

**ANÁLISIS DE LA INCERTIDUMBRE PARA LA RESISTENCIA AL CORTE
DIRECTO EN UNA ARENA SUELTA**

**JHON FREDY BECERRA RAMÍREZ
ANGHELO FABRIZIO CEDEÑO GONZÁLEZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2019

**ANÁLISIS DE LA INCERTIDUMBRE PARA LA RESISTENCIA AL CORTE
DIRECTO EN UNA ARENA SUELTA**

**JHON FREDY BECERRA RAMÍREZ
ANGHELO FABRIZIO CEDEÑO GONZÁLEZ**

Trabajo de Grado para optar el título de Ingeniero Civil

**DIRECTOR
HEBENLY CELIS LEGUIZAMO
M. Sc en Ingeniería civil**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2019

AGRADECIMIENTOS

Agradecer en primera instancia a Dios, es él quien nos guía, nos brinda la oportunidad de superarnos cada día.

A nuestros padres por todo el apoyo que nos brindan, el esfuerzo que hacen para darnos lo mejor, por estas razones son el motor de nuestra vida.

A la Ing. Hebenly Celis por ser la guía y gran apoyo durante toda la ejecución de nuestro proyecto.

A Sofía Pérez, por ser mi apoyo durante toda la carrera, quien me motivaba y me guiaba para seguir luchando a pesar de los obstáculos. Hace parte importante de mi vida. Jf.

A la universidad industrial de Santander, por formarnos como profesionales íntegros y ayudarnos a enfrentar diferentes situaciones del día a día.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	15
1. OBJETIVOS.....	16
1.1 OBJETIVO GENERAL	16
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	16
2. MARCO TEÓRICO	17
2.1 NORMA A UTILIZAR	17
2.2 RESUMEN DEL MÉTODO	17
2.3 INCERTIDUMBRE	18
2.3.1 Método para calcular la incertidumbre	20
2.3.1.1 Evaluación tipo A de la incertidumbre estándar.....	20
2.3.2 Fuentes posibles de incertidumbre en el ensayo de corte directo.	21
3. METODOLOGÍA	22
3.1 PRIMERA FASE: CLASIFICACIÓN DE LOS MATARIALES	22
3.1.1 Clasificación del material (arena).....	23
3.2 SEGUNDA FASE: DESCRIPCIÓN DEL ENSAYO DE CORTE DIRECTO.....	29
3.2.1 Selección del método para verter la arena en la caja de corte directo.....	29
3.2.2 Determinación de la velocidad de corte.	33
3.3 TERCERA FASE: ANÁLISIS DE RESULTADOS	35
3.3.1 Resultados Operario 1.	35
3.3.2 Resultados Operario 2.	37
4. ANÁLISIS DE LA INCERTIDUMBRE PRESENTADA EN LOS ENSAYOS DE CORTE DIRECTO	41
4.1 CÁLCULO DE LA INCERTIDUMBRE PRESENTADA EN LOS ENSAYOS DE CORTE DIRECTO	41

4.1.1 Incertidumbre estándar asociada a las medidas, calculada a partir de los resultados obtenidos de cada operador.....	41
4.1.2 Cálculo de incertidumbre combinada.....	42
4.1.3 Cálculo de la incertidumbre expandida.....	43
5. RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE CORTE DIRECTO DE LA ARENA COMPACTA Y ARENA SUELTA.....	45
6. CONCLUSIONES	46
BIBLIOGRAFIA.....	47
ANEXOS.....	49

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Pesos retenidos en cada tamiz	24
Tabla 2. Datos obtenidos de la granulometría.	27
Tabla 3. Peso retenido en cada tamiz del análisis de incertidumbre para el ensayo de corte directo en una arena compacta.....	27
Tabla 4. Resultados Método ASTM - D4254 - 16	31
Tabla 5. Densidades de la arena suelta.....	31
Tabla 6. Desviación estándar de cada método	32
Tabla 7. Tiempo mínimo hasta la falla	34
Tabla 8. Resultados Operario 1	35
Tabla 9. Análisis estadístico del ángulo de fricción.....	36
Tabla 10. Análisis estadístico carga 8 kg	36
Tabla 11. Análisis estadístico carga 16 kg.....	37
Tabla 12. análisis estadístico carga 32 kg	37
Tabla 13. Resultados operario 2.....	38
Tabla 14. Análisis estadístico del ángulo de fricción.....	38
Tabla 15. Análisis estadístico carga 8 kg.....	39
Tabla 16. Análisis estadístico carga 16 kg.....	39
Tabla 17. Análisis estadístico carga 32 kg.....	40
Tabla 18. Resultados incertidumbre estándar operario 1	41
Tabla 19. Resultados incertidumbre estándar operario 2	42
Tabla 20. Cálculo de incertidumbre expandida.....	43
Tabla 21. Incertidumbre - Arena Suelta y Arena Compacta.....	45

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Curva granulométrica arena suelta	24
Figura 2. Curva granulométrica (Arena compacta, Arena suelta)	28

LISTA DE ILUSTRACIONES

	Pág.
Ilustración 1. Material tamizado por el tamiz número 4.....	23
Ilustración 2. Método A	29
Ilustración 3. Método B	30
Ilustración 4. Método C	30
Ilustración 5. Vertimiento de la arena.....	32

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A Gráfica de Resultados Operario 1	50
Anexos B. Gráfica de Resultados Operario 2	56

RESUMEN

TÍTULO: ANÁLISIS DE LA INCERTIDUMBRE PARA LA RESISTENCIA AL CORTE DIRECTO EN UNA ARENA SUELTA*

AUTOR(ES): JHON FREDY BECERRA RAMIREZ
ANGHELO FABRIZIO CEDEÑO GONZÁLEZ**

PALABRAS CLAVE: Ensayo, Incertidumbre, Confiabilidad, Variación, Esfuerzo Cortante.

