

## CAPITULO I

### 1.1.-Introducción.-

En el área de la Ingeniería Civil día a día se generan cambios no solo en los procedimientos de construcción, sino también en las metodologías para la determinación de la resistencia admisible de un suelo, esto se manifiesta en el área de la construcción, ya que como es de saber, las edificaciones requieren como parámetro de cálculo la resistencia que posee un determinado tipo de suelo, el cual es un factor importante al momento del diseño de una edificación u otra obra civil.

Esto conlleva que al momento de realizar el diseño de una estructura (Edificios, puentes, etc.) se conozcan las características propias del suelo de fundación como la resistencia admisible del suelo.

Uno de los ensayos más utilizados para la determinación de la resistencia del suelo, para posteriormente diseñar fundaciones de estructuras, tales como edificios o puentes, es el llamado “ENSAYO DE SPT” (Standart Penetration Test), este método es utilizado para determinar la resistencia admisible de un suelo, expresado en  $\text{Kg/cm}^2$ , dicho ensayo es el más adecuado para varios tipos de suelos finos.

Por otro lado existe otro Equipo llamado Cono Holandés (Que más adelante lo llamaremos de forma correcta PDC) este equipo es utilizado en base al número de golpes por medio de una correlación poder conocer el valor de CBR de un suelo, este equipo también es muy utilizado por el laboratorio de suelos de la UAJMS para poder determinar la resistencia admisible del suelo mediante una ecuación empírica, este último punto será objeto de estudio.

Este método solo es aplicable a suelos finos, por lo cual el análisis de comparación de los resultados obtenidos por estos dos métodos será **referido exclusivamente a suelos finos**, que son los predominantes en nuestra región (Ciudad de Tarija).

Habiendo identificado los dos tipos de métodos lo que se pretende con el estudio es poder correlacionar estos dos equipos y obtener el número de golpes de SPT en base al número de golpes de PDC por medio de un análisis estadístico y una correlación

para posteriormente poder hacer el cálculo del esfuerzo admisible por ambos casos para un posterior análisis de los mismo.

El aporte que se dará con este estudio será de gran importancia puesto que en lo académico se obtendrá una fórmula que correlaciones estos dos equipos, en la parte práctica se reducirá el tiempo y costo para la realización del ensayo de capacidad portante del suelo.

### **1.2.- Justificación.-**

Para una evaluación de las propiedades de resistencia del suelo de cimentación en nuestro medio se utiliza el ensayos de SPT, el cual es un equipo muy costoso y dificultoso a la hora de trabajar, necesitando de mucho personal para la realización del ensayo y en algunos caso imposibilitado para el trabajo en lugares de difícil acceso, debido a esto se pretende hallar una solución mucho más económica y con menos dificultad, el cual sería realizar un análisis de relación, mediante ajustes a diferentes modelos matemáticos, escogiendo el que tenga una mejor relación entre sus variables, en dónde la información por medio de PDC que es un equipo más liviano, fácil de trabajar y no requiere más que dos personas para la realización del ensayo, además es fácil de transportar pudiendo ingresar a cualquier lugar donde se necesite hacer el ensayo, se pueda obtener por medio de una correlación el número de golpes de SPT para posteriormente conocer el valor del esfuerzo admisible de un suelo, habiendo ahorrado de esta manera tiempo y costo en el ensayo.

### **1.3.- Planteamiento del problema.-**

El problema planteado en el trabajo, se refiere al costo y tiempo para la evaluación de las propiedades de resistencia del terreno, lo que nos lleva a desarrollar el siguiente trabajo, ya que el SPT se utiliza tanto para evaluar el suelo de fundación, como para el diseño, y el PDC será una herramienta de gran utilidad en el trabajo de campo.

## **1.4.- Objetivos.-**

### **1.4.1.- Objetivo General.-**

Realizar un análisis comparativo a través de una correlación del número de golpes para suelos finos entre los métodos de “SPT” y “PDC”, para posteriormente por medio de la correlación calcular los esfuerzos admisibles del suelo.

### **1.4.2.- Objetivos Específicos.-**

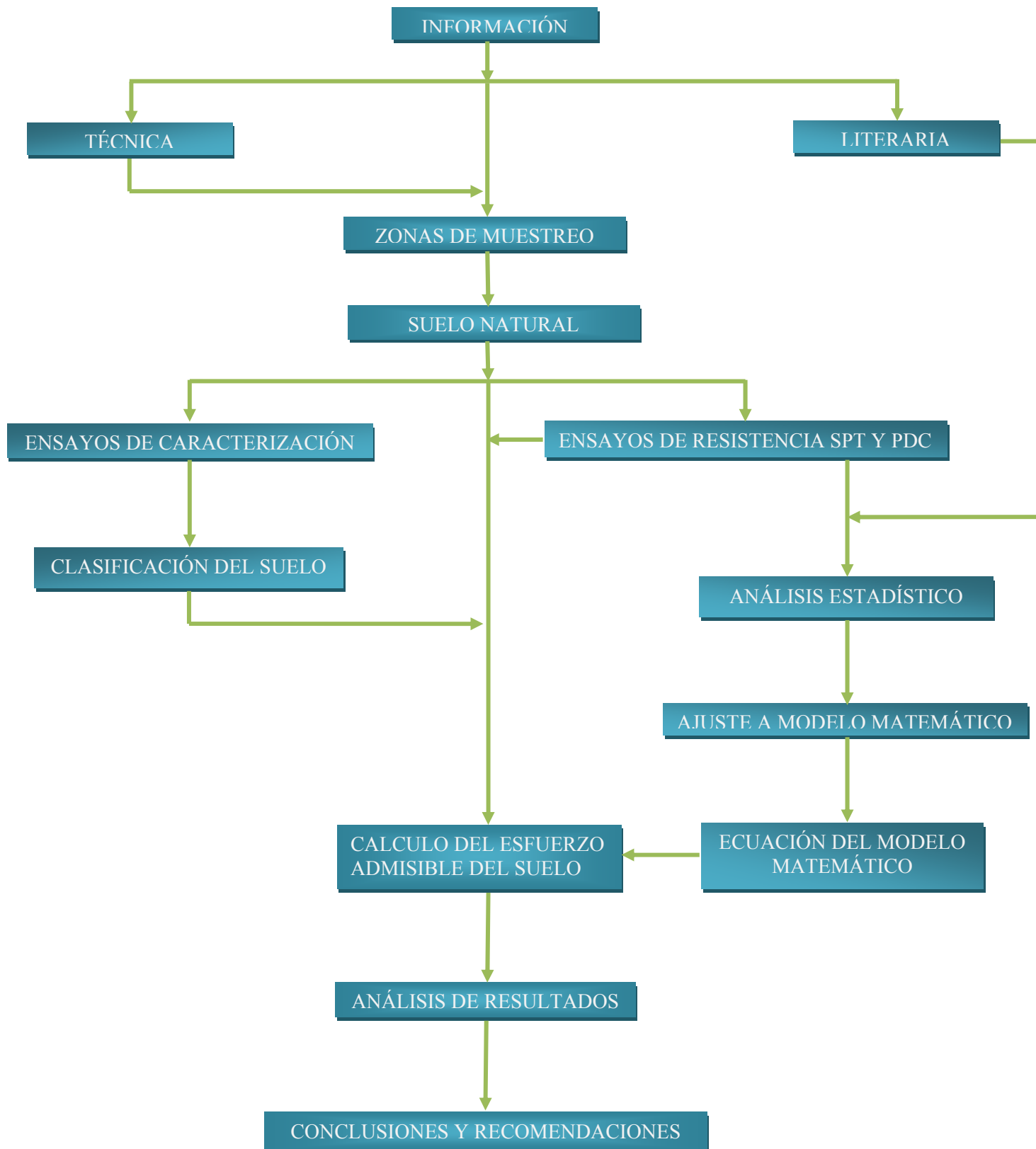
Los objetivos específicos del presente estudio son:

- Efectuar un análisis del parámetro “Resistencia Admisible” en mecánica de suelos.
- Analizar los métodos más empleados en la determinación de la resistencia admisible.
- Realizar ensayos en suelo fino, aplicando el método de SPT y PDC y efectuar un procesamiento de los datos obtenidos.
- Determinar una metodología de correlación entre los resultados de ambos métodos.
- Determinar factores de correlación y ajuste entre los dos métodos.
- Calcular la resistencia admisible del suelo por medio del número de golpes producto de la ecuación obtenida en la correlación.
- Efectuar un Análisis Comparativo de la resistencia admisible.

## **1.5.- Hipótesis.-**

En éste proyecto se propone un análisis de relación, con el que realizaremos ajustes a diferentes modelos matemáticos con el fin de encontrar una ecuación que está basada en ensayos locales y se aplica los resultados a diseños estructurales en la provincia Cercado, para suelos finos, con el cual se hallará un valor del número de golpes de SPT en función al número de golpes del PDC, este análisis de relación, se realizará con los datos encontrados de las siguientes prácticas de laboratorio de suelos: PDC in situ(número de golpes para hincar el equipo 30 cm) y SPT. Se hará el cálculo del esfuerzo admisible por la ecuación producto de la correlación.

### 1.6.- Diseño metodológico.-



### **1.7.- Alcance.-**

El alcance del presente estudio se limita a el área que comprende la ciudad de Tarija y áreas aledañas, zonas donde predominan estratos de suelo fino.

Se deberán identificar los lugares de muestreo, que estén en la zona indicada, en los lugares de muestreo se realizarán los siguientes ensayos: el ensayo de SPT y el DCP, con el cuál encontraremos el N° de golpes para una penetración estándar de 30 cm, esto para ambos casos.

Luego se realizará la extracción del material del estrato ensayado para su análisis en laboratorio y determinación de sus propiedades.

Para realizar el ensayo de SPT se realizará el montado de todo el equipo necesario y una vez armado todo el sistema se aplicarán los golpes estándar de martillo, para que penetre la punta de acero en el estrato, una profundidad estándar de 30 cm, para lo cual se contarán los golpes necesarios para esa penetración.

Para realizar el ensayo del PDC se procederá al montaje de dicho equipo y se realizara el trabajo de manera similar al de SPT, contando los números de golpes para hincar la punta de acero una profundidad de 30 cm, luego se hará la extracción de muestra de suelo con el fin de poder realizar la clasificación respectiva del punto de ensayo con su respectiva humedad natural.

En laboratorio se deberá realizar la granulometría correspondiente por el método del lavado y encontrar sus límites de Atterberg, para poder clasificar el suelo. Con una muestra en envase hermético se encontrará su porcentaje de humedad natural.

Con los resultados de las prácticas se deberá realizar ajustes de nuestros datos a diferentes modelos matemáticos y seleccionar el modelo que tenga un mejor ajuste a nuestros datos, con el fin de encontrar una ecuación y se verifica por medio del coeficiente de correlación y el coeficiente de determinación, la cual se podrá utilizar para suelos finos mas comunes en la provincia Cercado.

Se utilizará el equipo de la universidad, es decir se recurrirá al laboratorio de suelos de la UAJMS, que cuenta con los instrumentos que se utilizan para la determinación de la resistencia admisible a través de los dos métodos mencionados.

### **1.8.- Medios y Metodologías.-**

Los medios y la metodología para la realización del presente análisis serán los conocidos y aplicables en nuestro medio y son los que a continuación se detallan:

#### **1.8.1.- Medios.-**

Los medios a utilizar para lograr los objetivos planteados son esencialmente los equipos propiamente dichos es decir para el método SPT se utilizará los siguientes medios:

- Trípode de sustentación del martillo
- Punta de acero con forma de cono
- Martillo de peso de 63.5 kg
- Cápsulas
- Balanza de masa 10 Kg.
- Accesorios (picota, pala, cucharón, brocha, cuchara, flexómetro, etc.)
- Tablas y ábacos para la obtención de la resistencia admisible.

Para el método del PDC se utilizará el equipo propiamente dicho como ser:

- Varilla de perforación de acero con punta en forma de cono.
- Peso de 8 kg
- Registro del número de golpes del PDC.

#### **1.8.2.- Metodología.-**

La metodología a utilizar se apegará a todos los lineamientos normalizados de los ensayos de penetración indicados y de igual forma con el análisis comparativo, donde se realizarán regresiones matemáticas y análisis estadístico respectivo.

## CAPITULO II

### ESTADO DEL CONOCIMIENTO SOBRE LOS MÉTODOS SPT Y PDC EN LA DETERMINACIÓN DE LA FATIGA DE SUELOS

#### 2.1 Método de SPT (Standard Penetration Test)

##### 2.1.1 Introducción

La denominación Ensayo Normal de Penetración corresponde a la traducción de standard penetration test, cuya sigla SPT que se empleara en este texto por motivo de su amplio uso internacional.

El SPT, desarrollado por Terzagui a finales de los años 20, es el ensayo in situ más popular y económico para obtener información geotécnica del subsuelo. Se estima que el 85 % a 90 % de los diseños de las cimentaciones convencionales de Norte y Sur América se basan en los valores de N medidos con el SPT.

**Figura 2.1: Equipo de Penetración SPT**



**Fuente: Tecnotest**

A pesar de que el ensayo se estandarizó desde 1958 como el ASTM D-1586, y que se han venido realizando revisiones periódicamente, las evaluaciones realizadas en

Norteamérica indican que son muchas las variables que influyen en los valores de N (N° de golpes).

- Entre otras:
  - El tipo y estado de los equipos de perforación
  - La destreza de los operadores
  - El tipo y estado de las cucharas muestreadoras
  - La dimensión y estado del varillaje
  - La forma y tamaño del mazo

### **2.1.2. Definición**

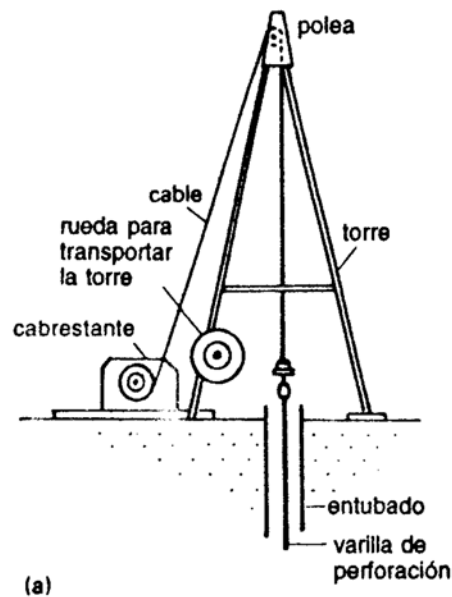
El SPT o ensayo de penetración normal es una prueba in situ que se realiza en el fondo de una perforación o donde se plantea ejecutar una fundación de algún tipo de estructura, este ensayo consiste en determinar el número N de golpes de un martillo de peso normalizado a una altura de caída constante, necesarios para hincar en el suelo inalterado un toma muestras partido normal.

### **2.1.3. Características del equipo de SPT**

El SPT es el método más generalizado de los métodos dinámicos de sondeo, el cual presenta en la punta un toma muestras partido normal cuyos diámetros normalizados son: 36.8 mm (1.45 pulg.) de diámetro interior y 50.8 mm (2.0 pulg.) de diámetro exterior.

Además del anterior se han desarrollado otros equipos similares pero con la diferencia en la punta de hincia es un cono de acero que puede recuperarse o dejarse en el sitio.

**Figura 2.2: Esquema de ensamblado del equipo**



**Fuente: Google**

El equipo para realizar el ensayo consta de una punta cónica de acero de 60° y 36 mm de diámetro que se colocan en el extremo de las barras de perforación, presenta una maza de acero de 63.5 kg (140 lb) que caiga desde una altura constante de 76.2 cm (30 pulg.).

Además de todas estas características el equipo debe de presentar un sistema de agarrare al mazo para poder levantarlo la altura especificada y un mecanismo de liberación para que el mazo pueda caer libremente y pueda penetrar la punta de acero los 30 cm requeridos para el ensayo.

#### **2.1.4 Procedimiento del Ensayo**

Para la realización de este ensayo se procede de la siguiente manera:

- Con el fin de que no haya perturbaciones de un ensayo del otro (SPT y PDC) en el punto de ensayo este debe distanciarse por lo menos metro y medio de cualquier otro punto ya ensayado y en el caso de existir sondeos previos la separación deberá cumplir esta condición como mínimo:

$$\text{Distancia} > 25. D$$

Siendo D el diámetro del sondeo realizado.

- Una vez elegido el lugar del trabajo, este deberá ser limpiado perfectamente con un barreno o con un chorro de agua de lavado para poder sacar todo el material suelto y no afecte cuando se tenga que hacer la extracción de la muestra una vez terminado el ensayo.
- Se procede a efectuar el ensayo de penetración normal SPT ensamblando el trípode y colocando una roldana por debajo del plato de unión de las piernas del trípode. Ensamblar a rosca el saca muestras de paredes partidas o la punta de hincas en forma de cono para posterior perforación.
- Asegurar el guinche a una de las piernas del trípode y hacer pasar por la roldana el cable de acero que irá conectado al sistema de liberación del martillo percutor. Una vez ensamblado se debe levantar el trípode a una altura lo bastante cómoda para poder realizar el ensayo.
- El saca muestras o la punta de hincas cónicas deberá estar en contacto con el suelo natural a explorar, la tubería de hincas deberá estar marcada cada 15 cm hasta los 45 cm para su posterior observación del avance del muestreador bajo el impacto del martillo.
- Con ayuda del guinche se va levantando el martillo hasta que el mecanismo de liberación libere el peso y caiga libremente haciendo que penetre la punta del SPT.
- Se debe seguir este procedimiento hasta que la punta haya penetrado los primeros 15 cm, en este punto es donde se comienza a contabilizar el número de golpes cada 15 cm de penetración, los primeros 15 cm no se toman en cuenta ya que sirve para que la cuchara se asiente y se mantenga firme en el suelo. Para el registro del ensayo se toman en cuenta la suma de los últimos 30 cm o sea la segunda y tercera hincas.
- Llegado al objetivo de los 45 cm de penetración se debe extraer la punta de acero y se procede a sacar la muestra de suelo y depositarla en embaces herméticos para que la pérdida de humedad natural sea la menor posible, esta muestra se lleva a laboratorio para someterla a los ensayos debidos para su clasificación.

### 2.1.5 Numero de golpes normalizado

Bowles propone que un número de golpes del SPT normalizado  $N_s$  se puede calcular al corregir el valor medido  $N$  por efecto de los siguientes factores:

**a) Presión calculada de sobre capa,  $C$**

$$C_N = \left( \frac{P''}{P'} \right)^{1/2}$$

Dónde:

$P'$  = Presión efectiva de sobre capa igual a  $\gamma h$ , en  $\text{k/cm}^2$

$P''$  = Presión de sobre capa de referencia igual a  $1.0 \text{ kg/cm}^2$

**b) Relación de energía del martillo,  $\eta_1$**

$$\eta_1 = \frac{ER}{ER_s}$$

Dónde:

$ER$  = Energía debido a una masa y una altura de caída propia del equipo:

$ER_s$  = Energía estándar debido a una masa de  $63.5 \text{ kg}$  y una altura de caída del mazo de  $0.762 \text{ m}$  ( $ER_s = 474.5 \text{ J}$ )

**c) Longitud de las barras de perforación,  $\eta_2$**

Para el valor de  $\eta_2$  se puede usar el valor de la tabla siguiente:

**Tabla 2.1 Valores para corrección de acuerdo a la longitud de perforación**

Longitud	> 10 m	1.00
	6 - 10	0.95
	4 - 6	0.85
	0 - 4	0.75

**Criterio básico:  $N$  es muy alto si  $L < 10 \text{ m}$**

**Fuente: Ingeniería de Fundaciones**

d) **Corrección por toma muestras  $\eta_3$**

**Tabla 2.2 Valores para corrección por toma muestras**

	Sin revestimiento	1.00
<b>Con revestimiento</b>	Arena densa, arcilla	0.80
	Arena suelta	0.90

**Criterio básico: N es muy alto si se usa revestimiento interior**

**Fuente: Ingeniería de Fundaciones**

e) **Corrección por el diámetro de la perforación  $\eta_4$**

**Tabla 2.3 Valores para corrección por diámetro de perforación**

<b>Diámetro de la perforación</b>	60 – 120 mm	1.00
	150 mm	1.05
	200 mm	1.15

**Criterio básico: N es muy bajo si el diámetro de la perforación supera los diámetros usuales.**

**Fuente: Ingeniería de Fundaciones**

Otra corrección que se debe tomar muy en cuenta es cuando el ensayo se realiza por debajo del nivel freático (y en suelos no cohesivos según Celso Iglesias, arenas saturadas muy finas o limosas), se proponen estos tipos de corrección:

- Terzaghi y Peck si:  $N > 15 \quad N_2 = 15 + 1/2 \cdot (N - 15)$
- Bazaraa si:  $N < 15 \quad N_2 = 0'6 \cdot N$

Para N el número de golpes dados por el SPT

### **2.1.6 Correlaciones empíricas del SPT**

Son de muy gran utilidad y el interés de los métodos de investigación del subsuelo que incluyen ensayos de penetración, puesto que han permitido obtener correlaciones

de validez general o local entre los resultados de campo y los resultados de ensayos de laboratorio, sobre diferentes suelos.

Esto hace posible relacionar directamente resultados de ensayos in situ con propiedades físicas del suelo, lo cual es necesario para selección y el diseño de fundaciones.

Terzaghi y Peck propusieron la siguiente relación entre la densidad relativa  $D_r$  y el número  $N$  de golpes del SPT, que ha sido acogida en muchos tratados tradicionales de ingeniería de fundaciones. Su utilidad es como servir de guía preliminar para formarse un concepto sobre la compacidad natural in situ.

**Tabla 2.4 Valores de SPT para un tipo de Densidad**

No. de goles $N$	Densidad relativa
0 – 4	Muy suelta
4 – 10	Suelta
10 – 30	Mediana
30 – 50	Densa
Mayor que 50	Muy Densa

**Fuente: Terzaghi y Peck 1967**

En la siguiente tabla 2.5, Bowles propone unas correlaciones empíricas entre  $N$  del SPT y otras propiedades de los suelos.

Estos valores deben emplearse con precaución debido a los diversos factores in situ que afectan a  $N$ ,  $D_r$  y  $\Phi$  tales como cementación natural, humedad, angulosidad de los granos y a lo que pueden representar los términos fino, medio y grueso.

**Tabla 2.5 Valores empíricos de  $\Phi$ ,  $D_r$  y  $\gamma$ , relativos a N del SPT en suelos granulares normalmente consolidados y una profundidad de 6m**

Descripción	Muy suelta	Suelta	Mediana	Densa	Muy densa
Densidad relativa	0 – 0.15	0.15 – 0.35	0.35 – 0.65	0.65 – 0.85	0.85 – 1.0
$N_{70}$ SPT: fino	1 – 2	3 – 6	7 – 15	16 – 30	?
Medio	2 – 3	4 – 7	8 – 20	21 – 40	>40
Grueso	3 – 6	5 – 9	10 – 25	26 – 45	>45
$\Phi^\circ$ : fino	26 – 28	28 – 30	30 – 34	33 – 38	
Medio	27 – 28	30 – 32	32 – 36	36 – 42	<50
Grueso	28 – 30	30 – 34	33 – 40	40 – 50	
$\gamma_h$ (KN/m <sup>3</sup> )	11 - 16	14 - 18	17 - 20	17 - 22	20 - 23

**Fuente: Bowles 1988**

En la tabla siguiente se clasifican las arenas, los limos y las arcillas gracias al ensayo del SPT. Como recordaremos se dan una serie de golpes al toma muestras el cual se va introduciendo en el suelo hasta la profundidad de 30 cm, al número de golpes que se realizan para penetrar en dicho suelo se le denomina N.

Con dicho número N y la clase de terreno que es, se podrá calcular gracias a la tabla, la carga que se podrá aplicar en el suelo, sin que este falle, resulta pues una importante herramienta para el cálculo de zapatas y pilotes.

**Tabla 2.6 Valores de Esfuerzo en Función del N° de Golpes de SPT**

Suelo	Designación	N° de golpes	Carga que se puede aplicar en Kg/cm <sup>2</sup>	Ángulo de rozamiento $\phi$ Arenas	ID (Dr) Suelo granular
Arena Y Limo	<u>Muy suelta</u>	0-4	0.2	< 29	0 a 0,15
	<u>Suelta</u>	4-10	0.2-1.1	29 - 30	0,15 a 0,35
	Media	11-30	1.1-2,9	30 - 36	0,35 a 0,65
	Compacta	31-50	2.9-5.1	36 - 41	0,65 a 0,85
	Muy compacta	más de 50	5.1-6.3	> 41	< 1,00
Arcilla	<u>Muy blanda</u>	0-2	0.27	Se deshace en los dedos	
	Blanda	3-5	0.27-0.55	Moldeable a presión débil	
	Media	6-15	0.55-2.2	Moldeable a presión fuerte	
	Firme	16-25	2.2-4	Se marca con la uña	
	Dura	más de 25	4-8.8	Se marca difícilmente	

**Fuente: Proveniente del Manual de Ingeniería de Taludes.**

Las denominaciones de las arenas y limos de “Muy suelta, suelta,...” se refieren a su compacidad relativa o índice de densidad.

La siguiente tabla nos informa sobre las cargas máximas que soportan una serie de terrenos antes de su rotura.

El análisis de dicha tabla y el reconocimiento del terreno (a partir de la muestra obtenida por el SPT), resultan ser de útil ayuda a la hora de realizar cimentaciones superficiales, siempre y cuando se tenga un conocimiento previo de la zona o se contrasten los resultados con sondeos rotativos.

**Tabla 2.7 Cargas máximas**

<b>Carga máxima aplicable según el tipo de terreno</b>	
<b>Tipo de terreno</b>	<b>Carga Máxima Kg /cm<sup>2</sup></b>
Lechos masivos de rocas cristalinas, granitos.	100
Rocas blandas; lechos rocosos de rocas blandas como pizarras areniscas calizas.	14
Roca de arenisca muy compacta.	11
Mezcla de arena y grava compacta.	6.6
Gravas firmes; arcilla compacta: mezcla de arcilla y arena muy compacta.	5.5
Grava suelta; arena gruesa compacta.	4.4
Grava suelta de grano grueso o medio; arena fina compacta; mezcla de arena y arcilla compacta; arcilla firme.	3.3
Arena fina firme; limos compactos inorgánicos; arcillas medias.	2.2
Arenas finas sueltas; limos inorgánicos firmes.	1.65
Suelos de arena y arcilla; limos arcillosos inorgánicos sueltos.	1.1

### **2.1.7 Variables y detalles que inciden en los resultados del SPT**

#### **➤ Peso y altura de caída del martillo**

El peso de 63.5 kg (140lb) no debe presentar problema, pues es fácil comprobarlo en caso de duda. La altura exacta de caída, 76.2 cm (30 pulg.) tiene notable influencia, el

cuidado que se ejerza para mantener constante esta altura es muy importante en la hora de ejecutar el ensayo, dado que puede resultar corta o errática si no se realiza apropiadamente la operación.

