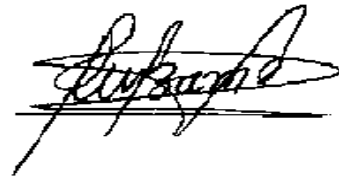
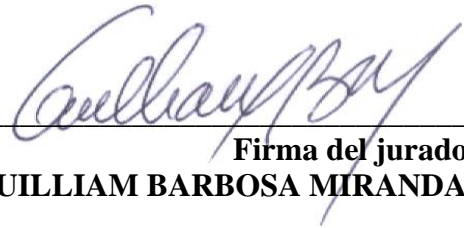


*DETERMINACIÓN DE LA CORRELACIÓN ENTRE EL ÍNDICE DE PLASTICIDAD Y EL ÁNGULO DE
FRICCIÓN INTERNA DE UN SUELO*

NOTA DE ACEPTACION



Firma del director
MODESTO BARRIOS FONTALVO



Firma del jurado
GUILLIAM BARBOSA MIRANDA



Firma del jurado
RAMÓN TORRES ORTEGA



*DETERMINACIÓN DE LA CORRELACIÓN ENTRE EL INDICE DE PLASTICIDAD
Y EL ANGULO DE FRICCIÓN DE UN SUELO*



**DETERMINACIÓN DE LA CORRELACIÓN ENTRE EL INDICE DE PLASTICIDAD
Y EL ANGULO DE FRICCIÓN DE UN SUELO**

ARNALDO ULLOQUE LLERENA

JUAN CARLOS GUZMÁN PEREZ

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO



UNIVERSIDAD DE CARTAGENA

FACULTAD DE INGENIERIA

PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL

CARTAGENA D.T. y C.

2020



**DETERMINACIÓN DE LA CORRELACIÓN ENTRE EL INDICE DE PLASTICIDAD
Y EL ANGULO DE FRICCIÓN DE UN SUELO**



**DETERMINACIÓN DE LA CORRELACIÓN ENTRE EL INDICE DE PLASTICIDAD
Y EL ANGULO DE FRICCIÓN DE UN SUELO**

Investigadores:

ARNALDO ULLOQUE LLERENA

JUAN CARLOS GUZMÁN PEREZ

Director:

MODESTO BARRIOS FONTALVO

**GRUPO DE INVESTIGACIÓN: GEOTECNIA, MATERIALES, VÍAS Y TRANSPORTE
(GEOMAVIT)**

LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN: PROPIEDADES DEL SUELO Y APLICACIONES

**UNIVERSIDAD DE CARTAGENA
FACULTAD DE INGENIERIA
PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL
CARTAGENA D.T. y C.**

2020



**DETERMINACIÓN DE LA CORRELACIÓN ENTRE EL INDICE DE PLASTICIDAD
Y EL ANGULO DE FRICCIÓN DE UN SUELO**



AGRADECIMIENTOS

“A mi madre, Enith Pérez Ahumada, mi familia, a Swanny Rocha; a la paciencia e incluso a la falta de ella.”

Juan Carlos Guzmán Pérez

“Por las palabras de aliento dichas y la motivación insistente, a mi nueva familia y pilar; a ellas.”

Arnaldo Ulloque Llerena



TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	5
ABSTRACT	6
1. INTRODUCCIÓN.	7
2. MARCO REFERENCIAL.	15
2.1 ANTECEDENTES.....	15
2.2 ESTADO DEL ARTE	17
2.3 MARCO TEORICO	25
3. OBJETIVOS	36
3.1 OBJETIVO GENERAL	36
3.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS	36
4. ALCANCE.....	37
5. METODOLOGÍA.	40
6. ANALISIS DE RESULTADOS	54
7. CONCLUSIONES	68
8. RECOMENDACIONES	71
9. BIBLIOGRAFIA	73



**DETERMINACIÓN DE LA CORRELACIÓN ENTRE EL ÍNDICE DE PLASTICIDAD
Y EL ÁNGULO DE FRICCIÓN DE UN SUELO**



RESUMEN

En general la correlación entre propiedades y características del suelo es una herramienta de alta utilidad ya que esta permite, con un adecuado uso, realizar estimaciones preliminares cuando la zona de estudio es de difícil acceso o la obtención de muestras y su análisis sea de un elevado costo. Esta investigación de tipo mixto, consistió en la toma de 13 muestras en la zona sur de la ciudad de Cartagena, para luego ser ensayadas en el laboratorio. Una parte de la investigación es descriptiva mediante la cual se obtuvieron directamente por los autores las propiedades índices y los parámetros de resistencia del suelo, y otra parte de tipo analítica a través de la cual se pretendió determinar la correlación entre el ángulo de fricción de un suelo arcillo-arenoso, obtenido mediante ensayo de corte directo y el índice de plasticidad del mismo, observando el comportamiento de los datos obtenidos a partir de análisis de regresión de datos estadísticos, para obtener una ecuación que permitiera estimar de manera ágil y dinámica el ángulo de fricción del suelo estudiado.

Se pudo encontrar que, a partir de las muestras estudiadas, existe una correlación de tipo potencial entre el ángulo de fricción y el índice de plasticidad que viene dada por la ecuación $\phi = \frac{706.83}{IP^{1.643}}$, con un coeficiente de determinación $R^2 = 0,856$. A partir del análisis comparativo entre la ecuación propuesta y los modelos de otros autores se evidenció que en un rango de plasticidad entre 6 y 9 la diferencia medida a partir de cocientes se encuentra entre 0.82 y 1.65, mientras para valores fuera del rango de plasticidad la diferencia medida a partir de cocientes alcanza valores de 10.6.

Evidentemente la correlación obtenida indica una relación inversamente proporcional de tipo potencial entre el índice de plasticidad y el ángulo de fricción interna, y adicional a esto el análisis comparativo ejecutado refleja que la ecuación obtenida es aplicable en un rango de plasticidad $6 < IP < 9$. Ello implica que futuros trabajos deben apuntar a ensayar un mayor número de muestras y ampliar el rango de índice de plasticidad experimental.

Palabras claves: correlación, geotecnia, ángulo de fricción, índice de plasticidad.



*DETERMINACIÓN DE LA CORRELACIÓN ENTRE EL INDICE DE PLASTICIDAD
Y EL ANGULO DE FRICCIÓN DE UN SUELO*



ABSTRACT

In general, the correlation between properties and soil characteristics is a highly useful tool since it allows, with proper use, to make preliminary estimates when the study area is difficult to access or to obtain samples and their analysis is too expensive. This mixed type investigation consisted of taking 13 samples in the southern part of the city of Cartagena, to later be tested in the laboratory. One part of the research is descriptive through which the index properties and soil resistance parameters were obtained directly by the authors, and another part of an analytical type through which it was intended to determine the correlation between the friction angle of a clay-sandy soil, obtained by direct shear test and its plasticity index, observing the behavior of the data obtained from regression analysis of statistical data, to obtain an equation that allows an agile and dynamic estimate of the angle friction of the soil studied.

It was found that, from the studied samples, there is a potential correlation between the friction angle and the plasticity index, which is given by the equation $\phi = \frac{706.83}{IP^{1.643}}$, with a coefficient of determination $R^2 = 0,856$. From the comparative analysis between the proposed equation and the models of other authors, it was evidenced that in a range of plasticity between 6 and 9 the difference measured from ratios is between 0.82 and 1.65, while for values outside the range of plasticity the difference measured from quotients reaches values of 10.6.

Obviously, the correlation obtained indicates an inversely proportional relationship of a potential type between the plasticity index and the internal friction angle, and in addition to this, the comparative analysis carried out reflects that the obtained equation is applicable in a plasticity range $6 < IP < 9$. This implies that future works should aim to test a greater number of samples and expand the range of experimental plasticity index.

Keywords: correlation, geotechnics, friction angle, plasticity index.



1. INTRODUCCION

El suelo es un complejo material de ingeniería, y sus propiedades no son únicas o constantes. En cambio, varían con muchos factores ambientales (por ejemplo, tiempo, historia geológica, fluctuación del nivel freático, etc.), como se discute en la mayoría de los libros de referencia geotécnicos. (Kulhawy & Mayne, 1990)

Las correlaciones geotécnicas nacen por la necesidad de reproducir en laboratorio el comportamiento del suelo, a través de ensayos ‘in situ’ (en sitio) con muestras representativas e inalteradas del terreno. Estos parámetros permiten predecir la respuesta del terreno frente a las acciones que lo soliciten, por ejemplo, para conocer el intervalo de variación de una propiedad de un determinado material y comprobar que cumple con los límites o para contrastar el resultado en ubicaciones de difícil acceso o materiales en los que el coste de obtención y análisis de las muestras resulte muy elevado.

La relación entre el ángulo de fricción y el índice de plasticidad ha sido estudiada durante los últimos años por numerosos autores, Bjerrum y Simons (1960), Kenney (1959), Holt (1962), Brooker and Ireland (1965), Skempton (1964), Mitchell (1965), Bjerrum (1967), Deere (1967) y M.A. Kanji (1970, 1972 y 1974), los cuales encontraron buenas correlaciones entre ambos parámetros.



**DETERMINACIÓN DE LA CORRELACIÓN ENTRE EL INDICE DE PLASTICIDAD
Y EL ANGULO DE FRICCIÓN DE UN SUELO**

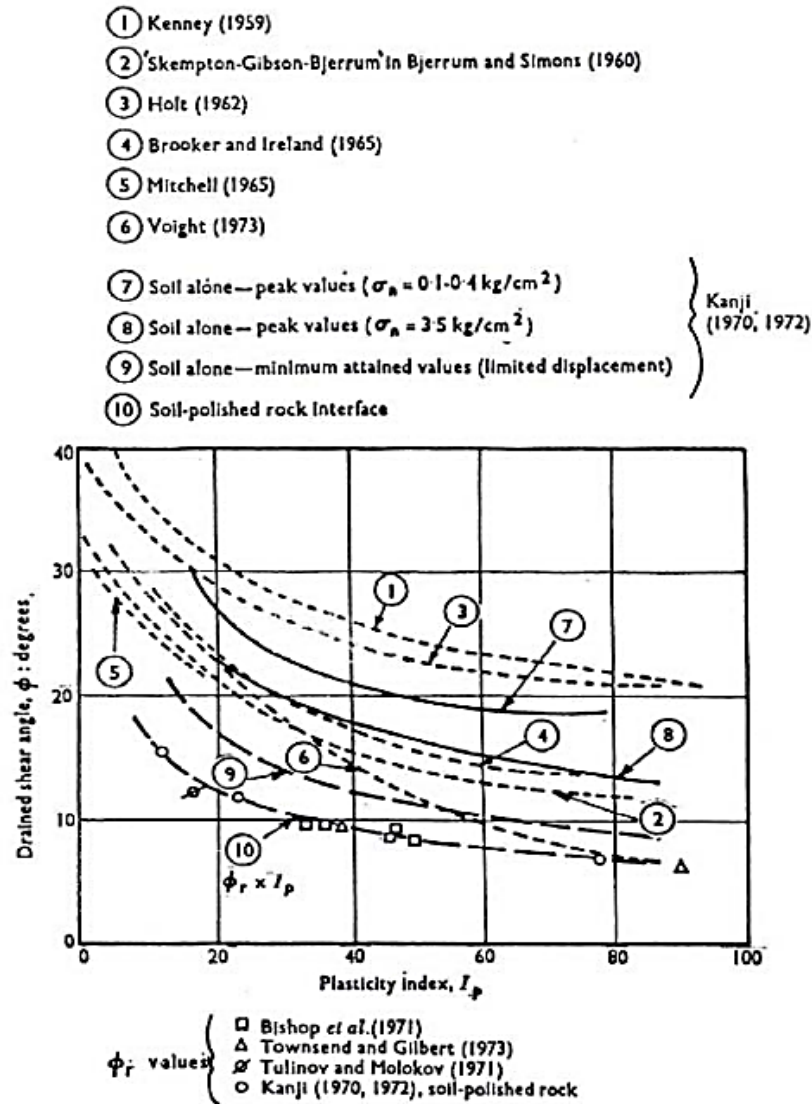


Ilustración 1. Relaciones entre el ángulo de fricción y el índice de plasticidad. Autor: A. Puy Santín, "Influencia de la temperatura en el límite líquido para suelos con diferentes índices de plasticidad"

Las curvas indican la variación del ángulo de fricción efectiva con el índice de plasticidad en suelos no alterados, normalmente consolidados y suelos remoldeados.

El determinar correlaciones entre propiedades y parámetros característicos del suelo resulta ser importante objeto de estudio por diversas razones:



DETERMINACIÓN DE LA CORRELACIÓN ENTRE EL INDICE DE PLASTICIDAD Y EL ANGULO DE FRICCIÓN DE UN SUELO



- Estas correlaciones permiten realizar estimaciones preliminares cuando la zona de estudio es de difícil acceso o la obtención de muestras y su análisis sea de un elevado costo.
- El ángulo de fricción en algunos tipos de suelos es el factor principal para determinar la capacidad portante del suelo y calcular factores de seguridad para estabilidad de taludes.

Las correlaciones se basan en amplios estudios, fundamentados en una gran diversidad y cantidad de datos de partida, para los cuales es factible asociar métodos estadísticos que aportan una adecuada fiabilidad a las conclusiones obtenidas. No obstante, la mayoría de las correlaciones no dejan de tener un marco de fiabilidad local, restringida a cierto tipo de suelo, presente en un determinado entorno geológico, y para unas condiciones geotécnicas concretas.

A grandes rasgos, podría decirse que el asertivo uso de datos obtenidos de correlaciones depende del conocimiento que se tenga de la materia (ensayos), la trascendencia y responsabilidad de lo que se vaya a calcular, además de la normativa existente.

Se han realizados estudios de correlación entre propiedades y parámetros de suelo a nivel internacional, como es el caso del estudio titulado **QUANTIFYING THE CROSS-CORRELATION BETWEEN EFFECTIVE COHESION AND FRICTION ANGLE OF SOIL FROM LIMITED SITE-SPECIFIC DATA.** (Wang, Y.; Akeju, O. City University of Hong Kong, 2016) en el cual se desarrolla un enfoque bayesiano para caracterizar la distribución de probabilidad conjunta específica de sitio de c 'y ϕ ' y cuantificar la correlación cruzada entre c 'y ϕ ' a partir de un número limitado de c 'y ϕ ' datos obtenidos de un proyecto Bajo un marco bayesiano, el enfoque propuesto integra de manera probabilística los pares de datos c 'y ϕ ' limitados específicos del sitio con conocimiento previo, y el conocimiento integrado se transforma en un gran número de pares de muestras c 'y ϕ ' usando la simulación de MCMC.

En el contexto nacional se desarrolló un **ANÁLISIS DE LAS CORRELACIONES EXISTENTES DEL ÁNGULO DE FRICCIÓN EFECTIVO PARA SUELOS DEL PIEDEMONTE ORIENTAL DE BOGOTÁ USANDO ENSAYOS IN SITU.** (Ruge & Carmona. Universidad Nacional de Colombia, 2015). Esta investigación buscó mediante el uso de ensayos in situ (SPT y SPT-T), definir por medio de análisis de diferentes correlaciones, cuál de estas se ajustaba mejor a las condiciones propias de suelos del piedemonte de la ciudad de Bogotá. En esencia este estudio buscó resolver el problema relativo a que las correlaciones que



**DETERMINACIÓN DE LA CORRELACIÓN ENTRE EL ÍNDICE DE PLASTICIDAD
Y EL ÁNGULO DE FRICCIÓN DE UN SUELO**



han determinado distintos autores corresponden a casos de estudio en zonas con características geológicas, ambientales, etc. Muy diferentes, lo que también se pretende en el desarrollo de este trabajo de grado, guardando diferencias en que el estudio citado no busca determinar una correlación propiamente dicha, y que en lugar de usar como estadístico el índice de plasticidad, usa datos obtenidos de ensayos in situ.

En el contexto local no fue posible evidenciar estudios acerca este tipo específico de correlaciones, pero se han desarrollado estudios alrededor de correlaciones geotécnicas tales como:

CORRELACIÓN ENTRE LOS MÉTODOS DE COMPRESIÓN INCONFINADA Y CORTE DIRECTO EN SUELOS COHESIVOS, DEL SECTOR EL RODEO EN CARTAGENA (Mendivil P., Saavedra M. Universidad de Cartagena. 2016), en el cual el objetivo principal determinar un coeficiente de correlación que permitiera optimizar el costo de la aplicación de ensayos de suelo para determinar su resistencia al corte.

Con relación al presente estudio, este trabajo buscaba establecer una correlación que permitiera “suplantar” el ensayo de corte directo y sus resultados con un ensayo de alta frecuencia de aplicación en obra y más económico que el ensayo de corte directo. Dicho de otra forma, buscaba obtener resultados confiables de parámetros de resistencia mediante un método más simple, ágil y económico

Se sabe por definición propia que el suelo es un complejo material de ingeniería, y sus propiedades no son únicas o constantes. En cambio, varían con muchos factores ambientales.

