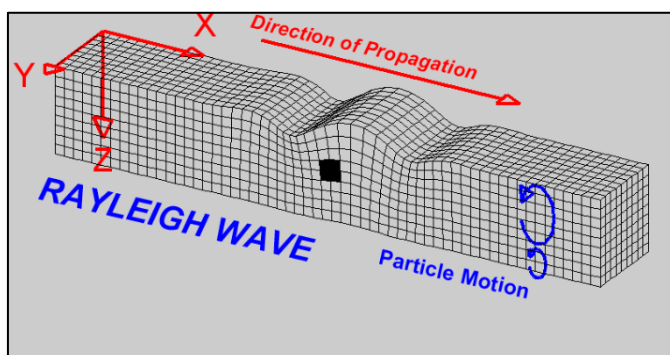


Figura A 1.- Modelo trayectoria onda Rayleigh.

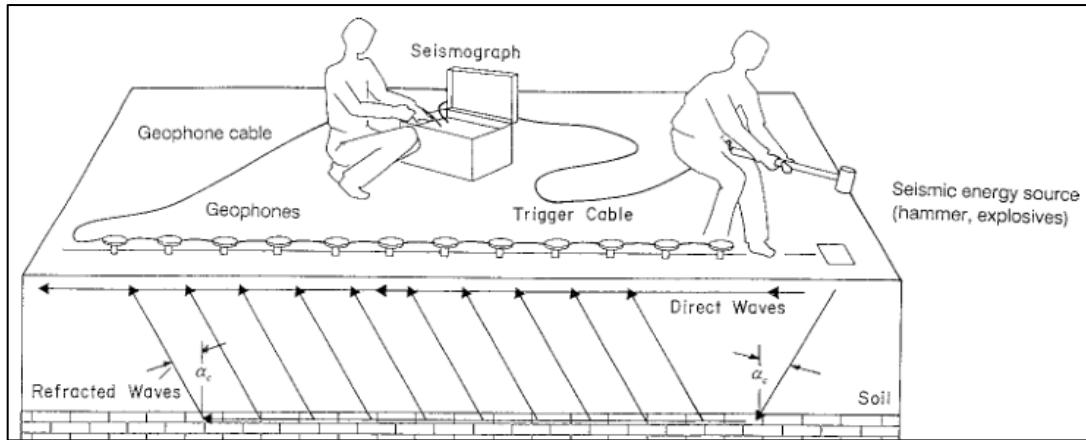


Figura A 2.- Esquema ensayo ReMi.