Otro aspecto que también puede causar errores es que haya rozamientos entre el tubo del martillo y el mazo evitando así una caída libre del mazo como debería de ser.

➤ **Limpieza del fondo de la perforación**

Existe una tendencia a la acumulación de lodos de desechos en el fondo durante el intervalo transcurrido entre la limpieza de la perforación y la hincada del toma muestras. En general no resulta posible evitar en la práctica esta acumulación, más bien debe tomarse precauciones como ser:

- ☞ La perforación debe limpiarse hasta el fondo y la punta de acero del SPT debe ser bajado lo más pronto posible.
- ☞ Debe comprobarse la presencia y el espesor del lodo acumulado en caso de hallar el nivel freático.

➤ **Presencia de material grueso**

En caso de utilizar un toma muestras de paredes partidas se presenta complicaciones y limitaciones, puesto que este presenta una sección transversal relativamente pequeña (diámetro interior de 1 3/8 pulg.), por esto una partícula gruesa de grava o de otro material pueden obstruir su abertura y restringir la penetración del toma muestras aumentando drásticamente y en forma errónea la resistencia aparente del suelo. Todo lo anterior se puede evitar haciendo uso de una punta de inca en forma de cono poniendo como limitantes los suelos que presenten diámetros de piedras grandes.

➤ **Descuido en el conteo de los golpes**

Cuando el número de golpes no se registra oportunamente y se confía a la memoria del operador, se pueden cometer errores en los resultados anotados.

➤ **Estado de los equipos**

Se ve la necesidad de un perfecto estado de la punta de inca el cual debe tener la correcta forma y biselado de la punta.

## **2.2 Método PDC (Penetrometro Dinámico de Cono) ASTM D 6951-03**

### **2.2.1 Introducción**

Penetrómetro dinámico de cono (PDC) con un martillo de 8 kg: Es un dispositivo utilizado que describe la rigidez, para determinar una resistencia CBR a través de una correlación apropiada. Este ensayo se interpreta como evaluador de la resistencia in situ del material bajo las condiciones existentes en el terreno en el instante de la prueba.

### **2.2.2 Uso y significado**

- Este método de ensayo se usa para evaluar la resistencia in-situ de los suelos inalterados y/o materiales compactados.
- Existen otros métodos de ensayo para penetrómetros con diferentes masas de martillos y tipos de puntas cónicas, los cuales tienen correlaciones que son aplicables únicamente a esos instrumentos específicos.
- El PDC de 8 kg debe ser sostenido verticalmente durante su empleo y, por lo tanto, es utilizado fundamentalmente en aplicaciones de construcciones horizontales, tales como pavimentos y losas de piso.
- El instrumento es típicamente utilizado para evaluar propiedades de los materiales a una profundidad hasta de 1000 milímetros bajo la superficie.
- El PDC de 8 kg puede ser utilizado para estimar las características de resistencia de los suelos de grano fino y grueso, materiales de construcción y materiales débiles modificados o estabilizados. El dispositivo no se puede emplearse en materiales altamente estabilizados o cementados o en materiales granulares que contengan un gran porcentaje de agregados pétreos.
- El PDC puede ser utilizado para estimar la resistencia in-situ de materiales que se encuentren por debajo de una capa altamente estabilizada, previo el barrenado de la misma para permitir un orificio de acceso.

La barrena es un instrumento de acero con una punta en espiral en un lado y una manija en el otro y sirve para taladrar o hacer agujeros en un cuerpo, en nuestro caso en el suelo.

### 2.2.3.-Características del equipo PDC

El equipo de 8 kg está constituido por los siguientes elementos:

- Una varilla de acero de 16 milímetros (5/8 pulgadas) de diámetro, con una punta cónica reutilizable o desechable.
- Un martillo de 8 kilogramos (17.6 libras) el cual es asociado desde una altura fija de 575 milímetros (22.6 pulgadas).
- Un yunque de ensamble y una manija. La punta del cono tiene un ángulo de 60° y el diámetro en la base del cono es de 20 milímetros (0.79 pulgadas).

El aparato debe de ser de acero inoxidable con excepción del cono, el cual puede ser de acero endurecido u otro material similar, resistente al desgaste.

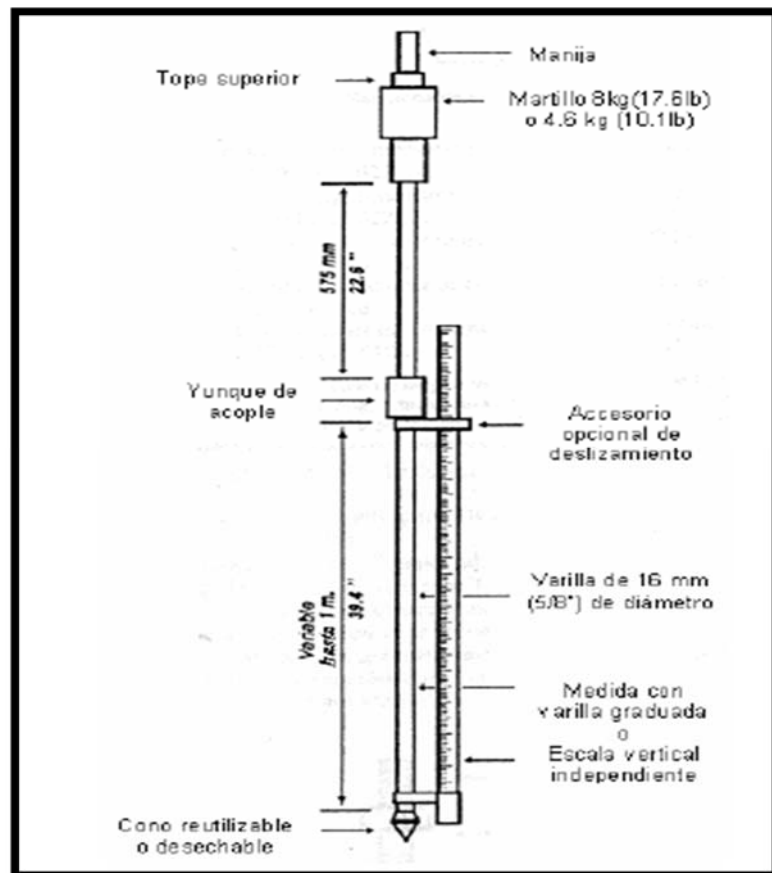
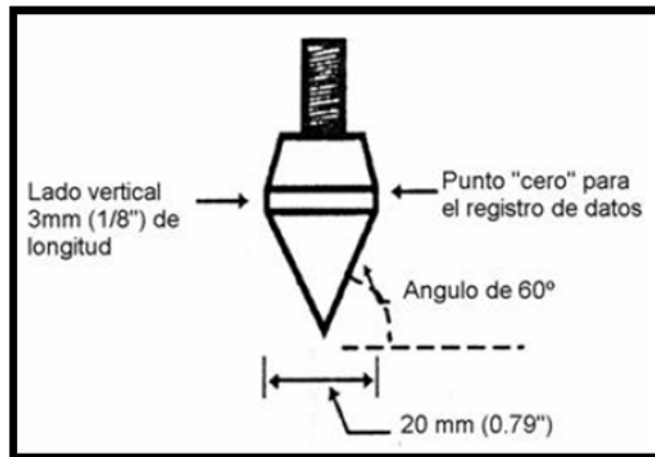


Figura 2.3 Características del PDC

Fuente: ASTM



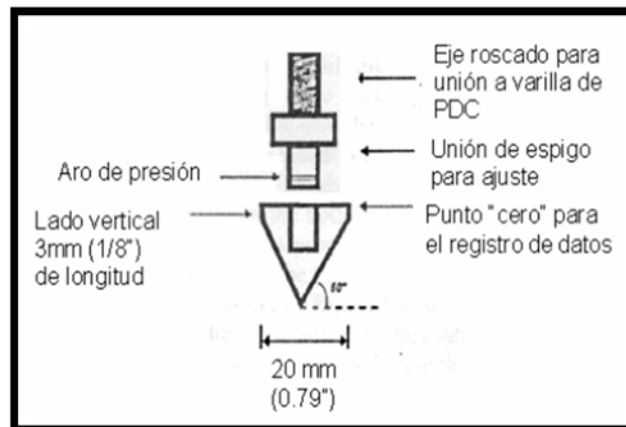
**Figura 2.4 Características del cono**

**Fuente: ASTM**

#### 2.2.4 Tolerancias a cumplirse

- Tolerancia en el peso del martillo de 8 kilogramos es 0.010 kilogramos.
- Dimensión de la caída del mazo de 575 mm (22,6"); su tolerancia es 1,0 mm.
- Tolerancia en el ángulo de la punta del cono de 60° es 1°.
- Tolerancia en la base medida del cono de 20 milímetros es 0.25 milímetros.

**Figura 2.5 Partes del cono**



**Fuente: ASTM**

### 2.2.5 Verificación del equipo y operación básica

Antes de comenzar un ensayo, el dispositivo PDC debe ser inspeccionado en las partes que pueden sufrir daños por fatiga como en la manija y se debe verificar que no exista un excesivo desgaste de la varilla ni del cono reutilizable.

Se debe hincar la punta hasta que el cono quede en punto cero, que es el punto de inicio de lectura de penetración, el operador sostiene el dispositivo a través de la manija en una posición vertical, levanta y libera el martillo, de manera que caiga a la altura especificada.

El encargado de registrar la información, mide y registra la penetración total para un determinado N° de golpes o de la penetración por cada golpe.

### 2.2.6 Correlaciones empíricas del PDC

#### Correlación entre el CBR y el PDC

Para poder hacer una correlación entre el CBR y el PDC, se debe cuantificar el número de golpes proporcionado por el equipo y las alturas de penetración, estos datos se deben organizar de la manera siguiente:

**Tabla 2.8 Esquema de ordenamiento y proceso de datos**

Cantidad de golpes <sup>A</sup>	Penetración acumulada <sup>B</sup> (mm)	Penetración entre lecturas <sup>C</sup> (mm)	Penetración por golpe <sup>D</sup> (mm)	Factor de mazo <sup>E</sup>	Índice DCP <sup>F</sup> (mm/golpe)	CBR % <sup>G</sup>	Humedad % <sup>H</sup>
0	0	--	--	--	--	--	
5	25	25	5	1	5	50	
5	55	30	6	1	6	40	
15	125	70	5	1	5	50	
10	175	50	5	1	5	50	
5	205	30	6	1	6	40	
5	230	25	5	1	5	50	
10	280	50	5	1	5	50	
5	310	30	6	1	6	40	
5	340	30	6	1	6	40	
5	375	35	7	1	7	35	
5	435	60	12	1	12	18	

A: Cantidad de golpes del mazo entre lecturas del ensayo

B: Penetración acumulada después de cada set de golpes del mazo

**C:** Diferencia en la penetración acumulada (nota de pie B) entre lecturas

**D:** Nota de pie C dividida entre nota de pie A

**E:** Anote 1 para el mazo de 8 Kg. (17.6 lb) y 2 para el mazo de 4.6 Kg.

**F:** Nota de pie D x Nota de pie E

**G:** De la correlación entre CBR y el Índice PDC

**H:** Contenido de humedad cuando se disponga de este valor.

Para obtener el valor del CBR se puede utilizar la tabla siguiente de correlación entre el índice de PDC y el CBR.

**Tabla 2.9 Correlación entre CBR y el Índice de PDC**

Índice DCP mm/golpe	CBR %	Índice DCP mm/golpe	CBR %	Índice DCP mm/golpe	CBR %
<3	100	39	4.8	69-71	2.5
3	80	40	4.7	72-74	2.4
4	60	41	4.6	75-77	2.3
5	50	42	4.4	78-80	2.2
6	40	43	4.3	81-83	2.1
7	35	44	4.2	84-87	2.0
8	30	45	4.1	88-91	1.9
9	25	46	4.0	92-96	1.8
10-11	20	47	3.9	97-101	1.7
12	18	48	3.8	102-107	1.6
13	16	49-50	3.7	108-114	1.5
14	15	51	3.6	115-121	1.4
15	14	52	3.5	122-130	1.3
16	13	53-54	3.4	131-140	1.2
17	12	55	3.3	141-152	1.1
18-19	11	56-57	3.2	153-166	1.0
20-21	10	58	3.1	166-183	0.9
22-23	9	59-60	3.0	184-205	0.8
24-26	8	61-62	2.9	206-233	0.7
27-29	7	63-64	2.8	234-271	0.6
30-34	6	65-66	2.7	272-324	0.5
35-38	5	67-68	2.6	>324	<0.5

El CBR in situ estimado se calcula usando el índice del PDC. La penetración por golpe puede ser graficada respecto a la escala de lectura o respecto a la profundidad total alcanzada. La penetración por golpe se utiliza luego para estimar el CBR in situ o la resistencia al corte utilizando una correlación adecuada. La correlación entre la penetración por golpe (PDC) se deriva de la ecuación:

$$\text{CBR} = 292 / \text{PDC}^{1.12}$$

Recomendada por el Cuerpo de Ingenieros de la Armada de los Estados Unidos.

Esta ecuación es utilizada para todo los suelos, exceptuando los suelos arcillosos de baja plasticidad (CL) con CBR por debajo de 10 y los suelos CH.

Para este tipo de suelos, las siguientes ecuaciones son recomendadas por el Cuerpo de Ingenieros de la Armada de los Estados Unidos:

$$\text{CBR de suelos CL} < 10: \text{CBR} = 1 / (0.017019 \times \text{PDC})^2$$

$$\text{Suelos CH:} \quad \text{CBR} = 1 / 0.002871 \times \text{PDC}$$

La selección de la correlación apropiada es un asunto de criterio profesional.

### **2.2.7 Formula empírica del PDC para el cálculo del esfuerzo admisible propuesta por el laboratorio de suelos de la UAJMS**

El laboratorio de la universidad autónoma Juan Misael Saracho propone una fórmula empírica para el cálculo de la capacidad portante de un suelo mediante el uso del equipo de PDC, dicha fórmula la presento a continuación:

$$\sigma = \frac{W * h * m * N}{S * N_p * A} * f$$

Dónde:

$\sigma$  = Esfuerzo admisible del suelo, Kg/cm<sup>2</sup>

W = Peso del martillo = 7.68 kg

h = Altura de caída = 60.25 cm

m = Factor de penetración = 0.1

N = Numero de golpes

S = Altura de Penetración = 30 cm

N<sub>p</sub> = Factor de arcillas de media sensibilidad = 8

A = Área de la sección del cono = 10.2 cm<sup>2</sup>

f = Factor de eficiencia = 0.4

### 2.2.8 Deducción de la ecuación

Las ecuaciones dinámicas son ampliamente usadas en el campo para determinar si el pilote (PDC) ha alcanzado un valor satisfactorio de carga a la profundidad predeterminada. Una de las primeras ecuaciones dinámicas comúnmente llamada la fórmula de Engineering News Record (ENR), se deriva de la teoría del trabajo y energía. De acuerdo con la ENR la resistencia del pilote es la carga última  $Q_u$ , expresada como:

$$Q_u = \frac{W * h}{S}$$

Dónde:

$W$  = Peso del martillo

$h$  = Altura de caída del martillo

$S$  = Factor de Penetración del pilote por golpe del martillo

El factor de penetración  $S$  del pilote se basa usualmente en el valor promedio obtenido de los últimos golpes del martillo y viene dado por la siguiente relación:

$$S = \frac{1}{N^o}$$

Donde

$N^o$  = Numero de golpes del martillo por unidad de penetración

A esta ecuación inicial de la ENR se hace la introducción de un factor de eficiencia para martillos simples y dobles, quedando la nueva ecuación de la siguiente manera:

$$Q_u = \frac{W * h}{S} * f$$

Por consiguiente la ecuación propuesta por el laboratorio está basada en el principio de la inca de pilotes tomando como punto de partida la ecuación de la ENR.

A esta ecuación que está formulada de forma general se le introdujo más variables tomando en cuenta el tipo y comportamiento del suelo arcilloso, estas variables vienen a ser:

N = El número de golpes para una determinada penetración

S = Altura de Penetración

A = Área de la sección transversal

Np = Factor de sensibilidad o sensibilidad

### **Factor de Sensitividad o sensibilidad**

Para muchos depósitos naturales de suelo arcilloso, el esfuerzo de compresión inconfiada se reduce grandemente cuando el suelo a ensayar es remoldeado aunque no se presente un cambio en el contenido de humedad del suelo, Esta propiedad del suelo arcilloso es conocida como sensibilidad. El grado de sensibilidad se expresa como el cociente del esfuerzo de compresión inconfiada en un estado inalterado y remoldeado, que será:

$$S = Np = \frac{Cu(\text{inalterado})}{Cu(\text{remoldeado})}$$

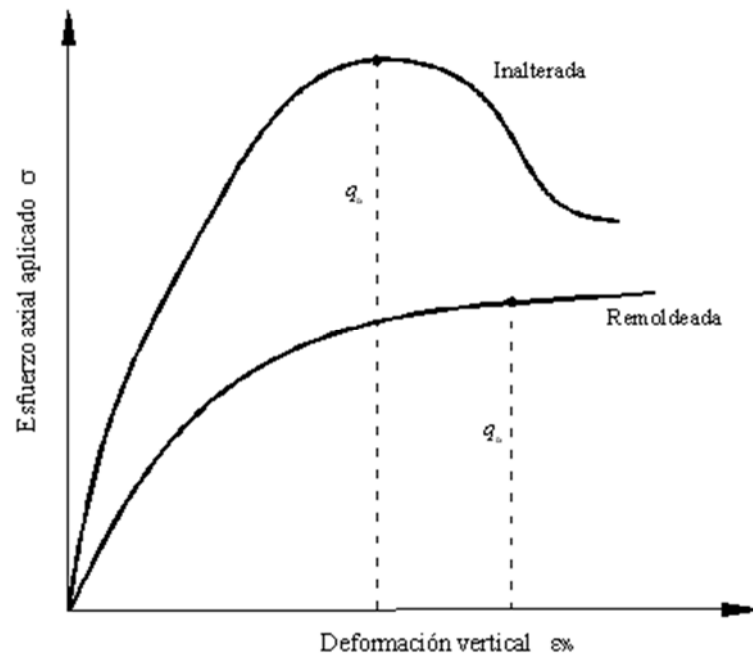
Dónde:

S = Np = Sensibilidad de las arcillas

Cu = Parámetro de resistencia no drenado

Para la mayoría de las arcillas la sensibilidad generalmente varía entre 1 a 8,

**Figura 2.6 Compresión inconfiada en arcilla inalterada y remoldeada**



Fuente: Das, 1998

A continuación se presenta una tabla de valores de sensibilidad de las arcillas:

**Tabla 2.10 Sensitividad o sensibilidad de las arcillas**

Sensibilidad	Descripción
1 - 2	Ligeramente sensitiva
2 - 4	Medianamente sensitiva
4 - 8	Muy sensitiva
8 - 16	Ligeramente activa
16 - 32	Medianamente activa
32 - 64	Muy activa
> 64	Extra activa

Fuente: Das, 1997

Entonces partiendo de la ecuación de la inca de pilotes tenemos:

$$Qu = \sigma = \frac{W * h}{S}$$

Si deseamos saber el esfuerzo para una determina altura de penetración (S) para una repetida acción de cargar (Nº golpes), la ecuación anterior queda:

$$\sigma = \frac{W * h * N}{S * A}$$

Incluyendo el factor de penetración y el factor de eficiencia de la inca de pilotes tenemos:

$$\sigma = \frac{W * h * N}{S * A} * \frac{1}{N^{\circ}} * f$$

si:

$$m = * \frac{1}{N^{\circ}}$$

Tenemos:

$$\sigma = \frac{W * h * m * N}{S * A} * f$$

Introduciendo la variable de factor de sensibilidad o sensibilidad con respecto a las características del suelo (arcillas)

$$\sigma = \frac{W * h * m * N}{S * Np * A} * f$$

Llegando a la ecuación final propuesta por el laboratorio de suelos para el equipo de PDC para la estimación del esfuerzo admisible.

## **2.3 Fatiga, Definición y Propiedades de los suelos**

### **2.3.1 Concepto de Fatiga**

La vida a fatiga se puede definir como el "fallo debido a cargas repetitivas que incluye la iniciación y propagación de una grieta o conjunto de grietas hasta el fallo final por fractura" (Fuchs, 1980). El análisis de fatiga es una herramienta para evaluar la validez de un diseño, o su durabilidad, bajo condiciones de carga simples o complejas conocidas como cargas de servicio.

### **2.3.2 Definición de Suelo**

La definición de suelo en ingeniería se presenta como cualquier material no consolidado compuesto de distintas partículas sólidas con gases o líquidos incluidos. El suelo contiene una amplia variedad de materiales tales como la grava, la arena y las mezclas arcillosas depositadas por glaciares, las arenas aluviales y los limos, las arcillas de los depósitos aluviales de los ríos.

Por tanto, los problemas de ingeniería en suelo o roca, rara vez pueden resolverse confiando ciegamente en datos empíricos recogidos en proyectos anteriores o en los más seductores análisis de computadoras. Cada situación es única y requiere una cuidadosa investigación y un completo análisis científico, así como el criterio ingenieril.

Y aún más, la ingeniería del suelo y de la roca requiere imaginación, intuición, iniciativa. Imaginación para ver representadas en tres dimensiones las fuerzas y reacciones de los complejos materiales; intuición para inferir lo que no puede deducirse del conocimiento científico o de experiencias anteriores; iniciativa para dar nuevas soluciones para los viejos y nuevos problemas; afrontando los riesgos siempre presentes de lo desconocido.

Esto es un desafío constante que la verdadera ingeniería sea una tarea grata.

### **2.3.3 Clasificación de los suelos**

Los suelos se clasifican en:

- **Suelos orgánicos:** Estos son de origen orgánico
- **Suelos inorgánicos:** Son producto de la descomposición física o química de las rocas

#### **2.3.4 Propiedades de los suelos**

En muchos campos, tal como el de la ingeniería, hay que tener en cuenta tantas propiedades importantes, que cualquier tabla de clasificación de suelos resultaría muy burda. En su lugar, una descripción exacta de las propiedades significativas del suelo puede dar la información necesaria sin las instrucciones de una clasificación determinada.

Las propiedades de los suelos se relacionan a continuación, son importantes en la mayoría de los problemas de suelos, y por lo tanto, forman la base de una completa descripción del suelo; también son un requisito suplementario de la Clasificación Unificada.

Para una descripción precisa, muchas de estas propiedades deben ser determinadas por ensayos de laboratorio. Sin embargo, un ingeniero de suelos experimentado, puede estimar la mayor parte de ellas observando y examinando cuidadosamente en el campo pequeñas muestras de suelo.

#### **Plasticidad**

Es la facultad que tienen ellos de alterar su forma si se le aplica una fuerza, sin cambiar sensiblemente de volumen y conservar después la nueva forma adquirida.

La plasticidad se debe al contenido de partículas más finas de la forma laminar, éstas influyen en la compresibilidad del suelo a la vez que en su permeabilidad. Al aplicar presión a una masa de partículas laminares, el volumen ocupado disminuye considerablemente, lo que produce una compresibilidad alta del suelo en cuestión, mientras su permeabilidad es baja.

## Resistencia

La resistencia al esfuerzo cortante de un suelo está determinada por la resistencia al deslizamiento entre las partículas que procuran desplazarse unas respecto de otras. Esta resistencia es máxima cuando un espécimen alcanza el límite de resistencia al esfuerzo cortante, estando sometido a una presión normal efectiva. Una vez superado este límite de resistencia hasta que llega un valor constante, aun cuando las deformaciones continúen en aumento, este nuevo límite se denomina resistencia residual.

Ordinariamente la resistencia se define en términos de la resistencia a compresión sin confinar, pero se puede estimar por la presión que se necesita para comprimir entre los dedos una muestra inalterada. Si el suelo es frágil (que falla bruscamente con pequeña deformación), elástico (como la goma), friable (que se desmorona fácilmente) o susceptible (que pierde resistencia al rearmarse), estos términos deben incluirse en la descripción.

**Tabla 2.11 Resistencia del suelo**

<b>Término Usado</b>	<b>Resistencia a Compresión Sin confinar según Terzaghi y Peck. (kg/ cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Ensayo de campo según Cooling, Skempton y Glossop</b>
Muy Blando	0-0.25	Se escurre entre los dedos al cerrar la mano
Blando	0.25-0.5	Se amasa fácilmente con los dedos
Firme	0.5-1.0	Se amasa con fuerte presión de los dedos
Resistente	1.0-1.5	Se deprime con fuerte presión de los dedos

Muy resistente	1.5-2.0	Se deprime ligeramente con la presión de los dedos
Duro	2.0 o más	Se hunde ligeramente con la punta del lápiz

Fuente: Karl Terzaghi.

### 2.3.5 Ensayos requeridos para la clasificación de suelos

#### Porcentaje de Humedad (ASTM D2216)

El contenido de humedad del suelo, se define como la cantidad de agua presente en el suelo al momento de efectuar el ensayo, relacionado al peso de su fase sólida, se representa por la siguiente expresión:

$$\%w = \frac{\text{peso del agua contenida}}{\text{peso seco}} * 100\% = \frac{W_h - W_s}{W_s} * 100\%$$

W = Humedad.

W<sub>h</sub> = Peso de la muestra húmeda.

W<sub>s</sub> = Peso de la muestra seca.

#### Método del horno

- Se deberán pesar las cápsulas: (C).
- Registrar los pesos obtenidos en la planilla de contenido de humedad, cabe hacer notar que deben identificarse las cápsulas ya sea con números o letras.
- Se llenaran las cápsulas con el suelo húmedo natural: (SH+C).
- Registrar el peso del suelo húmedo más el peso de la cápsula.
- Introducir las cápsulas con el suelo al horno durante 24 horas a una temperatura de 105 a 110°C.
- Extraer del horno y pesar registrando el valor obtenido de peso de suelo seco más cápsula (SS+C).

**Tabla 2.12 Porcentaje de humedad**

<b>Capsula N°</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
Peso Capsula (gr)			
Peso capsula + muestra húmeda (gr)			
Peso capsula + muestra seca (gr)			
Peso muestra seca (gr)			
Peso del agua (gr)			
Contenido de Humedad (%)			

**Fuente: Manual de Laboratorio de Suelos UAJMS**

#### **Análisis Granulométrico de los suelos ASTM D422 - AASHTO T88**

El análisis granulométrico tiene por objeto determinar el tamaño de las partículas o granos que constituyen un suelo y expresar en porcentaje de su peso total la cantidad de granos de distinto tamaño que el mismo contiene.