La correlación entre una característica índice de suelo y un parámetro de resistencia resulta ser importante objeto de estudio por razones que se pueden clasificar como generales y específicas. Como razones generales se pueden entender que la correlación de propiedades del suelo es una herramienta de alta utilidad ya que esta permite, con un adecuado uso, realizar estimaciones preliminares cuando la zona de estudio es de difícil acceso o la obtención de muestras y su análisis sea de un elevado costo. Como razón específica se tiene que el estimar el ángulo de fricción de un suelo es una tarea de importancia ya que en algunos suelos es el factor principal para determinar la capacidad portante del suelo y en el cálculo de factores de seguridad de estabilidad de taludes.



DETERMINACIÓN DE LA CORRELACIÓN ENTRE EL ÍNDICE DE PLASTICIDAD Y EL ÁNGULO DE FRICCIÓN DE UN SUELO



Además, estudiar esta correlación a nivel académico y profesional se justifica en primera instancia porque ampliaría el conocimiento de la mecánica de suelos a nivel local, es decir teniendo en cuenta todas las características geológicas y medioambientales de la ciudad de Cartagena, que se pueden resumir de la siguiente manera: terrenos parcialmente afectados por inundaciones, erosión descontrolada de colinas circundantes, topografía suavemente ondulada, estructura y litología características del cinturón del Sinú y depósitos cuaternarios de origen marino y continental, tales como depósitos de playas y playones, intermareales, sustrato de manglar, dunas y depósitos aluviales, coluvioaluviales y de coluvión. (Díaz Mendoza, 2010). Y en segunda instancia porque, dependiendo de los resultados que se obtengan, será posible estimar con mayor precisión el ángulo de fricción del suelo en proyectos que se encuentren dentro de la zona de estudio.

También se conoce que en la zona de estudio no se ha realizado ninguna investigación que se proponga correlacionar el índice de plasticidad y el ángulo de fricción efectivo, pero se conocen los antecedentes expuestos anteriormente. Con base a esto y a las características geológicas y geotécnicas de Cartagena, se hace necesario que se estudie la correlación entre índice de plasticidad y ángulo de fricción efectivo, la cual por supuesto estará influenciada por los factores medioambientales característicos de la ciudad.

La correlación entre el ángulo de fricción e índice de plasticidad, permite conocer o identificar de forma sencilla algunas de las propiedades de los suelos. Esta correlación se ha aplicado en análisis de estabilidad en suelos donde han ocurrido movimientos previos (deslizamientos).

Pero, ¿qué sucedería con estas propiedades del suelo si se ignora la correlación que existe entre el ángulo de fricción y el índice de plasticidad? Parece ilógico pensar que, como consecuencia de esta omisión, conlleve el desarrollo de un proyecto constructivo a un evento no deseado, representando pérdidas económicas e incluso humanas.

Así entonces, se planteó; ¿Qué efecto e importancia tiene la determinación de la correlación entre el ángulo de fricción del suelo y el índice de plasticidad? Este interés se vio acentuado al comprobar el esfuerzo a lo largo de los años por relacionar los límites de Atterberg y, en particular, el límite líquido con numerosos factores como el índice de compresión y el coeficiente de consolidación, mientras que la correlación entre el ángulo de fricción y el límite plástico era poco atendida.



DETERMINACIÓN DE LA CORRELACIÓN ENTRE EL INDICE DE PLASTICIDAD Y EL ANGULO DE FRICCIÓN DE UN SUELO



En este estudio se pretende determinar la correlación existente entre el ángulo de fricción interna de un suelo y el índice de plasticidad, para así estimar con agilidad el valor del ángulo de fricción en un suelo, valor que puede ser influyente en los posibles proyectos desarrollados en la zona.

En el campo profesional este estudio podría ser de capital importancia ya que en principio permitiría estimar de manera ágil el ángulo de fricción para estudios geotécnicos localizados en la zona de estudio, lo que eventualmente repercutiría en el aspecto financiero del proyecto a realizar, en la determinación o estimación oportuna del ángulo de fricción en zonas de difícil acceso, e incluso en el desarrollo de proyectos cuyo objetivo sea mitigar el riesgo de movimientos de masas de suelo. Además, es trascendental para determinar la estabilidad de taludes, la resistencia de una cimentación o para el cálculo del empuje de tierras, establecer los parámetros de asentamiento de un suelo y su expansividad potencial.

Para la realización del trabajo de investigación en primera instancia se recolectaron 13 muestras parcialmente inalteradas mediante ensayo SPT, procurando proteger las muestras con papel aluminio para conservar en lo posible sus condiciones naturales, en la zona sur de la ciudad de Cartagena, concretamente las coordenadas 10.412383, -75.456829, del barrio el Pozón, sector 1ro de Mayo, 10.394807, -75.497942, del barrio los Calamares, 10.389776, -75.484404, del barrio San Pedro, 10.389742, -75.471421 del barrio El Recreo, 10.370418, -75.463361 del barrio El Rodeo y 10.389871, -75.509623 el barrio Nuevo Bosque.

De acuerdo al informe de zonificación geotécnica (INGEOMINAS, 2001), los lugares escogidos corresponden a diferentes zonas o conjuntos litológicos, cada uno con características geotécnicas diferentes que se resumen en la siguiente *Tabla*:

Barrio	Zona o conjunto litológico	Característica geotécnica
San Pedro	Zona III B	Suelo arcilloso producto de la meteorización de la unidad detrítica de la popa. Plasticidades entre 15% y 20%
Los Calamares	Zona IV	Constitución predominante arenarcillosa. Índice de plasticidad alrededor de 8% y porcentaje de finos de 42%



**DETERMINACIÓN DE LA CORRELACIÓN ENTRE EL INDICE DE PLASTICIDAD
Y EL ANGULO DE FRICCIÓN DE UN SUELO**



Barrio	Zona o conjunto litológico	Característica geotécnica
El recreo	Zona III A	Depósito marino aluvial y aluvial, compuesto principalmente por arcilla altamente plástica y susceptible a cambios volumétricos
Nuevo Bosque	DAR ¹	Arcillas y arenas finas de variada composición
El rodeo	T2-3	Alternancia de arcillolitas y areniscas arcillosas
El pozón	DMA ²	Arcillas plásticas con niveles arenosos de grano fino a medio

Tabla 1. Características geotécnicas y zonas litológicas de los lugares donde se tomaron muestras. Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente en el laboratorio de geotecnia y materiales de la Universidad de Cartagena cada muestra fue ensayada con dos objetivos específicos: obtener el tipo de suelo y estimar el ángulo de rozamiento interno. Para tales fines se tomó una porción de 200 gramos de cada muestra, dicha porción fue secada al horno por 24 horas, lavada a través del tamiz #200, nuevamente secada por 24 horas, pesada y tamizada (según la norma INV E 123). Luego fue tomada una porción de 300 gramos para realizar los ensayos de límites de Atterberg pertinentes: límite líquido empleando la máquina de Casagrande hasta elaborar 3 puntos con número de golpes y humedades distintas para cada muestra y obtener la humedad en la cual la ranura se cierra con 25 golpes (según las normas INV E 125 y 122); límite plástico mediante el desmoronamiento de pequeñas cantidades de cada muestra enrollados hasta el desmoronamiento con un diámetro aproximado de 3.2 mm, para luego obtener el porcentaje de humedad en el que se logra desmoronar en el diámetro estipulado, el mismo proceso se repitió 1 o 2 veces más para cada muestra según lo dictado en la norma INV E 126.

Luego, para obtener el ángulo de rozamiento de cada muestra se elaboraron probetas de 19.6 cm², 2 centímetros de altura y manteniendo la densidad aparente del suelo en condiciones naturales.

¹ DAR: Depósitos Aluviales Recientes

² DMA: Depósitos marino aluviales



***DETERMINACIÓN DE LA CORRELACIÓN ENTRE EL INDICE DE PLASTICIDAD
Y EL ANGULO DE FRICCIÓN DE UN SUELO***



Para cada muestra se elaboraron tres probetas para obtener tres puntos que permitieran dibujar la envolvente de falla. Dichas probetas fueron ensayadas en la máquina de corte directo, siendo sometidas a fuerza cortante y fuerza normal, variando esta última en 50, 100 y 200 kilopascales. Estos ensayos de corte directo fueron realizados bajo el procedimiento descrito en la norma INV E 154 y fueron ejecutados en su totalidad en el laboratorio de geotecnia y materiales, del programa de Ingeniería Civil de la Universidad de Cartagena.

Los resultados y la correlación obtenida al final de este trabajo, confirma o sirve como validación para modelos propuestos por otros autores, dan luces para ratificar la validez y la existencia per se de una correlación entre el índice de plasticidad y el ángulo de fricción interno de un suelo.



2. MARCO DE REFERENCIA

2.1 ANTECEDENTES

En cuanto al estudio de correlaciones entre propiedades y características del suelo a nivel local se han desarrollado las siguientes investigaciones:

2.1.1 CORRELACIÓN ENTRE LOS MÉTODOS DE COMPRESIÓN INCONFINADA Y CORTE DIRECTO EN SUELOS COHESIVOS, DEL SECTOR EL RODEO EN CARTAGENA (Mendivil P., Saavedra M. Universidad de Cartagena. 2016)

La investigación tuvo como objetivo principal determinar un coeficiente de correlación que permitiera optimizar el costo de la aplicación de ensayos de suelo para determinar su resistencia al corte. Este trabajo se realizó mediante las siguientes etapas: recolección de muestras, clasificación del suelo, aplicación de ensayos de corte directo y compresión simple y el análisis de datos obtenidos. Con los ensayos de resistencia se halló que las muestras presentaban una resistencia mucho mayor a la establecida teórica, en cuanto a arcillas se refiere. Esto sucedió porque las muestras sufrieron una densificación al momento de ser extraídas. Para obtener las muestras inalteradas se necesitaba de un equipo de rotación, el cual es muy costoso y la universidad no contaba con este equipo, lo cual hizo que este proyecto fuese inviable económicamente y no se pudiera obtener la correlación buscada.

Con relación al presente estudio, este trabajo buscaba establecer una correlación que permitiera “suplantar” el ensayo de corte directo y sus resultados con un ensayo de alta frecuencia de aplicación en obra y más económico que el ensayo de corte directo. Dicho de otra forma buscaba obtener resultados confiables de parámetros de resistencia mediante un método más simple, ágil y económico.



2.1.2 EVALUACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE CONSOLIDACIÓN CON GRANDES DEFORMACIONES EN FUNCIÓN DE LAS PROPIEDADES ÍNDICES DE LOS SUELOS DE BAJA PLASTICIDAD. (Salamanca D., Ahumada V. Universidad de Cartagena. 2013)

En esta investigación se buscó proveer correlaciones entre los límites de Atterberg y los parámetros de consolidación con grandes deformaciones en suelos de baja plasticidad, a través de ensayos y modelos experimentales. Los resultados obtenidos en la investigación arrojaron que para que haya una estructura de suelo debe estar operando en él la máxima relación de vacíos estable, que en este caso varió entre 22% y 51.82% indicando de esta forma que la cohesión entre las pequeñas partículas de arcilla es responsable de su consistencia. Además, se obtuvieron las correlaciones entre los parámetros A, B y C y las propiedades índices de suelos como sigue:

$$A = -2,0145(IP) + 68,101. (Ec. 1)$$

$$B = 0,007(LL) + 0,4. (Ec. 2)$$

$$C = 3 \times 10^{-11}(IP) + 2E^{-10}. (Ec. 3)$$

La manera como el estudio mencionado se relaciona con el propósito de la actual investigación, se debe a que busca una correlación a través de ensayos entre los límites de Atterberg y otros parámetros, encontrando resultados confiables por medio de un modelo matemático.

2.1.3 ÁNGULO DE FRICCIÓN BIDIMENSIONAL EN ARENAS EN FUNCIÓN DE SU GRADACIÓN. (Covo T. et al. Universidad de Cartagena. 2012)

El ángulo de fricción interna en el suelo representa el parámetro más importante en la evaluación de la resistencia al corte, lo cual permite evaluar sus capacidades portantes última y admisible. Es sabido que el ángulo de fricción interna del suelo de grano grueso depende mayormente de dos factores fundamentales, los cuales son su gradación y la densidad relativa. En este artículo se presentan los resultados de una tesis de grado efectuada en la Universidad de Cartagena, mediante ensayos de corte directo efectuados en muestras de arena pobremente gradadas preparadas en el laboratorio de acuerdo con la norma ASTM D 3080-90 con el fin de estudiar su variación en



función del tamaño máximo del grano. Los resultados obtenidos en esta investigación indican que la relación entre la densidad relativa y el ángulo de fricción interna de arenas uniformes y limos se puede representar mediante regresiones lineales, como se observa en investigaciones previas, pero contrario a lo indicado en los resultados de la investigación de Rowe, 1962.

La manera como el estudio mencionado se relaciona con el propósito de la actual investigación, se debe a que demuestra la importancia rigurosa del ángulo de fricción interna del suelo, dado que denota las capacidades portantes mecánicas del suelo en estudio.

2.1.4 TEORÍA DEL ÁNGULO DE FRICCIÓN INTERNA BIDIMENSIONAL EN ARENAS. (Covo T. Universidad de Cartagena. 2012)

En este artículo se presenta una teoría que explica la tendencia observada en los resultados de las investigaciones efectuadas hasta la fecha, las cuales establecen que el ángulo de fricción interna de un suelo granular aumenta cuando se incrementa su densidad relativa y en particular basándose en los resultados de la tesis de grado efectuada en la Universidad de Cartagena por los ingenieros Edwin Tuirán y Tomás Pereira en el año 2000 para obtener el título de ingeniero civil. La teoría presentada consiste grosso modo en la incidencia de la disipación de energía, la cual produce un aumento de volumen en el plano de falla de la muestra. La energía necesaria para incrementar el volumen en el plano de falla, produce un aumento en la energía requerida para fallar la muestra, la cual se traduce en un aumento del ángulo de fricción interna del material.

Las limitaciones expuestas en el artículo recaen sobre el rigor científico de toda investigación, tal como indica el autor: se necesita llevar a cabo más investigación con el fin de validar los resultados encontrados que permitan verificar la teoría expuesta en este artículo.

La manera como el estudio mencionado se relaciona con el propósito de la actual investigación, es que como el ángulo de fricción puede variar a medida que cambia la densidad relativa del suelo en estudio, importante para la obtención de resultados.

2.2 ESTADO DEL ARTE

Las características propias de un suelo siempre son motivos de estudio, ya que estas permiten tener conocimiento del comportamiento del mismo, en donde se desplantarán las diferentes obras



civiles. (Mendivil & Saavedra, 2016) La amplia gama de ensayos que se pueden aplicar sobre el suelo permiten que los parámetros o propiedades que se determinen a través de estos sean susceptibles de comparación y correlación, guardando precaución sobre la confiabilidad de establecer dichas correlaciones y recordando que siempre resulta ser más confiable determinar parámetros y propiedades de suelo mediante ensayos de laboratorio.

A continuación, se hará una breve descripción de los estudios e investigaciones que se han adelantado en cuanto a correlación de variables geotécnicas.

2.2.1 RELACIÓN ENTRE LA RESISTENCIA AL CORTE DIRECTO Y PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS EN ALGUNOS SUELOS DE LA ZONA CAFETERA COLOMBIANA. (Medina S., Salazar L. Cenicafé. 2009)

En esta investigación se estudió la relación entre la resistencia al corte directo, 22 propiedades físicas y 11 propiedades químicas de algunos suelos cafeteros en los departamentos de Caldas, Quindío y Tolima, en 11 unidades cartográficas de suelo. Se realizaron mediciones in situ de la resistencia al corte y penetrabilidad por los métodos de la veleta, torvane y la resistencia a la penetración. Se tomaron muestras inalteradas para determinar la resistencia al corte directo en el laboratorio y muestras alteradas para evaluar las propiedades físicas y químicas. En suelos plásticos las propiedades que mostraron mayor relación con la resistencia al corte directo fueron la presencia de aluminio ($r=0.52$), materia orgánica ($r=0.51$), acidez ($r=0.5$), índice de plasticidad ($r=0.51$) y resistencia a la penetración ($r=0.44$).

Las limitaciones de este estudio se encuentran en su alcance espacial. Las características propias de los suelos de la zona cafetera colombiana provocan que al momento de emplear las correlaciones obtenidas se deba tener alta precaución. Particularmente porque los suelos de la zona cafetera colombiana son de reciente formación, son heterogéneos en sus propiedades físicas y químicas, con pendientes de longitudes largas y fuerte inclinación.

Resulta clave para el estudio desarrollado para el presente trabajo de grado tener en cuenta uno de los objetivos específicos del estudio realizado por Medina y Salazar que pretendió obtener una correlación entre resistencia al corte directo y ángulo de fricción, y el índice de plasticidad en muestras de suelo del eje cafetero. Las dos propiedades físicas (resistencia al corte y ángulo de fricción) y el parámetro (índice de plasticidad) fueron obtenidos por un lado mediante máquina de



corte directo con aplicación de carga normal y carga transversal, y calculados mediante la aplicación del criterio Mohr-Coulomb; y por otro lado mediante la aplicación del procedimiento descrito en la normativa colombiana INV E-122, INV E-125 e INV E-126.