El procedimiento de ejecución del ensayo es simple y consistente en tomar una muestra de suelo de peso conocido, colocarlo en el juego de tamices ordenados de mayor a menor abertura, pesando los retenidos parciales del suelo en cada tamiz. Esta separación física de la muestra en dos o más fracciones que contiene un suelo, es lo que se conoce como “fraccionamiento”.

La determinación del peso de cada fracción que contiene partículas de un solo tamaño es llamado” análisis mecánico “. Este es uno de los análisis de suelo más antiguo y común, brindando la información básica del material revelando su uniformidad o graduación dentro de rangos establecidos.

**Tabla 2.13 Valores en mm de la abertura de los tamices más usados**

<b>Tamiz</b>	<b>Abertura (mm)</b>
3"	76.2
2 ½"	63.5
2"	50.8
1 ½"	38.1
1"	25.4
¾"	19.1
½"	12.7
3/8"	9.52
¼"	6.35
No. 4	4.76
No. 10	2.0
No. 40	0.420
No. 200	0.075

**Fuente: Manual de Laboratorio de Suelos UAJMS**

### **Límites de tamaño para suelos**

Estos sistemas nos indican el tamaño para gravas, arenas, limos y arcillas.

**Figura 2.7 Sistema de clasificación de suelos**

Sistema de clasificación	Tamaño del grano (mm)
<b>Unificado</b>	Grava: 75 mm a 4.75 mm Arena: 4.75 mm a 0.075 mm Limo y arcilla (finos): <0.075 mm
<b>AASHTO</b>	Grava: 75 mm a 2 mm Arena: 2 mm a 0.05 mm Limo: 0.05 mm a 0.002 mm Arcilla: <0.002 mm

**Fuente: Principios de la ingeniería de cimentaciones - Braja M. Das**

### **Método del lavado**

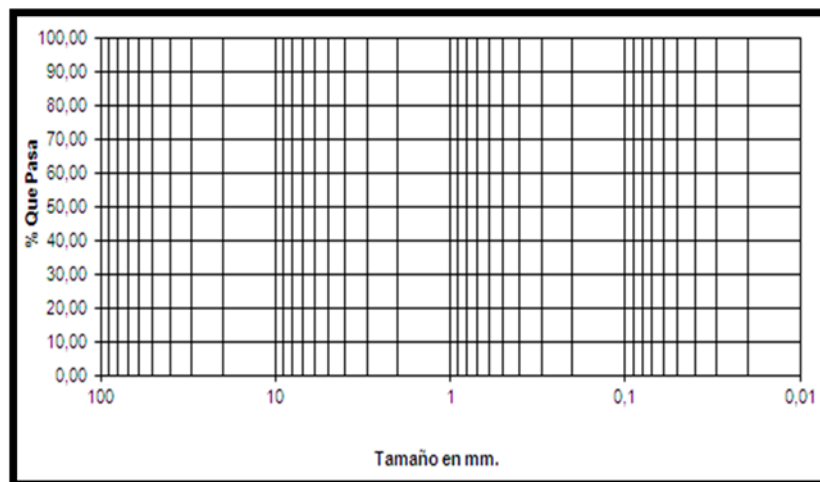
- Se pesan 500 gr de nuestro material seco y se lo dejó saturado con agua 24 horas antes de realizar la práctica.
- Una vez saturado completamente el material se empezó a realizar el método del lavado.
- Para realizar el método del lavado se introdujo nuestra muestra en el tamiz N°200 y se empezó a lavar con agua nuestro material.
- Al comienzo nuestro material presentaba un aspecto oscuro por la sedimentación que después a medida que seguimos lavando se fue perdiendo dejando nuestra muestra con un aspecto más claro.
- Una vez finalizado el lavado en el tamiz solo quedo el material fino retenido en el tamiz 200
- Para minimizar los riesgos de perdida de material y otros tipos de errores, se pesaron los tamices a utilizar para la granulometría anotando todos los para su posterior utilización.
- Con la muestra casada del horno totalmente seca se empezó a realizar la granulometría de nuestro material utilizando los tamices necesarios para los suelos finos, se pueden utilizar desde el N°4, N°10, N°40 y el N°200 dependiendo que tan fino o grueso sea el material.
- Luego se pesaron los tamices utilizados con el material retenido por cada tamiz para así poder obtener el porcentaje de material que paso por cada uno de ellos.

**Tabla 2.14 Granulometría del material**

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DEL MATERIAL QUE PASA (LAVADO)				
TAMIZ NO.	PESO RETENIDO PARCIAL EN GRS.	% RETENIDO PARCIAL	% RETENIDO ACUMULATIVO	% QUE PASA POR EL TAMIZ
40				
100				
200				
PASA 200				
SUMA				

**Fuente:** Guía de la laboratorio de mecánica de suelos UAJMS

**Figura 2.8 Grafica en escala semi logarítmica**

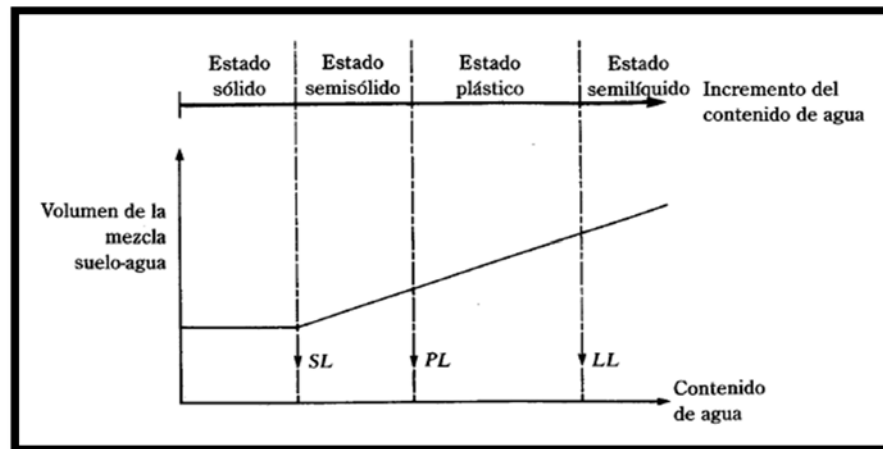


**Fuente:** Guía de la laboratorio de mecánica de suelos UAJMS

### **Límites de Atterberg**

Se define límites de Atterberg o límites de consistencia como las diferentes fronteras entre cualquier de los estados o fases que un suelo pueda estar, según el contenido de agua expresado en porcentaje. Los estados de consistencia definidos por Atterberg son: estado líquido, estado semilíquido, estado plástico, estado semisólido y estado sólido. Llamándose límites de plasticidad a las fronteras (límite líquido y límite plástico) que definen el intervalo plástico.

**Figura 2.9 Definición de los límites de Atterberg**



**Fuente: Principios de la ingeniería de cimentaciones - Braja M. Das**

### **Límite Líquido ASTM D4318 - AASHTO T89**

Se define como el contenido de humedad por debajo del cual el suelo se comporta como un material plástico. A este nivel de contenido de humedad el suelo está en el vértice de cambiar su comportamiento al de un fluido viscoso

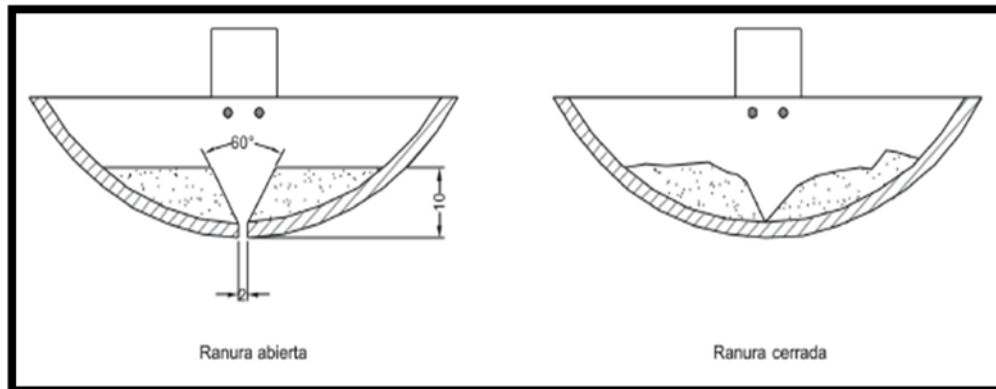
### **Procedimiento**

Los ensayos de consistencia se hacen solamente con la fracción de suelo que pasa por el tamiz N°40.

- Después de secada la muestra de suelo al aire, se debe hacer pasar una muestra representativa por el tamiz N° 40 desechándose el material retenido.
- Antes de utilizar la “Copa de Casagrande”, esta debe ser calibrada, para que la copa tenga una altura de caída de 1 cm (+/- 0.1mm), para esto se debe utilizar la cabeza en forma de dado en el extremo superior del ranurador patrón, la calibración se debe de hacer con respecto a la marca de desgaste que se nota en la parte inferior de la cazuela.



**Figura 2.11 Suelo antes y después de realizado el ensayo**



**Fuente: Manual de Carreteras ABC**

- Después de hacer la ranura se deberá hacer el conteo de los golpes accionando la manija del “Aparato de Casagrande”, uniformemente a razón de 2 golpes por segundo hasta que se cierre el fondo de la ranura en una distancia de 1.27 cm. Si la ranura se cierra antes de los 10 golpes, se saca el material se vuelve a mezclar y se repiten nuevamente los pasos anteriores.
- Después que el suelo se ha unido en la parte inferior de la ranura, se toman la muestra correspondiente a la zona donde se cerró la ranura; se anota su peso húmedo, el n° de golpes obtenidos y se determina el peso seco.
- Se deben repetir los anteriores pasos con el propósito de obtener puntos menores y mayores de 25 golpes, que vayan entre los rangos de 15 a 20, 20 a 25, 25 a 30 y 30 a 35 golpes.
- Determine el porcentaje de humedad correspondiente a cada número de golpes.
- El límite líquido se define cuando el contenido de agua en la curva de fluidez corresponde a 25 golpes.

Tabla 2.15 Limite Liquido

Límite Líquido					
Cápsula					
No de golpes					
Peso suelo húmedo + cápsula (g)					
Peso suelo seco + cápsula (g)					
Peso del agua (g)					
Peso de cápsula (g)					
Peso suelo seco (g)					
Porcentaje de humedad (%)					

**Fuente: Manual de laboratorios de suelos de ingeniería civil-Joseph E. Bowles**

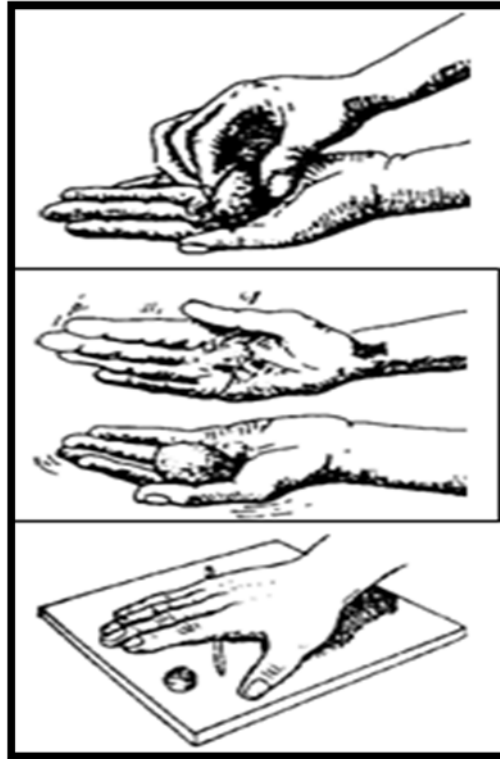
### **Límite Plástico ASTM D4318 - AASHTO T90**

Se define como el contenido de humedad, expresado en porciento, que por debajo del cual se puede considerar el suelo como material no plástico, esto pasa cuando el suelo al rodarlo con la mano sobre una superficie absorbente se agrieta al llegar a un diámetro de 3 mm, entonces se dice que llego a su límite plástico.

### **Procedimiento**

- Se toma aproximadamente la mitad de la muestra que se usó en el límite líquido, procurando que tenga una humedad uniforme, amáselo con la mano y ruédelo sobre una superficie limpia y lisa, como una hoja de papel o vidrio hasta formar un cilindro de 3 milímetros de diámetro.
- El límite plástico se alcanza cuando el cilindro se agrieta al ser reducido a 3 milímetros de diámetro.

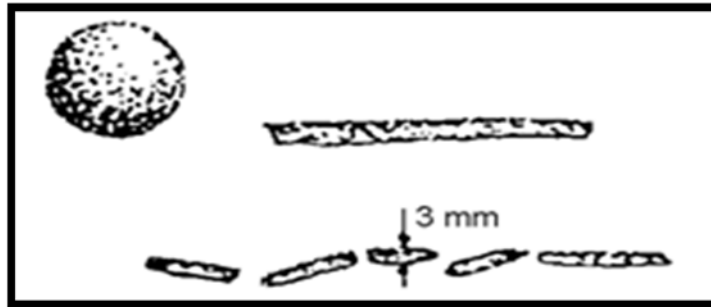
**Figura 2.12 Pasos para el Limite Plástico**



**Fuente: Características físicas y propiedades mecánicas de los suelos y sus métodos de medición- Juan Carlos Hernández Canales**

- Inmediatamente se divide en porciones y se colocan los pedazos en taras. Se pesan y se registran sus pesos.
- Se pone la muestra en el horno por un periodo de 24 horas y se determina su peso seco.
- Con los datos anteriores se calcula el contenido de agua en porcentaje. Si la diferencia entre los porcentajes de humedad no es mayor que 2% se promedian y en caso contrario se repite el ensayo.
- El promedio es el valor en porcentaje del límite plástico.

Figura 2.13 Altura de los rollitos



Fuente: Características físicas y propiedades mecánicas de los suelos y sus métodos de medición- Juan Carlos Hernández Canales

Tabla 2.16 Limite Plástico

Cápsula				
Peso suelo húmedo + cápsula (g)				
Peso suelo seco + cápsula (g)				
Peso del agua (g)				
Peso de cápsula (g)				
Peso suelo seco (g)				
Porcentaje de humedad (%)				

Fuente: Manual de laboratorios de suelos de ingeniería civil-Joseph E. Bowles

### Índice Plástico ASTM D4318 - AASHTO T90

Se define como la diferencia numérica entre los límites líquidos (LL) y plásticos (LP), e indica el margen de humedades dentro del cual se encuentra el suelo en estado plástico, tanto el límite líquido como el límite plástico dependen de la calidad, tipo y cantidad de arcilla presente en la muestra.

$$IP = LL - LP$$

Atterberg clasificó el IP en diferentes secciones, que varía de 0 hasta 17, en los cuales los suelos se comportan de acuerdo a la magnitud del índice de plasticidad, es decir, que se muestra un indicativo para razonar como trabaja el suelo en el terreno.

**Tabla 2.17 Relación del IP con la plasticidad del suelo**

Si $IP = 0$	Si no es posible determinar uno de los dos límites (LL o LP), o si la diferencia es negativa (IP), el suelo se clasifica como No Plástico (NP).
Si $IP < 7$	El suelo tiene una baja plasticidad
Si $7 < IP < 17$	El suelo es medianamente plástico
Si $IP > 17$	Suelo altamente plástico

**Fuente: Características físicas y propiedades mecánicas de los suelos y sus métodos de medición- Juan Carlos Hernández Canales**

### **Clasificación de suelos**

La existencia de esta variedad de sistemas de clasificación de suelos se debe, al hecho de que tanto el ingeniero civil como el geólogo y el agrónomo analizan el suelo desde diferentes puntos de vista. Sin embargo, lo que es fundamental es el hecho de que cualquier clasificación que quiera abarcar las necesidades correspondientes, debe estar basada en las propiedades mecánicas de los suelos, ya que estas son fundamentales en las variadas aplicaciones de la ingeniería.

En general, la textura de un suelo se refiere a su apariencia superficial, la cual es influenciada por el tamaño de los granos presentes en él. La clasificación por texturas permite dividir el suelo en categorías básicas dependiendo del tamaño presente: grava, arena, limo y arcilla, pero en la naturaleza en la presentación habitual de los suelos es una mezcla de ellos, en este caso el nombre del suelo depende de los componentes principales o según el tamaño de grano que predomina en cantidad, según el caso el suelo se puede clasificar como arcillo limoso, areno arcilloso.

En nuestro medio se utilizan los siguientes métodos de clasificación: el sistema de clasificación de los suelos AASHTO (American Association of state High-way and Transportation Officials) y el sistema unificado de clasificación de los suelos SUCS o USCS (Unified Soil Clasification System) también llamado sistema de clasificación ASTM.

### **Sistema de Clasificación de suelos AASHTO.-**

Está destinada principalmente a clasificar los suelos de acuerdo a su adaptabilidad para ser usados en la construcción de pavimentos de carreteras y caminos. El sistema AASHTO se usa principalmente para la clasificación de las capas de carreteras. No se usa en la construcción de cimentaciones.

Este sistema describe un procedimiento para clasificar suelos en 7 grupos principales: Desde A-1 hasta A-7, basado en el tamaño del grano (granulometría), en la plasticidad (límite líquido e índice de plasticidad). Para sub-rasante de un camino, se desarrolló también un número denominado índice de grupo (IG).

- **GRUPO A-1:** El material típico de este grupo, es una mezcla bien gradada de fragmentos de piedra o grava, arena gruesa, arena fina y un ligante no plástico o de baja plasticidad.
- **Grupo A-1-a:** En este sub-grupo se clasifican aquellos materiales que están formados, principalmente, de fragmentos de piedra o grava con o sin ligante fino bien gradado.
- **GRUPO A-1-b:** incluye aquellos materiales que consisten predominantemente de arena gruesa con o sin un ligante de suelo bien graduado
- **GRUPO A-3:** El material típico de este grupo es la arena fina de playa o la arena fina de desierto, sin finos de arcilla, limo o con una pequeña cantidad de limo no plástico. Este grupo también incluye las mezclas aluviales de arena fina mal gradada con pequeñas cantidades de arena gruesa y grava.
- **GRUPO A-2:** Este grupo incluye una amplia variedad de materiales granulares que se encuentran en el límite entre los materiales que se clasifican en los grupos A-1 y A-3 y los materiales tipo limo y arcilla que se clasifican en los grupos A-4, A-5, A-6 y A-7. Incluye todos los materiales que contienen 35% o menos de material que pasa el tamiz N° 200 que no pueden ser clasificados en los grupos A-1 o A-3, debido al contenido de finos o a los índices de plasticidad o ambos por encima de las limitaciones de estos grupos.

➤ **SUB-GRUPO A-2-4 y A-2-5:** Incluyen varios materiales granulares que contienen 35% o menos de material que pasa el tamiz N° 200 y con una porción que pasa el tamiz N° 40 que tiene las características de los grupos A-4 y A-5 respectivamente. Estos grupos comprenden materiales tales como grava y arena gruesa con contenidos de limos e IP por encima de los límites del grupo A-1 y arena fina con un contenido de limo no plástico por encima de las limitaciones del grupo A-3

➤ **SUB GRUPOS A-2-6 y A-2-7** incluyen materiales similares a los descritos en los subgrupos A-2-4 y A-2-5 excepto en que la porción fina contiene arcilla plástica que tiene las características de los granos A-6 y A-7 respectivamente.

Material limo arcillosos: Contiene más de 35% de material que pasa la malla N°200

➤ **GRUPO A-4:** A este grupo pertenecen los suelos limosos sin plasticidad o poco plásticos, que tienen más del 75% de sus partículas pasando por la malla N°200. También incluye este grupo mezclas de limo fino y hasta un 64% de arenas y gravas que carecen de la fracción que pasa de la malla N°200. El índice de grupo varía de 1 a 8, notándose un aumento en el porcentaje de material grueso a medida que se reduce el índice de grupo.

➤ **GRUPO A-5:** Similares al grupo anterior, pero con la diferencia que son del tipo diatomáceo o micáceo. Estos suelos pueden ser muy elásticos según se refleja por su alto límite líquido. Su índice de grupo varía de 1 a 12, indicando los valores crecientes, el efecto combinado de la disminución del porcentaje de material grueso y el aumento de su límite líquido.

➤ **GRUPO A-6:** Arcillas que tiene el 75% o más del material pasado de la malla N°200. Incluye también mezclas de suelo arcilloso fino hasta con un 64% de grava y arena que carecen de la fracción que pasa de la malla N°200. Con la humedad estos suelos suelen experimentar fuertes cambios de volumen. Su índice de grupo varía de 1 a 16, indican los valores crecientes el efecto del aumento de índice plástico y la disminución del porcentaje del material grueso.

➤ **GRUPO A-7:** Similares al grupo anterior, excepto que tiene el límite líquido muy alto como es característico de los suelos del grupo A-5. Pueden ser elásticos y

están sujetos a grandes cambios de volumen, estos suelos tienen un índice de grupo que varía de 1 a 20.

Reflejándose el efecto combinado del aumento del límite líquido, el índice plástico y la disminución del porcentaje del material grueso, en los valores crecientes del índice de grupo.

➤ **SUB-GRUPO A-7-5:** Materiales con un índice de plasticidad moderado en relación con el límite líquido, los cuales pueden ser muy elásticos y están sujetos a grandes cambios de volumen.

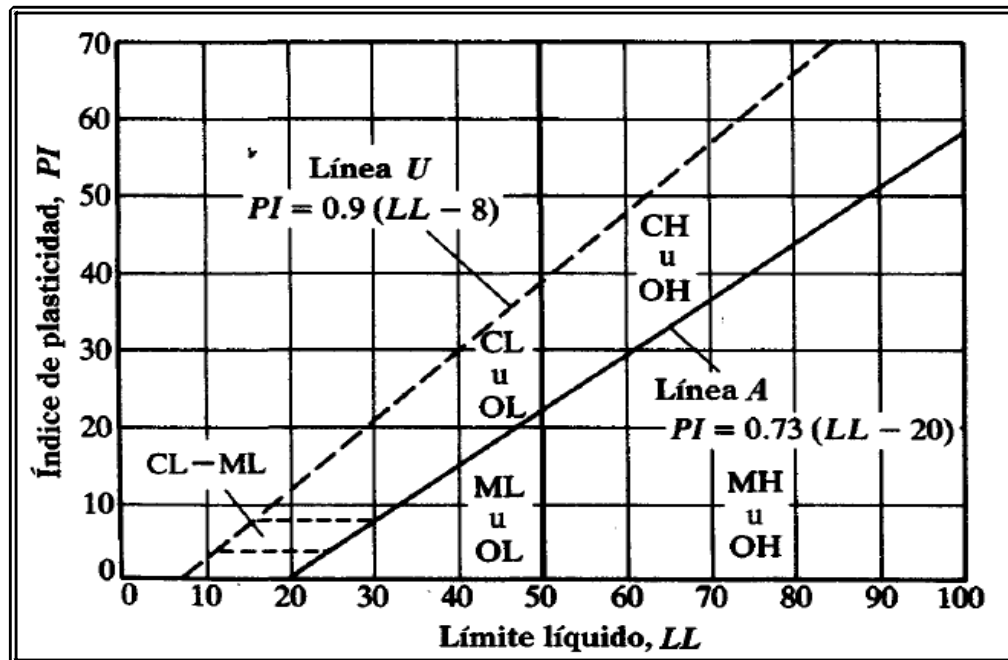
➤ **SUB-GRUPO A-7-6:** Materiales que tienen un índice plástico muy alto con relación a su límite líquido y que están sujetos a extremos cambios de volumen con los cambios de humedad.

En la clasificación AASHTO se describe las propiedades de los suelos descritos anteriormente y donde además se muestran algunas recomendaciones para el uso adecuado en carreteras.

a) **Tamaño de grano grueso:** Se distinguen 3 tamaños principales; grava, arena y finos (limo y arcilla). Los bloques de roca (tamaño superior a los 75 mm) encontrados dentro de la muestra de suelo, se excluyen de la porción de análisis para la clasificación, pero se registra la cantidad presente.

b) **Plasticidad:** El término limo es aplicado a aquellas fracciones finas donde el índice de plasticidad es inferior o igual a 10, el término arcilloso a las fracciones con plasticidad superior o igual a 11.

Figura 2.14 Carta de plasticidad



Fuente: Principios de la ingeniería de cimentaciones - Braja M. Das

- c) **Índice de grupo:** El índice de grupo incluyendo el grupo de clasificación, se usa para determinar la calidad relativa de suelos de terraplenes, material de la subrasante, sub-bases y bases.

El índice de grupo se determina a través de la evaluación en cada grupo, mediante el cálculo de la fórmula empírica:

$$IG = (F_{200} - 35)(0.2 + 0.005(LL - 40)) + 0.01(F_{200} - 15)(IP - 10)$$

Fuente: Manual de laboratorios de suelos de ingeniería civil-Joseph E. Bowles

Dónde:

$F_{200}$  = Porcentaje que pasa la malla N°200, expresado como un número entero.

$LL$  = Límite líquido;  $IP$  = Índice de plasticidad.

También se puede ver esta ecuación de forma resumida:

$$IG = 0.2a + 0.005ac + 0.01bd$$

Dónde:

$$a = F_{200} - 35$$

$$b = F_{200} - 15$$

$$c = LL - 40$$

$$d = IP - 10$$

Si a es mayor de 75, se anotará 75 y si es menor de 35, se anotará 0.

Si b es mayor de 55, se anotará 55, si es menor de 15, se anotará 0.

Para c, si el LL es mayor de 60, se anotará 60 y si es menor de 40 se anotará 0.

Para d, si el IP es mayor a 30, se anotará 30 y si es menor de 10 se anotará 0.

Al calcular el índice de grupo para un suelo de los grupos A-2-6 o A-2-7, se debe usar la ecuación del índice de grupo parcial relativa al índice de plasticidad:

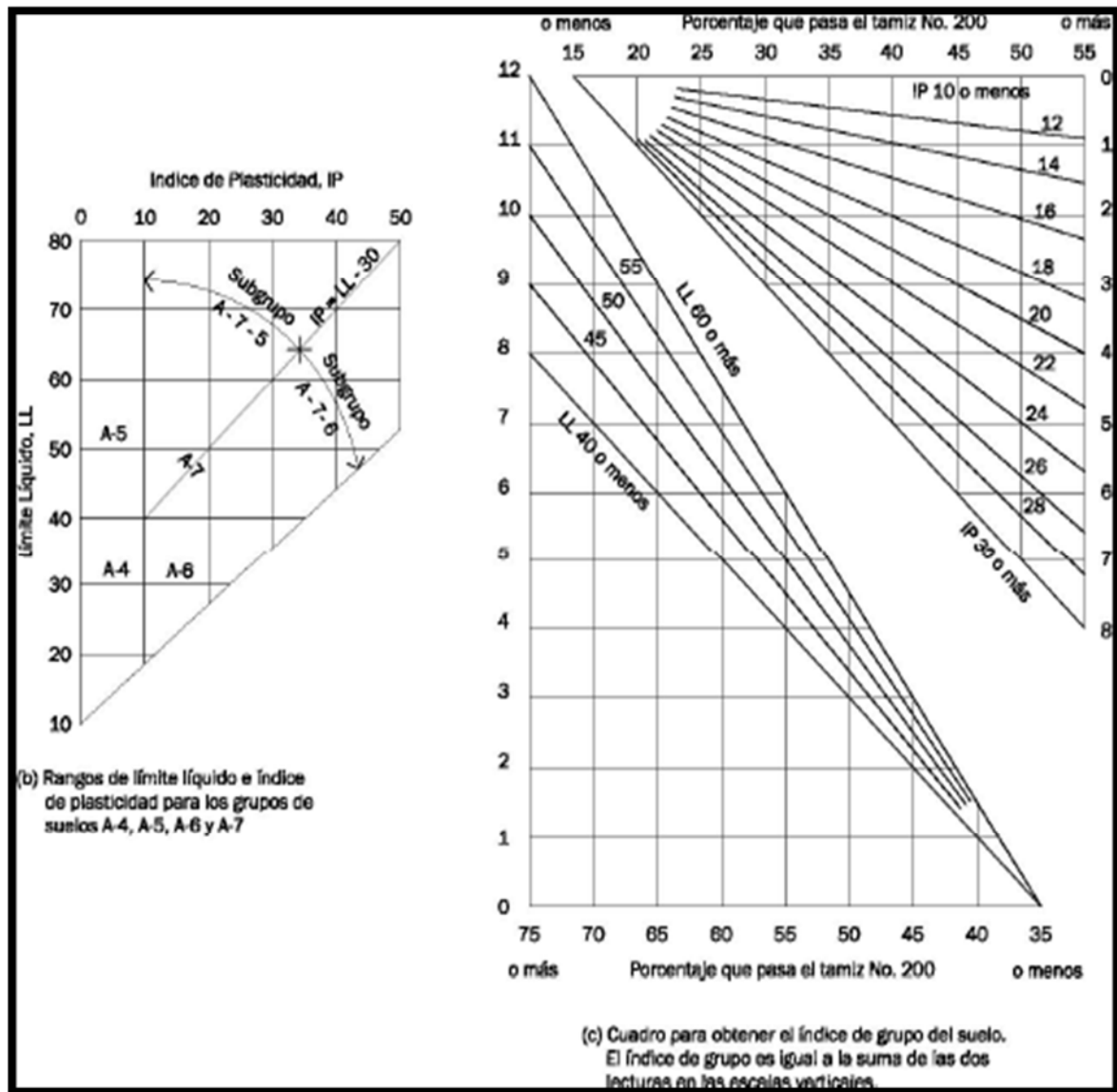
$$IG = 0.01(F_{200} - 15)(IP - 10)$$

Cuando el suelo es NP o cuando el límite líquido no puede ser determinado, el índice de grupo se debe considerar 0. Si un suelo es altamente orgánico (turba) puede ser clasificada como A-8 solo con una inspección visual generalmente, es de color oscuro, fibroso y olor putrefacto.

Algunas reglas con respecto al uso de estas ecuaciones, son las siguientes:

- 1.- Si el valor obtenido es negativo, se debe asumir como  $IG = 0$ .
- 2.- No hay un límite superior para el índice de grupo.
- 3.- El IG debe recordarse a valores enteros: por ejemplo, si el valor obtenido es  $IG=3.3$  realmente es  $IG=3$  o si es  $IG=3.5$  realmente es  $IG=4$ .
- 4.- El índice de grupo de A-1, A-3, A-2-4 y A-2-5 siempre es = 0.
- 5.- Para los grupos A-2-6 y A-2-7, el índice de grupo se calcula con la segunda parte de la ecuación, dependiendo sólo del IP.
- 6.- El valor del índice de grupo debe ser siempre en paréntesis después del símbolo del grupo, como: A-2-6(3), A-7-5(17), etc.

Figura 2.15 Carta de plasticidad AASHTO



Fuente: AASHTO

Tabla 2.18 Sistema de Clasificación AASHTO

<b>SISTEMA DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS AASHTO</b>											
Clasificación general	Materiales granulares (35% o menos pasa por el tamiz N° 200					Materiales limoso arcilloso (más del 35% pasa el tamiz N° 200)					
	A-1	A-3	A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7	A-4	A-5	A-6	A-7	
<b>Grupo:</b>	A-1-a	A-1-b	A-3	A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7	A-4	A-5	A-6	A-7-5 A-7-6
Porcentaje que pasa: N° 10 (2mm)	50 máx	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
N° 40 (0,425mm)	30 máx	50 máx	51 mín	-	-	-	-	-	-	-	-
N° 200 (0,075mm)	15 máx	25 máx	10 máx	35 máx	35 máx	35 máx	35 máx	36 mín	36 mín	36 mín	36 mín
Características de la fracción que pasa por el tamiz N° 40											
Límite líquido	-	-	-	40 máx	41 mín	40 máx	41 mín	40 máx	41 mín	40 máx	41 mín (2)
Índice de plasticidad	6 máx	NP (1)	NP (1)	10 máx	10 máx	11 mín	11 mín	10 máx	10 máx	11 mín	11 mín
Índice de grupo	0	0	0	0	0	4 máx	4 máx	8 máx	12 máx	16 máx	20 máx
Constituyentes principales	Fractamentos de roca, grava y arena		Arena fina	Grava y arena arcillosa o limosa			Suelos limosos		Suelos arcillosos		
Características como subgrupo	Excelente a bueno					Pobre a malo					
(1):	No plástico										
(2):	El índice de plasticidad del subgrupo A-7-5 es igual o menor al LL menos 30										
	El índice de plasticidad del subgrupo A-7-6 es mayor que LL menos 30										

Fuente: AASHTO - 93

### **Sistema de Clasificación de suelos SUCS**

La clasificación se basa en las propiedades de plasticidad y en la distribución del tamaño de grano, según esta última, el sistema divide el suelo en dos grandes categorías:

**Suelos de grano grueso (granulares):** Son aquellos materiales en los cuáles el porcentaje retenido en la malla N°200 es superior al 50 %.

Dentro de ellos están las fracciones de arena y grava, son suelos donde la distribución del tamaño y la forma de los granos influye notablemente en las propiedades físico-mecánicas del suelo. El símbolo de cada grupo está formado por letras mayúsculas, que son las iniciales de los nombres ingleses de los suelos más típicos de ese grupo. El significado se especifica a continuación:

- G = Del término inglés Gravel, fracción de suelo más grueso o tamaño grava.
- S = Del término inglés Sand, fracción del suelo con tamaño de grano comprendido entre la malla N°4 y malla N°200.

Las gravas y arenas se separan por la malla N°4, de manera que un suelo pertenece al grupo genérico G, si más del 50% de su fracción gruesa (retenida en la malla N°200) no pasa por la malla N°40 y es del grupo genérico S, en caso contrario.

Las gravas y las arenas se sub-dividen en 4 tipos:

- Materiales prácticamente limpios de finos, bien gradados.
- ☞ W=Del término inglés Well, buena gradación del suelo, o sea que dentro de la masa de suelo hay predominio de un tamaño de grano. En combinación con los símbolos genéricos, se obtienen los grupos GW y SW.
- Materiales prácticamente limpios de finos, mal gradados.
- ☞ P=del término inglés Poorty, mala gradación. Significa que dentro de la masa de suelo hay variedad en el tamaño de grano, aunque haya predominio de uno de ellos. Da lugar a los grupos GP y SP.

- Materiales con cantidad apreciable de finos no plásticos.
- ☞ M=Del término sueco Mo, fracción fina del suelo que no posee propiedades de plasticidad, o de tener, es muy baja. Da lugar a los grupos GM y SM.
- Materiales con cantidad apreciable de finos plásticos.
- ☞ C=Del término inglés Clay, fracción fina del suelo que posee propiedades de plasticidad. Da lugar a los grupos GC y SC.

**Suelos de grano fino:** También en este caso el sistema considera a los suelos agrupados, formándose el símbolo de cada grupo por dos letras mayúsculas, elegidas con un criterio similar al usado para los suelos gruesos y dando lugar a las siguientes divisiones:

- Materiales orgánicos
- ☞ M=Del término sueco Mo, fracción fina del suelo que no posee propiedades de plasticidad o de tener, es muy baja.
- Arcillas inorgánicas.
- ☞ C=Del término inglés Clay, fracción fina del suelo que posee propiedades de plasticidad.
- Limos y arcillas orgánicas.
- ☞ O=Del término inglés Organic, define a los suelos que tiene propiedades orgánicas como turba, Suelos no aptos para ingeniería.

Cada uno de estos 3 tipos de suelo se sub-dividen, según su límite líquido, en dos grupos. Si este es menor del 50%, es decir, si son suelos de compresibilidad baja o media, se añade el símbolo genérico.

- ☞ L=Del término inglés Low, suelos con baja plasticidad, son aquellos donde  $LL < 50$ . Obteniéndose de esta combinación los grupos ML, CL y OL.

Si los suelos son finos con límite líquido mayor del 50% o sea de alta compresibilidad, llevan tras el símbolo genérico:

- ☞ H=Del término inglés High, suelos con alta plasticidad, aquellos donde  $LL > 50$ . Teniéndose así los grupos MH, CH y OH.

Ha de notarse que las letras L y H no se refieren a alta o baja plasticidad, pues esta propiedad del suelo ha de expresarse en función de 2 parámetros (LL e IP), mientras que en el caso actual solo el valor del límite líquido interviene. En la tabla se presentan los factores a considerar en la clasificación de un suelo de acuerdo con el Sistema Unificado de Clasificación de los suelos (SUCS).

☞ Gravos o arenas son: GW, GP, SW, SP, si menos del 5% del material que pasa a través del tamiz N°200, la designación bien graduada o grada depende de los valores característicos para Cu y CC.

☞ Gravos y arenas son: GM, GC, SM, SC, si más del 12% del material que pasa a través del tamiz N°200; la designación limo o arcilla se determina después de obtener los valores de los límites líquido y plástico de la fracción menor al tamiz N°40 y utilizando los criterios de carta de plasticidad.

☞ Las gravas y las arenas se pueden clasificar así:

**Tabla 2.19 Nomenclatura de los suelos según SUCS**

<b>GW-GC</b>	<b>SW-SC</b>	<b>GP-GC</b>	<b>SP-SC</b>
<b>GW-GM</b>	<b>SW-SM</b>	<b>GP-GM</b>	<b>SP-SM</b>

Si entre 5 y 12 % del material pasa a través del tamiz N°200.

☞ Los suelos de grano fino (más del 50% pasa por el tamiz N°200) son: ML, OL, o CL. Si los límites líquidos son menores que 50%.

☞ Los suelos de grano fino son: MH, OH o CH, si los límites líquidos son superiores a 50%. Los límite líquido y plástico se ejecutan sobre material correspondiente a la fracción menor del tamiz N°40 de todos los suelos, incluyendo gravas, arenas y suelos finos, utilizando en la ejecución los procedimientos del ensayo del límite y plástico.

☞ Estos límites se utilizan con la carta de plasticidad, para determinar el prefijo M, O o C, dependiendo de la localización de las coordenadas de plasticidad del suelo dentro de la carta.

Una descripción visual del suelo debe siempre incluirse conjuntamente con el símbolo unificado para completar la clasificación igualmente para el sistema de clasificación AASHTO, se presenta también una carta de plasticidad para el SUCS.

Este cuadro es otra contribución de Casagrande al sistema y la línea A que se encuentra en él, es conocida como línea A de Casagrande.

De acuerdo con la sugerencia del cuerpo de ingenieros en el sentido de que no se han encontrado suelos con coordenadas superiores a las determinadas por la línea “límite superior” mostrada.

Tabla 2.20 Sistema de Clasificación SUCS

SISTEMA DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS UNIFICADO "U.S.C.S."									
DIVISIONES PRINCIPALES		Símbolos del grupo	NOMBRES TÍPICOS	IDENTIFICACIÓN DE LABORATORIO					
SUELOS DE GRANO GRUESO	GRAVAS	Gravas limpias	GW	Gravas, bien graduadas, mezclas grava-arena, pocos finos o sin finos.	Determinar porcentaje de grava y arena en la curva granulométrica. Según el porcentaje de finos (fracción inferior al tamiz número 200). Los suelos de grano grueso se clasifican como sigue:	$C_u = D_{60}/D_{10} > 4$ $C_c = (D_{30})^2 / D_{10} \times D_{60}$ entre 1 y 3			
		(sin o con pocos finos)	GP	Gravas mal graduadas, mezclas grava-arena, pocos finos o sin finos.		No cumplen con las especificaciones de granulometría para GW.			
		Gravas con finos (apreciable cantidad de finos)	GM	Gravas limosas, mezclas grava-arena-limo.	Límites de Atterberg debajo de la línea A o $IP < 4$ . Límites de Atterberg sobre la línea A con $IP > 7$ .	Encima de línea A con $IP$ entre 4 y 7 son casos límite que requieren doble símbolo.			
			GC	Gravas arcillosas, mezclas grava-arena-arcilla.					
	ARENAS	Arenas limpias (pocos o sin finos)	SW	Arenas bien graduadas, arenas con grava, pocos finos o sin finos.	$< 5\%$ - $> 12\%$ - $> GM, GC, SM, SC$ .	$C_u = D_{60}/D_{10} > 6$ $C_c = (D_{30})^2 / D_{10} \times D_{60}$ entre 1 y 3			
			SP	Arenas mal graduadas, arenas con grava, pocos finos o sin finos.					
		Arenas con finos (apreciable cantidad de finos)	SM	Arenas limosas, mezclas de arena y limo.	$5$ al $12\%$ ->casos límite que requieren usar doble símbolo.	Cuando no se cumplen simultáneamente las condiciones para SW.			
			SC	Arenas arcillosas, mezclas arena-arcilla.					
			Limos y arcillas:				ML	Limos inorgánicos y arenas muy finas, limos limpios, arenas finas, limosas o arcillosa, o limos arcillosos con ligera plasticidad.	Los límites situados en la zona rayada con $IP$ entre 4 y 7 son casos intermedios que precisan de símbolo doble.
			Límite líquido menor de 50	CL			Arcillas inorgánicas de plasticidad baja a media, arcillas con grava, arcillas arenosas, arcillas limosas.		
OL	Limos orgánicos y arcillas orgánicas limosas de baja plasticidad.								
Límite líquido mayor de 50	Limos y arcillas:		MH	Limos inorgánicos, suelos arenosos finos o limosos con mica o diatomeas, limos elásticos.					
	Límite líquido mayor de 50	CH	Arcillas inorgánicas de plasticidad alta.						
		OH	Arcillas orgánicas de plasticidad media a elevada; limos orgánicos.						
Suelos muy orgánicos		PT	Turba y otros suelos de alto contenido orgánico.						

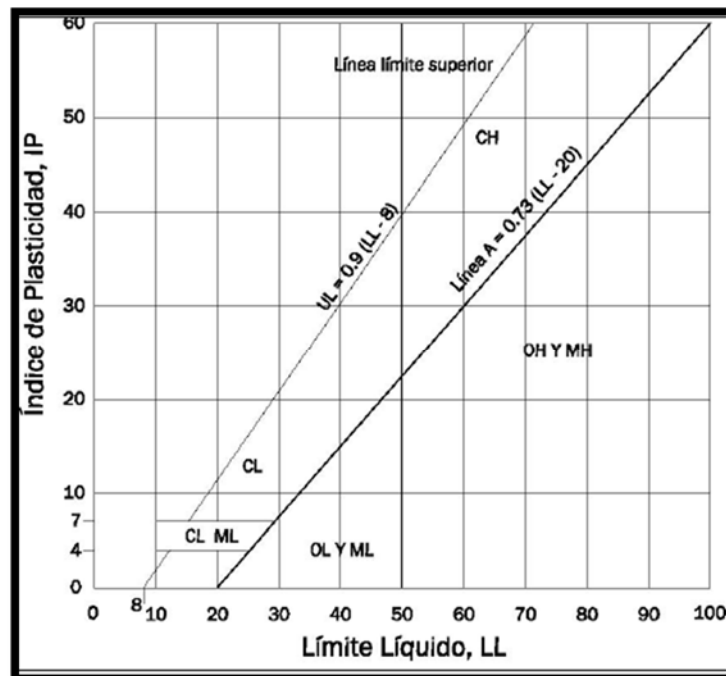
Fuente: ASTM

Para la clasificación de los suelos de grano fino y suelos de granos gruesos con parte de finos. Los límites de Atterberg que se grafican en el área sombreada son clasificaciones de frontera y requieren el símbolo de símbolos duales.

La designación limo o arcilla se determina después de obtener los valores de los límites líquido y plástico de la fracción menor al tamiz N°40 y utilizando los criterios de la carta de plasticidad:

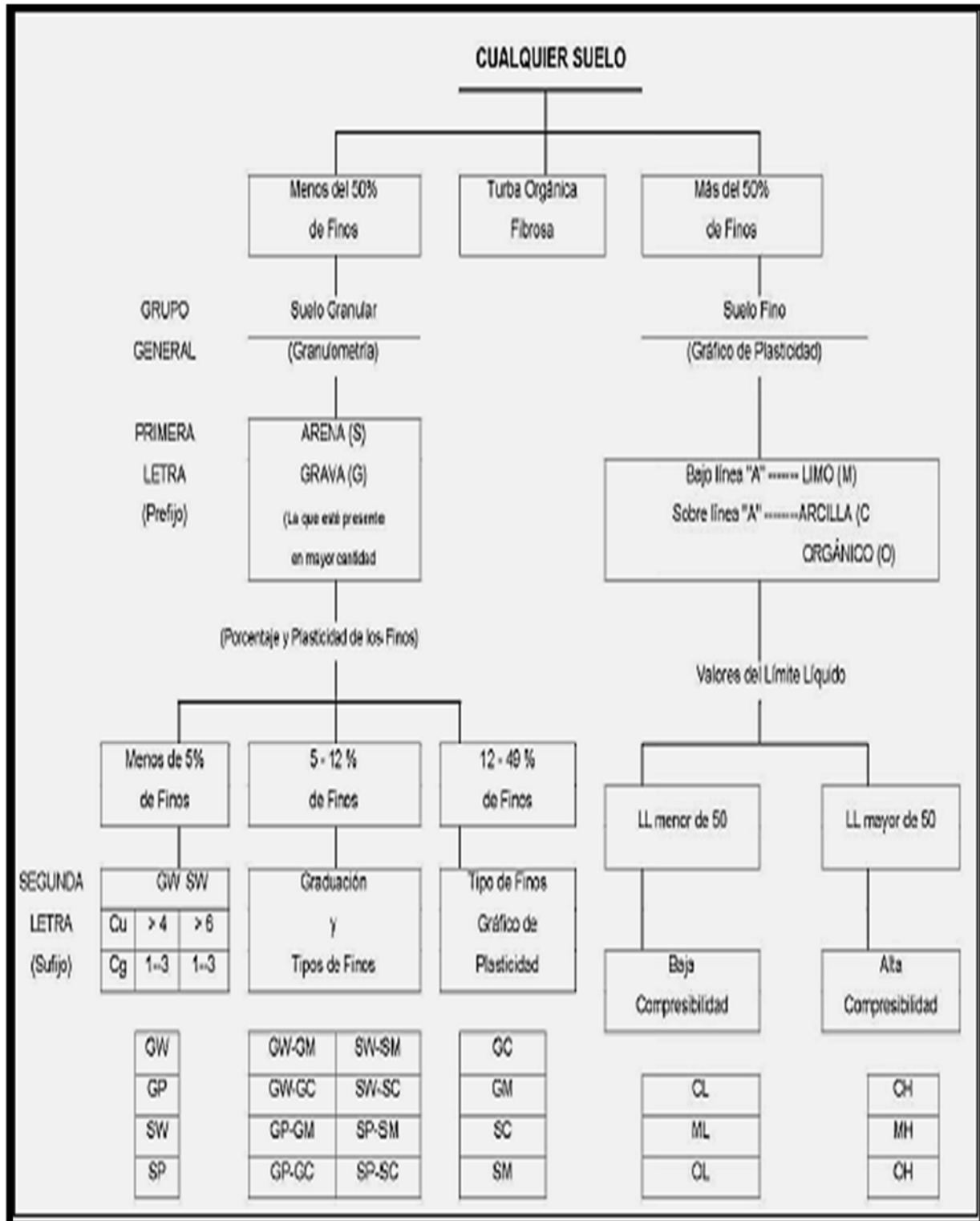
$$IP = 0.73 (LL-20)$$

Figura 2.16 Carta de plasticidad SUCS



Fuente ASTM

Figura 2.17 Modelo de Clasificación SUCS



Fuente: ASTM

## 2.4 Análisis estadístico

La estadística, es una ciencia con base matemática referente a la recolección, análisis e interpretación de datos, que busca explicar condiciones regulares en fenómenos de tipo aleatorio. Es transversal a una amplia variedad de disciplinas, desde la Física hasta las Ciencias Sociales, desde las ciencias de la salud hasta el control de calidad. Se usa para la toma de decisiones en áreas de negocios o instituciones gubernamentales.

La Estadística se divide en dos ramas:

➤ **La estadística descriptiva.-** Que se dedica a los métodos de recolección, descripción, visualización y resumen de datos originados a partir de los fenómenos en estudio. Los datos pueden ser resumidos numéricamente o gráficamente. Ejemplos básicos de parámetros estadísticos son: la media y la desviación estándar. Algunos ejemplos gráficos son: histograma, pirámide poblacional, etc.

➤ **La inferencia estadística.-** Que se dedica a la generación de los modelos, inferencias y predicciones asociadas a los fenómenos en cuestión teniendo en cuenta la aleatoriedad de las observaciones. Se usa para modelar patrones en los datos y extraer inferencias acerca de la población bajo estudio. Estas inferencias pueden tomar la forma de respuestas a preguntas si/no (prueba de hipótesis), estimaciones de características numéricas (estimación), pronósticos de futuras observaciones, descripciones de asociación (correlación) o modelamiento de relaciones entre variables (análisis de regresión). Otras técnicas de modelamiento incluyen series de tiempo y minería de datos.

Ambas ramas (descriptiva e inferencial) comprenden la Estadística Aplicada. Hay también una disciplina llamada Estadística Matemática, la cual se refiere a las bases teóricas de la materia. La palabra “Estadística”, también se refiere al resultado de aplicar un algoritmo estadístico a un conjunto de datos, como en estadísticas económicas, estadísticas criminales, etc.

### 2.4.1. Población

El concepto de población en estadística va más allá de lo que comúnmente se conoce como tal. Una población se precisa como un conjunto finito o infinito de personas u objetos que presentan características comunes.

- Una Población, es un conjunto de todos los elementos que estamos estudiando, acerca de los cuales intentamos sacar conclusiones. Levin & Rubin (1996).
- "Una Población, es un conjunto de elementos que presentan una característica común". Cadenas (1974).

El tamaño que tiene una población es un factor de suma importancia en el proceso de investigación estadística, y este tamaño viene dado por el número de elementos que constituyen la población, según el número de elementos la población puede ser finita o infinita. Cuando el número de elementos que integra la población es muy grande, se puede considerar a esta como una población infinita, por ejemplo; el conjunto de todos los números positivos. Una población finita es aquella que está formada por un limitado número de elementos.

Cuando la población es muy grande, es obvio que la observación de todos los elementos se dificulte en cuanto al trabajo, tiempo y costos necesarios para hacerlo. Para solucionar este inconveniente se utiliza una muestra estadística.

Es a menudo imposible o poco práctico observar la totalidad de los individuos, sobre todos si éstos son muchos. En lugar de examinar el grupo entero llamado población o universo, se examina una pequeña parte del grupo llamada muestra.

### 2.4.2 Muestra

- "Se llama Muestra a una parte de la población a estudiar que sirve para representarla". Murria R. Spiegel (1991).
- "Una Muestra es una colección de algunos elementos de la población, pero no de todos". Levin & Rubin (1996).

➤ "Una muestra debe ser definida en base de la población determinada, y las conclusiones que se obtengan de dicha muestra solo podrán referirse a la población en referencia", Cadenas (1974).

El estudio de muestras es más sencillo que el estudio de la población completa; cuesta menos y lleva menos tiempo. Por último, se ha probado que el examen de una población entera todavía permite la aceptación de elementos defectuosos; por tanto, en algunos casos, el muestreo puede elevar el nivel de calidad.

Una muestra representativa contiene las características relevantes de la población en las mismas proporciones que están incluidas en tal población.

Los expertos en estadística recogen datos de una muestra. Utilizan esta información para hacer referencias sobre la población que está representada por la muestra. En consecuencia muestra y población son conceptos relativos. Una población es un todo y una muestra es una fracción o segmento de ese todo.

### **2.4.3 Muestreo**

Esto no es más que el conjunto de procedimientos o técnicas empleados para obtener una o más muestras de una población.

Este se realiza una vez que se ha establecido un marco muestral representativo de la población, se procede a la selección de los elementos de la muestra aunque hay muchos diseños de la muestra. Al tomar varias muestras de una población, las estadísticas que calculamos para cada muestra no necesariamente serían iguales, y lo más probable es que varían de una muestra a otra.

#### **Tipos de muestreo**

Existen dos métodos para seleccionar muestras de poblaciones; el muestreo no aleatorio o de juicio y el muestreo aleatorio o de probabilidad. En este último todos los elementos de la población tienen la oportunidad de ser escogidos en la muestra. Una muestra seleccionada por muestreo de juicio se basa en la experiencia de alguien con la población. Algunas veces una muestra de juicio se usa como guía o muestra

tentativa para decidir cómo tomar una muestra aleatoria más adelante. Las muestras de juicio evitan el análisis estadístico necesario para hacer muestras de probabilidad.

#### 2.4.4 Variables y atributos

Las variables, también suelen ser llamados caracteres cuantitativos, son aquellos que pueden ser expresados mediante números. Son caracteres susceptibles de medición. Como por ejemplo, la estatura, el peso, el salario, la edad, etc.

➤ Según, Murray R. Spiegel, (1992) "una variable es un símbolo, tal como X, Y, Hx, que puede tomar un valor cualquiera de un conjunto determinado de ellos, llamado dominio de la variable. Si la variable puede tomar solamente un valor, se llama constante."