2.2.2 CORRELACIONES ENTRE LA RESISTENCIA AL CORTE SIN DRENAJE Y RESISTENCIA CPT. (Rémai Z. Periódico politécnico. 2012)

En esta investigación se determinó una correlación del parámetro de resistencia al corte, en los ensayos de penetrómetro de cono que se realiza en sitio y de corte con muestras no drenadas de suelo tipo arcillas blandas del periodo del holoceno. Fueron 22 muestras tomadas en 8 (ocho) puntos diferentes dentro del país. Para la caracterización del suelo, realizó ensayos de compresión no confinada y uniaxial y compresión triaxial. Llegaron a la conclusión que la correlación que existe entre los ensayos de CPT y corte no drenado está dada por la ecuación:

$$N_{\Delta u} = 24.3B_q. (Ec. 4)$$

Donde $N_{\Delta u}$ es factor de cono, B_q es el coeficiente de presión de poros. De igual forma llego a la conclusión de que esta ecuación proporciona una guía útil para cuando no hay otros datos disponibles acerca de la resistencia al corte sin drenaje o cuando se necesita más información para evaluar la incertidumbre de la resistencia al corte no drenado de una cierta capa de suelo, por lo tanto, permite tener más realista y más detallada información acerca de la resistencia del suelo. Limitaciones: esta ecuación determinada solo es útil para el caso del suelo de Hungría tipo arcilla blanda conformada en el periodo holoceno.

2.2.3 CALIBRACIÓN DEL MÉTODO DE PARÁMETROS DE RESISTENCIA CON SPT EN SUELOS DE LA REGIÓN LLANERA COLOMBIANA. (Montenegro L. Universidad Nacional de Colombia. 2014)

Con el objetivo de brindar herramientas adicionales para la determinación de los parámetros de resistencia del suelo (cohesión efectiva y ángulo de fricción efectiva), por medio de 202 muestras con resultados del ensayo de corte directo y cerca de 4800 muestras con mediciones realizadas en campo a través del SPT en la región llanera colombiana en los departamentos de Meta y Casanare,



DETERMINACIÓN DE LA CORRELACIÓN ENTRE EL INDICE DE PLASTICIDAD Y EL ANGULO DE FRICCIÓN DE UN SUELO



se propone calibrar la metodología para estimar dichos parámetros de resistencia, calculando una ecuación para encontrar el ángulo de fricción efectivo equivalente a partir de los resultados del SPT, para finalmente calcular la cohesión efectiva y el ángulo de fricción efectiva de suelos con comportamiento cohesivo y granular.

En cuanto al desarrollo de este estudio, guarda relación con el trabajo a desarrollar en que explora una herramienta más (diferente al objetivo del presente estudio) para estimar propiedades de resistencia al corte.

Limitaciones de carácter metodológico se presentan en este estudio. Tal como señalan los autores se debe tener precaución en la utilización de la metodología empleada, ya que ésta está orientada específicamente a depósitos aluviales conformados en llanuras, abanicos y terrazas; además de algunos depósitos coluviales y conglomerados.

2.2.4 ANÁLISIS DE LAS CORRELACIONES EXISTENTES DEL ÁNGULO DE FRICCIÓN EFECTIVO PARA SUELOS DEL PIEDEMONTES ORIENTAL DE BOGOTÁ USANDO ENSAYOS IN SITU. (Ruge & Carmona. Universidad Nacional de Colombia. 2015)

Esta investigación buscó mediante el uso de ensayos in situ, definir por medio de análisis de diferentes correlaciones, cuál de estas se ajusta mejor a las condiciones propias de suelos del piedemonte de la ciudad de Bogotá. Para el estudio se utilizaron datos provenientes del SPT - Standard Penetration Test (de amplio uso en Colombia) y SPT-T Standard Penetration Test + Torque (nunca antes llevado a cabo en el país), realizados teniendo en cuenta la normativa acorde para cada ensayo. Considerando que para el SPT-T no existe norma local que rija este tipo de ensayos.

En cuanto al desarrollo de este estudio, guarda relación con el trabajo a desarrollar en que explora una herramienta más (diferente al objetivo del presente estudio) para estimar propiedades de resistencia al corte, con la particularidad de que trabaja con parámetros obtenidos mediante ensayos de campo.



2.2.5 QUANTIFYING THE CROSS-CORRELATION BETWEEN EFFECTIVE COHESION AND FRICTION ANGLE OF SOIL FROM LIMITED SITE-SPECIFIC DATA. (Wang, Y.; Akeju, O. City University of Hong Kong. 2016)

La cohesión efectiva (c') y el ángulo de fricción efectivo (ϕ') del suelo son parámetros importantes del suelo necesarios para evaluar la estabilidad y la deformación de las estructuras geotécnicas. Es bien sabido que existe una correlación cruzada entre c' y ϕ' del suelo y que esta correlación cruzada afecta el análisis de fiabilidad de las estructuras geotécnicas. Ignorar la correlación cruzada entre c' y ϕ' puede conducir a una estimación sesgada de la probabilidad de falla. Por lo tanto, es importante cuantificar adecuadamente la correlación cruzada entre c' y ϕ' del suelo para el análisis y el diseño geotécnicos. Sin embargo, los datos c' y ϕ' obtenidos de pruebas de campo y / o laboratorio para un proyecto suelen ser limitados e insuficientes para proporcionar una distribución de probabilidad conjunta significativa de c' y ϕ' o cuantificar su correlación cruzada. Esto plantea un desafío significativo en la práctica de la ingeniería. Para abordar este desafío, este artículo desarrolla un enfoque bayesiano para caracterizar la distribución de probabilidad conjunta específica de sitio de c' y ϕ' y cuantificar la correlación cruzada entre c' y ϕ' a partir de un número limitado de c' y ϕ' datos obtenidos de un proyecto. Bajo un marco bayesiano, el enfoque propuesto integra de manera probabilística los pares de datos c' y ϕ' limitados específicos del sitio con conocimiento previo, y el conocimiento integrado se transforma en un gran número de pares de muestras c' y ϕ' usando la simulación de MCMC. Usando los pares de muestras generados c' y ϕ' , se estima el coeficiente de correlación de c' y ϕ' , y se evalúan las distribuciones marginales y conjuntas de c' y ϕ' . El enfoque propuesto se ilustra y valida utilizando pares de datos reales c' y ϕ' obtenidos a partir de pruebas de corte directo de suelos aluviales de grano fino en la llanura aluvial del río Paglia, en el centro de Italia.



2.2.6 VELOCIDADES DE ONDA VS Y VP Y SU RELACIÓN CON LOS VALORES DE ÁNGULO DE FRICCIÓN INTERNA, COHESIÓN Y NSPT PARA LOS SUELOS DE SANGOLQUÍ. (Pazmiño, L. Universidad de las fuerzas armadas ESPE. 2017)

La presente investigación realiza el análisis y correlación de los parámetros de resistencia al corte: ángulo de fricción interna “ ϕ ” y cohesión “ c ”, el número de golpes del ensayo SPT “N30”, y los valores de velocidades de onda de compresión “ V_p ” y de corte “ V_s ” para los suelos aluviales de Sangolquí, provincia de Pichicha, Ecuador. Para esto, se realizaron los ensayos de campo: SPT (Standard Penetration Test), sísmica de refracción y medición de ondas superficiales por los métodos MASW y MAM (MULTICHANNEL ANALYSIS OF SURFACE WAVES & MULTICHANNEL ANALYSIS OF MICROTREMOR). Y el ensayo corte directo en laboratorio. Con los datos obtenidos, y tomando como referencia correlaciones empíricas disponibles en la bibliografía, se procedió a relacionar estos parámetros entre sí: ángulo de fricción interna “ ϕ ” en función de los valores velocidades de onda V_s y V_p , cohesión “ c ” en función de los valores velocidades de onda V_s y V_p , el número de golpes del ensayo SPT “N30” en función de la velocidad de onda V_p y la velocidad de onda V_s en función del valor “N30” del SPT. En el primer capítulo se describen los antecedentes, se plantean los objetivos, y se expone la metodología de trabajo. En el segundo capítulo se realiza la descripción teórica de los métodos a utilizarse y los parámetros a obtenerse. En el tercer capítulo se exponen los resultados de todos los ensayos tanto de campo como de laboratorio. En el cuarto capítulo se tabulan los resultados obtenidos y se calculan las correlaciones entre estos parámetros. Se presentan cuatro ecuaciones de correlación matemática.

El autor de este trabajo plantea correlaciones no solo entre dos propiedades físicas del suelo, sino que incluye una tercera con la velocidad de onda sísmica, abriendo la posibilidad a estimar el valor de los parámetros de resistencia al corte mediante la medición de la velocidad de ondas de corte (V_s) y de compresión (V_p). Sin embargo queda en entredicho la consecución del objetivo por parte del autor ya que en primera instancia manifiestan la debilidad del estudio en cuanto a cantidad de muestras ensayadas (16), además examinando las correlaciones dadas para estimar la cohesión efectiva y el ángulo de fricción a partir de las velocidades de onda, obtienen valores de R^2 muy



DETERMINACIÓN DE LA CORRELACIÓN ENTRE EL INDICE DE PLASTICIDAD Y EL ANGULO DE FRICCIÓN DE UN SUELO



bajos (0.2315 y 0.0021, respectivamente) y posteriormente usan como validación las correlaciones obtenidas con los datos que usaron para determinar esas mismas correlaciones.

El proyecto se limitó a estudiar suelos de tipo granular/intermedio, por lo que el autor recomienda ampliar el estudio empleando suelos de tipo cohesivo.

2.2.7 CORRELACIÓN ENTRE ÁNGULO DE FRICCIÓN INTERNA Y PESO VOLUMÉTRICO SECO PARA LAS ARENAS PUMÍTIICAS DE LA ZONA METROPOLITANA DE GUADALAJARA. (Vargas, d.; Ochoa, g. Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Occidente. 2014)

Con el fin de detectar los factores que más influyen en la resistencia al esfuerzo cortante y generar una correlación que permita determinarlo con pruebas simples y económicas, se realizó este experimento de regresión multivariable con pruebas de corte directo. Con base en la teoría de Mohr-Coulomb, se presentan los factores que más influyen en el ángulo de fricción interna.

En cuanto al desarrollo de este estudio, guarda relación con el trabajo a desarrollar en que explora una herramienta más (diferente al objetivo del presente estudio) para estimar propiedades de resistencia al corte, con la particularidad de que trabaja con parámetros obtenidos mediante ensayos de campo.

En cuanto a limitaciones se debe establecer primero la zona de estudio, lo que desemboca en una diferencia no menor respecto a nuestro trabajo de grado ya que el tipo de suelo por supuesto influye en los resultados finales, aunque se busque estimar el mismo parámetro de resistencia mediante parámetros distintos, ya que el estudio citado trabajó con suelos tipo arena, permitiéndoles asumir un concepto teórico muy arraigado en el gremio: el aporte de la cohesión a la resistencia al corte en suelos granulares es insignificante o nulo. Induciéndolos a una limitación evidente como lo es no considerar el efecto de la cohesión.

Además, los propios autores reconocen que a medida que aumenta la profundidad de muestreo es más complicado obtener un peso volumétrico seco confiable, por lo que este estudio no sustituye a la prueba NSPT, por lo que es necesario que se establezca una correlación entre la prueba SPT y el modelo.



2.2.8 CORRELATION BETWEEN DRAINED SHEAR STRENGTH AND PLASTICITY INDEX OF UNDISTURBED OVER CONSOLIDATED CLAYS

(Sorensen, K.; Okkels, N. The Danish geotechnical institute. 2013)

El estudio anteriormente mencionado utiliza ensayos de compresión triaxial realizados durante décadas pasadas en suelo danés, este estudio buscó una correlación conservativa entre la resistencia al corte (utilizando como parámetro el ángulo de fricción) y el índice de plasticidad para estimar de manera ágil, rápida y económica el ángulo de fricción de un suelo, además de utilizar esta correlación para diseños preliminares a nivel geotécnico y como método de validación de resultados al momento de realizar el ensayo triaxial. Vale la pena señalar que el rango de plasticidad de las muestras empleadas en el estudio es muy amplio, encontrando desde arcillas de baja plasticidad ($4 < IP < 7$) hasta arcillas de origen marino altamente plásticas ($IP > 100$). En cuanto a los resultados obtenidos por el estudio se debe resaltar que incluyen una serie de correlaciones obtenidas con base a condiciones específicas de algunas muestras estudiadas:

$$\phi = 39 - 11 * \log IP. (Ec. 5)$$

$\phi = 45 - 15 * \log IP. (Ec. 6)$, solo considerando estudios de vieja data cuyo rango de plasticidad es: $6 < IP < 106$

$$\phi = 44 - 14 * \log IP. (Ec. 7), 4 < IP < 50 \text{ (estimación de límite inferior)}$$

$$\phi = 45 - 14 * \log IP. (Ec. 8), 4 < IP < 50 \text{ (major estimación)}$$

Además de esto los resultados gráficamente muestran alto grado de dispersión.

En este estudio danés, aparte de buscar un objetivo similar al de nuestro trabajo de grado con la estimación del ángulo de fricción interna a partir del índice de plasticidad, debe apreciarse que la medición de los parámetros de resistencia al corte se realizó mediante ensayo triaxial, a diferencia de nuestro trabajo realizado mediante ensayo de corte directo. Lo que plantea una limitación de nuestro trabajo respecto al estudio citado ya que es bien sabido que el ensayo triaxial garantiza mayor confiabilidad en los parámetros obtenidos debido a su capacidad de aplicar esfuerzos de manera uniforme en todas las direcciones del espécimen ensayado.



2.2.9 ESTIMACIÓN DEL ÁNGULO DE FRICCIÓN INTERNA Y COHESIÓN NO DRENADA A PARTIR DE CORRELACIONES BASADAS EN ENSAYOS IN SITU PARA SUELOS DEL PIEDEMONTES DE LOS CERROS ORIENTALES DE BOGOTÁ DC (Olivos, 2015)

El Ensayo de Penetración Estándar (Standard Penetration Test, SPT, por su sigla en inglés) y el Ensayo de Veleta (Vane Shear Test, VST, por su sigla en inglés) hacen parte de la serie de ensayos In Situ, que son utilizados en la práctica y avalados desde los escenarios teóricos y normativos para la exploración y posterior determinación de las características del suelo objeto de estudio. Entre los descriptores que son susceptibles de hallar a partir de las investigaciones in situ se encuentran aquellos referidos a parámetros de resistencia. En el presente trabajo de grado, se utilizaron los ensayos SPT y VST para la determinación del ángulo de fricción interna y la cohesión no drenada, ambos indicadores de la resistencia al corte de los suelos, en este caso específico para el sector conocido como Chapinero Alto de la ciudad de Bogotá. Una vez realizados los ensayos, se aplicaron las fórmulas de corrección para el mejoramiento de los resultados y las correlaciones respectivas para ajustarlos a los parámetros experimentales.

En cuanto al desarrollo de este estudio, guarda relación con el trabajo a desarrollar en que trata de adoptar una herramienta más con base a experiencias previas sin determinar una correlación propia (diferente al objetivo del presente estudio) para estimar propiedades de resistencia al corte, con la particularidad de que trabaja con parámetros obtenidos mediante ensayos de campo.

2.3 MARCO TEÓRICO

2.3.1 SUELO

El suelo puede definirse, de acuerdo con el glosario de la Sociedad Americana de la ciencia del suelo (1984), como el material mineral no consolidado en la superficie de la tierra, que ha estado sometido a la influencia de factores genéticos y ambientales (material parental, clima, macro y microorganismos y topografía), actuando durante un determinado periodo. Es considerado también como un cuerpo natural involucrado en interacciones dinámicas con la atmósfera y con los estratos que están debajo de él, que influye en el clima y en el ciclo hidrológico del planeta, y



DETERMINACIÓN DE LA CORRELACIÓN ENTRE EL INDICE DE PLASTICIDAD Y EL ANGULO DE FRICCIÓN DE UN SUELO



que sirve como medio de crecimiento para diversos organismos. (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, 2004).

2.3.2 TIPOS DE SUELO

De acuerdo con el origen de sus elementos, los suelos se dividen en dos amplios grupos: suelos cuyo origen se debe a la descomposición física y/o química de las rocas, es decir los suelos inorgánicos y suelos cuyo origen es principalmente orgánico. Los suelos inorgánicos pueden ser residuales, estos se forman a partir del producto del intemperismo que la descomposición de los materiales rocosos expuestos al aire, la humedad, la temperatura y al efecto de la materia orgánica que permanecen al sitio donde se formó, en algunos casos estos materiales descompuestos son transportados y depositados en otro lugar permitiendo la creación del nuevo suelo. Los suelos orgánicos generalmente se forman in situ, cuando la cantidad de materia inorgánica en forma de humus o materia no descompuesta es mucho más alta en relación a la cantidad de suelo inorgánico. La siguiente es una descripción de los suelos más comunes, con los nombres utilizados generalmente dentro del campo de la ingeniería:

Gravas: Son acumulaciones sueltas de fragmentos de rocas y que tienen más de dos milímetros de diámetro. **Arenas:** Son materiales de granos finos procedentes de la denudación de las rocas o de su trituración artificial, cuyas partículas varían entre 2 mm y 0.05 mm de diámetro. No se contraen al secarse, no son plásticas, son menos compresibles que la arcilla y al aplicárseles carga en la superficie se comprimen casi instantáneamente.