Todos los elementos de la población poseen los mismos tipos de caracteres; pero, como éstos en general no suelen representarse con la misma intensidad, es obvio que las variables toman distintos valores. Por tanto, estos distintos números o medidas que toman los caracteres son los "valores de la variable". Todos ellos juntos constituyen una variable.

Los atributos también llamados caracteres cualitativos, son aquellos que no son susceptibles de medición; es decir, que no se pueden expresar mediante un número.

La forma de expresar los atributos es mediante palabras, por ejemplo: profesión, estado civil, sexo, nacionalidad, etc. Puede notar que los atributos no se presentan en la misma forma en todos los elementos. Estas distintas formas en que se presentan los atributos reciben el nombre de "modalidades".

#### 2.4.5 Formas de observar a la población

- Atendiendo a la fuente se clasifican en directa e indirecta.

**Observación directa:** Es aquella donde se tienen un contacto directo con los elementos o caracteres en los cuales se presenta el fenómeno que se pretende investigar, y los resultados obtenidos se consideran datos estadísticos originales. Para Ernesto Rivas González (1997) "Investigación Directa, es aquella en que el investigador observa directamente los casos o individuos en los cuales se produce el

fenómeno, entrando en contacto con ellos; sus resultados se consideran datos estadísticos originales, por esto se llama también a ésta, investigación primaria".

**Observación indirecta:** Es aquella donde la persona que investiga hace uso de datos estadísticos ya conocidos en una investigación anterior, o de datos observados por un tercero (persona o entidad). Con el fin de deducir otros hechos o fenómenos.

- Atendiendo a la periodicidad, puede ser continua, periódica o circunstancial.

**Observación continua:** Como su nombre lo indica es aquella que se lleva a cabo de un modo permanente.

**Observación periódica:** Es aquella que se lleva a cabo a través de períodos de tiempo constantes. Estos períodos de tiempos pueden ser: semanas, trimestres, semestres, años, etc. Lo que debemos destacar es que los períodos de tiempo tomados como unidad deben ser constantes en lo posible.

**Observación circunstancial:** Es aquella que se efectúa en forma ocasional o esporádica, esta observación hecha más por una necesidad momentánea, que de carácter regular o permanente.

- Atendiendo a la cobertura; pueden ser: exhaustiva, parcial o mixta.

**Observación exhaustiva:** Cuando la observación es efectuada sobre la totalidad de los elementos de la población se habla de una observación exhaustiva.

**Observación parcial:** Dado que las poblaciones en general son grandes, la observación de todos sus elementos se ve imposibilitada. La solución para superar este inconveniente es observar una parte de esta población.

**Observación mixta:** En este tipo de observación se combinan adecuadamente la observación exhaustiva con la observación parcial. Por lo general, este tipo de observaciones se lleva a cabo de tal manera que los caracteres que se consideran básicos se observan exhaustivamente y los otros mediante una muestra; o bien cuando la población es muy grande, parte de ella se observa parcialmente.

#### 2.4.6 Datos estadísticos

Los datos estadísticos no son otra cosa que el producto de las observaciones efectuadas en las personas y objetos en los cuales se produce el fenómeno que queremos estudiar. Dicho en otras palabras, son los antecedentes (en cifras) necesarios para llegar al conocimiento de un hecho o para reducir las consecuencias de este.

Los datos estadísticos se pueden encontrar de forma no ordenada, por lo que es muy difícil en general, obtener conclusiones de los datos presentados de esta manera. Para poder obtener una precisa y rápida información con propósitos de descripción o análisis, estos deben organizarse de una manera sistemática; es decir, se requiere que los datos sean clasificados. Esta clasificación u organización puede muy bien hacerse antes de la recopilación de los datos.

#### Clasificación de los datos estadísticos

Los Datos Estadísticos pueden ser clasificados en: cualitativos, cuantitativos, cronológicos y geográficos.

- **Datos cualitativos:** Cuando los datos son cualitativos, la diferencia entre ellos es de clase y no de cantidad.
- **Datos cuantitativos:** Cuando los valores de los datos representan diferentes magnitudes, decimos que son datos cuantitativos.
- **Datos cronológicos:** Cuando los valores de los datos varían en diferentes instantes o períodos de tiempo, los datos son reconocidos como cronológicos.
- **Datos geográficos:** Cuando los datos están referidos a una determinada zona se dice que son datos geográficos.

#### 2.4.7 Medidas de tendencia central

En los capítulos anteriores, nos referimos a la clasificación, ordenación y presentación de datos estadísticos, limitando el análisis de la información a la interpretación porcentual de las distribuciones de frecuencia. El análisis estadístico

propriadamente dicho, parte de la búsqueda de parámetros sobre los cuales pueda recaer la representación de toda la información.

Las medidas de tendencia central, llamadas así porque tienden a localizarse en el centro de la información, son de gran importancia en el manejo de las técnicas estadísticas, sin embargo, su interpretación no debe hacerse aisladamente de las medidas de dispersión, ya que la representatividad de ellas está asociada con el grado de concentración de la información.

### **Media aritmética**

Cotidiana e inconscientemente estamos utilizando la media aritmética. Cuando por ejemplo, decimos que un determinado fumador consume una cajetilla de cigarrillos diaria, no aseguramos que diariamente deba consumir exactamente los 20 cigarrillos que contiene un paquete sino que es el resultado de la observación, es decir, dicho sujeto puede consumir 18, un día; 19 otro; 20, 21, 22; pero según nuestro criterio, el número de unidades estará alrededor de 20.

Matemáticamente, la media aritmética se define como la suma de los valores observados dividida entre el número de observaciones:

$$\bar{X} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_i + \dots + x_n}{N} = \frac{\sum_1^N x_i}{N}$$

$\bar{X}$  : Media aritmética de la variable X.

$x_i$ : Valores de la variable X.

N: Número de observaciones.: Signo de sumatoria, indica que se debe sumar.

### **La mediana**

Otra medida de tendencia central, utilizada principalmente en estadística no paramétrica, es la mediana, la cual no se basa en la magnitud de los datos, como la media aritmética, sino en la posición central que ocupa en el orden de su magnitud, dividiendo la información en dos partes iguales, dejando igual número de datos por encima y por debajo de ella.

### La mediana cuando los datos no están agrupados en intervalos

Partiendo de la información bruta, ordenamos los datos ascendente o descendientemente:

$$x_1, x_2, x_3, \dots, x_i, \dots, x_n$$

$$Me = x_{\left(\frac{n+1}{2}\right)}$$

Si n es impar

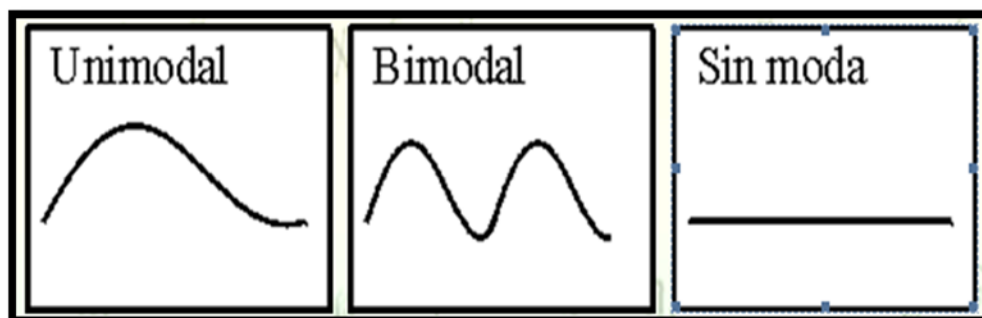
$$Me = \frac{x_{\left(\frac{n}{2}\right)} + x_{\left(\frac{n}{2}+1\right)}}{2}$$

Si n es par

### La moda

La moda es el valor más común (de mayor frecuencia dentro de una distribución). Una información puede tener una moda y se llama unimodal, dos modas y se llama bimodal, o varias modas y llamarse multimodal. Sin embargo puede ocurrir que la información no posea moda.

Figura 2.18 Tipos de moda



Fuente: Probabilidades y Estadística. Carles M. Cuadras.

### **La moda cuando los datos no están agrupados en intervalos**

Se tomarán los datos que se repiten más dentro de la planilla

### **Cálculo de la moda cuando la información está agrupada en intervalos**

Cuando la información se encuentra agrupada en intervalos de igual tamaño la moda se calcula con la siguiente expresión:

$$Mo = LI + \frac{f_m - f_{(m-1)}}{2f_m - f_{(m-1)} - f_{(m+1)}} A$$

$Mo$ : Moda.

$LI$ : Límite inferior del intervalo modal.

$f_m$ : Frecuencia de la clase modal.

$f_{(m-1)}$  : Frecuencia de la clase pre modal.

$f_{(m+1)}$  : Frecuencia de la clase pos modal.

$A$ : Amplitud de los intervalos.

### **2.4.8 Medidas de dispersión**

Las Medidas de Dispersión, también llamadas Medidas de Variabilidad, muestran la variabilidad de una distribución, indicando por medio de un número, si las diferentes puntuaciones de una variable están muy alejadas de la media.

Cuanto mayor sea ese valor, mayor será la variabilidad, cuanto menor sea, más homogénea será a la media. Así se sabe si todos los casos son parecidos o varían mucho entre ellos.

Para calcular la variabilidad que una distribución tiene respecto de su media, se calcula la media de las desviaciones de las puntuaciones respecto a la media aritmética.

Pero la suma de las desviaciones es siempre cero, así que se adoptan dos clases de estrategias para salvar este problema. Una es tomando las desviaciones en valor

absoluto (Desviación media) y otra es tomando las desviaciones al cuadrado (Varianza).

Para medir el grado de dispersión de una variable, se utilizan principalmente los siguientes indicadores:

- Rango o recorrido.
- Desviación estándar.
- Varianza.
- Coeficiente de variabilidad.
- Covarianza.

### **Rango o recorrido**

Es la medida de dispersión más sencilla ya que solo considera los dos valores extremos de una colección de datos, sin embargo, su mayor utilización está en el campo de la estadística no paramétrica:

$$R = X_{\text{máx}} - X_{\text{mín}}$$

$X_{\text{máx}}$ ,  $X_{\text{mín}}$  son el máximo y el mínimo valor de la variable X, respectivamente.

### **Desviación estándar**

La variancia a veces no se interpreta claramente, ya que se mide en unidades cuadráticas. Para evitar ese problema se define otra medida de dispersión, que es la Desviación Típica, o Desviación Estándar, que se halla como la raíz cuadrada positiva de la variancia. La desviación típica informa sobre la dispersión de los datos respecto al valor de la media; cuanto mayor sea su valor, más dispersos estarán los datos.

Esta medida viene representada en la mayoría de los casos por S, dado que es su inicial de su nominación en inglés.

Desviación estándar muestral:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

Desviación estándar poblacional:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \mu)^2}{N}}$$

## Varianza

El problema de los signos en la desviación media, es eludido tomando los valores absolutos de las diferencias de los datos con respecto a la media aritmética. Ahora bien, la varianza obvia los signos elevando las diferencias al cuadrado, lo cual resulta ser más elegante, aparte de que es supremamente útil en el ajuste de modelos estadísticos que generalmente conllevan formas cuadráticas.

La varianza es uno de los parámetros más importantes en estadística paramétrica, se puede decir que, teniendo conocimiento de la varianza de una población, se ha avanzado mucho en el conocimiento de la población misma. Numéricamente definimos la varianza, como desviación cuadrática media de los datos con respecto a la media aritmética:

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^m (x_i - \bar{X})^2 f_i}{n}$$

$S^2$  : Varianza.

$x_i$  : Valor de la variable X.

▪ : Media aritmética de la información.

$f_i$  : Frecuencia absoluta de la observación  $x_i$ .

$n$  : Tamaño de la muestra.

$m$  : Número de agrupamientos o intervalos.

$$S = \sqrt{S^2} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (x_i - \bar{X})^2 f_i}{n}}$$

La varianza es siempre positiva o 0:  $S_X^2 \geq 0$

### **Coefficiente de variabilidad**

Generalmente interesa establecer comparaciones de la dispersión, entre diferentes muestras que posean distintas magnitudes o unidades de medida.

El coeficiente de variabilidad tiene en cuenta el valor de la media aritmética, para establecer un número relativo, que hace comparable el grado de dispersión entre dos o más variables, y se define como:

$$CV = \frac{S}{\bar{X}} 100$$

#### **2.4.9 Coeficiente de correlación**

En el análisis conjunto para dos o más variables es básica la búsqueda del tipo y grado de la relación que pueda existir entre ellas, o si por el contrario, las variables sean independientes entre sí y la relación que puedan mostrar se debe únicamente al azar, o a través de terceras variables.

El sondeo del tipo y grado de la correlación, parte desde la misma presunción del investigador, teniendo presente que la búsqueda de relaciones entre variables debe ser lógica, es decir relacionar lo que sea razonable y no datos cuya asociación sea desde cualquier punto de vista absurda.

Para fortalecer el indicio de correlación inicial, se grafica cada uno de los pares ordenados de las variables  $(x_i, y_j)$  en un plano cartesiano, para observar la “nube de puntos” o diagrama de dispersión, donde se advierte la tendencia o no, de la información representada.

A pesar de la ilustración visual que ofrecen las gráficas, solo podemos percibir la tendencia, mas no el grado o fortaleza de la relación, entre la variable independiente “X” y la variable dependiente “Y”.

Para cuantificar la calidad de la dependencia, entre las dos variables, el indicador más acostumbrado es el Coeficiente de correlación, definido como:

$$r = \frac{S_{x,y}}{S_x S_y}$$

r : Coeficiente de correlación entre “X” y “Y”

Sx: Desviación típica de “X”

Sy: Desviación típica de “Y”

Sx,y : Covarianza entre “X” y “Y”

$$r = \frac{n \sum xy - \sum x \sum y}{\sqrt{[n \sum x^2 - (\sum x)^2][n \sum y^2 - (\sum y)^2]}}$$

**Figura 2.19 Coeficiente de correlación**

$X_i$	$Y_i$	$X_i Y_i$	$X_i^2$	$Y_i^2$
$x_1$	$y_1$	$x_1 y_1$	$x_1^2$	$y_1^2$
$x_2$	$y_2$	$x_2 y_2$	$x_2^2$	$y_2^2$
·	·	·	·	·
·	·	·	·	·
·	·	·	·	·
$x_n$	$y_n$	$x_n y_n$	$x_n^2$	$y_n^2$
$\sum X$	$\sum Y$	$\sum XY$	$\sum X^2$	$\sum Y^2$

El coeficiente de correlación, es un indicador del grado de la relación entre las dos variables, el cual oscila en el intervalo cerrado (-1,+1) es decir,  $-1 \leq r \leq 1$

Cuando r toma un valor extremo, ya sea  $r=1$  ó  $r=-1$  existe una correlación perfecta positiva o negativa según el signo.

Sin embargo, no todas las relaciones son tan ideales, en el común de los casos  $-1 < r < 1$ . Empíricamente se afirma que:

**Figura 2.20 Tipos de correlación**

1. Si $r = \pm 1$ Correlación perfecta
2. Si $0.9 \leq r < 1$ ó $-1 < r \leq -0.9$ Correlación excelente
3. Si $0.8 \leq r < 0.9$ ó $-0.9 < r \leq -0.8$ Correlación buena
4. Si $0.6 \leq r < 0.8$ ó $-0.8 < r \leq -0.6$ Correlación regular
5. Si $0.3 \leq r < 0.6$ ó $-0.6 < r \leq -0.3$ Correlación mala
6. Si $-0.3 < r < 0.3$ No hay correlación

#### 2.4.10 Depuración de datos

La depuración de datos o intervalos de confianza es el rango aceptable en el que se pueden encontrar los datos.

Y está dado por:

- Límite superior: Media Aritmética+ C x Desviación Estándar (Ls)
- Límite inferior: Media Aritmética- C x Desviación Estándar (Li)

C: coeficiente de la curva de distribución normal.

#### 2.4.11 Gráficas de dispersión

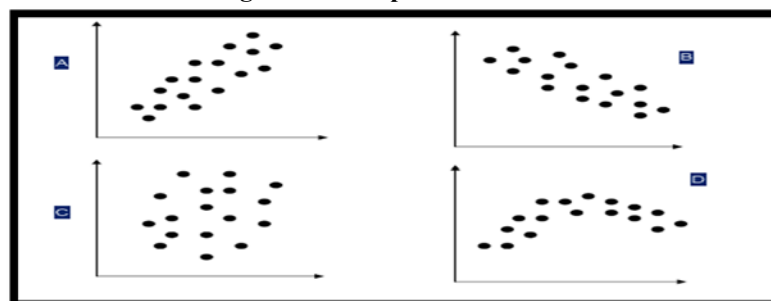
Dadas dos variables X y Y tomadas sobre el mismo elemento de la población, el diagrama de dispersión es simplemente un gráfico de dos dimensiones, donde en un eje (la abscisa) se grafica una variable (independiente), y en el otro eje (la ordenada) se grafica la otra variable (dependiente).

Disposición:

Eje de abscisas: variable independiente (X).

Eje de ordenadas: variable dependiente (Y).

**Figura 2.21 Dispersión de datos**



### 2.4.12 Ajuste Potencial

Suele suceder que al dibujar la nube de puntos correspondiente a  $n$  observaciones, se observa una tendencia no rectilínea, pero a la cual se le puede ajustar un modelo teórico conocido.

Dentro de la familia de modelos, es de aplicación común el ajuste regresivo potencial, las ecuaciones normales para este tipo de regresión son de la forma:

$$Y = aX^b$$

De dónde se pueden estimar los parámetros  $a$ ,  $b$  como sigue:

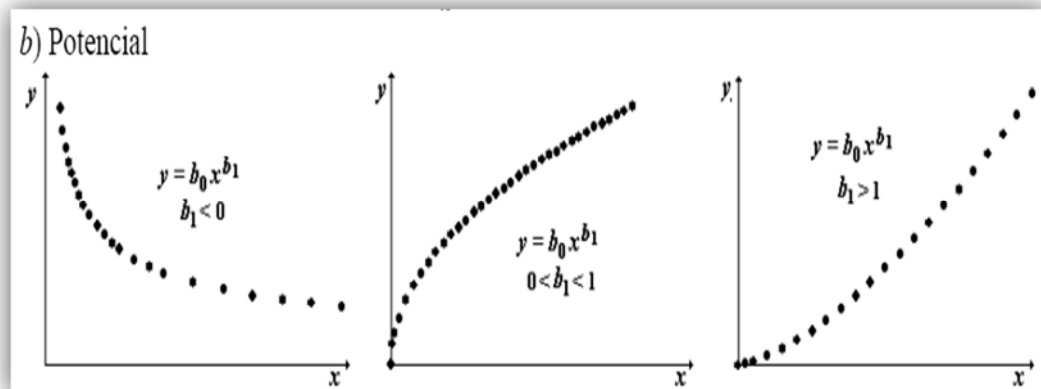
$$b = \frac{\sum \text{Ln}x * \text{Ln}y - \frac{\sum \text{Ln}x \sum \text{Ln}y}{n}}{\sum (\text{Ln}x)^2 - \frac{(\sum \text{Ln}x)^2}{n}}$$

$$\text{Ln } a = \frac{\sum \text{Ln } y - b \sum \text{Ln } x}{n}$$

Para obtener el valor de  $a$  es necesario aplicar un antilogaritmo a la ecuación dada.

#### Tipos de curvas

Figura 2.22 Curvas de una Regresión Potencial



Fuente: Análisis de correlación y regresión



### 3.3 Muestreo

Para la realización de los ensayos requeridos para el proyecto son necesarios distintos puntos de SPT y PDC en varios tipos de suelo, para tal efecto los ensayos se realizaron en distintas zonas y barrios correspondientes a la provincia cercado de la ciudad de Tarija

#### 3.3.1 Identificación de las zonas de muestreo

Para realizar el muestreo en una zona se deberán seguir los siguientes pasos:

➤ **Inspección visual de la zona.**

Se tuvo que visitar los lugares de muestreo con anterioridad para conocer las condiciones del lugar en cuanto a espacio para el armado del equipo y el estado natural del suelo.

➤ **Identificación de las zonas de muestreos.**

- ☞ Monte cercado
- ☞ Ex parque las barrancas
- ☞ Campus Universitario (Ing. de Alimentos)
- ☞ Villa Fátima
- ☞ Luis de Fuentes.
- ☞ Barrio El Tejar
- ☞ Villa Fátima
- ☞ Yacuiba (Campo Grande)
- ☞ Aeropuerto
- ☞ Campus Universitario
- ☞ Miraflores
- ☞ Miraflores
- ☞ Miraflores
- ☞ Zona el Campesino (Froilán Tejerina)

### 3.3.2 Número de muestras

Debido al costoso manipuleo del equipo de SPT al momento de realizar el ensayo es que se decidió realizar un mínimo de 10 ensayos tanto para el equipo de SPT como para el equipo de PDC para poder realizar el análisis de relación.

### 3.3.3 Muestra del material

Se dice que una muestra es alterada cuando no guarda las mismas condiciones que cuando se encontraba en el terreno de donde procede.

Para este tipo de muestras se utilizó el siguiente equipo:

- ☞ Pala.
- ☞ Picota.
- ☞ Bolsas nylon.
- Para la extracción de muestras se deberá quitar la cobertura vegetal en caso de existir o sino limpiar toda la parte externa que se encuentre contaminada.
- Profundidad de muestreo.

En cuanto a la profundidad se deberá considerar lo siguiente:

**Figura 3.2: Profundidad de los muestreos**

TIPO DE ENSAYO	PROFUNDIDAD
Contenido de humedad	10 - 15 (cm)
Limites	30- 50 (cm)
Granulometría	> 30 (cm)

**Fuente: Muestreo de suelos Ing. Alberto D. Sosa**

- Las muestras deberán ser etiquetadas identificando el lugar y número de muestra.
- Las muestras deberán ser guardadas en bolsas preferentemente de nylon.

### 3.3.4 Materiales a utilizar en el proyecto

En la siguiente investigación se utilizarán materiales correspondientes a suelos finos, vale decir suelos A-4, A-5, A-6, A-7.

### 3.4 ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN

#### 3.4.1 Porcentaje de humedad

Para obtener el porcentaje de humedad de las muestras se realizara el método del horno.

##### Procedimiento

- En el momento del muestreo en campo se debe guardar muestra en una bolsa de nylon para que no pierda humedad (50-100 gramos).

**Figura 3.3: Muestra de suelo para el porcentaje de humedad**



**Fuente: Elaboración Propia**

- Una vez en el laboratorio se deberá colocar la muestra en una cápsula de peso conocido.

**Figura 3.4: Taras para el contenido de humedad**



**Fuente: Elaboración Propia**

- Pesar el suelo húmedo + cápsula en una balanza eléctrica de 0.01 gramos de precisión.

**Figura 3.5: Balanza de precisión de 0.01 gr**



**Fuente: Elaboración Propia**

- Colocar cápsula en el horno durante 24 horas.

**Figura 3.6: Colocado de las capsulas en el horno**



**Fuente: Elaboración Propia**

- Pesar el suelo seco + cápsula.
- Realizar el trabajo de escritorio.

**Resultados:****Tabla 3.1: Porcentajes de Humedad de las muestras**

N°	Zona	% W
1	Monte Cercado	15.98
2	Parque las Barrancas	9.36
3		14.60
4	Campus Universitario	25.09
5		19.96
6	Luis de fuentes	22.44
7	Zona el Tejar	22.85
8	Villa Fátima	18.38
9	Yacuiba Campo Grande	11,51
10		<b>13,17</b>
11	Zona Aeropuerto	14.13
12	Campus universitario	32.64
13	Miraflores	14.16
14	Miraflores	15.56
15	Miraflores	17.46
16	Froilán Tejerina	17.26

**Fuente: Elaboración Propia**

**3.4.2 Granulometría**

Método del lavado.

**Procedimiento**

- Si el suelo muestreado está en terrones se lo deberá moler.
- Tomar 800 gramos y colocarlos en el horno durante 24 horas.
- Sacar la muestra del horno y pesar 500 gramos para realizar el ensayo.

**Figura 3.7: Muestra secada al horno para la granulometría**



**Fuente: Elaboración Propia**

- Colocar la muestra en el tamiz N° 200 y comenzar a lavar el material con agua.

**Figura 3.8: Lavado del material por el tamiza N° 200**



**Fuente: Elaboración Propia**

- Para saber si el material está bien lavado el agua que sale por abajo debe ser cristalina.
- Una vez lavado el material se lo coloca en un plato y se lo deja en el horno por 24 horas.

**Figura 3.9: Muestra lavada colocada al horno**



**Fuente: Elaboración Propia**

- Ordenar los tamices N° 10, N° 40 y N° 200 y comenzar a tamizar la muestra secada en el horno.
- Una vez tamizado el material pesar los retenidos en cada tamiz en una balanza eléctrica de 0.01 gramos de precisión.

**Figura 3.10: Pesando el material retenido**



**Fuente: Elaboración Propia**

- Realizar el trabajo de escritorio.

## Resultado

**Tabla 3.2: Porcentajes que pasan en cada tamiz**

N°	Zona	% Que Pasa en Tamiz			
		N° 4	N° 10	N° 40	N° 200
1	Monte Cercado	100	100	98.45	94.11
2	Parque las Barrancas	100	100	99.62	97.22
3		100	100	99.83	99.72
4	Campus Universitario	100	99.86	99.42	98.30
5		Ing. Alimentos	100	99.97	99.68
6	Luis de fuentes	100	99.88	99.68	98.77
7	Zona el Tejar	100	99.93	99.54	97.74
8	Villa Fátima	100	99.99	99.89	99.50
9	Yacuiba Campo Grande	100	99,96	99,44	58,88
10		100	98.58	92.48	53.61
11	Zona El aeropuerto	100	100	99.68	67.31
12	Campus Universitario	100	99.90	99.14	97.90
13	Miraflores	100	99.82	98.75	96.80
14	Miraflores	100	99.98	99.88	99.56
15	Miraflores	100	99.72	97.65	89.68
16	Froilán Tejerina	100	98.98	96.49	84.73

**Fuente: Elaboración Propia**

### 3.4.3 Límites de Atterberg

#### Límite Líquido

#### Procedimiento

- Para el límite líquido se debe agarrar la muestra y si está en terrones se la debe moler para que pueda tamizarse.

- Hacer pasar el material por el tamiz N° 40 de tal manera que se obtengan unos 500 gramos de material seleccionado.

**Figura 3.11: Tamizado del material**



**Fuente: Elaboración Propia**

- En un recipiente colocar alrededor de 100 gramos de material tamizado, verter una pequeña cantidad de agua y mezclar con una espátula, hasta que quede una pasta homogénea.