Limos: Son suelos de granos finos con poca o ninguna plasticidad, cuyas partículas están comprendidas entre 0.05 mm y 0.005 mm de diámetro. Pueden ser orgánicos, procedentes de los ríos o inorgánicos, producidos en canteras. Su permeabilidad suele ser baja y su compresibilidad muy alta; su color varía desde gris claro a muy oscuro.

Arcillas: Son partículas sólidas cuyo diámetro es menor a 0.005 mm, con la propiedad de volverse plástica al mezclarse con agua. Químicamente es un silicato de alúmina hidratado, aunque puede contener silicatos de hierro o de magnesio hidratados. (Jiménez González, 2010).

Para propósitos de ingeniería el suelo se puede clasificar de la siguiente manera:



DETERMINACIÓN DE LA CORRELACIÓN ENTRE EL INDICE DE PLASTICIDAD Y EL ANGULO DE FRICCIÓN DE UN SUELO



Suelos gruesos: En este tipo de suelos, el material se clasifica como gravas (G) y arenas (S) teniendo en cuenta la cantidad de suelo que pasa o se retiene en el tamiz N° 4; si es retenido más del 50% del material es grava (G), si pasa más del 50% del material es arena (S). Así mismo las gravas y arenas se dividen en cuatro grupos (GW, GP, GM, GC) y (SW, SP, SM, SC), respectivamente. El sufijo W quiere decir bien gradado, el P significa mal gradado, el M limoso y el C arcilloso.

Grupo SC (arenas arcillosas): A este grupo pertenecen los tipos de suelos con contenido de finos en peso mayor o igual a 12% lo cual implica que sus características de resistencia (esfuerzo vs deformación) y su capacidad de drenaje libre en la fracción gruesa se alteren. Los finos para este grupo deben ser de media alta plasticidad. Para la caracterización de este suelo, los límites de Atterberg, deben situarlo sobre la línea A en la carta de plasticidad (Sistema Unificado de Clasificación de Suelo) además; su índice de plasticidad debe ser mayor a 7.

Suelos finos: En este tipo de material, el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos los divide en tres grupos para los limos y arcilla con límite líquido menor al 50% y un grupo para los suelos finos altamente orgánicos. Las convenciones usadas son: S para arenas, C para arcillas, O para suelos altamente orgánicos. Los suelos que se encuentran con el límite líquido menor al 50%, son considerados como suelos de baja compresibilidad; por esta razón a las convenciones nombradas anteriormente se le agrega el sufijo L, lo que significaría: ML limo de baja compresibilidad, CL arcilla de baja compresibilidad, OL limos orgánicos de baja compresibilidad. De igual manera para los suelos que se encuentran en el grupo del límite líquido mayor del 50%, son considerados como suelos de alta compresibilidad; por lo cual a las convenciones utilizadas se les agrega el sufijo H, clasificando los suelos así: MH limos orgánicos de alta compresibilidad, CH arcillas inorgánicas de alta compresibilidad, OH arcillas orgánicas de alta compresibilidad. (Villamizar Lemos & Díaz Gutiérrez, 2010)

En Colombia la clasificación de suelos se rige por la norma INV E-102 que además debe complementarse con las normas INV E- 122, 125, 126 y 127 que se refieren a los límites de Atterberg, necesarios para realizar una clasificación de suelos al detalle.



2.3.3 LÍMITES DE ATTERBERG

Los límites de Atterberg son ensayos de laboratorio normalizados que permiten obtener los límites del rango de humedad dentro del cual el suelo se mantiene en estado plástico. Con ellos, es posible clasificar el suelo en la Clasificación Unificada de Suelos.

Fueron originalmente ideados por un sueco de nombre Atterberg especialista en agronomía y posteriormente redefinidos por Casagrande para fines de mecánica de suelos de la manera que hoy se conocen.

Para obtener estos límites se requiere remoldear (manipular) la muestra de suelo destruyendo su estructura original y por ello es que una descripción del suelo en sus condiciones naturales es absolutamente necesaria y complementaria.

Para realizar los límites de Atterberg se trabaja con todo el material menor que la malla #40 (0.42 mm). Esto quiere decir que no solo se trabaja con la parte fina del suelo (< malla#200), sino que se incluye igualmente la fracción de arena fina.

Contenido de humedad (w): El contenido de humedad se define como la razón entre peso del agua y peso del suelo seco de una muestra. Se expresa en porcentaje:

$$W = \frac{W_1 - W_2}{W_2 - W_t} \cdot 100 = \frac{W_w}{W_s} \cdot 100$$

W = es el contenido de humedad, (%)

W_w = Peso del agua

W_s = Peso seco del material

W_1 = es el peso de tara más el suelo húmedo, en gramos

W_2 = es el peso de tara más el suelo secado en horno, en gramos:

W_t = es el peso de tara, en gramos

Ilustración 2. Cálculo de contenido de agua en muestras de suelo.

Límite líquido: El límite líquido como fue definido por Atterberg ha estado sujeto a distintas variaciones en su determinación. Fue Terzaghi, quien le sugirió a Casagrande en 1927, que diseñara un dispositivo mecánico que pudiera eliminar en la medida de lo posible los errores del operador en la determinación del mismo. Casagrande desarrolló un dispositivo normalizado llamado cazuela de Casagrande. El límite líquido se establece como la humedad que tiene un suelo



DETERMINACIÓN DE LA CORRELACIÓN ENTRE EL INDICE DE PLASTICIDAD Y EL ANGULO DE FRICCIÓN DE UN SUELO



amasado con agua y colocado en una cazuela normalizada, cuando un surco, realizado mediante un acanalador normalizado, que divide dicho suelo en dos mitades, se cierra a lo largo del fondo en una distancia de 13 mm, tras haber dejado caer 25 veces la mencionada cazuela desde una altura de 10 mm sobre una base también normalizada, con una cadencia de 2 golpes por segundo. La altura de caída, como las dimensiones del cascador y las dimensiones de la ranura, como el material de la base, etc., son factores de influencia en los resultados obtenidos.

Casagrande observó que el número de golpes necesarios para cerrar la ranura dependía del contenido de agua del suelo y que cuando una serie de resultados de un suelo se representaba en un gráfico donde el eje de la humedad era aritmético y el eje del número de golpes era logarítmico, esos resultados formaban una línea recta. Esa curva fue llamada curva de flujo.

En Colombia, la metodología de este ensayo está definida por la norma INV E-125, incluyendo la determinación del contenido de agua que está definido por la norma INV E-122.

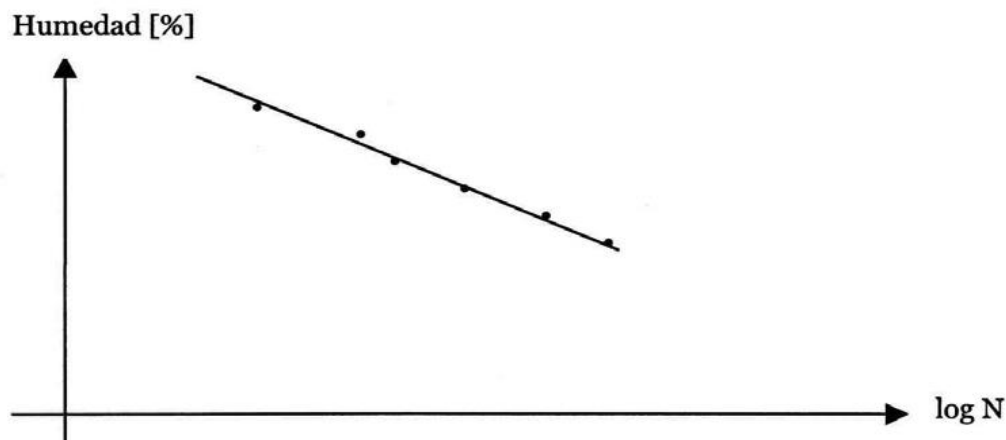


Ilustración 3. Curva de flujo para determinar límite líquido de un suelo. Fuente: Puy, 2005

Esta curva puede ser representada mediante la siguiente ecuación:

$$w = -F \cdot \log N + C$$

donde: w : contenido de humedad en porcentaje de suelo seco.
 F : constante, llamada "índice de flujo".
 N : número de golpes.
 C : constante.



DETERMINACIÓN DE LA CORRELACIÓN ENTRE EL ÍNDICE DE PLASTICIDAD Y EL ÁNGULO DE FRICCIÓN DE UN SUELO



Límite plástico: El límite plástico (LP) es el contenido en agua donde el suelo comienza a exhibir comportamiento plástico. Un hilo de rosca del suelo está en su límite plástico cuando se rueda a un diámetro de 3 milímetros y se desmenuza. Para mejorar consistencia, una barra de 3 milímetros de diámetro es de uso frecuente calibra el grueso del hilo de rosca al conducir la prueba. Los valores típicos entre arenas y arcillas se encuentran entre 5 y 30%. En arenas la prueba no es posible.

En Colombia, la metodología de este ensayo está definida por la norma INV E-126, incluyendo la determinación del contenido de agua que está definido por la norma INV E-122.

Límite de contracción: El límite de contracción (LC) de un suelo se define como el porcentaje de humedad con respecto al peso seco de la muestra, con el cual una reducción de agua no ocasiona ya una disminución en el volumen del suelo. La relación de contracción da una indicación de cuánto cambio de volumen puede presentarse por cambios de la humedad de los suelos. La relación de contracción se define como la relación del cambio de volumen del espécimen o muestra de suelo como un porcentaje de su volumen seco al cambio correspondiente en humedad por encima del límite de contracción expresado como un porcentaje del suelo seco obtenido luego de ser secado al horno. La prueba para determinar el límite de la contracción es ASTM internacional D427. El límite de la contracción es mucho menos de uso general que el límite líquido y el límite plástico.

En Colombia, la metodología de este ensayo está definida por la norma INV E-127, incluyendo la determinación del contenido de agua que está definido por la norma INV E-122.

Índice de plasticidad: El índice de la plasticidad (IP) es una medida de la plasticidad de un suelo. El índice de la plasticidad es el tamaño de la gama de los contenidos en agua donde el suelo exhibe características plásticas. El IP es la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico.

$$IP = LL - LP . (Ec. 9)$$

Los suelos con un alto IP tienden a ser arcillas, y grosso modo este es un indicador indirecto de cuan arcilloso es un suelo, ya que aquellos suelos con IP cercano a cero o menor a cero son suelos puramente granulares.



2.3.4 ENSAYO DE CORTE DIRECTO

Dicho ensayo se esquematiza en la *Ilustración 3*. Básicamente este consta de dos marcos que contiene a la muestra. El marco inferior es fijo, mientras que el superior puede desplazarse en forma horizontal. Las muestras a ensayar en este aparato de corte son de forma prismática.

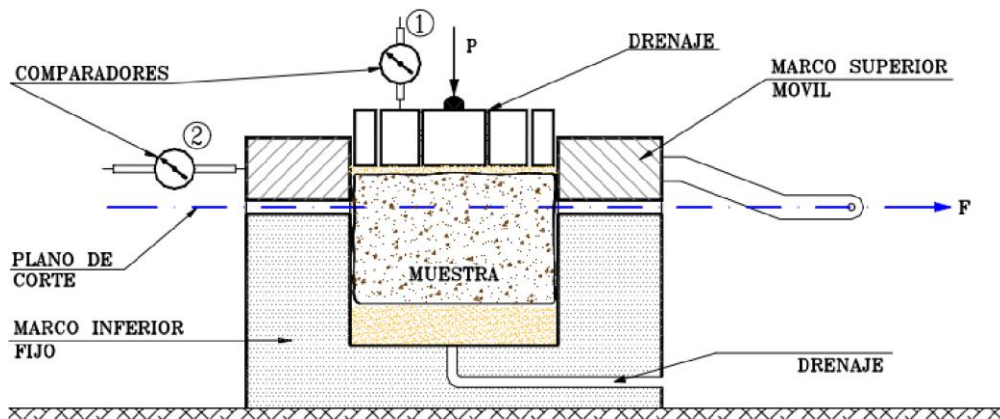


Ilustración 4. Ensayo de corte directo. Fuente: Mendivil & Saavedra, 2016

Una vez que hemos recortado la muestra se la coloca dentro de la cavidad que forman los dos marcos, de tal manera que la mitad de su altura h quede comprendida en cada uno de ellos. En la parte superior e inferior de la misma se coloca un colchón de arena para permitir el drenaje y para permitir un mejor asiento de la probeta, que como se expresó anteriormente, recorta lo mejor posible de una “Dama” de suelo inalterado, y que, en los casos de suelos cohesivos, no siempre se puede lograr una superficie perfectamente lisa. Posteriormente se somete la probeta, a través de una placa de distribución de tensiones sobre la que actúa una carga vertical P que desarrolla una tensión normal.

Una vez que la muestra haya consolidado bajo la acción de la carga P se procede a solicitar a la probeta con fuerzas horizontales constantes F . Luego de cada aplicación de una fuerza F se mide las deformaciones horizontales δ en el comparador N° 2. Cuando las deformaciones se detienen, se tiene un par de valores (F_1 ; δ_1) que permiten obtener un punto en el gráfico de la *Ilustración 4*. Repitiendo este procedimiento se observa que para las restantes fuerzas horizontales F se obtiene deformaciones δ que serán cada vez mayores hasta que para una fuerza F el marco superior llegará



**DETERMINACIÓN DE LA CORRELACIÓN ENTRE EL INDICE DE PLASTICIDAD
Y EL ANGULO DE FRICCIÓN DE UN SUELO**



al límite de su desplazamiento mecánico lo que indicará que se ha alcanzado la rotura por corte de la muestra bajo la tensión normal.

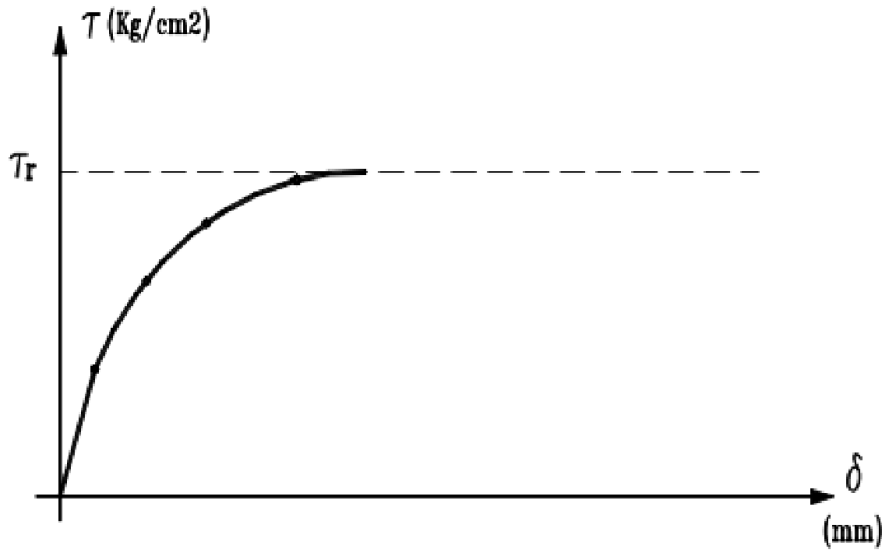


Ilustración 5. Tensión vs deformaciones. Fuente: Leoni, 1987

Luego se tendrán un par de valores: Tensión de corte en rotura τ_1 y σ_1 tensión normal que corresponden a un punto en la curva de resistencia intrínseca del material ensayado. Por lo tanto, si se ensayan dos probetas más se obtendrán dos puntos más de la curva (τ_2, σ_2) y (τ_3, σ_3) y así se podrá definir la curva de resistencia intrínseca del material y se podrá determinar el parámetro de resistencia ϕ .

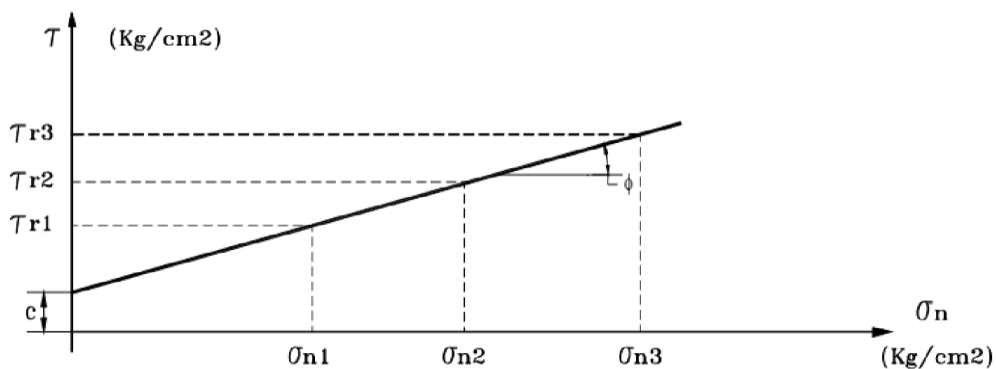


Ilustración 6. Presión de tensión vs esfuerzos. Fuente: Leoni, 1987



DETERMINACIÓN DE LA CORRELACIÓN ENTRE EL INDICE DE PLASTICIDAD Y EL ANGULO DE FRICCIÓN DE UN SUELO



Clasificación de los ensayos de corte directo:

No consolidado, no drenado: Es un ensayo rápido, en el cual la probeta no sufre ninguna consolidación del drenaje previo a la tensión normal (σ) del ensayo. Es apto para estudiar la resistencia al corte de suelos en los que no es posible que exista drenaje, ya sea porque el mismo suelo es cohesivo, o también en suelos no cohesivos localizados en una estratigrafía donde no es posible el drenaje.

Consolidado, no drenado: En este ensayo la muestra se deja consolidar bajo una carga vertical, igual a la que será impuesta antes de comenzar a aplicar el esfuerzo cortante. La tensión de corte es rápida para que no se efectúe drenaje alguno y para que la presión de poros no pueda disiparse en el transcurso del ensayo. Estos ensayos no son posibles en suelos permeables bajo condiciones normales, además es necesario medir el movimiento vertical durante la consolidación con el objeto de poder saber con exactitud el momento en que esta última ha tenido lugar por completo.

Consolidado, drenado: Este ensayo es análogo al ensayo Triaxial consolidado – drenado.

Para suelos no cohesivos, estos tres ensayos dan el mismo resultado, esté la muestra saturada o no, y por supuesto, si la tasa de aplicación del corte no es demasiado rápida. Para materiales cohesivos, los parámetros de suelos están notoriamente influenciados por el método de ensayo, por el grado de saturación, y por el hecho que el material esté normalmente consolidado o sobre consolidado. Generalmente, se obtienen para suelos pre consolidados dos conjuntos de parámetros de resistencia: un conjunto para ensayos hechos con cargas inferiores a la presión de preconsolidación y un segundo conjunto para cargas normales mayores a la presión de preconsolidación. Donde se sospeche la presencia de esfuerzos de preconsolidación en un suelo cohesivo sería aconsejable hacer seis o más ensayos para garantizar la obtención de los parámetros adecuados de resistencia al corte.

En Colombia, la metodología de este ensayo está definida por la norma INV E-154.



2.3.5 CORRELACIONES

La tradicional dificultad que se asocia a la tarea de obtener muestras representativas e inalteradas del terreno, de calidad suficiente como para reproducir adecuadamente en un laboratorio el comportamiento del suelo, ha impulsado el desarrollo de una amplia y variada metodología de ensayos “in situ” (En sitio), el resultado de los cuales se ha pretendido correlacionar con los parámetros que permiten predecir la respuesta del terreno frente a las acciones que lo soliciten.

Algunos ensayos ‘in situ’ y resultados esperados se presentan a continuación:

ENSAYO “in situ”	RESULTADOS DIRECTOS OBTENIDOS
Penetración dinámica DPSH o Borro	N_{20} , N_b : número de golpes necesarios para una hincada de 20 cm, q_d : resistencia dinámica por punta
Ensayo de penetración dinámica estándar (S.P.T.)	N (N_{30} o N_{SPT} según la notación): número de golpes necesarios para una hincada de 30 cm
Ensayo de penetración estática (CPT, CPTu)	q_c : resistencia por punta, q_f : resistencia por fuste u : presión intersticial durante la hincada
Ensayo presiométrico	p_l : presión límite, E_{pr} : módulo presiométrico
Placa de carga	E : módulo de deformación del terreno (a corto plazo), K_{30} : coeficiente de balasto

Tabla 2. Resumen de ensayos in situ y resultados obtenidos. Fuente: www.estudiosgeotecnicos.info

Básicamente, los cuatro propósitos fundamentales de los EGIS son (Worth, 1984):

1. Caracterización o “diagnóstico” del terreno.
2. Determinación de propiedades específicas del suelo.
3. Control de obras.



**DETERMINACIÓN DE LA CORRELACIÓN ENTRE EL INDICE DE PLASTICIDAD
Y EL ANGULO DE FRICCIÓN DE UN SUELO**



4. Comprobación de hipótesis de cálculo y análisis retrospectivo.

Estos conceptos se resumen ligeramente ampliados en la *Tabla 3*.

Para el Proyecto	Caracterización del Terreno
	Parámetros de Cálculo
	Modelización
Comportamiento del Terreno	Durante la Construcción
	Durante la Explotación
Control y Comprobación	Sobre el Terreno
	Sobre las Estructuras

Tabla 3. Objetivos de los EGIS. Fuente: Jiménez Salas, 1987.

La interpretación teórica de los datos obtenidos de un ensayo in situ dista de ser fácil. Diversos factores contribuyen a ello y éstos caen dentro de dos categorías distintas (Worth,1984): aquellos debidos al comportamiento del suelo y aquellos debidos al tipo de ensayo que se realiza.

En algunos casos, estas correlaciones se basan en amplios estudios, fundamentados en una gran diversidad y cantidad de datos de partida, para los cuales es factible asociar métodos estadísticos que aportan una adecuada fiabilidad a las conclusiones obtenidas. No obstante, en otras ocasiones, las correlaciones no dejan de tener un marco de fiabilidad local, restringida a cierto tipo de suelo, presente en un determinado entorno geológico, y para unas condiciones geotécnicas concretas.



3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Determinar la correlación entre el ángulo de fricción de un suelo arcillo-arenoso obtenido mediante ensayo de corte directo y el índice de plasticidad del mismo, estableciendo el comportamiento de los datos obtenidos a partir de análisis de regresión de datos estadísticos, para obtener una ecuación que permita estimar de manera ágil el ángulo de fricción del suelo estudiado.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar las propiedades índices de las muestras de suelo arcillo-arenoso estudiadas tales como: límite líquido, límite plástico, índice de plasticidad, distribución granulométrica, etc.
- Establecer los parámetros de clasificación de suelo de las muestras de suelo arcillo-arenoso estudiadas.
- Establecer los parámetros de resistencia al corte de las muestras estudiadas, tales como: Ángulo de fricción interna y cohesión.
- Identificar el tipo de correlación existente entre ángulo de fricción interna y el índice de plasticidad de las muestras estudiadas.



4. ALCANCE

4.1 DELIMITACIÓN ESPACIAL

Los estudios y ensayos se llevaron a cabo en los laboratorios de suelos de la Universidad de Cartagena y de la empresa BARRIOS PADILLA INGENIEROS S A S.

Geográficamente la extracción de las muestras se realizó en la zona sur de la ciudad de Cartagena, Colombia, se recolectaron 13 muestras mediante apiques de perforación SPT estándar, procurando proteger las muestras con papel aluminio para conservar en lo posible sus condiciones naturales, concretamente las coordenadas 10.412383, -75.456829, del barrio el Pozón, sector Iro de Mayo, 10.394807, -75.497942, del barrio los Calamares, 10.389776, -75.484404, del barrio San pedro, 10.389742, -75.471421 del barrio El Recreo, 10.370418, -75.463361 del barrio El Rodeo y 10.389871, -75.509623 el barrio Nuevo Bosque.



Ilustración 7. Delimitación espacial para la extracción de muestras de suelo. Fuente: Google earth ©

Google earth, imagery ©2017 DigitalGlobe, CNES



DETERMINACIÓN DE LA CORRELACIÓN ENTRE EL ÍNDICE DE PLASTICIDAD Y EL ÁNGULO DE FRICCIÓN DE UN SUELO



De acuerdo al informe de zonificación geotécnica (INGEOMINAS, 2000), los lugares escogidos corresponden a diferentes zonas o conjuntos litológicos, cada uno con características geotécnicas diferentes que se resumen en la *Tabla 1*.

4.2 DELIMITACIÓN TEMPORAL

La investigación abarcó un lapso de dos (2) periodos académicos. En un principio, se realizaron las actividades encaminadas a la extracción de las muestras, caracterización del suelo y realización de los ensayos, luego se realizó el análisis de resultados obtenidos de las actividades mencionadas y sus respectivas conclusiones.

4.3 DELIMITACIÓN CONCEPTUAL

A continuación, se determinó una ecuación que permitió correlacionar el ángulo de fricción interna de un suelo y el índice de plasticidad del mismo, para ello se llevaron a cabo ensayos de corte directo y clasificación para las 13 muestras obtenidas en la zona estudiada, procurando preservar su estado parcialmente inalterado. Se limita la investigación a tipos de suelo arcillo arenosos, debido a que presentan una determinada capacidad de resistencia por fricción y cohesión entre sus partículas.

4.4 PRODUCTO FINAL A ENTREGAR

Como resultados de la investigación se entrega un informe en el cual se especifica; la clasificación del suelo, así como también parámetros de resistencia al corte, que mediante análisis de regresión se relacionó con las características índices previamente obtenidas, logrando así, obtener una ecuación de correlación entre el índice de plasticidad y el ángulo de fricción interna del suelo. Con el establecimiento de esta correlación, se podrán optimizar proyectos ejecutados.



*DETERMINACIÓN DE LA CORRELACIÓN ENTRE EL INDICE DE PLASTICIDAD
Y EL ANGULO DE FRICCIÓN DE UN SUELO*



4.5 PRODUCTOS COMPLEMENTARIOS

Al hacer ensayos de corte directo de las distintas muestras de suelos, fue posible determinar la cohesión del mismo, lo cual es de gran importancia para la caracterización del suelo. A partir de este resultado, la investigación podrá ser útil como base para futuras investigaciones donde se emplee diversos tipos de correlaciones.

4.6 EXCEPCIONES Y/O LIMITACIONES

Los ensayos de laboratorio, tanto para el análisis de sus atributos peculiares, como para la determinación de esfuerzos de corte y límites de Atterberg, se realizaron exclusivamente para las muestras de suelos que emularan los comportamientos de los suelos encontrados en la zona de estudio, por tal motivo la correlación hallada entre el ángulo de fricción interna e índice de plasticidad, sólo será aplicable a suelos que tengan características y comportamientos similares en la ciudad de Cartagena.



5. METODOLOGÍA

Esta investigación de tipo mixto, consistió en la toma de muestras en distintos puntos de la ciudad y luego fueron ensayadas en el laboratorio. Una parte de la investigación fue descriptiva mediante la cual se obtuvieron directamente por los autores o a través de fuentes indirectas las propiedades índices y los parámetros de resistencia del suelo, y otra parte de tipo analítica en la cual se emplearon los resultados de los ensayos realizados para definir la correlación entre los parámetros de plasticidad y resistencia, objetos de este estudio, el cuál para su desarrollo requirió un lapso de dos períodos académicos.

Para cumplir con el objetivo propuesto en este trabajo de grado se tomaron 13 muestras parcialmente inalteradas en campo mediante apiques de perforación SPT estándar en la zona sur de la ciudad de Cartagena, procurando proteger las muestras con papel aluminio para conservar en lo posible sus condiciones naturales, concretamente las coordenadas 10.412383, -75.456829, del barrio el Pozón, sector 1ro de Mayo, 10.394807, -75.497942, del barrio los Calamares, 10.389776, -75.484404, del barrio San pedro, 10.389742, -75.471421 del barrio El Recreo, 10.370418, -75.463361 del barrio El Rodeo y 10.389871, -75.509623 el barrio Nuevo Bosque.

Se determinó una ecuación que permitió correlacionar el ángulo de fricción interna de un suelo y el índice de plasticidad del mismo, para ello se llevaron a cabo ensayos de corte directo y clasificación para las 13 muestras obtenidas en la zona estudiada, procurando preservar su estado inalterado. Se limita la investigación a tipos de suelo arcillo arenosos, debido a que presentan una determinada capacidad de resistencia por fricción y cohesión entre sus partículas.

5.1 OBTENCIÓN DE MUESTRAS DE SUELO

Las muestras de suelos parcialmente inalteradas se obtuvieron en áreas específicas en las cuales se pudiera excavar, libre de tráfico peatonal y que presente las características deseadas.

Con ayuda de equipo SPT se realizaron las excavaciones a profundidades de 1 a 2 metros, teniendo en cuenta, mediante una inspección manual y visual previa, que el suelo no se encuentre contaminado con otro material. Además, se verificó con base a experiencias anteriores que el



*DETERMINACIÓN DE LA CORRELACIÓN ENTRE EL INDICE DE PLASTICIDAD
Y EL ANGULO DE FRICCIÓN DE UN SUELO*



fenotipo del suelo sea el que se busca. Luego se procedió a almacenar las muestras en papel aluminio marcadas con el sector del cual fue obtenido, para su posterior análisis y desarrollo de conclusiones.

El método mediante el cual se realizaron los sondeos fue por medios ensayos de penetración estándar o SPT, la cual es la prueba más utilizada en la realización de sondeos. Consistió en contar el número de golpes necesarios para que se introduzca a una determinada profundidad una barra cilíndrica hueca, que permite tomar una muestra, esta es envuelta en papel aluminio para protegerla y tratar de conservar sus características naturales, evitando así la contaminación de la misma.

Para tal fin se procedió, de acuerdo a la norma INV E 111, de la siguiente manera:

- Se hizo avanzar la perforación hasta 1.5 metros
- Se garantizó la limpieza y estabilidad del agujero de perforación, lo cual fue decisivo para obtener muestras parcialmente inalteradas.
- Se conectó el tubo partido a la tubería de perforación y se bajó dentro del hueco, dejándolo caer suavemente, sin permitir que se introdujera dentro del suelo que se muestreó.
- Se colocó el martillo en posición e instaló el cabezote en la parte superior de la tubería de perforación.
- Se dejó en reposo el peso muerto del muestreador, tubería y cabezote, sobre el fondo del hueco y se aplicó un golpe de asentamiento.
- Se hincó el muestreador con golpes de martillo hasta alcanzar la profundidad de asentamiento de 0.15 metros.
- Se registró el número de golpes necesarios hasta alcanzar la profundidad requerida.
- Se sacó el muestreador a la superficie y se abrió para registrar y describir la muestra extraída.



**DETERMINACIÓN DE LA CORRELACIÓN ENTRE EL INDICE DE PLASTICIDAD
Y EL ANGULO DE FRICCIÓN DE UN SUELO**



Imagen 1. Extracción de muestras de suelo mediante sondeos SPT. Fuente: elaboración propia.



5.2 ENSAYOS DE LABORATORIO

Posteriormente en el laboratorio de geotecnia y materiales de la Universidad de Cartagena cada muestra fue ensayada con dos objetivos específicos: obtener el tipo de suelo y estimar el ángulo de rozamiento interno. Para tales fines se tomó una porción de 200 gramos de cada muestra, dicha porción fue secada al horno por 24 horas, lavada a través del tamiz #200, nuevamente secada por 24 horas, pesada y tamizada (según la norma INV E 123). Luego fue tomada una porción de 300 gramos para realizar los ensayos de límites de Atterberg pertinentes: límite líquido empleando la máquina de Casagrande hasta elaborar 3 puntos con número de golpes y humedades distintas para cada muestra y obtener la humedad en la cual la ranura se cierra con 25 golpes (según las normas INV E 125 y 122); límite plástico mediante el desmoronamiento de pequeñas cantidades de cada muestra enrollados hasta el desmoronamiento con un diámetro aproximado de 3.2 mm, para luego obtener el porcentaje de humedad en el que se logra desmoronar en el diámetro estipulado, el mismo proceso se repitió 1 o 2 veces más para cada muestra según lo dictado en la norma INV E 126.

Luego, para obtener el ángulo de rozamiento de cada muestra se elaboraron probetas de 19.6 cm², 2 centímetros de altura y manteniendo la densidad aparente del suelo en condiciones naturales. Para cada muestra se elaboraron tres probetas para obtener tres puntos que permitieran dibujar la envolvente de falla. Dichas probetas fueron ensayadas en la máquina de corte directo, siendo sometidas a fuerza cortante y fuerza normal, variando esta última en 50, 100 y 200 kilopascales. Estos ensayos de corte directo fueron realizados bajo el procedimiento descrito en la norma INV E 154 y fueron ejecutados en su totalidad en el laboratorio de geotecnia y materiales, del programa de Ingeniería Civil de la Universidad de Cartagena.

5.3 PROCEDIMIENTO PARA ENSAYOS DE SUELO

Para esta fase se llevaron a cabo los ensayos de suelo propuestos tanto en la norma NSR-10 como en las Normas del instituto nacional de vías (INVIAS). Esto con el propósito de determinar las propiedades índices del suelo y su ángulo de fricción interna y poder determinar la correlación buscada.

En primera instancia se realizó la caracterización de las muestras obtenidas en campo: Contenido de agua (Norma INV E 122), Límites de Atterberg (Normas INV E 125, INV E 126), Lavado por



DETERMINACIÓN DE LA CORRELACIÓN ENTRE EL INDICE DE PLASTICIDAD Y EL ANGULO DE FRICCIÓN DE UN SUELO



tamiz N° 200, Granulometría tamizando en tamaños mayores a N° 200 (Norma INV E 123). Estos ensayos se realizaron con el objetivo principal de obtener el índice de plasticidad del suelo estudiado.

Posteriormente se realizó el ensayo de corte directo mediante el cual se obtuvo el ángulo de fricción interna. Este ensayo se encuentra descrito en la norma INV E 154.

Estos ensayos fueron realizados en los laboratorios de la Universidad de Cartagena, los cuales se encuentran dotados de los implementos necesarios para su elaboración.