**Figura 3.12: Material de apoyo (Plato y Espátula)**



**Fuente: Elaboración Propia**

- Ubicar el aparato Casagrande en una superficie plana, segura y limpia.

**Figura 3.13: Equipo de Casa Grande**



**Fuente: Elaboración Propia**

- Calibrar la caída de la copa, haciendo que la misma tenga 1cm de caída, la medición se puede realizar con el mismo ranurador del equipo que se encuentra acondicionado para tal efecto.
- Pesar 5 cápsulas vacías y limpias, anotado los pesos de cada cápsula con su respectiva identificación en la planilla de límite líquido.
- Poner la muestra suavemente y tratando siempre que sea de manera horizontal, dentro la copa de Casagrande, con ayuda de una espátula se debe nivelar el material para que quede lo más horizontal posible.

**Figura 3.14: Muestra colocada en la copa de Casa Grande**



**Fuente: Elaboración Propia**

- Una vez que la muestra se encuentre horizontal y la copa limpia de otras impurezas, sujetar con una mano la copa de Casagrande y con la otra realizar la ranura de manera firme en una sola pasada, tratando de que en el fondo de la ranura se encuentre visible el color de la copa a lo largo de toda la muestra, caso contrario repetir todo el procedimiento.
- Una vez realizada la ranura, accionar la copa de Casagrande, al ritmo de 2 golpes por segundo, no perdiendo la cuenta del número de golpes accionado hasta que en la ranura se produzca la unión de aproximadamente 1.27 cm, anotar el número de golpes en la planilla.

**Figura 3.15: Muestra Ranurada**



**Fuente: Elaboración Propia**

- Con la espátula y en forma perpendicular a la ranura realizar 2 cortes a la muestra, estos deben pasar por los extremos de la parte que se unió. Luego extraer la porción de suelo entre los cortes y proceder a depositar en una de las cápsulas que ya se encuentran pesadas e identificadas.

**Figura 3.16: Sección de Muestra unida aproximadamente 1.27 cm**



**Fuente: Elaboración Propia**

- Pesar el suelo húmedo + cápsula, registrar el dato en la planilla correspondiente al número de golpes.
- Realizar estos pasos para obtener golpes entre los límites de 15-20, 20-25, 25-30, 30-35 golpes.

**Figura 3.17: Colocado del material en taras para su secado**



**Fuente: Elaboración Propia**

- Introducir la cápsula más suelo húmedo en el horno por 24 horas, luego pesar la cápsula más suelo seco, registrar los datos en la planilla.

**Figura 3.18: Taras colocadas en el horno**



**Fuente: Elaboración Propia**

- Con estos valores se calculan los diferentes tipos de humedad a sus respectivos números de golpes y realizar el trabajo de escritorio.

### **Limite Plástico**

#### **Procedimiento**

- Para el límite plástico se puede extraer un poco de material utilizado para el límite líquido.
- Agarrar un poco de la mezcla con la mano para amasarla, para hacer una pelota con la muestra.

**Figura 3.19: Muestra de suelo para el límite plástico**



**Fuente: Elaboración Propia**

- Luego en una base de vidrio se comienza a hacer rollitos con un diámetro aproximado de 3 mm.

**Figura 3.20: Rollito de aproximadamente 3 mm de diámetro**



**Fuente: Elaboración Propia**

- Dejar de frotar la mezcla cuando el rollito se comience agrietar debido a que se le está quitando su humedad.
- Con la espátula cortar un poco de la muestra que tiene rajadura y colocarla en una cápsula de peso conocido.

**Figura 3.21: Muestra en tara para su secado**



**Fuente: Elaboración Propia**

- Pesar el suelo húmedo más tara y colocarla en el horno durante 24 horas.

**Figura 3.22: Taras puestas al horno**



**Fuente: Elaboración Propia**

- Pesar el suelo seco más tara.
- Realizar el trabajo de escritorio.

## Resultados

**Tabla 3.3: Límites de Atterberg**

N°	Zona	Límites de Atterberg		Índice De Plasticidad
		LL	LP	IP
1	Monte Cercado	46	35	11
2	Parque las Barrancas	41	19	23
3		38	15	23
4	Campus Universitario	55	38	17
5		Ino. Alimentos	41	31
6	Luis de fuentes	39	38	1
7	Zona el Tejar	46	37	10
8	Villa Fátima	37	32	6
9	Yacuiba Campo Grande	-	-	-
10		-	-	-
11	Zona El Aeropuerto	21.91	20.50	1.41
12	Campus Universitario	58	40	18
13	Miraflores	48	31	16
14	Miraflores	47	36	11
15	Miraflores	33	26	6
16	Froilán Tejerina	23	18	5

**Fuente: Elaboración Propia**

### 3.4.4 Clasificación método AASHTO Y SUCS

La clasificación de los suelos se realizó por los métodos AASHTO y SUCS, a continuación se presenta una tabla resumen de todos los puntos de ensayos con su respectiva clasificación.

## Resultados

**Tabla 3.4: Clasificación del suelo**

Nº Ensayo	Zona	AASHTO	SUCS
1	Monte Cercado	A-6(10)	CL
2	Parque las Barrancas	A-6(13)	CL
3		A-6(13)	CL
4	Campus Universitario Ing. Alimentos	A-7-5(12)	OH
5		A-5(8)	CL
6	Luis de fuentes	A-4(8)	ML
7	Zona el Tejar	A-5(9)	ML
8	Villa Fátima	A-4(8)	ML
9	Yacuiba Campo Grande	A-4(5)	SM
10		A-4(4)	SM
11	Zona El Aeropuerto	A-4(6)	ML
12	Campus Universitario	A-7-5(15)	OH
13	Miraflores	A-7-5(12)	OH
14	Miraflores	A-7-5(10)	OH
15	Miraflores	A-4 (8)	ML
16	Froilán Tejerina	A-4 (8)	ML

**Fuente: Elaboración Propia**

### 3.4.5 Ensayos de SPT y PDC

- **Ensayo de penetración estándar (SPT)**

#### Procedimiento

- ☞ Definido el sitio escogido para la realización del ensayo, se procede a la limpieza del mismo sacando toda turba vegetal que pudiera existir.
- ☞ Realizar el ensamblaje del equipo SPT, armando el trípode de sostenimiento del mecanismo accionador del martillo.

**Figura 3.23: Equipo de SPT Ensamblado**



**Fuente Elaboración Propia**

☞ Hincar la punta del SPT, hasta que penetre los primeros 15 cm, los números de golpes para esta etapa no se tomaran en cuenta.

**Figura 3.24: Posicionando el equipo para el ensayo**



**Fuente Elaboración Propia**

☞ Para la inca de los posteriores 30 cm, si se deberá de hacer los conteos de golpes necesarios, estos se anotaran en la planilla para el ensayo de SPT.

## Resultados

**Tabla 3.5: Numero de golpes del SPT**

N°	Zona	N° de Golpes
1	Monte Cercado	13
2	Parque las Barrancas	11
3		10
4	Campus Universitario Ing. Alimentos	5
5		9
6	Luis de fuentes	6
7	Zona el Tejar	7
8	Villa Fátima	9
9	Yacuiba Campo Grande	3
10		4
11	Zona El Aeropuerto	2
12	Campus Universitario	8
13	Miraflores	20
14	Miraflores	13
15	Miraflores	2
16	Froilán Tejerina	7

**Fuente: Elaboración Propia**

- **Penetrometro Dinámico de Cono PDC**

El ensayo de PDC es apropiado para estimar la resistencia de suelos finos

### Procedimiento

☞ Para realizar el ensayo se tuvo que hacer una calibración previa puesto que el peso del martillo era de 7.68 kg, no así de 8 kg como lo indica la bibliografía, para tal efecto y obtener una misma energía de impacto al equipo original se compenso

aumentando su altura de 57.5 cm a 60.25 para que la energía de impacto sea igual a la de un equipo nuevo.

☞ Se procede a levantar el martillo de 8 kilogramos hasta que llegue a la marca de los 60.25 cm y luego soltarlo para que caiga libremente.

**Figura 3.25: Realización del Ensayo de PDC**



**Fuente: Elaboración Propia**

☞ Se deberán contabilizar los golpes para hincar el equipo 30 centímetros.

## Resultados

**Tabla 3.6: Numero de golpes del PDC**

N°	Zona	N° de Golpes
1	Monte Cercado	213
2	Parque las Barrancas	193
3		179
4	Campus Universitario Ing. Alimentos	49
5		123
6	Luis de fuentes	41
7	Zona el Tejar	40
8	Villa Fátima	51
9	Yacuiba Campo Grande	19
10		24

11	Zona El Aeropuerto	15
12	Campus universitario	76
13	Miraflores	498
14	Miraflores	216
15	Miraflores	13
16	Froilán Tejerina	43

Fuente: Elaboración Propia

### 3.5 ANÁLISIS ESTADÍSTICO Y CORRELACIÓN

#### 3.5.1 Medidas de Tendencia Central

Tabla 3.7: Distribución de Frecuencia Simple.

SPT (X)	Frecuencia (f)	SPT*f
2	2	4
3	1	3
4	1	4
5	1	5
6	1	6
7	2	14
8	1	8
9	2	18
10	1	10
11	1	11
13	2	26
20	1	20
Suma	16	129

Fuente: Elaboración Propia

#### Media Aritmética

$$\bar{X} = \frac{x_1 f_1 + x_2 f_2 + \dots + x_i f_i + \dots + x_m f_m}{\sum_{i=1}^m f_i} = \frac{\sum_{i=1}^m x_i f_i}{\sum_{i=1}^m f_i}$$

$$x = \frac{129}{16} = 8.06$$

### Mediana

$$Me = \frac{x_{(\frac{n}{2})} + x_{(\frac{n}{2}+1)}}{2}, \text{ si } n \text{ es par}$$

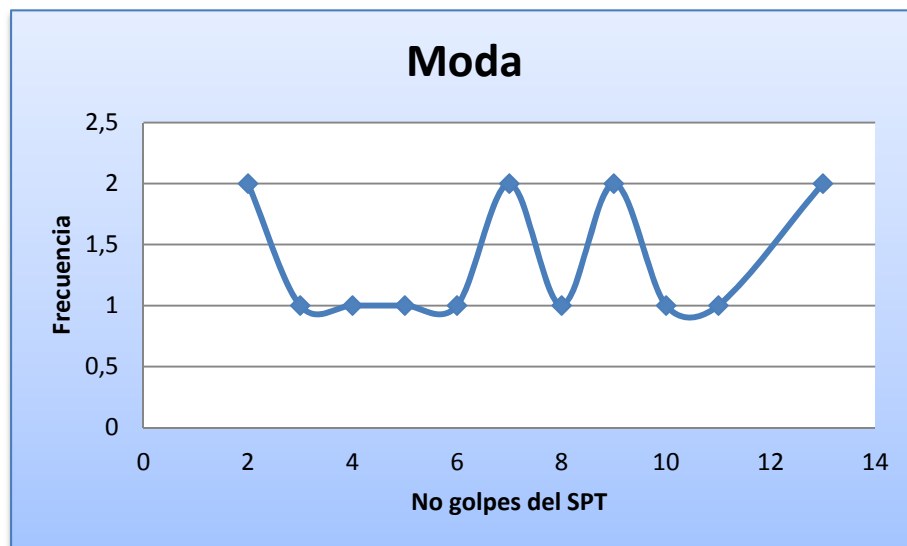
n/2	7
n/2 +1	8

$$Me = \frac{7 + 8}{2} = 7,5$$

Este valor nos indica que el 50% de los valores están por encima de 7,5 y el otro 50% debajo de 7,5.

### Moda

Figura 3.26: Moda



Fuente: Elaboración Propia

La moda de nuestra información es de forma multimodal, debido a que presenta más de un pico en la gráfica, los valores de las modas son:

- 1) Mo 1 = 2
- 2) Mo 2 = 7
- 3) Mo 3 = 9
- 4) Mo 4 = 13

### 3.5.2 Medidas de dispersión

**Tabla 3.8: Datos para el análisis de Dispersión**

SPT (X)	Frecuencia (f)	SPT*f	$X_i - x$	$f^*(X_i - x)$	ABS $f^*(X_i - x)$	$(X_i - x)^2$	$f^*(X_i - x)^2$
2	2	4	-6,06	-12.12	12.12	36.72	73.45
3	1	3	-5,06	-5,06	5,06	25.6	25.60
4	1	4	-4,06	-4,06	4,06	16.48	16.48
5	1	5	-3,06	-3,06	3,06	9.36	9.36
6	1	6	-2,06	-2,06	2,06	4.24	4.24
7	2	14	-1,06	-2.12	2.12	1.12	2.25
8	1	8	-0,06	-0,06	0,06	0.004	0.004
9	2	18	0,94	1.88	1.88	0,88	1.77
10	1	10	1,94	1,94	1,94	3.76	3.76
11	1	11	2,94	2,94	2,94	8.64	8.64
13	2	26	4,94	9.88	9.88	24.40	48.81
20	1	20	11.94	11.94	11.94	142.56	142.56
	<b>Suma</b>	129			57.12		336.94

**Fuente: Elaboración Propia**

**Rango**

$$R = X_{max} - X_{min}$$

$$R = 20 - 2 = 18$$

Se puede observar que existe dispersión entre los datos, para que los datos sean más homogéneos los valores extremos deben ser más cercanos entre ellos.

### Desviación media

$$DM = \frac{\sum_{i=1}^m |x_i - \bar{X}| f_i}{n}$$

$$DM = 57.12 / 16 = 3.57$$

El valor de 3.57 es un error promedio, este se refiere a la distancia promedio de dato a dato de toda la serie.

### Varianza

#### Poblacional

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^m (x_i - \bar{X})^2 f_i}{n}$$

$$S^2 = 336.94 / 16 = 21.06$$

#### Varianza Muestral

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^m (x_i - \bar{X})^2 f_i}{n-1}$$

$$\sigma^2 = 336.94 / 15 = 22.46$$

La varianza se interpreta como como una medida de cuán diversos son los datos obtenidos del SPT.

### Desviación estándar

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2}$$

$$\sigma = \sqrt{(22.46)} = 4.74$$

Por tanto el error estándar es de 4.74, este valor permite conocer la ubicación de nuestros datos con respecto a la media.

### Coefficiente de variación

$$CV = \frac{\sigma}{\bar{X}} 100\%$$

$$CV = (4.74 / 8.06) * 100 = 58.78 \%$$

Un coeficiente de variación elevado nos indica hay una alta dispersión de datos de toda la serie de estudio.

### 3.5.3 Depuración de datos

#### Límites de tolerancia estadística

Tamaño de muestra = 16.

Media de la muestra = 8.06.

Desviación estándar de la muestra = 4.74

Intervalos de tolerancia del 95,0% para 99,0% de la población.

- Media aritmética + C\*Desviación estándar.
- Media aritmética - C\*Desviación estándar.

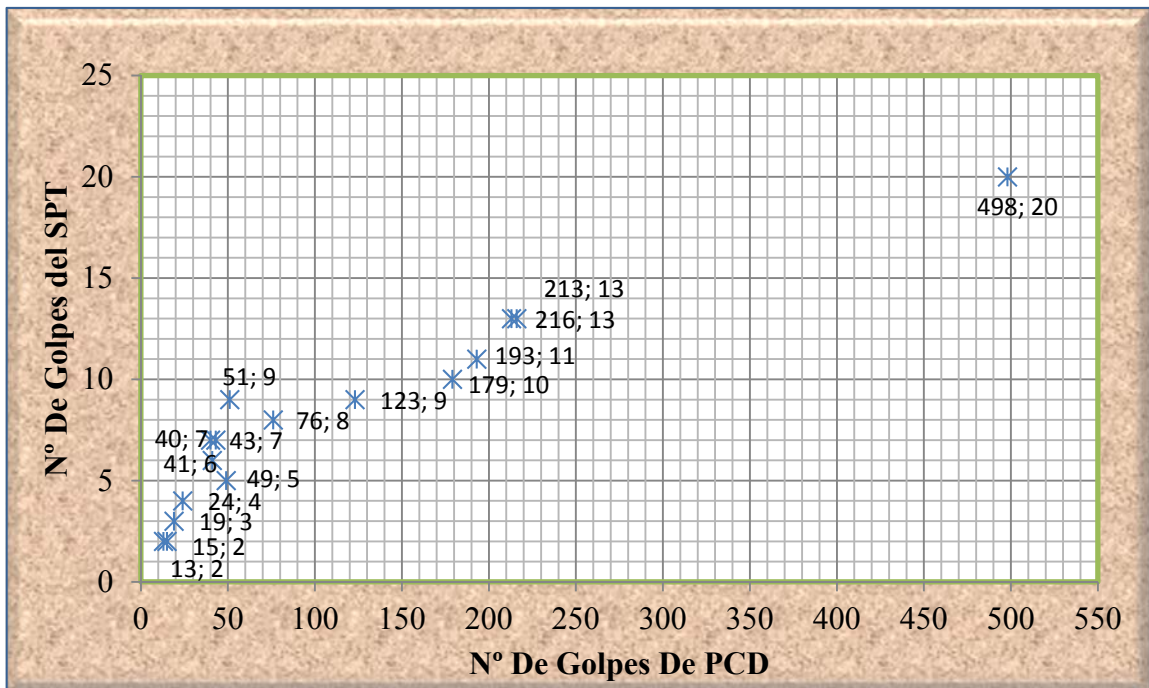
El valor de C se calcula con la siguiente expresión:

$$f(x) = y = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\left(\frac{x^2}{2}\right)}$$

El valor del coeficiente C viene a ser muy pequeño para poder establecer los límites inferior y superior, por tanto es innecesario hacer la depuración de datos, por otra parte, al tener un número reducido de puntos debido a la complejidad del ensayo mismo, es por el cual se optó de no excluir ningún punto tomado para el estudio.

### 3.5.4 Gráfica de dispersión de puntos

**Figura 3.27: Grafica de Dispersión de Puntos**



**Fuente: Elaboración Propia**

En la gráfica de dispersión de datos se debe ordenar la variable independiente (PCD) en el eje x o eje de abscisas, y la variable dependiente (SPT) en el eje y o eje de las ordenadas.

Al conjunto de puntos que se forman se lo llama nube de puntos. En la nube de puntos formada con los datos de PCD y SPT se puede ver que tiene una pendiente positiva, lo que quiere decir que a medida que X es mayor, Y es mayor.

### 3.5.5 Elección del modelo

Un modelo de regresión, es una manera de expresar dos ingredientes esenciales de una regresión estadística:

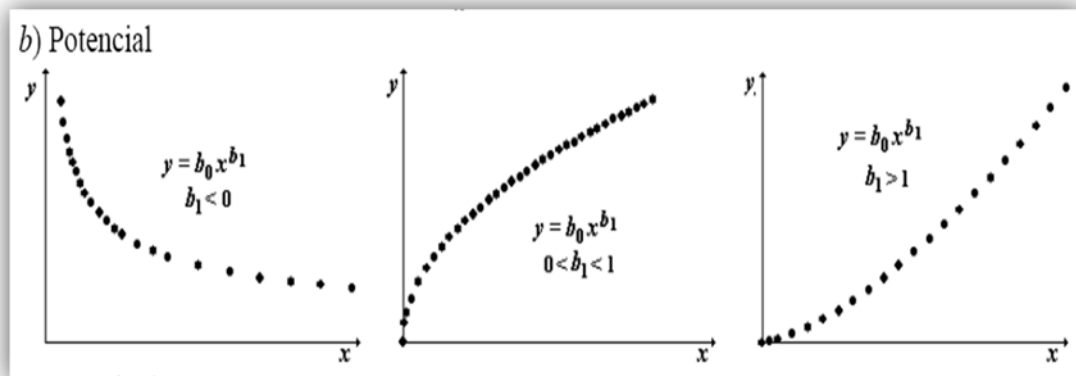
- Una tendencia de la variable dependiente  $Y$  a variar conjuntamente con la variación de  $X$  de una manera sistemática.
- Una dispersión de las observaciones alrededor de la curva de relación estadística.

Estas dos características están implícitas en un modelo de regresión, postulando que:

- En la población de observaciones asociadas con el proceso que fue muestreado, hay una distribución de probabilidades de  $Y$  para cada nivel de  $X$ .
- Las medias de estas distribuciones varían de manera sistemática al variar  $X$ .

Suele suceder que al dibujar la nube de puntos correspondiente a  $n$  observaciones, se observa una tendencia no rectilínea, pero a la cual se le puede ajustar un modelo teórico conocido no lineal. Dentro de la familia de modelos, es de aplicación común el ajuste de regresión potencial.

**Figura 3.28: Modelo Potencial**



**Fuente: Análisis de correlación y regresión**

Al fijarse en nuestra nube de puntos se puede notar que se debe realizar un ajuste no lineal. Para nuestros datos se procede a realizar el ajuste a un modelo de regresión

como es el Potencial, puesto que al hacer un análisis del comportamiento de los puntos tanto para Y como para X van en forma creciente.

La ecuación definida para este tipo de modelo matemático es de la forma:

$$Y = aX^b$$

**Fuente: Problemas de Probabilidades y Estadística. CARLES M. CUADRAS**

### 3.5.6 Ajuste de curva

Mediante el estudio de regresión se determinó el modelo potencial con la utilización de logaritmos naturales.

**Tabla 3.9: Datos para la Regresión**

Nº	X (PDC)	Y	Ln X	LnY	(Ln X) <sup>2</sup>	Ln X*Ln Y	(Ln Y) <sup>2</sup>
1	498	20	6,21	3,00	38,57	18,61	8,97
2	213	13	5,36	2,56	28,74	13,75	6,58
3	216	13	5,38	2,56	28,89	13,79	6,58
4	193	11	5,26	2,40	27,70	12,62	5,75
5	179	10	5,19	2,30	26,91	11,94	5,30
6	123	9	4,81	2,20	23,16	10,57	4,83
7	51	9	3,93	2,20	15,46	8,64	4,83
8	76	8	4,33	2,08	18,76	9,01	4,32
9	40	7	3,69	1,95	13,61	7,18	3,79
10	43	7	3,76	1,95	14,15	7,32	3,79
11	41	6	3,71	1,79	13,79	6,65	3,21
12	49	5	3,89	1,61	15,15	6,26	2,59
13	24	4	3,18	1,39	10,10	4,41	1,92
14	19	3	2,94	1,10	8,67	3,23	1,21
15	15	2	2,71	0,69	7,33	1,88	0,48
16	13	2	2,56	0,69	6,58	1,78	0,48
<b>SUMA</b>	<b>1793</b>	<b>129</b>	<b>66,92</b>	<b>30,46</b>	<b>297,56</b>	<b>137,64</b>	<b>64,63</b>

**Fuente: Elaboración Propia**

El valor de **b** viene dado por la expresión siguiente:

$$b = \frac{\sum(\text{Ln}x * \text{Ln}y) - \frac{\sum \text{Ln}x \sum \text{Ln}y}{n}}{\sum(\text{Ln}x)^2 - \frac{(\sum \text{Ln}x)^2}{n}}$$

El valor de **a** viene dado por la expresión siguiente:

$$\text{Ln } a = \frac{\sum \text{Ln } y - b \sum \text{Ln } x}{n}$$

Para obtener el valor de **a** es necesario aplicar un antilogaritmo a la ecuación dada.

Reemplazando valores en las ecuaciones se tiene:

$$b = \frac{137.64 - \frac{66.92 * 30.46}{16}}{297.56 - \frac{66.92^2}{16}}$$

$$a = \text{ant. ln} \frac{30.46 - 0.57897744 * 66.92}{16}$$

De dónde se obtiene:

**Tabla 3.10: Valores de las constantes de la ecuación potencial.**

<b>a</b>	<b>0.5957108</b>
<b>b</b>	<b>0,57897744</b>

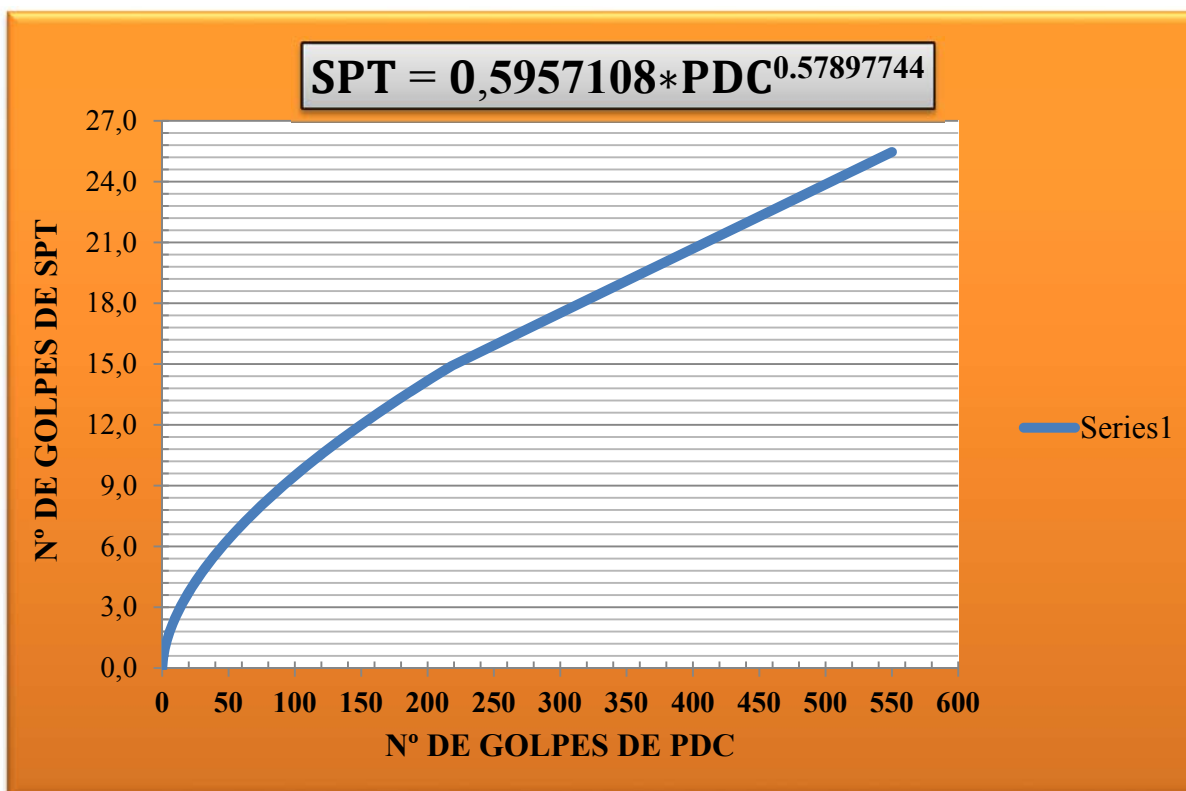
**Fuente: Elaboración Propia**

La ecuación obtenida se aplicará solamente para los datos de: PDC y SPT.

$$Y = 0.5957108 X^{0.57897744}$$

Para el tipo de información como es el PDC y SPT se aplica este tipo de modelo.