Contenido de agua (Norma INV E-122): Para conocer la masa de agua removida al secar la muestra de suelo, primero se midió la masa de una muestra de suelo en estado natural para obtener el peso húmedo (W_w), luego esta muestra fue colocada durante 24 horas en un horno con temperatura controlada a $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$. Posteriormente la muestra se retiró del horno y se midió la masa de esta completamente seca para obtener el peso seco de muestra (W_s), y así obtener el contenido de humedad en porcentaje de la muestra.

Granulometría (Norma INV E-123):

Para determinar la distribución cuantitativa de las partículas en un suelo se procedió como reza a continuación:

- Se separaron mediante cuarteo, 115 g para suelos arenosos y 65 g para suelos arcillosos y limosos, pesándolos con exactitud de 0.01 g.
- Se pesó una porción de 10 a 15 gramos de los cuarteos anteriores y se secaron al horno a una temperatura de $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$. Luego dichas porciones fueron pesadas nuevamente en estado completamente seco.
- Se colocó la muestra en un recipiente apropiado, cubriéndola con agua y se dejó en remojo hasta que todos los terrones se ablanden.
- Se lavó a continuación la muestra sobre el tamiz de $75 \mu\text{m}$ (No.200) con abundante agua, evitando frotarla contra el tamiz y teniendo mucho cuidado de que no se pierda ninguna partícula de las retenidas en él.



**DETERMINACIÓN DE LA CORRELACIÓN ENTRE EL INDICE DE PLASTICIDAD
Y EL ANGULO DE FRICCIÓN DE UN SUELO**



- Se recogió lo retenido en un recipiente, se secó en el horno a una temperatura de 110 ± 5 °C (230 ± 9 °F) y se pesó.
- Posteriormente se tamizó en seco a través del tamiz N° 200.

Norma INV E 125: Determinación del límite líquido de los suelos

El límite líquido de un suelo es el contenido de humedad expresado en porcentaje del suelo secado en el horno, cuando este se halla en el límite entre el estado líquido y el estado plástico.

Para obtener el límite líquido de las muestras se procedió así:

- Se preparó una pasta de suelo con humedad ligeramente superior al límite líquido ó con 15 a 20 ml de agua destilada.
- Se verificó que la cazuela de Casagrande estuviera completamente limpia y seca antes de empezar el ensayo.
- Se colocaron entre 10 y 15 gramos de suelo húmedo en la cazuela, alisando la superficie hasta dejarla con una profundidad de 10 mm en el punto de espesor máximo.
- Se dividió el suelo en la cazuela de bronce con una firme pasada del ranurador a través de la línea central de la masa de suelo. La ranura se hizo con el menor número posible de pasadas (máximo 6 pasadas).
- Se levantó y golpeó la cazuela girando la manija a una velocidad de dos revoluciones por segundo, hasta que las dos mitades de la muestra se estuvieran en contacto. Se anotó el número de golpes requeridos para cerrar la ranura.
- Se determinó el contenido de humedad de la muestra ensayada y se repitió la operación anterior por lo menos en dos ensayos adicionales con el suelo restante.



**DETERMINACIÓN DE LA CORRELACIÓN ENTRE EL INDICE DE PLASTICIDAD
Y EL ANGULO DE FRICCIÓN DE UN SUELO**



Imagen 2. Ensayo en cazuela de Casagrande para obtención de límite líquido. Fuente: elaboración propia.



FORMATO LIMITE LIQUIDO DE UNA MUESTRA			
	1	2	3
Numero de recipiente			
Peso del recipiente			
Peso del recipiente + suelo humedo			
Peso del recipiente + suelo seco			
Numero de golpes			

Tabla 4. Formato para recolección de datos para obtención de limite líquido de una muestra.

Fuente: elaboración propia.

Norma INV E 126: Límite plástico e índice de plasticidad de suelos

El límite plástico del suelo es el contenido más bajo de agua, determinado por este procedimiento, en el cual el suelo permanece en estado plástico. En términos prácticos el límite plástico se define como el contenido de agua con el cual pueden formarse rollos de suelo de aproximadamente 3 mm de diámetro, rodando dicho suelo entre la palma de la mano y una superficie lisa sin que el rollo se desmorone.

Para realizar este ensayo se seleccionó una porción de 1.5 a 2 gramos de la masa de suelo tomada. Se rodó la masa de suelo entre la palma de la mano y la superficie lisa con solo la presión necesaria para formar un rollo de diámetro uniforme. Posteriormente se determinó el contenido de agua promedio en el cual se formaban rollos de suelo de aproximadamente 3 mm a punto de desmoronarse.



**DETERMINACIÓN DE LA CORRELACIÓN ENTRE EL INDICE DE PLASTICIDAD
Y EL ANGULO DE FRICCIÓN DE UN SUELO**



FORMATO LIMITE PLASTICO DE UNA MUESTRA			
	1	2	3
Numero de recipiente			
Peso del recipiente			
Peso del recipiente + suelo humedo			
Peso del recipiente + suelo seco			

Tabla 5. Formato para recolección de datos para obtención de limite plástico de una muestra.

Fuente: elaboración propia.



**DETERMINACIÓN DE LA CORRELACIÓN ENTRE EL INDICE DE PLASTICIDAD
Y EL ANGULO DE FRICCIÓN DE UN SUELO**



Imagen 3. Muestras extraídas de los ensayos de limite líquido y plástico, para calcular el contenido de agua correspondiente. Fuente: elaboración propia.



DETERMINACIÓN DE LA CORRELACIÓN ENTRE EL INDICE DE PLASTICIDAD Y EL ANGULO DE FRICCIÓN DE UN SUELO



Norma INV E 154: Ensayo de corte directo

El ensayo consistió en:

- Colocar de la muestra de ensayo en el dispositivo de corte directo
- Aplicar de una carga normal determinada
- Disponer de los medios de drenaje y humedecimiento de la muestra
- Consolidar de la muestra bajo carga normal
- Liberar los marcos que sostienen la muestra
- Aplicar la fuerza de corte para hacer fallar la muestra.
- Para cada muestra de suelo se ensayaron 3 probetas, cada una sometida a distintos esfuerzos normales: 50, 100 y 200 kilopascales.



Imagen 4. Ensayo de corte directo. Fuente: elaboración propia.



**DETERMINACIÓN DE LA CORRELACIÓN ENTRE EL ÍNDICE DE PLASTICIDAD
Y EL ÁNGULO DE FRICCIÓN DE UN SUELO**



Esfuerzo Normal (σ):			
Volumen Probeta:			
Consolidación		Corte	
Tiempo (min)	Deformación Vertical	Deformación Horizontal	Carga Horizontal
0		10	
1/4		20	
1		30	
2,25		40	
4		50	
6,25		60	
9		70	
12,25		80	
16		90	
20,25		100	
25		110	
30		120	

Tabla 6. Formato para recolección de datos de ensayo de corte directo. Fuente: elaboración propia.

5.4 ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Después de todo el proceso de selección de muestras y de realizar los ensayos necesarios para determinar las características índices de las muestras ensayadas se obtuvieron los resultados que fueron tratados mediante software (Excel) y luego se analizó todo lo concerniente a ellos.

El análisis de resultados de esta investigación fue llevado a cabo por etapas:

- Primera etapa: Caracterización de las muestras de suelo.
- Segunda etapa: Análisis de resultados del ensayo de corte directo.
- Tercera etapa: Análisis de regresión de datos para determinar la correlación entre índice de plasticidad y ángulo de fricción interna.

En cuanto al análisis de resultados correspondientes a la clasificación de muestras de suelo se recurrió por un lado al método del sistema unificado de clasificación de suelos, establece que



DETERMINACIÓN DE LA CORRELACIÓN ENTRE EL ÍNDICE DE PLASTICIDAD Y EL ÁNGULO DE FRICCIÓN DE UN SUELO



primero se debe observar el porcentaje que pasa el tamiz No. 200, para saber si se trata de suelos finos o suelos gruesos. Luego, en caso de suelos gruesos, se analiza la fracción de suelo que pasa por el tamiz #4 para determinar si se trata de gravas o arenas, y en caso de suelos finos se analiza el límite líquido para establecer si se trata de limos o arcillas de alta o baja plasticidad.

Por lo tanto, en caso de suelos gruesos, se vuelve a analizar el porcentaje que pasa el tamiz No. 200, para saber su estado de gradación e incluso conocer si hay presencia de partículas limosas o arcillosas.

Por otro lado, se recurrió al método AASHTO para clasificación de suelos, el cual plantea para el caso específico del presente trabajo que se debe observar primero el porcentaje que pasa el tamiz No. 200 para saber si se trata de material granular o material arcilloso. Luego se procede a revisar los límites de plasticidad y calcular el índice de grupo para finalmente clasificar la muestra de suelo.

Acto seguido para analizar los resultados de corte directo se recurrió a la composición granulométrica de las muestras, para comparar esto con los ángulos de fricción y la cohesión de cada muestra.

Con el objetivo de examinar la correlación obtenida se recurrió a analizar el tipo de tendencia que describen los datos arrojados por las 13 muestras para índice de plasticidad y ángulo de fricción, observando la ecuación que describe la correlación y el grado de dispersión mediante el coeficiente de determinación (R^2). Posteriormente se estudió el comportamiento de la correlación respecto a ecuaciones o modelos elaborados por otros autores calculando cuantas veces cabía el valor del ángulo de fricción obtenido mediante el modelo propuesto por este trabajo, en el valor del ángulo de fricción calculado usando modelos existentes, con el fin de validar la ecuación del modelo propuesto. Para esto no se usaron como valores de referencia los índices de plasticidad obtenidos en el trabajo, sino índices de plasticidad entre 5 y 30. Esto último se justifica ya que la mayoría de ecuaciones empleadas para la validación se definieron como aplicables en un rango de plasticidad cuyo límite inferior es 5.

Una vez concluido y con el fin de dar confiabilidad se puede determinar que mediante la conservación en estado natural de la muestra se recreó las condiciones del suelo donde fueron tomadas, buscando así que al momento de realizar los ensayos de corte directo la ordenación de



***DETERMINACIÓN DE LA CORRELACIÓN ENTRE EL INDICE DE PLASTICIDAD
Y EL ANGULO DE FRICCIÓN DE UN SUELO***



las partículas de suelo, su humedad y demás condiciones naturales se mantuvieran inalterables y esto conllevara a la obtención de un resultado acertado y preciso para el ángulo de fricción de cada muestra.

Además, de acuerdo a experiencias prácticas se estableció que el comportamiento de la ecuación obtenida respecto a ecuaciones existentes como rango aceptable de comparación y validación entre 0.8 veces y 1.6 veces.

Información secundaria:

Bases de datos: Para la recolección de trabajos previos que sirvieran como referencia teórico-práctica a nivel local, nacional e internacional. Para ello se accedió a la página web de la biblioteca de la Universidad de Cartagena, y allí se accedió al metabuscador EBSCOhost, desde donde se obtuvieron los diversos trabajos de referencia.



6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

6.1 CARTACTERIZACIÓN Y CLASIFICACIÓN DE MUESTRAS

Para desarrollar la caracterización y clasificación de las muestras ensayadas, en primera instancia se llevaron a cabo los ensayos de granulometría utilizando la siguiente serie de tamices: 1/2", 3/8", #4, #10, #40, #100, #200, fondo.

Evidentemente para la clasificación de suelos, en cuanto a granulometría se refiere, se deben tener en cuenta 2 resultados: el porcentaje que pasa el tamiz #200 y el porcentaje que pasa el tamiz #4.

Para las muestras 1, 2, 3, 4, 5, 6 y 8, el porcentaje que pasa el tamiz #200 oscila entre 42% y 49.07% (<50%) lo que señala que se trata de suelos granulares gruesos. A su vez el porcentaje que pasa el tamiz #4 oscila entre 99.15% y 99.77% (>50%), de lo cual se determina que estamos ante muestras de suelo tipo arena.

Para las muestras 7, 9, 10, 11, 12 y 13 el porcentaje que pasa el tamiz #200 oscila entre 50.23% y 62.96% (>50%) lo que determina que se trata de suelos de grano fino. Así mismo el porcentaje que pasa el tamiz #4 oscila entre 99.61% y 100% (>50%), por lo cual se requiere conocer los límites de Atterberg de las muestras y emplear la carta de plasticidad para establecer si se trata de muestras tipo limo o tipo arcilla.



**DETERMINACIÓN DE LA CORRELACIÓN ENTRE EL ÍNDICE DE PLASTICIDAD
Y EL ÁNGULO DE FRICCIÓN DE UN SUELO**



MUESTRA	% PASA TAMIZ #200	% PASA TAMIZ #4
1	42.28	99.49
2	42.5	99.72
3	42.45	99.61
4	42.08	99.49
5	48.17	99.15
6	48.02	99.77
7	50.23	99.66
8	49.07	99.33
9	58.09	99.61
10	57.93	99.66
11	58.09	99.83
12	57.77	99.66
13	62.96	100

Tabla 7. Porcentaje que pasa por los tamices #200 y #4. Fuente: elaboración propia.

Prosiguiendo con el propósito de clasificar las muestras ensayadas, podemos analizar los resultados obtenidos para los límites de Atterberg.

Observando el conjunto total de las muestras y cotejando los resultados con la carta de plasticidad, el límite líquido de las muestras oscila entre $20 < LL < 41$, mientras los valores de índice de plasticidad se encuentran en un rango de 8 a 22, a partir de esto se establece que el tipo de suelo estudiado en las muestras 1, 2, 3, 4, 5, 6 y 8 corresponde a arena arcillosa (SC), entre tanto el tipo de suelo estudiado en las muestras 7, 9, 10, 11, 12 y 13 corresponde a arcilla de baja plasticidad. Todo esto de acuerdo al sistema de clasificación de suelos USCS.



**DETERMINACIÓN DE LA CORRELACIÓN ENTRE EL INDICE DE PLASTICIDAD
Y EL ANGULO DE FRICCIÓN DE UN SUELO**



Ahora de acuerdo a los criterios de clasificación de AASHTO se encuentra lo siguiente:

- Todas las muestras corresponden a materiales arcillosos de baja plasticidad, ya que el porcentaje que pasa el tamiz #200 es mayor a 35%.
- Para las muestras desde la 1 hasta la 4 el LL es menor que 40 y el IP es menor o igual a 10, por lo que el tipo de suelo sería A-4.
- Para las muestras desde la 5 hasta la 12 el límite líquido es menor que 40 y el índice de plasticidad es mayor que 11, por lo que corresponden a un tipo de suelo A-6.
- Para la muestra 13 el límite líquido es mayor o igual que 41, mientras el índice de plasticidad es mayor que 11 y a su vez $IP > LL - 30$, obteniendo así un tipo de suelo A-7-6.

MUESTRA	% PASA TAMIZ #200	% PASA TAMIZ #4	LL (%)	LP (%)	IP (%)	TIPO (USCS)	TIPO (AASHTO)
1	42.28	99.49	26	16	10	SC	A-4
2	42.5	99.72	25	15	10	SC	A-4
3	42.45	99.61	22	13	9	SC	A-4
4	42.08	99.49	20	12	8	SC	A-4
5	48.17	99.15	28	17	11	SC	A-6
6	48.02	99.77	32	18	14	SC	A-6
7	50.23	99.66	31	17	14	CL	A-6
8	49.07	99.33	30	15	15	SC	A-6
9	58.09	99.61	31	19	12	CL	A-6
10	57.93	99.66	36	21	15	CL	A-6
11	58.09	99.83	36	20	16	CL	A-6
12	57.77	99.66	39	21	18	CL	A-6
13	62.96	100	41	19	22	CL	A-7-6

Tabla 8. Clasificación de muestras de acuerdo a USCS y AASHTO. Fuente: elaboración propia.



6.2 RESISTENCIA AL CORTE

Teniendo en cuenta la clasificación de las muestras, se analiza lo siguiente respecto a los resultados obtenidos del ensayo de corte directo:

Para las muestras desde la 1 hasta la 4 se observa en su composición granular que poseen un porcentaje considerable de granos gruesos y a su vez presentan los índices de plasticidad más bajos del conjunto de muestras. Los ángulos de fricción interna obtenidos mediante ensayo de corte directo se encuentran entre 17.3° y 22.9° , mientras la cohesión del material se halla entre 23.8 kPa y 25.5 kPa.

En las muestras 5 hasta la 12, donde la composición granular se observa mayor predominancia de granos finos, y por ende son muestras con mayor plasticidad que las muestras 1-4, se obtuvieron envolventes de falla con pendientes bajas, arrojando ángulos de fricción interna entre 5.2° y 13.75° ; e intersecciones que definen la cohesión de estas muestras en un rango de 29.2 kPa a 31.5 kPa.

La muestra 13 exhibe un alto porcentaje de finos (62.9%) en su composición granular, del conjunto total de muestras, esta es la de mayor plasticidad (IP=22), y de acuerdo a los resultados del ensayo de corte directo, la resistencia al corte se sustenta casi exclusivamente en la cohesión del material arcilloso ($c=41.39$ kPa), mientras el aporte por fricción es casi nulo ($\phi=4.5^\circ$).



**DETERMINACIÓN DE LA CORRELACIÓN ENTRE EL INDICE DE PLASTICIDAD
Y EL ANGULO DE FRICCIÓN DE UN SUELO**



MUESTRA	TIPO		LÍMITES DE ATTERBERG			CORTE DIRECTO	
	UCS	AASHTO	LL(%)	LP (%)	IP(%)	FRICCIÓN (ϕ)	COHESIÓN (kPa)
1	SC	A-4	26	16	10	18.1	23.8
2	SC	A-4	25	15	10	17.3	23.9
3	SC	A-4	22	13	9	19.1	25.2
4	SC	A-4	20	12	8	22.9	25.5
5	SC	A-6	28	17	11	13.75	29.3
6	SC	A-6	32	18	14	5.2	29.9
7	CL	A-6	31	17	14	9.17	30.4
8	SC	A-6	30	15	15	8.3	30.8
9	CL	A-6	31	19	12	11.9	30.3
10	CL	A-6	36	21	15	11.2	29.5
11	CL	A-6	36	20	16	7.15	31.4
12	CL	A-6	39	21	18	6.9	31.2
13	CL	A-7-6	41	19	22	4.5	41.3

Tabla 9. Resumen de resultados. Fuente: elaboración propia.



6.3 CORRELACION ENTRE ÍNDICE DE PLASTICIDAD Y ÁNGULO DE FRICCIÓN INTERNA

En resumen, los resultados obtenidos para índice de plasticidad y ángulo de fricción fueron los siguientes:

MUESTRA	IP (%)	FRICCIÓN
1	10	18.1
2	10	17.3
3	9	19.1
4	8	22.9
5	11	13.75
6	14	5.2
7	14	9.17
8	15	8.3
9	12	11.9
10	15	11.2
11	16	7.15
12	18	6.9
13	22	4.5

Tabla 10. Índice de plasticidad y ángulo de fricción para cada muestra. Fuente: elaboración propia.

Con una simple observación de los datos obtenidos se infiere la proporcionalidad inversa entre las dos variables. El desarrollo de la geotecnia permite inferir lo siguiente: suelos de granos gruesos (para el caso específico: suelos tipo arena) suelen tener baja plasticidad y un aporte significativo a la resistencia al corte debido a la fricción entre sus partículas. Suelos de granos muy finos (para el caso específico: suelos tipo arcilla) suelen tener valores considerables de plasticidad y su resistencia al corte se debe casi exclusivamente a la cohesión. Dicho esto, se entiende el



DETERMINACIÓN DE LA CORRELACIÓN ENTRE EL ÍNDICE DE PLASTICIDAD Y EL ÁNGULO DE FRICCIÓN DE UN SUELO



comportamiento de los datos, a medida que el valor del índice de plasticidad aumenta, el ángulo de fricción interna disminuye.

El *Gráfico* muestra la relación entre el ángulo de fricción interna y el índice de plasticidad obtenidos como resultado de respectivos ensayos de corte directo y límites de Atterberg en muestras con alto contenido de material tipo arcilla (entre 42% y 63% que pasa el tamiz #200), que a su vez se concentran en un rango de plasticidad estrecho ($8 < IP < 22$) con índices relativamente bajos (arenas arcillosas, arcillas de baja plasticidad), tal como se observa en la *Tabla 10*.

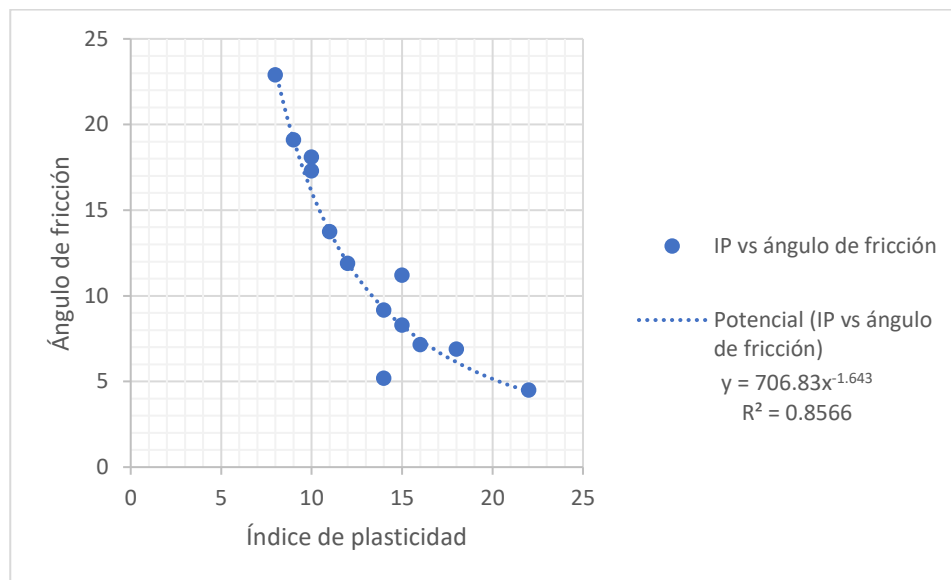


Gráfico 1. Correlación entre índice de plasticidad y ángulo de fricción obtenida. Fuente: elaboración propia.

A partir del *gráfico 1* se analizan dos cosas: la primera es que los datos gozan de una dispersión fácil de observar, datos que se alejan del modelo propuesto; esto encuentra soporte en el coeficiente de determinación (R^2) que no está cerca de ser un modelo ideal ($R^2=1$), pero de acuerdo a su valor y cuya estimación se ajusta bastante bien al comportamiento real de la variable. Luego, con base a los datos obtenidos y las condiciones dadas se sugiere el siguiente modelo para estimar el ángulo de fricción interna:

$$\phi = \frac{706.83}{IP^{1.643}} \cdot (Ec. 10)$$

ϕ , en grados.



6.4 ANÁLISIS DE CORRELACION EXISTENTES

6.4.1 Correlación de Mitchell

Fig. 9.14 Relationship between M or $\sin \phi'$ and plasticity index I_p for normally compressed soils [after Mitchell, 1976, with additional data (●) from Brooker and Ireland, 1965].

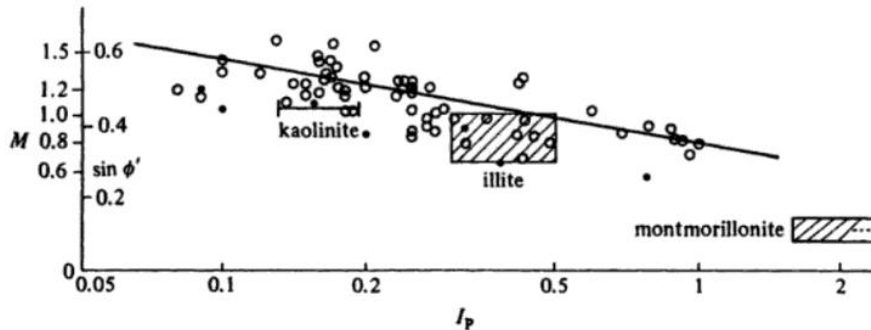


Ilustración 8. Correlación entre seno de phi y el índice de plasticidad para suelos normalmente comprimidos, Mitchell 1976. Fuente: *Soil behaviour and critical state soil mechanics*, Muir, D.;1990.

$$\sin \phi = 0.35 - 0.1 * \ln IP. (Ec. 11)$$

ϕ , en grados.

IP , decimal correspondiente al porcentaje

De esta ecuación se deben resaltar al menos 4 cosas:

- Es resultado de una investigación realizada por Mitchell (1976) y alimentada por datos de investigaciones anteriores en suelos normalmente comprimidos de tipo arcilloso con énfasis en 3 minerales arcillosos: caolinita, ilita y montmorillonita.
- Los datos propios de la investigación presentan un alto grado de dispersión
- Los datos abarcan un amplio rango de plasticidad, $5 < IP < 150$
- El ángulo de fricción disminuye con el aumento del índice de plasticidad, exhibiendo una correlación de tipo logarítmica.



6.4.2 Correlación de Kanji

$$\phi = \frac{46.6}{IP^{0.446}} \cdot (Ec. 12)$$

ϕ , en grados.

IP , porcentaje

- Para el desarrollo de esta correlación se extrajeron muestras de interfaz roca-suelo, pero no se especifican ni tipo de suelo ni mineral de roca.
- El rango de plasticidad que abarca es $5 < IP < 95$
- El ángulo de fricción disminuye con el aumento del índice de plasticidad, exhibiendo una correlación de tipo potencial.

6.4.3 Correlaciones de Sorensen y Okkels

En primera instancia los autores proponen una correlación con base a varios estudios anteriores: Brooker y Ireland; 1965; Ladd et al. 1977; Stark and Eid, 1997; Terzaghi et al., 1996, entre otros.

Señalan que estos estudios están principalmente enfocados en arcillas normalmente consolidadas o arcillas en estado natural. La colección de datos presenta un estado de dispersión significativo y el rango de plasticidad se encuentra entre $5 < IP < 244$

$$\phi = 39 - 11 * \log IP$$

ϕ , en grados.

IP , porcentaje.



**DETERMINACIÓN DE LA CORRELACIÓN ENTRE EL ÍNDICE DE PLASTICIDAD
Y EL ÁNGULO DE FRICCIÓN DE UN SUELO**



Posteriormente presentan una correlación propuesta por Knudsen (1981) elaborada con base en vieja data, experiencia previa, y en valores medios del índice de plasticidad. El rango de plasticidad para el cual se aplica esta correlación es $6 < IP < 106$.

$$\phi = 45 - 15 * \log IP$$

ϕ , en grados.

IP , porcentaje.

A la luz de los datos más recientes los autores señalan que estos amplían el rango del índice de plasticidad; las correlaciones propuestas reflejan diferencias significativas con aquellas construidas con base en datos antiguos y por ello sugieren el uso de nuevas correlaciones:

- Estimación cautelosa:

$$\phi = 44 - 14 * \log IP, 4 < IP < 50$$

$$\phi = 30 - 6 * \log IP. (Ec. 13), 50 < IP < 150$$

- Estimación más precisa:

$$\phi = 45 - 14 * \log IP, 4 < IP < 50$$

$$\phi = 26 - 3 * \log IP. (Ec. 14), 50 < IP < 150$$

Con base en las condiciones dadas por cada correlación previamente expuesta, los datos de índice de plasticidad obtenidos y el modelo propuesto en este trabajo se procede a realizar un análisis de confiabilidad comparativo:



**DETERMINACIÓN DE LA CORRELACIÓN ENTRE EL INDICE DE PLASTICIDAD
Y EL ANGULO DE FRICCIÓN DE UN SUELO**



6.4.4 Validación del modelo

A continuación, presentamos una serie de tablas cuyo objetivo es comparar los resultados obtenidos y el modelo propuesto para estimar el ángulo de fricción con las ecuaciones previamente expuestas, empleando un rango de índice de plasticidad entre 5 y 30 para calcular el ángulo de fricción.

	Ecuación 10	Kanji (Ec. 12)	Mitchell (Ec. 11)	Sorensen (Ec. 5)	Sorensen (Ec. 6)	Sorensen (Ec. 7)	Sorensen (Ec. 8)
IP	ϕ	ϕ	Φ	ϕ	ϕ	ϕ	ϕ
5	50,22	22,73	40,51	31,31	34,52	34,21	35,21
6	37,22	20,96	39,15	30,44	33,33	33,11	34,11
7	28,89	19,56	38,02	29,70	32,32	32,17	33,17
8	23,20	18,43	37,05	29,07	31,45	31,36	32,36
9	19,12	17,49	36,21	28,50	30,69	30,64	31,64
10	16,08	16,69	35,47	28,00	30,00	30,00	31,00
11	13,75	15,99	34,80	27,54	29,38	29,42	30,42
12	11,92	15,38	34,20	27,13	28,81	28,89	29,89
13	10,45	14,84	33,64	26,75	28,29	28,40	29,40
14	9,25	14,36	33,13	26,39	27,81	27,95	28,95
15	8,26	13,93	32,66	26,06	27,36	27,53	28,53
16	7,43	13,53	32,23	25,75	26,94	27,14	28,14
17	6,72	13,17	31,82	25,47	26,54	26,77	27,77
18	6,12	12,84	31,43	25,19	26,17	26,43	27,43
19	5,60	12,53	31,07	24,93	25,82	26,10	27,10
20	5,15	12,25	30,73	24,69	25,48	25,79	26,79



**DETERMINACIÓN DE LA CORRELACIÓN ENTRE EL INDICE DE PLASTICIDAD
Y EL ANGULO DE FRICCIÓN DE UN SUELO**



	Ecuación 10	Kanji (Ec. 12)	Mitchell (Ec. 11)	Sorensen (Ec. 5)	Sorensen (Ec. 6)	Sorensen (Ec. 7)	Sorensen (Ec. 8)
21	4,75	11,99	30,40	24,46	25,17	25,49	26,49
22	4,40	11,74	30,09	24,23	24,86	25,21	26,21
23	4,09	11,51	29,80	24,02	24,57	24,94	25,94
24	3,82	11,29	29,52	23,82	24,30	24,68	25,68
25	3,57	11,09	29,25	23,62	24,03	24,43	25,43
26	3,35	10,90	28,99	23,44	23,78	24,19	25,19
27	3,14	10,72	28,75	23,25	23,53	23,96	24,96
28	2,96	10,54	28,51	23,08	23,29	23,74	24,74
29	2,80	10,38	28,28	22,91	23,06	23,53	24,53
30	2,64	10,22	28,06	22,75	22,84	23,32	24,32

Tabla 11. Comparación entre valores de ángulo de fricción calculados mediante la ecuación propuesta y las ecuaciones de Kanji, Mitchell y Sorensen. Fuente: Elaboración propia.

Además, con base a los resultados reflejados en la tabla anterior se calculó cuantas veces cabía el valor del ángulo de fricción obtenido mediante el modelo propuesto por este trabajo, en el valor del ángulo de fricción calculado usando modelos existentes, con el fin de validar la ecuación del modelo propuesto. Los resultados de esta operación se reflejan en la siguiente *tabla*:

IP	Ec. 12 vs Ec. 10	Ec. 11 vs Ec. 10	Ec. 5 vs Ec. 10	Ec. 6 vs Ec. 10	Ec. 7 vs Ec. 10	Ec. 8 vs Ec. 10
5	0,45	0,81	0,62	0,69	0,69	0,70
6	0,56	1,05	0,82	0,90	0,90	0,92
7	0,68	1,32	1,03	1,12	1,12	1,15
8	0,79	1,60	1,25	1,36	1,36	1,39
9	0,91	1,89	1,49	1,60	1,60	1,65
10	1,04	2,21	1,74	1,87	1,87	1,93
11	1,16	2,53	2,00	2,14	2,14	2,21
12	1,29	2,87	2,28	2,42	2,42	2,51
13	1,42	3,22	2,56	2,71	2,71	2,81



**DETERMINACIÓN DE LA CORRELACIÓN ENTRE EL INDICE DE PLASTICIDAD
Y EL ANGULO DE FRICCIÓN DE UN SUELO**



IP	Ec. 12 vs Ec. 10	Ec. 11 vs Ec. 10	Ec. 5 vs Ec. 10	Ec. 6 vs Ec. 10	Ec. 7 vs Ec. 10	Ec. 8 vs Ec. 10
14	1,55	3,58	2,85	3,01	3,01	3,13
15	1,69	3,95	3,16	3,31	3,31	3,45
16	1,82	4,34	3,47	3,63	3,63	3,79
17	1,96	4,73	3,79	3,95	3,95	4,13
18	2,10	5,13	4,11	4,27	4,27	4,48
19	2,24	5,55	4,45	4,61	4,61	4,84
20	2,38	5,97	4,79	4,95	4,95	5,20
21	2,52	6,40	5,15	5,30	5,30	5,57
22	2,67	6,84	5,50	5,65	5,65	5,95
23	2,81	7,28	5,87	6,00	6,00	6,34
24	2,96	7,74	6,24	6,37	6,37	6,73
25	3,11	8,20	6,62	6,73	6,73	7,13
26	3,26	8,67	7,00	7,11	7,11	7,53
27	3,41	9,14	7,39	7,48	7,48	7,94
28	3,56	9,62	7,79	7,86	7,86	8,35
29	3,71	10,11	8,19	8,25	8,25	8,77
30	3,87	10,61	8,60	8,64	8,64	9,20

Tabla 12. Diferencia calculada entre los resultados de ángulo de fricción obtenidos con la ecuación propuesta y las ecuaciones de diferentes autores. Fuente: Elaboración propia.

En general la tabla anterior muestra que al comparar los valores obtenidos mediante la ecuación propuesta y los obtenidos mediante las ecuaciones de diferentes autores existe un rango de plasticidad entre 5 y 6, que se extiende incluso hasta 9, en el cual los valores de ángulo de fricción calculados por las ecuaciones de Kanji, Mitchell y Sorensen son menores que los calculados mediante el modelo propuesto. Seguidamente se observa un rango entre 6 y 9, que se extiende incluso hasta 14 en el cual la tendencia mencionada se invierte, es decir los valores de ángulo de fricción calculados por las ecuaciones de Kanji, Mitchell y Sorensen son mayores que los arrojados por la ecuación presentada en este trabajo y se encuentran dentro del rango de confiabilidad definido como aceptable entre 0.8 y 1.6. A partir de un valor de índice de plasticidad de 14, la diferencia entre valores se hace demasiado grande.