**Figura 3.29: Curva de Correlación de PDC - SPT**



**Fuente: Elaboración Propia**

### 3.6 ANÁLISIS DE CORRELACIÓN

Un análisis de correlación trata de establecer el grado de relación entre dos variables, es decir trata de medir cuán dependiente es una variable de la otra.

Se asume que existe correlación entre dos variables, cuando es evidente que al variar una de ellas, también se produce variación de la otra.

#### 3.6.1 Coeficiente de correlación

Es un número que varía entre -1 y +1, se usa para medir el grado de relación existente entre las variables.

$$r = 0.94$$

Lo que nos indica que la relación existente entre las variables es de correlación positiva muy alta.

### **3.6.2 Coeficiente de determinación**

Es el cuadrado del coeficiente de correlación, es un número positivo que varía entre 0 y 1, permite indicar el grado de certeza con que una variable depende de la otra, este coeficiente multiplicado por 100 y redondeado, es la certeza de en qué porcentaje los valores de Y dependen de los valores de X.

Para nuestro estudio se tiene un coeficiente de determinación:

$$\mathbf{R^2 = 0.893}$$

Que en porcentaje nos da:

$$\mathbf{R2 = 89 \%}$$

Lo que nos indica que el valor Y (SPT) depende en un 89% de la variable X (PDC)

### **3.7 VALORACIÓN DE LA ECUACIÓN**

Para la valoración de la ecuación obtenida, se presentan ensayos realizados con los equipos de SPT y PDC, con los cuales se procederá por medio de la ecuación matemática hacer la relación y así poder obtener en base al número de golpes del PDC los números de golpes de SPT para posteriormente obtener el esfuerzo admisible del suelo para los tres casos que vendrían a ser:

1. Cálculo del esfuerzo admisible para un número de golpes de SPT realizado con el equipo normado.
2. Cálculo del esfuerzo admisible para un número de golpes de SPT en base al número de golpes de PDC haciendo uso de la fórmula producto de la correlación.
3. Cálculo del esfuerzo admisible para un número de golpes de PDC mediante el uso de la fórmula empírica propuesta por el laboratorio de la UAJMS.

Realizado el cálculo de los esfuerzos admisibles se podrá hacer una comparación entre los esfuerzos admisibles del mismo suelo.

### 3.7.1 Ensayo de penetración estándar (SPT)

#### Procedimiento

- ☞ Definido el sitio escogido para la realización del ensayo, se procede a la limpieza del mismo sacando toda turba vegetal que pudiera existir.
- ☞ Realizar el ensamblaje del equipo SPT, armando el trípode de sostenimiento del mecanismo accionador del martillo.

**Figura 3.30: Realización del ensayo**



**Fuente Elaboración Propia**

- ☞ Hincar la punta del SPT, hasta que penetre los primeros 15 cm, los números de golpes para esta etapa no se tomaran en cuenta.

**Figura 3.31: Posicionando el equipo para el ensayo**



**Fuente Elaboración Propia**

- ☞ Para la inca de los posteriores 30 cm, si se deberá de hacer los conteos de golpes necesarios, estos se anotaran en la planilla para el ensayo de SPT.

### **Resultados**

**Tabla 3.11: Numero de golpes del SPT**

Nº	Zona	Nº de Golpes
1	Av. Las Américas (Zona La Terminal)	21
2	Av. Las Américas (Zona La Terminal)	24
3	Av. Las Américas (Zona La Terminal)	22

**Fuente: Elaboración Propia**

### **3.7.2 Ensayo de Penetración Dinámico de Cono (PDC)**

El ensayo de PDC es apropiado para estimar la resistencia de suelos finos.

**Procedimiento**

- ☞ Una vez identificados los sitios de muestreo se procede a limpiar el sitio donde se realizara el ensayo.
- ☞ Se deben asegurar bien las partes del equipo PDC.
- ☞ Hincar la punta del PDC.

**Figura 3.32: Inca de la punta cónica de PDC****Fuente: Elaboración Propia**

- ☞ Proceder a levantar el martillo de 8 kilogramos hasta que llegue hasta la manija superior y soltarlo.

**Figura 3.33: Realización del Ensayo de PDC****Fuente: Elaboración Propia**

Se deberán contabilizar los golpes para hincar el equipo 30 centímetros.

## Resultados

**Tabla 3.12: Numero de golpes del PDC**

N°	Zona	N° de Golpes
1	Av. Las Américas (Zona La Terminal)	386
2	Av. Las Américas (Zona La Terminal)	487
3	Av. Las Américas (Zona La Terminal)	397

**Fuente: Elaboración Propia**

### 3.7.3 Ensayos de caracterización

#### Porcentaje de humedad

Para obtener el porcentaje de humedad de las muestras se realizara el método del horno.

#### Procedimiento

- En el momento del muestreo en campo se debe guardar muestra en una bolsa de nylon para que no pierda humedad (50-100 gramos).
- Una vez en el laboratorio se deberá colocar la muestra en una cápsula de peso conocido.

**Figura 3.34: Taras para el contenido de humedad**



**Fuente: Elaboración Propia**

- Pesar el suelo húmedo + cápsula en una balanza eléctrica de 0.01 gramos de precisión.

**Figura 3.35: Balanza de precisión de 0.01 gr**



**Fuente: Elaboración Propia**

- Colocar cápsula en el horno durante 24 horas.

**Figura 3.36: Colocado de las capsulas en el horno**



**Fuente: Elaboración Propia**

- Pesar el suelo seco + cápsula.
- Realizar el trabajo de escritorio.

## Resultados

**Tabla 3.13: Porcentajes de Humedad de las muestras**

N°	Zona	% W
1	Av. Las Américas (Zona La Terminal)	12.38
2	Av. Las Américas (Zona La Terminal)	11.12
3	Av. Las Américas (Zona La Terminal)	12.17

**Fuente: Elaboración Propia**

## Granulometría

Método del lavado.

### Procedimiento

- Si el suelo muestreado está en terrones se lo deberá moler.
- Tomar 800 gramos y colocarlos en el horno durante 24 horas.
- Sacar la muestra del horno y pesar 500 gramos para realizar el ensayo.

**Figura 3.37: Muestra secada al horno para la granulometría**



**Fuente: Elaboración Propia**

- Colocar la muestra en el tamiz N° 200 y comenzar a lavar el material con agua.
- Para saber si el material está bien lavado el agua que sale por abajo debe ser cristalina.
- Una vez lavado el material se lo coloca en un plato y se lo deja en el horno por 24 horas.
- Ordenar los tamices N° 10, N° 40 y N° 200 y comenzar a tamizar la muestra secada en el horno.

**Figura 3.38: Tamices ordenados para su utilización**



**Fuente: Elaboración Propia**

- Tamizar el material secado.

**Figura 3.39: Tamizado del material**



**Fuente: Elaboración Propia**

- Pesado de los materiales retenidos en cada tamiz en una balanza de precisión de 0.01 gr.

**Figura 3.40: Material pesado retenido en cada tamiz**



**Fuente: Elaboración Propia**

- Realizar el trabajo de escritorio.

### Resultado

**Tabla 3.14: Porcentajes que pasan en cada tamiz**

N°	Zona	% Que Pasa en Tamiz			
		N° 4	N° 10	N° 40	N° 200
1	Av. Las Américas (Zona La Terminal)	100	99.75	99.28	98.09
2	Av. Las Américas (Zona La Terminal)	100	98.64	96.94	91.90
3	Av. Las Américas (Zona La Terminal)	100	99.04	97.21	94.50

**Fuente: Elaboración Propia**

### Límites de Atterberg

#### Limite Líquido

#### Procedimiento

- Para el límite líquido se debe agarrar la muestra y si está en terrones se la debe moler para que pueda tamizarse.
- Hacer pasar el material por el tamiz N° 40 de tal manera que se obtengan unos 500 gramos de material seleccionado.

**Figura 3.41: Material tamizado**



**Fuente: Elaboración Propia**

- En un recipiente colocar alrededor de 100 gramos de material tamizado, verter una pequeña cantidad de agua y mezclar con una espátula, hasta que quede una pasta homogénea.
- Ubicar el aparato Casagrande en una superficie plana, segura y limpia.

**Figura 3.42: Aparato de casa grande en una base plana**



**Fuente: Elaboración Propia**

- Calibrar la caída de la copa, haciendo que la misma tenga 1cm de caída, la medición se puede realizar con el mismo ranurador del equipo que se encuentra acondicionado para tal efecto.
- Pesar 5 cápsulas vacías y limpias, anotado los pesos de cada cápsula con su respectiva identificación en la planilla de límite líquido.

**Figura 3.43: Taras para el contenido de humedad**



**Fuente: Elaboración Propia**

- Poner la muestra suavemente y tratando siempre que sea de manera horizontal, dentro la copa de Casagrande, con ayuda de una espátula se debe nivelar el material para que quede lo más horizontal posible.
- Una vez que la muestra se encuentre horizontal y la copa limpia de otras impurezas, sujetar con una mano la copa de Casagrande y con la otra realizar la ranura de manera firme en una sola pasada, tratando de que en el fondo de la ranura se encuentre visible el color de la copa a lo largo de toda la muestra, caso contrario repetir todo el procedimiento.
- Una vez realizada la ranura, accionar la copa de Casagrande, al ritmo de 2 golpes por segundo, no perdiendo la cuenta del número de golpes accionado hasta que en la ranura se produzca la unión de aproximadamente 1.27 cm, anotar el número de golpes en la planilla.

**Figura 3.44: Muestra Ranurada**



**Fuente: Elaboración Propia**

- Con la espátula y en forma perpendicular a la ranura realizar 2 cortes a la muestra, estos deben pasar por los extremos de la parte que se unió. Luego extraer la porción de suelo entre los cortes y proceder a depositar en una de las cápsulas que ya se encuentran pesadas e identificadas.

**Figura 3.45: Sección de Muestra unida aproximadamente 1.27 cm**



**Fuente: Elaboración Propia**

- Pesar el suelo húmedo + cápsula, registrar el dato en la planilla correspondiente al número de golpes.
- Realizar estos pasos para obtener golpes entre los límites de 15-20, 20-25, 25-30, 30-35 golpes.

**Figura 3.46: Colocado del material en taras para su secado**



**Fuente: Elaboración Propia**

- Introducir la cápsula más suelo húmedo en el horno por 24 horas, luego pesar la cápsula más suelo seco, registrar los datos en la planilla.

**Figura 3.47: Taras colocadas en el horno**



**Fuente: Elaboración Propia**

- Con estos valores se calculan los diferentes tipos de humedad a sus respectivos números de golpes y realizar el trabajo de escritorio.

### **Limite Plástico**

#### **Procedimiento**

- Para el límite plástico se puede extraer un poco de material utilizado para el límite líquido.

- Agarrar un poco de la mezcla con la mano para amasarla, para hacer una pelota con la muestra.

**Figura 3.48: Muestra de suelo para el límite plástico**



**Fuente: Elaboración Propia**

- Luego en una base de vidrio se comienza a hacer rollitos con un diámetro aproximado de 3 mm.

**Figura 3.49: Rollito de aproximadamente 3 mm de diámetro**



**Fuente: Elaboración Propia**

- Dejar de frotar la mezcla cuando el rollito se comience agrietar debido a que se le está quitando su humedad.
- Con la espátula cortar un poco de la muestra que tiene rajadura y colocarla en una cápsula de peso conocido.

**Figura 3.50: Muestra en tara para su secado**



**Fuente: Elaboración Propia**

- Pesar el suelo húmedo más tara y colocarla en el horno durante 24 horas.

**Figura 3.51: Taras puestas al horno**



**Fuente: Elaboración Propia**

- Pesar el suelo seco más tara.
- Realizar el trabajo de escritorio.

## Resultados

**Tabla 3.15: Límites de Atterberg**

N°	Zona	Límites de Atterberg		Índice De Plasticidad
		LL	LP	IP
1	Av. Las Américas (Zona La Terminal)	46	34	12
2	Av. Las Américas (Zona La Terminal)	34	25	9
3	Av. Las Américas (Zona La Terminal)	28	17	11

**Fuente: Elaboración Propia**

## Clasificación método AASHTO Y SUCS

La clasificación de los suelos se realizó por los métodos AASHTO y SUCS

## Resultados

**Tabla 3.16: Clasificación del suelo**

N° Ensayo	Zona	AASHTO	SUCS
1	Av. Las Américas (Zona La Terminal)	A-7-5(10)	CL
2	Av. Las Américas (Zona La Terminal)	A-4(8)	ML
3	Av. Las Américas (Zona La Terminal)	A – 6(8)	CL

**Fuente: Elaboración Propia**

### 3.7.4 Utilización de la ecuación de correlación para el cálculo del número de golpes de SPT en base al PDC

Con el número de golpes del PDC y con la utilización de la ecuación potencial propuesta tenemos:

$$N^{\circ} SPT = 0.5957108PDC^{0.57897744}$$

Dónde:

N° SPT = Numero de Golpes del SPT

PDC = Numero de Golpes de PDC

Reemplazando los datos tenemos:

$$1. \text{ N}^\circ \text{ SPT} = 0.5957108 (386)^{0.57897744}$$

$$\text{N}^\circ \text{ SPT} = 18.73$$

$$2. \text{ N}^\circ \text{ SPT} = 0.5957108 (487)^{0.57897744}$$

$$\text{N}^\circ \text{ SPT} = 21.43$$

$$3. \text{ N}^\circ \text{ SPT} = 0.5957108 (397)^{0.57897744}$$

$$\text{N}^\circ \text{ SPT} = 19.04$$

**Tabla 3.17: N° de Golpes de SPT en Función de PDC**

N° Ensayo	Zona	PDC	SPT
1	Av. Las Américas (Zona La Terminal)	386	18.73
2	Av. Las Américas (Zona La Terminal)	487	21.43
3	Av. Las Américas (Zona La Terminal)	397	19.04

**Fuente: Elaboración Propia**

### 3.7.5 Comparación de los resultados obtenidos mediante el uso de la fórmula de correlación y los datos obtenidos en campo

A continuación se presenta una tabla resumen con los resultados obtenidos con la utilización de la fórmula propuesta por la correlación de PDC y SPT:

**Tabla 3.18: Comparación de resultados de N° de golpes**

N°	Zona	N° Golpes	N° Golpes	N° Golpes
1	Av. Las Américas (Zona La Terminal)	386	18.73	21
2	Av. Las Américas (Zona La Terminal)	487	21.43	24
3	Av. Las Américas (Zona La Terminal)	397	19.04	22

Como se puede apreciar en la tabla 3.18, los valores del número de golpes del SPT obtenido por la fórmula  $N^{\circ} \text{ SPT} = 0.5957108 \text{ PDC}^{0.57897744}$  en base a los números de golpes obtenidos mediante el ensayo de PDC, tienen una buena proximidad entre ellos, haciendo que la ecuación propuesta en el estudio estadístico sea confiable.

### 3.7.6 Cálculo de los esfuerzos admisibles

Para poder tener una mejor comparación y comprensión de los resultados obtenidos mediante la fórmula obtenida del análisis estadístico, se procede a realizar el cálculo del esfuerzo admisible para el número de golpes del SPT realizado con el equipo normado, con la clasificación del suelo correspondiente para AASHTO y para SUCS tenemos:

#### 1.- Cálculo del esfuerzo admisible con un número de golpes de SPT realizado con el equipo normado.

- Para Muestra 1

Datos:

- a) Clasificación

AASHTO = A-7-5(10)

SUCS = CL

**Descripción del suelo.-** Arcillas inorgánicas de baja o media plasticidad, arcillas limosas, arcillas pobres.

- b) N° de golpes de SPT

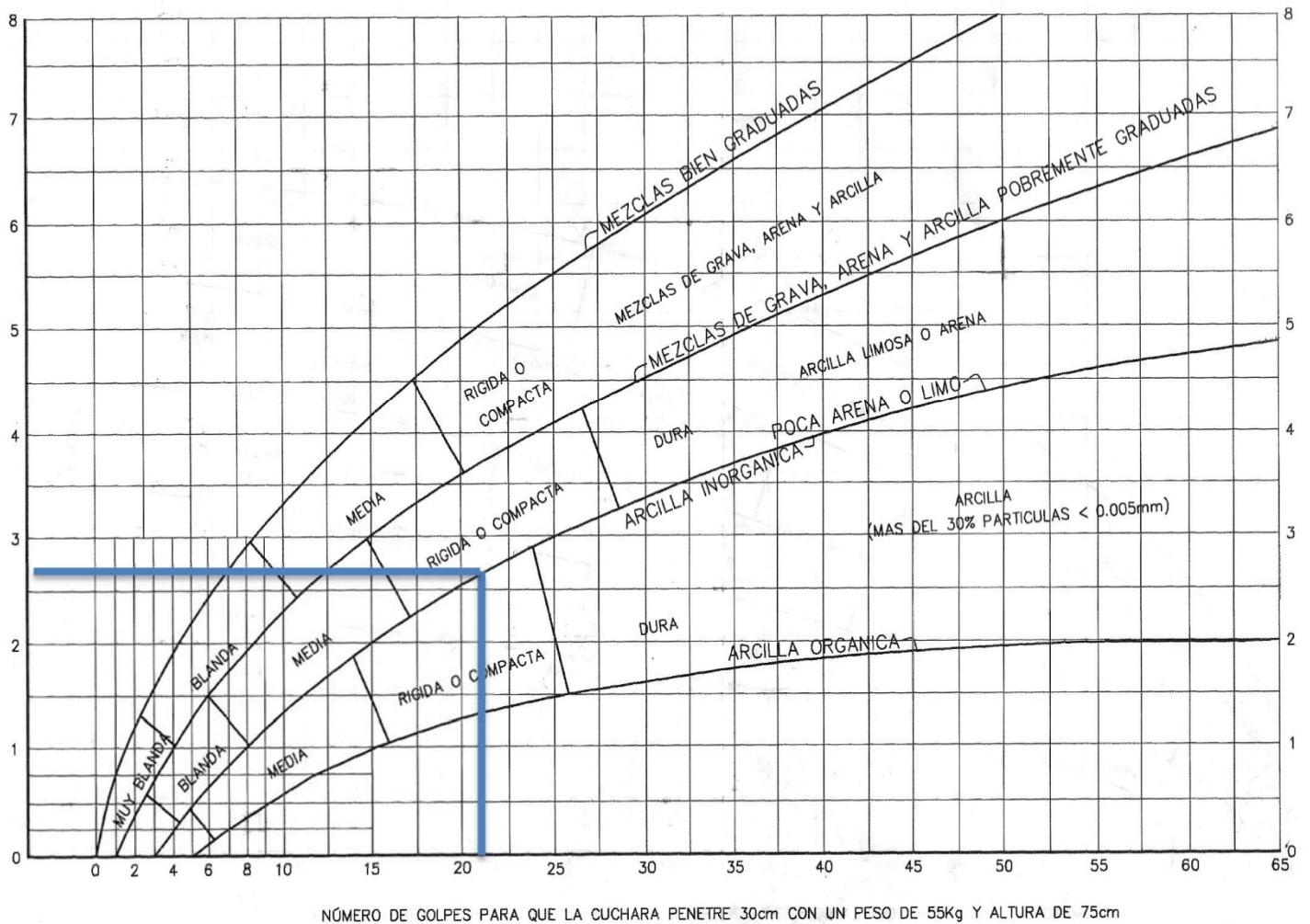
N° de golpes = 21

Por ábaco tenemos:

Universidad Autónoma Juan Misael  
Saracho  
Facultad de Ciencias y Tecnología  
Programa de Ingeniería Civil  
Laboratorio de Suelos y Hormigones

S.P.T. METODO DE LA CUCHARA NORMAL  
CAPACIDAD DE CARGAS ADMISIBLES

B.- ARCILLAS Y MEZCLAS DE SUELO



La capacidad portante del suelo con una humedad natural obtenido por ábaco es de  
2.65 Kg/cm<sup>2</sup>

- Para Muestra 2

Datos:

a) Clasificación

AASHTO = A - 4(8)

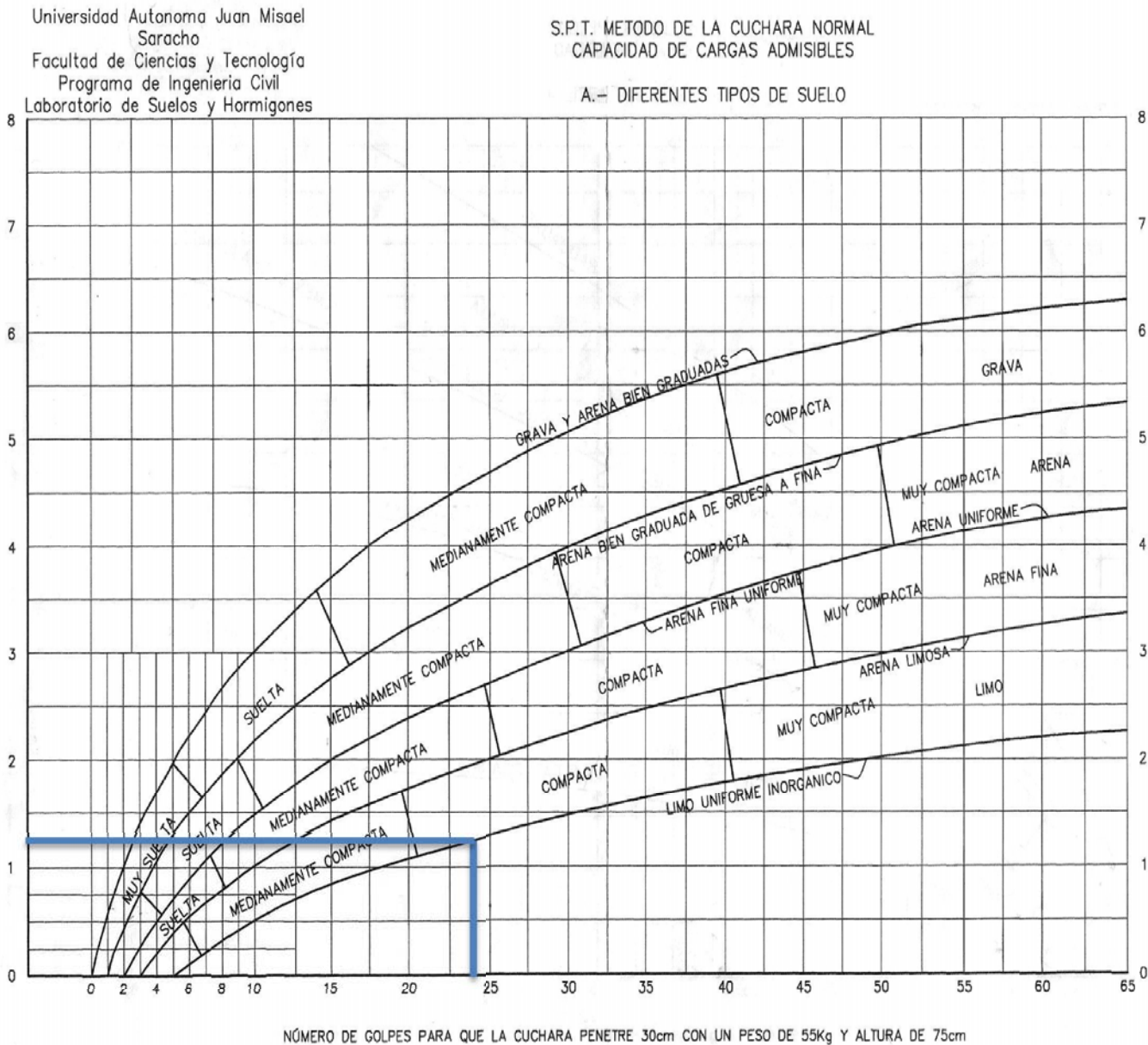
SUCS = ML

**Descripción del suelo.-** Los tipos de suelos ML pertenecen a limos inorgánicos, polvo de roca, limos arenosos o arcillosos ligeramente plásticos.

b) N° de golpes de SPT campo

N° de golpes = 24

Por ábaco tenemos:



El esfuerzo admisible obtenido por ábaco es de  $1.23 \text{ Kg/cm}^2$

- Para Muestra 3

Datos:

a) Clasificación

AASHTO = A - 6(8)

SUCS = CL

**Descripción del suelo.-** Los tipos de suelos CL pertenecen a arcillas inorgánicas de baja o mediana plasticidad, arcillas limosas

b) N° de golpes de SPT campo

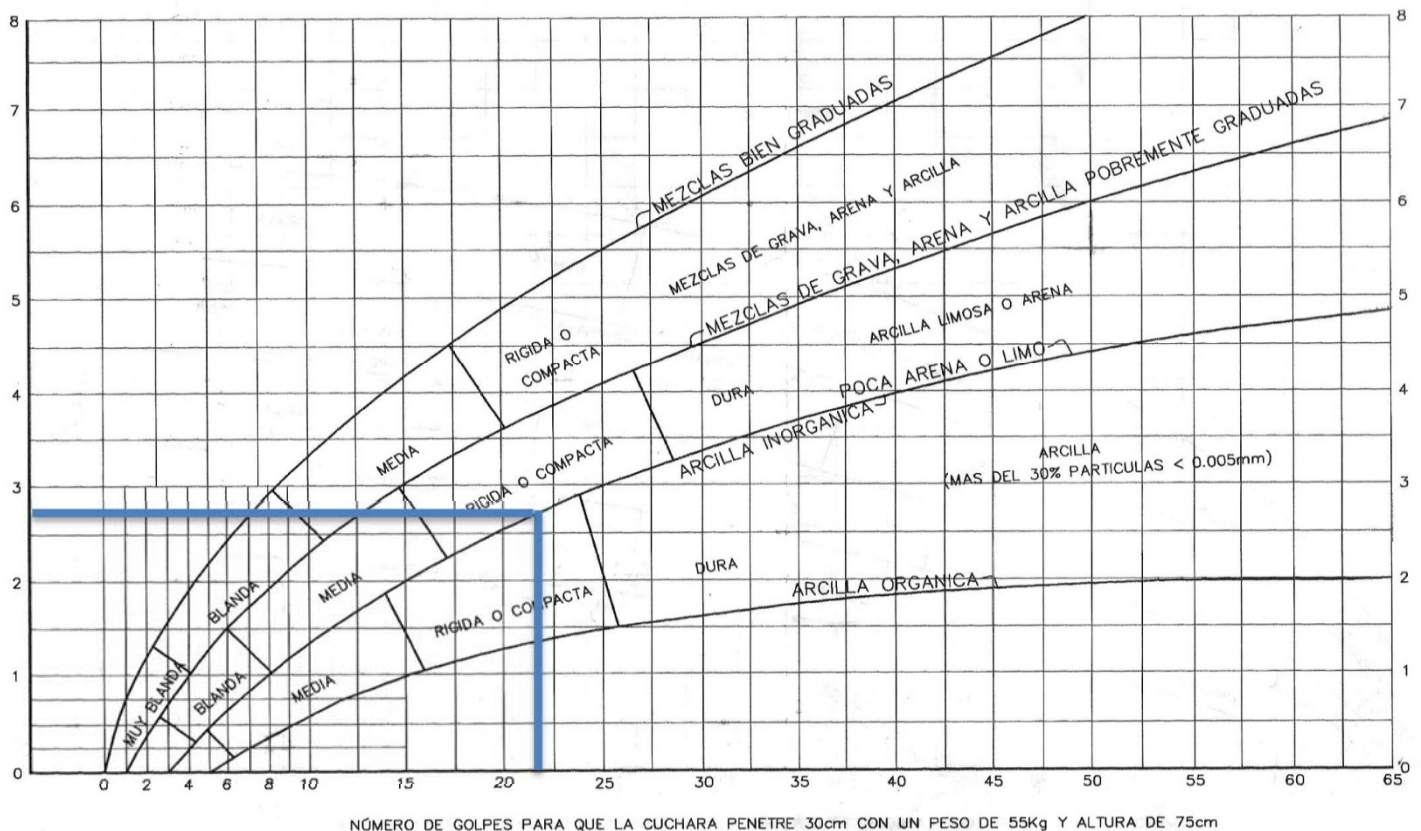
N° de golpes = 22

Por ábaco tenemos:

Universidad Autónoma Juan Misael  
Saracho  
Facultad de Ciencias y Tecnología  
Programa de Ingeniería Civil  
Laboratorio de Suelos y Hormigones

S.P.T. METODO DE LA CUCHARA NORMAL  
CAPACIDAD DE CARGAS ADMISIBLES

B.- ARCILLAS Y MEZCLAS DE SUELO



El esfuerzo admisible obtenido por ábaco es de 2.70 Kg/cm<sup>2</sup>

## 2.- Cálculo del esfuerzo admisible para el número de golpes del SPT en base al PDC.

Utilizando la formula obtenida de la correlación, con la clasificación del suelo correspondiente para AASHTO y para SUCS tenemos:

- Para Muestra 1

Datos:

a) Clasificación

AASHTO = A-7-5(10)

SUCS = CL

**Descripción del suelo.-** Arcillas inorgánicas de baja o media plasticidad, arcillas limosas, arcillas pobres.

b) N° de golpes de SPT en base a PDC

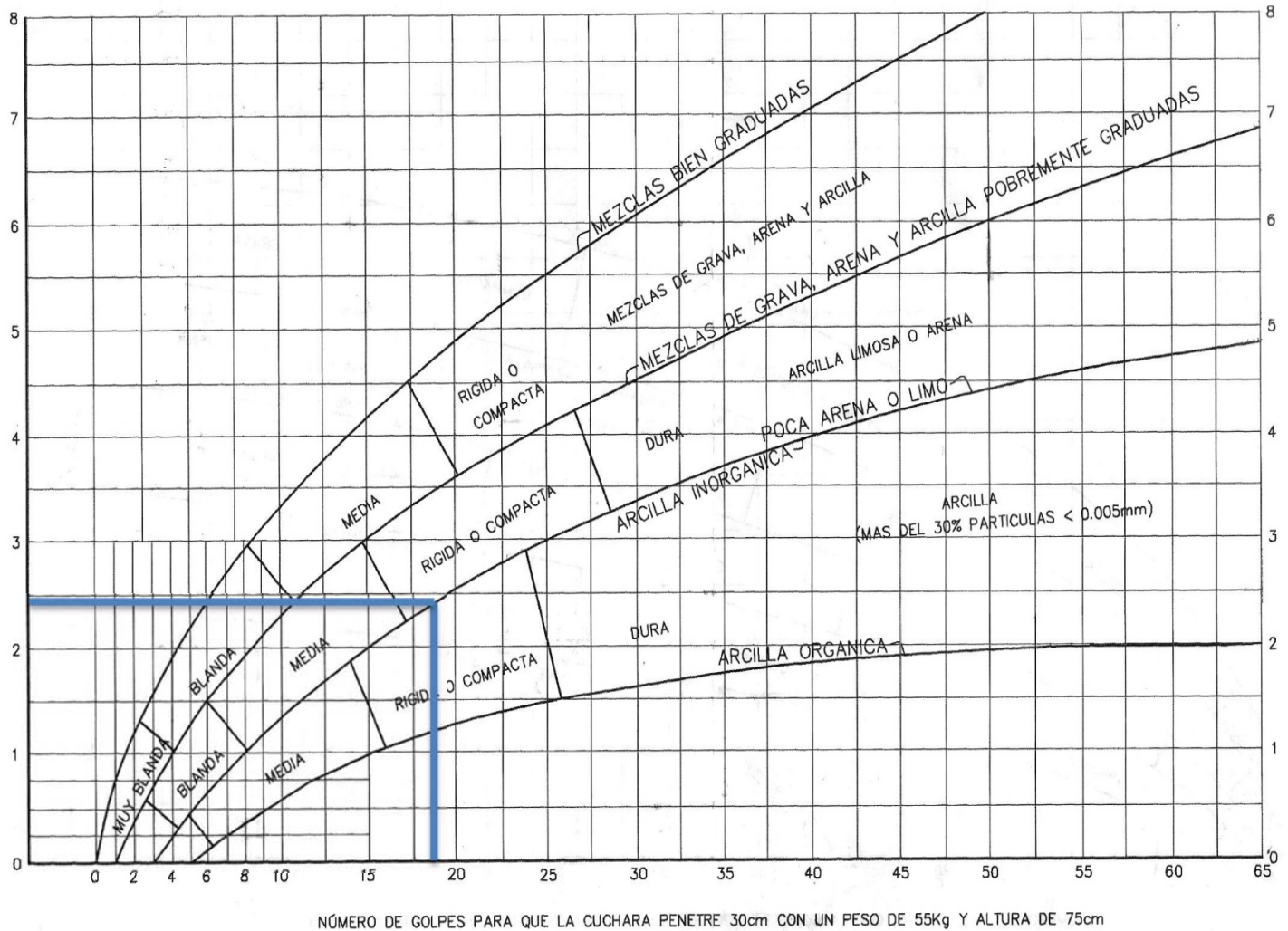
N° de golpes = 18.73

Por ábaco tenemos:

Universidad Autónoma Juan Misael  
Saracho  
Facultad de Ciencias y Tecnología  
Programa de Ingeniería Civil  
Laboratorio de Suelos y Hormigones

S.P.T. METODO DE LA CUCHARA NORMAL  
CAPACIDAD DE CARGAS ADMISIBLES

B.- ARCILLAS Y MEZCLAS DE SUELO



El esfuerzo admisible obtenido por ábaco es de  $2.49 \text{ Kg/cm}^2$

- Para Muestra 2

Datos:

a) Clasificación

AASHTO = A - 4(8)

SUCS = ML

**Descripción del suelo.-** Los tipos de suelos ML pertenecen a limos inorgánicos, polvo de roca, limos arenosos o arcillosos ligeramente plásticos.

b) N° de golpes de SPT calculado

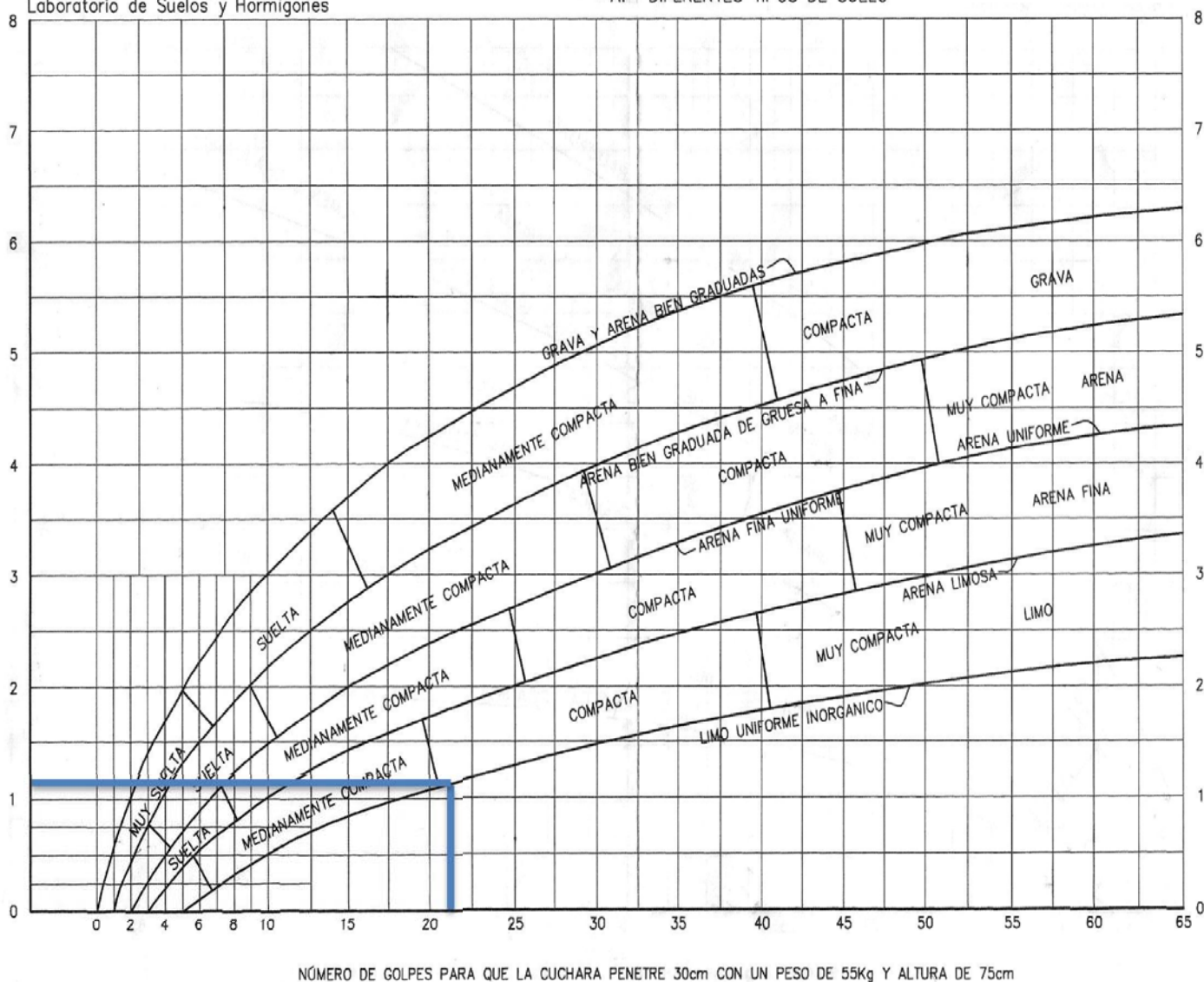
N° de golpes = 21.43

Por ábaco tenemos:

Universidad Autónoma Juan Misael  
Saracho  
Facultad de Ciencias y Tecnología  
Programa de Ingeniería Civil  
Laboratorio de Suelos y Hormigones

S.P.T. METODO DE LA CUCHARA NORMAL  
CAPACIDAD DE CARGAS ADMISIBLES

A.- DIFERENTES TIPOS DE SUELO



El esfuerzo admisible obtenido por ábaco es de 1.12 Kg/cm<sup>2</sup>

- Para Muestra 3

Datos:

c) Clasificación

AASHTO = A - 6(8)

SUCS = CL

**Descripción del suelo.-** Los tipos de suelos CL pertenecen a arcillas inorgánicas de baja o mediana plasticidad, arcillas limosas

d) N° de golpes de SPT calculado

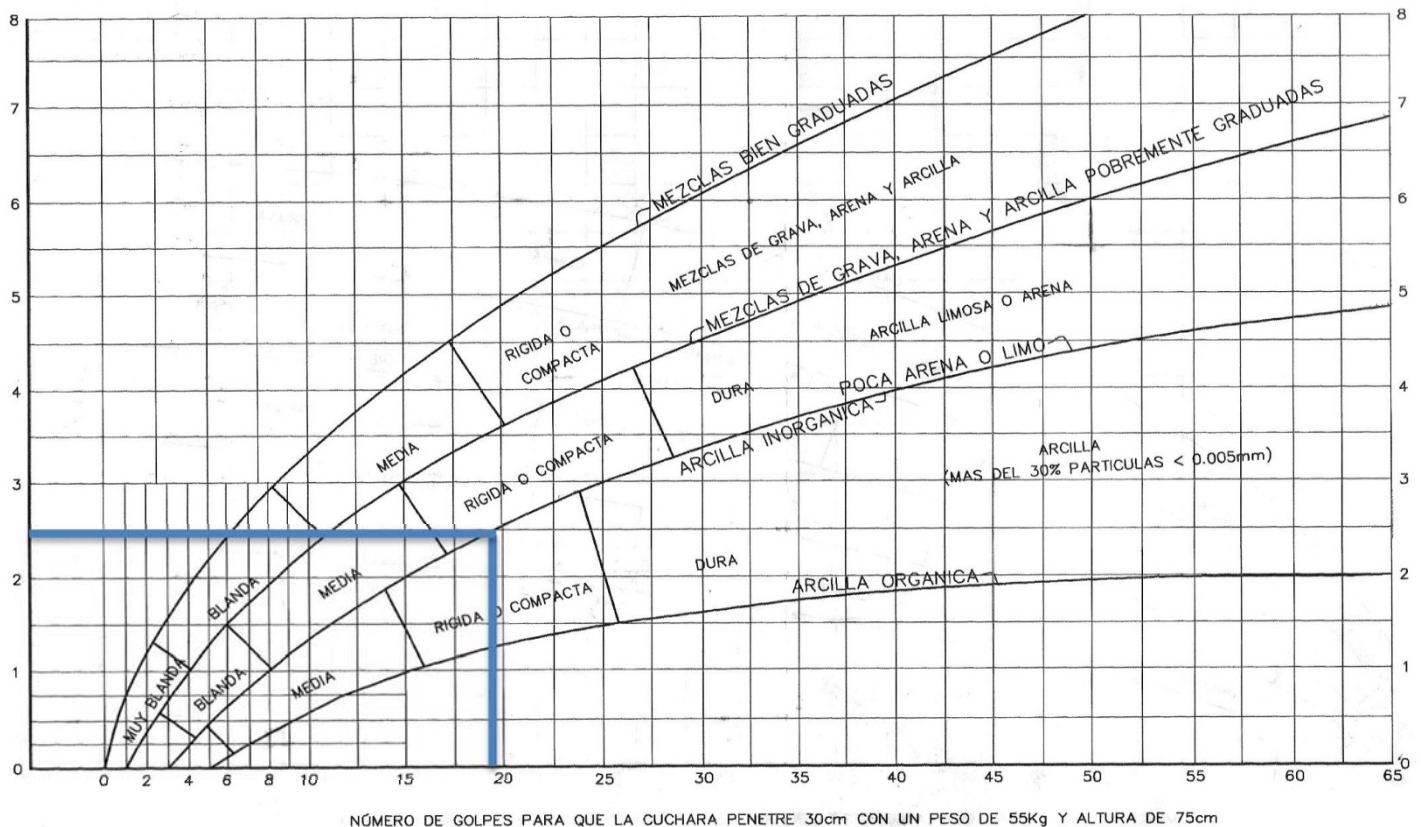
N° de golpes = 19.04

Por ábaco tenemos:

Universidad Autónoma Juan Misael Saracho  
Facultad de Ciencias y Tecnología  
Programa de Ingeniería Civil  
Laboratorio de Suelos y Hormigones

S.P.T. METODO DE LA CUCHARA NORMAL  
CAPACIDAD DE CARGAS ADMISIBLES

B.- ARCILLAS Y MEZCLAS DE SUELO



El esfuerzo admisible obtenido por ábaco es de 2.50 Kg/cm<sup>2</sup>

### 3.- Cálculo del esfuerzo admisible para el número de golpes del PDC utilizando la ecuación empírica.

Tenemos:

- Para Muestra 1

Datos:

Nº de golpes de PDC

Nº de golpes = 386

Utilizando la ecuación del Laboratorio de suelos de la UAJMS tenemos:

$$\sigma = \frac{W * h * m * N}{S * Np * A} * f$$

Dónde:

$\sigma$  = Esfuerzo admisible del suelo, Kg/cm<sup>2</sup>

W = Peso del martillo = 7.68 kg

h = Altura de caída = 60.25 cm

m = Factor de penetración = 0.1

N = Numero de golpes

S = Altura de Penetración = 30 cm

Np = Factor de arcillas de media sensibilidad = 8

A = Área de la sección del cono = 10.2 cm<sup>2</sup>

f = Factor de eficiencia = 0.4

Reemplazando datos tenemos:

$$\sigma = \frac{7.68 * 60.25 * 0.1 * 386}{30 * 8 * 10.2} * 0.4$$

$$\sigma = 2.63 \text{ kg/cm}^2$$

- Para Muestra 2

Datos:

Nº de golpes de PDC

Nº de golpes = 487

Utilizando la ecuación del Laboratorio de suelos de la UAJMS tenemos:

$$\sigma = \frac{W * h * m * N}{S * Np * A} * f$$

Reemplazando datos tenemos:

$$\sigma = \frac{7.68 * 60.25 * 0.1 * 487}{30 * 8 * 10.2} * 0.4$$

$$\sigma = 3.31 \text{ kg/cm}^2$$

- Para Muestra 3

Datos:

Nº de golpes de PDC

Nº de golpes = 397

Utilizando la ecuación del Laboratorio de suelos de la UAJMS tenemos:

$$\sigma = \frac{W * h * m * N}{S * Np * A} * f$$

Reemplazando datos tenemos:

$$\sigma = \frac{7.68 * 60.25 * 0.1 * 397}{30 * 8 * 10.2} * 0.4$$

$$\sigma = 2.70 \text{ kg/cm}^2$$

### 3.7.7 Comparación de los esfuerzos admisibles

En la tabla 3.19 se presentan los valores correspondientes a los esfuerzos admisibles obtenidos mediante el número de golpes de SPT realizado con el equipo normado, el número de golpes de SPT en función del número de golpes del PDC haciendo uso de la fórmula obtenida de la correlación y el esfuerzo calculo en función del PDC empleando la fórmula propuesta por la UAJSM.

**Tabla 3.19: Tabla Comparativa de esfuerzos admisibles**

N° de Ensayo	Procedencia	N° Golpes			Esfuerzo Admisible		
		SPT	SPT en Función del PDC	PDC	SPT	SPT en	PDC
1	Av. Las Américas (Zona La Terminal)	21	18.73	386	2.65	2.49	2.63
2	Av. Las Américas (Zona La Terminal)	24	21.43	487	1.23	1.12	3.31
3	Av. Las Américas (Zona La Terminal)	22	19.04	397	2.70	2.50	2.70

**Fuente: Elaboración Propia**

## 3.8 ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 3.8.1 Análisis de la curva de regresión

Al observar la curva de correlación se puede notar que es una curva de forma creciente positiva en donde para cada valor de número de golpes de PDC se obtiene un valor de número de golpes SPT, mientras más alto sea el valor de PDC, más alto será el valor del SPT, esto tiene coherencia puesto que ambos equipos son directamente proporcionales uno con el otro.

### 3.8.2 Análisis de los esfuerzos admisibles calculados por los tres métodos empleados.

Los resultados obtenidos en el estudio de estos dos equipos (SPT, PDC) son satisfactorios puesto que arrojan resultados coherentes y de buena aproximación.

Los valores de los esfuerzos admisibles calculados por medio del número de golpes del SPT y los esfuerzos admisibles calculados en base al número de golpes de PDC obtenido mediante la utilización de la fórmula resultado de la correlación, en promedio difieren en 7.46 %, esto quiere decir que los valores de los esfuerzos admisibles calculados con el número de golpes del SPT obtenido mediante el uso de la fórmula en función del número de golpes de PDC son en un 92.54% parecidos a los valores de los esfuerzos admisibles obtenidos por ábaco tomando directamente con el número de golpes de SPT usando el equipo normado en campo.

Los valores de los esfuerzos admisibles obtenidos mediante la fórmula empírica propuesta por el laboratorio de suelos para el PDC, arrojan resultados parecidos cuando se trabaja con suelos arcillosos, pero cuando tenemos otro tipo de suelo como un suelo limoso, limo arenosos, estos valores difieren en gran medida de los obtenidos mediante el SPT debido al factor de sensibilidad y al factor de penetración, el factor de sensibilidad o sensibilidad es únicamente aceptable para suelos arcillosos, tomando en cuenta los valores propuestos en la siguiente tabla bajo criterio técnico del laboratorista.

<b>Sensibilidad</b>	<b>Descripción</b>
1 - 2	Ligeramente sensitiva
2 - 4	Medianamente sensitiva
4 - 8	Muy sensitiva
8 - 16	Ligeramente activa
16 - 32	Medianamente activa
32 - 64	Muy activa
> 64	Extra activa

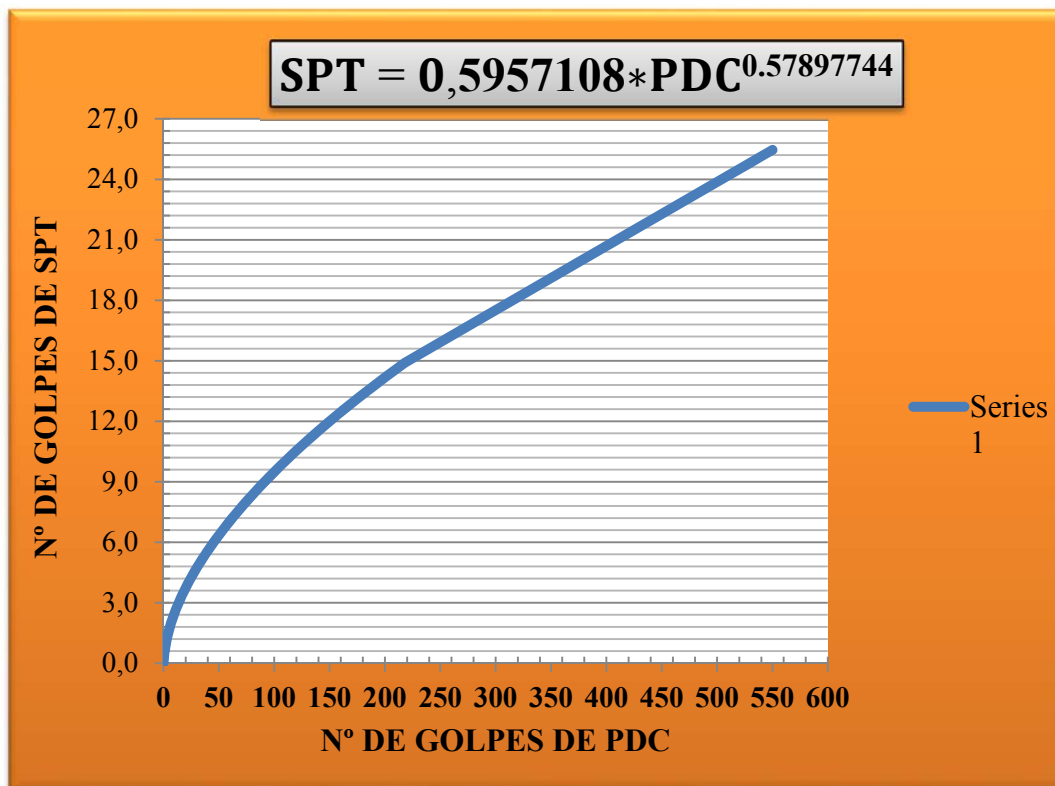
**Fuente: Das, 1997**

## CAPÍTULO IV

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 4.1 Conclusiones

- Es posible la realización de una correlación entre PDC y SPT, teniendo como la variable independiente el N° de golpes del PDC un equipo de fácil manejo, y la variable dependiente como el SPT, de esta manera se determinara el esfuerzo admisible de un suelo en lugares de difícil acceso, debido a que solo será necesario transportar el equipo de PDC para la realización del ensayo in situ, ahorrando de manera significativa el tiempo y costo de transporte como la mano de obra.
- En base al comportamiento y forma de la nube de puntos y analizando los distintos tipos de regresiones descartando aquellas que no reflejaban el verdadero comportamiento de los equipos, es que se optó por una regresión Potencial, como se muestra:



- Para cerciorarse si se obtuvieron buenos resultados de la correlación, se realizó una verificación y posterior comparación del esfuerzo admisible del suelo entregada por cada equipo, del cual los valores tienen una aproximación del 92.54 %.
- Los valores de los esfuerzos admisibles entregados por el PDC haciendo uso de la fórmula empírica propuesta por el laboratorio de suelos, son aceptables cuando se trabaja con suelos arcillosos, cuando se tiene otro tipo de suelo (Suelos limosos) la ecuación arroja valores demasiado altos en relación a los valores del SPT.
- El ensayo de PDC y SPT se los realiza conjuntamente, debido a que si se los realiza en distintos días cambia el porcentaje de humedad del terreno y así nos darían los número de golpes erróneos, debido a la expansión que sufren estos suelos, y si se los realiza muy alejados podrían variar debido a que los estratos de los suelos cambian y tendríamos distintas clasificaciones de suelos.

#### **4.2. Recomendaciones**

- Para los límites de Atterberg se recomienda trabajar con un gotero, porque se puede controlar fácilmente la cantidad de agua, sin olvidar que el equipo de casa grande se encuentre debidamente calibrado antes del ensayo para obtener mejores resultados en el proceso para la obtención de resultados del límite líquido y límite plástico.
- Al momento del ensamblado del equipo de SPT se debe de contar con todo el equipo necesario de seguridad (Casco de seguridad, guantes, botas con punta de acero en lo posible) puesto que se trabaja con un equipo pesado.
- Tener en cuenta que al momento de levantar el martillo del PDC, este llegue a la altura exacta para que pueda caer con la energía requerida por el equipo.
- Por medio de la tabla proporcionada para el factor de sensibilidad de las arcillas, se recomienda asumir un valor entre 8 – 16 que pertenecen a arcillas

ligeramente activas en su comportamiento como en cambios de volúmenes, tomando siempre el menor valor de este rango.

- Se recomienda utilizar los nuevos datos propuestos para la formula empírica del PDC, vale decir el peso del martillo será de 7.68 kg, la altura de caída de 60.25 cm y el factor de sensibilidad de las arcillas de 8.