***DETERMINACIÓN DE LA CORRELACIÓN ENTRE EL INDICE DE PLASTICIDAD
Y EL ANGULO DE FRICCIÓN DE UN SUELO***



Para la comparación establecida entre la ecuación de Kanji (Ec. 12) y la ecuación propuesta, se observa que en un rango de plasticidad entre 9 y 14 los valores se hayan dentro del intervalo de confiabilidad aceptable, mientras que fuera de este rango de plasticidad las diferencias por defecto llegan a ser de 0.5 y por exceso se observa que el valor calculado a través de la ecuación de este trabajo llega a ser aproximadamente 4 veces en el valor calculado usando la ecuación de Kanji.

Para la comparación mostrada entre la ecuación de Mitchell (Ec. 11) y la ecuación propuesta, se observa que en un rango de plasticidad entre 5 y 8 los valores se hayan dentro del intervalo de confiabilidad aceptable, mientras que fuera de este rango de plasticidad las diferencias por exceso se observan que el valor calculado a través de la ecuación de este trabajo llega a ser aproximadamente 10.6 veces en el valor calculado usando la ecuación de Mitchell.

Para la comparación calculada entre las ecuaciones de Sorensen (Ec. 5, 6, 7 y 8) y la ecuación propuesta, se observa que en un rango de plasticidad entre 6 y 9 los valores se hayan dentro del rango de confiabilidad aceptable, mientras que fuera de este rango de plasticidad las diferencias por defecto llegan a ser de 0.62 veces y por exceso se observa que el valor calculado a través de la ecuación de este trabajo llegan a ser aproximadamente 9 veces en el valor calculado usando las ecuaciones de Sorensen.

Con base a lo analizado sobre las comparaciones entre las distintas ecuaciones, se observa que el modelo propuesto en este trabajo es susceptible de validación en un rango de plasticidad comprendido entre 6 y 9. Para valores inferiores a este rango, los ángulos de fricción calculados a partir de la ecuación propuesta resultan absurdos e imposibles de encontrar en la práctica, mientras que para valores superiores al rango las diferencias comparativas halladas con respecto a cada uno de los autores (Kanji, Mitchell y Sorensen) impiden validar la ecuación.

También es importante destacar que, al validar las ecuaciones de los autores entre sus propios modelos, es posible afirmar que solo las ecuaciones de Sorensen, tienen un rango más amplio de validación entre ellas mismas.



7. CONCLUSIONES

Con base en los resultados reflejados en la *Tabla 10* y *gráfico 1 de correlación* se obtuvo la ecuación: $\phi = \frac{706.83}{IP^{1.643}}$ a partir de 13 muestras de suelo sometidas a ensayos de corte directo y clasificación de suelos. Esta ecuación es susceptible de ser aplicada para valores de índice de plasticidad entre 6 y 9. Esto se sustenta en los distintos análisis comparativos realizados entre la ecuación del presente trabajo y aquellas propuestas por Kanji, Mitchell y Sorensen.

Es claro que debido a la limitación dada por los lugares en los cuales se tomaron las muestras, la ecuación obtenida solo es aplicable para las zonas o conjuntos litológicos: Zona III A, Zona III B, Zona IV, T2-3 (Barrio el rodeo), DMA (Barrio el pozón), DAR (Barrio Nuevo Bosque), ubicadas en la zona sur de la ciudad de Cartagena.

Para valores inferiores al rango de plasticidad definido para la ecuación propuesta, los ángulos de fricción calculados tienden a infinito, con valores absurdos e imposibles de encontrar en la práctica. Para valores de índice de plasticidad mayores a 9 la mayoría de análisis comparativos dictan que la diferencia entre la ecuación propuesta y las ecuaciones previas son muy grandes con cocientes que reflejan diferencias entre 2 y 11 veces.

Evidentemente la correlación obtenida indica una relación inversamente proporcional de tipo potencial entre el índice de plasticidad y el ángulo de fricción interna, es decir que suelos de baja plasticidad sustentan una parte de su resistencia al corte en la fricción interna, mientras suelos de alta plasticidad sustentan su resistencia al corte casi exclusivamente en la cohesión de sus partículas coloidales.

Concretamente fueron utilizados tres trabajos previos para comparar e intentar validar la correlación propuesta, a continuación, se presentan los rangos de plasticidad en los cuales la ecuación propuesta es confiable según el análisis comparativo:



**DETERMINACIÓN DE LA CORRELACIÓN ENTRE EL ÍNDICE DE PLASTICIDAD
Y EL ÁNGULO DE FRICCIÓN DE UN SUELO**



Modelo	Rango de plasticidad
Propuesto	$6 < IP < 9$
Propuesto vs Kanji	$9 < IP < 14$
Propuesto vs Mitchell	$5 < IP < 8$
Propuesto vs Sorensen (Ec. 5)	$7 < IP < 9$
Propuesto vs Sorensen (Ec. 6)	$6 < IP < 9$
Propuesto vs Sorensen (Ec. 7)	$6 < IP < 9$
Propuesto vs Sorensen (Ec. 8)	$6 < IP < 9$

Tabla 13. Rangos de plasticidad en los cuales la ecuación propuesta es confiable según el análisis comparativo con cada una de las ecuaciones existentes.

Vale la pena observar que, si bien el rango de plasticidad en el que es posible aplicar la ecuación propuesta es entre 6 y 9, la comparación con la ecuación de Kanji arroja el rango más amplio, lo que deja abierta una posible línea de investigación, menos ambiciosa, cuyo objetivo no sea encontrar una ecuación propiamente dicha, sino entre las ecuaciones existentes encontrar cuál ofrece mejores y más confiables resultados para estudios geotécnicos en la zona sur de la ciudad de Cartagena.

Se debe señalar que el trabajo y el modelo propuesto puede servir para ampliar el conocimiento de la mecánica de suelos a nivel local, teniendo presente las condiciones geológicas y medioambientales propias. La correlación hallada entre el ángulo de fricción interna y el índice de plasticidad a nivel local, representa uno de los parámetros más importantes para la evaluación de las capacidades portantes; última y admisibles del suelo. De la ecuación de la correlación obtenida se dan resultados confiables de parámetros de resistencia mediante un método experimental, ágil y económico.

Este estudio sirve para reafirmar que entre las variables índice de plasticidad y ángulo de fricción existe una relación de proporcionalidad inversa, ya que se encontró, a partir de los ensayos de laboratorio, que los suelos tipo arena arcillosa (SC), con plasticidad entre 8 y 10, presentaron los valores de ángulo de fricción más altos, de aproximadamente 23° , y a medida que aumenta la plasticidad y se encuentran suelos tipo CL, se encontraron los ángulos de fricción de menor valor, de lo que se desprende evidentemente que suelos de tipo granular, con bajo índice de plasticidad,



***DETERMINACIÓN DE LA CORRELACIÓN ENTRE EL ÍNDICE DE PLASTICIDAD
Y EL ÁNGULO DE FRICCIÓN DE UN SUELO***



presentan alta resistencia al corte por fricción, mientras suelos de tipo arcilloso, con plasticidad significativa, presentan alta resistencia al corte debido a la cohesión de sus partículas. En resumen: a medida que disminuye el índice de plasticidad, aumenta el ángulo de fricción.

Es necesario observar que en las muestras 6 y 10, los valores de ángulo de fricción obtenidos (5.2° y 11.2° , respectivamente) están por fuera de lo esperado, dos muestras diferentes (muestras 7 y 8) cuyo índice de plasticidad es igual a las muestras 6 y 10, se obtuvieron ángulos de fricción de 9.17° y 8.3° . Esta diferencia puede explicarse debido a errores de procedimiento de los investigadores al momento de realizar los ensayos de corte directo.

En cuanto a la validación de la ecuación propuesta se observa claramente que, para un índice de plasticidad de 5, el ángulo de fricción que arroja es de 50.22° , valor muy difícil de encontrar en la práctica. Esto se puede explicar debido a el tipo de correlación y a los factores que componen la ecuación, ya que a medida que el índice de plasticidad se acerca a 0, el ángulo de fricción incrementa hasta valores absurdos. Esta situación sin duda hace necesario que se defina un rango de plasticidad en el cual la ecuación propuesta sea aplicable, por supuesto en ese rango no pueden contemplarse valores de índice de plasticidad menores a 6.



8. RECOMENDACIONES

A partir de la experiencia del presente trabajo y sus resultados se pone de presente que los aspectos críticos de la investigación son esencialmente dos: la cantidad de muestras y el rango de índice de plasticidad del conjunto de muestras. Por un lado, la cantidad de muestras empleadas en este trabajo de grado afectan los resultados y la ecuación obtenida en cuanto a la representatividad de la zona estudiada, por lo que un mayor número de muestras habría permitido mayor certeza al momento de obtener una ecuación de correlación; y por otro, un rango de plasticidad más amplio eventualmente hubiera arrojado un mayor intervalo de índice de plasticidad en el que la ecuación obtenida se puede aplicar, además esto habría otorgado una mayor variedad en cuanto a tipos de suelo arcilloso. Los modelos que se usaron para comparar la ecuación obtenida evidencian que la cantidad de muestras empleadas en este estudio es limitada, ya que en algunos de ellos se deja explícito que la cantidad de muestras es un factor importante al momento de determinar una correlación y además fueron alimentados incluso por estudios previos. En cuanto al rango del índice de plasticidad, el presente estudio arrojó un rango de IP entre 8 y 22, mientras que los estudios previos abarcan rangos de plasticidad mucho más amplios, como el trabajo de Sorensen y Okkels que contempla un rango de plasticidad entre 5 y 244.

Ante tales limitaciones se recomienda en principio utilizar los resultados de esta investigación como literatura previa para alimentar futuros estudios similares, en los que deberá contarse con mayor disponibilidad de equipos de muestreo, máquina de corte directo o triaxial, tamices y material de laboratorio geotécnico en general, recurso humano y tiempo; lo que permitirá evaluar un mayor número de muestras. A partir de tener un mayor número de muestras, y abarcar zonas con diferentes tipos de suelo es probable que el rango de plasticidad sea más amplio.

Los ensayos de laboratorio, tanto para el análisis de sus atributos peculiares, como para la determinación de esfuerzos de corte y límites de Atterberg, se realizaron exclusivamente para las muestras de suelos que emularan los comportamientos de los suelos encontrados en la zona de estudio, por tal motivo la correlación hallada entre el ángulo de fricción interna e índice de plasticidad, sólo será aplicable a suelos que tengan características y comportamientos similares en la ciudad de Cartagena, específicamente en las zonas litológicas: Zona III A, Zona III B, Zona IV, T2-3 (Barrio el rodeo), DMA (Barrio el pozón), DAR (Barrio Nuevo Bosque), ubicadas en la zona



***DETERMINACIÓN DE LA CORRELACIÓN ENTRE EL INDICE DE PLASTICIDAD
Y EL ANGULO DE FRICCIÓN DE UN SUELO***



sur de la ciudad de Cartagena como lo expresa la *Tabla 1*. Por tal razón se exhorta a replicar este experimento en otras zonas litológicas próximas a la ciénaga de la virgen o a la zona nororiental de la ciudad, donde se pueden encontrar suelos cuyo índice de plasticidad esté por encima de 50%, con el fin de que en futuras investigaciones el rango de plasticidad sea mucho más amplio.



BIBLIOGRAFÍA

- A. Puy Santín. (2005). *“Influencia de la temperatura en el límite líquido para suelos con diferentes índices de plasticidad”*, M.Sc. Tesis, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, CAT, España.
- Covo, A., Tuirán, E., Pereira, T., & Jaraba, F. (2012). *ángulo de fricción interna bidimensional en arenas en función de su gradación*. Ciencias E Ingeniería Al Día.
- Covo, A. (2012). *teoría del ángulo de fricción interna bidimensional en arenas*. Ciencias E Ingeniería Al Día.
- Díaz Mendoza, C. (2010). *Caracterización geológica y geotécnica de Cartagena y áreas de influencia*. Cartagena de Indias: Leidy Suárez Esquivia. Retrieved from <http://files.juan-carlos-valdelamar-villegas.webnode.es/200000042-991b69a154/Caracterizaci%C3%B3n%20geol%C3%B3gica%20y%20geot%C3%A9cnica%20de%20Cartagena.pdf>
- Duque & Caro. (1984). *Estilo estructural y Diapirismo y episodios de crecimiento del terreno del Sinú – San Jacinto en el Noroccidente de Colombia*. Boletín Geológico Vol. XXVII No. 2 INGEOMINAS. Bogotá.
- Gonzáles, A. (1999) *estimativos de parámetros efectivos de resistencia con el spt*. X jornada geotécnica de la ingeniería colombiana
- INGEOMINAS, 2001. *ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA, APTITUD Y USO DEL SUELO EN EL CASCO URBANO DE CARTAGENA DE INDIAS, DTC - BOLÍVAR*. Cartagena.
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. (9 de octubre de 2004). <http://www.inecc.gob.mx/>. Obtenido de <http://www.inecc.gob.mx/http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/libros/448/9.pdf>
- Jiménez González, M. L. (2010). *Evaluación de las propiedades mecánicas de suelos de grano fino estabilizados con cal*. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Jiménez Salas, J.A., Justo, J.L. y Serrano, A., 1987. *Geotecnia y Cimientos II*. Ed. Rueda, Madrid.
- Kulhawy, F., & Mayne, P. (1990). *Manual on estimating soil properties for foundation design*. New York: University of Cornell. Retrieved from http://www.geoengineer.org/EPRI_reports/EL-6800.pdf
- Leoni, A. J. (5 de octubre de 1987). *Apuntes de resistencia al corte*. En A. J. Leoni, & A. J. oni (Ed.), *Apuntes de resistencia al corte* (págs. 24-39). La Plata, Buenos Aires, Argentina: Laboratorios de mecánica de suelos, Universidad Nacional de La Plata. Obtenido de www.ing.unlp.edu.ar/http://www.ing.unlp.edu.ar/constr/g1/Apunte%20de%20Resistencia%20al%20Corte%201.pdf



**DETERMINACIÓN DE LA CORRELACIÓN ENTRE EL INDICE DE PLASTICIDAD
Y EL ANGULO DE FRICCIÓN DE UN SUELO**



- Medina, S; Salazar, L. Cenicafé. (2009). *Relación entre la resistencia al corte directo y propiedades físicas y químicas en algunos suelos de la zona cafetera colombiana*
- Mendívil, P., & Saavedra, M. (2016). *correlación entre los métodos de compresión inconfiada y corte directo en suelos cohesivos, del sector el rodeo en Cartagena*. Universidad de Cartagena.
- Montenegro, L. (2014). *Calibración del método de parámetros de resistencia con SPT en suelos de la región llanera colombiana*. Universidad Nacional de Colombia.
- Muir Wood, D., 1990. *Comportamiento del suelo y mecánica del suelo en estado crítico*. Cambridge [Inglaterra]: Cambridge University Press, p. 271.
- Olivos, M., 2015. *Estimación Del Ángulo De Fricción Interna Y Cohesión No Drenada A Partir De Correlaciones Basadas En Ensayos In Situ Para Suelos Del Piedemonte De Los Cerros Orientales De Bogotá DC*. [ebook] Bogotá. Available at: <<http://polux.unipiloto.edu.co:8080/00002524.pdf>> [Accessed 25 August 2020].
- Pazmiño, L. (2017) *velocidades de onda vs v_p y su relación con los valores de ángulo de fricción interna, cohesión y n_{spt} para los suelos de sangolquí*. Universidad de las fuerzas armadas ESPE.
- Remai, Z. Periódico Politécnico. (2012). *Correlación entre la resistencia al corte sin drenaje y resistencia CPT*. Hungría: periódico politécnico.
- Ruge, J., & Carmona, J. (2015). *Análisis de las correlaciones existentes del ángulo de fricción efectivo para suelos del piedemonte oriental de Bogotá usando ensayos in situ (Doctorado)*. Universidad Nacional de Colombia.
- Salamanca, D., & Ahumada, V. (2013). *evaluación de los parámetros de consolidación con grandes deformaciones en función de las propiedades índices de los suelos de baja plasticidad*. Universidad de Cartagena.
- Sorensen, K. and Okkels, N., 2013. *Correlation Between Drained Shear Strength and Plasticity Index of Undisturbed Overconsolidated Clays*. París.
- Terzaghi, K., Peck, R., & Moretto, O. (1980). *Mecánica de suelos en la ingeniería práctica*. Barcelona [etc.]: El Ateneo.
- Vargas, D.; Ochoa, G. (2014) *correlación entre el ángulo de fricción interna y peso volumétrico eco para las arenas pumíticas de la zona metropolitana de Guadalajara*. Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Occidente.
- Villamizar Lemos, A., & Díaz Gutiérrez, J. j. (2010). *Relación entre los parámetros de resistencia al esfuerzo cortante obtenido en los ensayos de corte directo y compresión simple para*



**DETERMINACIÓN DE LA CORRELACIÓN ENTRE EL INDICE DE PLASTICIDAD
Y EL ANGULO DE FRICCIÓN DE UN SUELO**



arenas arcillosas. Bucaramanga: Universidad Pontificia Bolivariana- seccional Bucaramanga.

Wang, Y.; Akaju, O. (2016) *quantifying the cross-correlation between effective cohesion and friction angle of soil from limited site-specific data.* City University of Hong Kong.

Worth (1984). *The interpretation of In Situ Soil Tests.* Géotechnique, Vol 34 n°4.