DESCRIPCIÓN:

En el campo de la ingeniería civil existen diversos campos de acción, como lo es, los estudios de suelos, para ello es importante contar con la ayuda de los laboratorios, dedicados a los estudios y análisis de muestras, estos ensayos aun que son precisos presentan variación en sus resultados, por esta razón es importante estudiar dicha variación, con el fin de presentar informes confiables.

Uno de los ensayos más utilizados en los laboratorios de suelos es el corte directo, aplicados a una muestra de suelo, cuya finalidad es determinar la resistencia al esfuerzo cortante de dicha muestra sometida a deformaciones, los cuales nos ayudan a identificar problemas como la determinación de la capacidad de soporte en cimentaciones, estabilidad de taludes, presión lateral de tierra sobre estructuras de contención.

Esta investigación se centra en el análisis de la incertidumbre que presenta el ensayo de corte directo, aplicado en una muestra de arena suelta con las mismas características, se realizaron treinta ensayos ejecutados por dos operarios, quince cada uno, con cargas estándar de 8 kg, 16 kg y 32 kg para cada muestra, los resultados de los ensayos se ajustaron por medio de una regresión lineal para realizar el análisis estadístico de los ángulos de fricción, posteriormente se calculó la incertidumbre combina y expandida, con el fin de analizar los diferentes factores que influyen en la incertidumbre presentada en el ensayo.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físico – Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Hebenly Celis Leguizamo, Ingeniera Civil.

ABSTRACT

TITLE: ANALYSIS OF THE UNCERTAINTY FOR THE SHEAR DIRECT STRENGTH IN A LOOSE SAND*.

AUTHOR (S): JHON FREDY BECERRA RAMIREZ
ANGHELO FABRIZIO CEDEÑO GONZÁLEZ**

KEYWORDS: Test, Uncertainty, Reliability, Variation, Shear Effort

DESCRIPTION:

In the field of civil engineering, there are a variety of action fields, as is the case of soil studies; in fact, it is important to have the help of the laboratories, which are dedicated to the studies and analysis of samples. Even though, these tests are still accurate, they show variation in their results. Thus, it is relevant to study this variation, in order to present reliable reports.

One of the most used tests in soil laboratories is direct cutting, applied to a soil sample, whose purpose is to determine the shear strength of the mentioned sample subjected to deformations, which help researchers to identify problems, such as the determination of the support capacity in foundations, slope stability, and lateral pressure of the earth on containment structures.

This research focuses on the analysis of the uncertainty presented by the direct cutting test, carried out to a sample of loose sand with the same characteristics, thirty tests were implemented by two operators, fifteen each one of them, with standard loads of 8 kg, 16 kg, and 32 kg for each sample. The results of the tests were adjusted using a linear regression to perform the statistical analysis of the friction angles. Consequently, combined and expanded uncertainty were calculated, in order to analyze the different factors that influence the uncertainty presented in the trial.

* Degree work

** Facultad de Ingenierías Físico – Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Hebenly Celis Leguizamo, Ingeniera Civil

INTRODUCCIÓN

En la rama de la ingeniería civil la incertidumbre siempre está presente al momento de tomar decisiones importantes para el éxito de la ejecución de cualquier proyecto, ya que existe la probabilidad de que ocurran eventos inesperados. La incertidumbre a la que se enfrentan los ingenieros constantemente se estima de una manera subjetiva, utilizando el sentido común y su experiencia, adicional, esta surge por los errores y equivocaciones cometidas que no son corregidas.

El ensayo de corte directo tiene como objetivo determinar la resistencia al corte de un suelo consolidado y drenado. Por medio de este ensayo se busca identificar y solucionar factores que influyen en la confiabilidad, analizando el ángulo de fricción para solucionar problemas con la resistencia del suelo.

Este proyecto esta direccionado al análisis de la incertidumbre que se presenta en el ensayo de corte directo aplicado a una muestra de arena suelta de un mismo terreno. Para esto se ejecutaron 30 ensayos entre dos operarios, 15 cada uno, con cargas estándares de 8 kg, 16 kg y 32 kg para cada muestra. De acuerdo con la norma ASTM – D4254 – 16, el método empleado para verter la arena suelta en el molde fue por medio de un embudo.

Posteriormente se estudió y ajustaron los resultados por medio de una regresión lineal que nos deja ver la tendencia de los datos acerca de la resistencia del suelo analizado, estos resultados obtenidos son comparados con el análisis realizado a la muestra de arena compacta.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Determinar y analizar la variabilidad en los resultados obtenidos en el ensayo de corte directo en una arena suelta.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Establecer una metodología para el muestreo del ensayo de corte directo bajo consideraciones de la incertidumbre.
- Analizar los resultados obtenidos del ensayo de corte directo y la variabilidad de la resistencia al esfuerzo cortante.
- Establecer factores que influyen en la confiabilidad de los resultados del ensayo de corte directo.
- Comparar los resultados con los obtenidos para la arena compactada.

2. MARCO TEÓRICO

En esta investigación se estudió el ensayo de corte directo y el análisis de incertidumbre que se presentan en los resultados obtenidos de dichos ensayos, como también los diferentes parámetros que afectan la incertidumbre, a continuación, se definen los términos y normativas utilizados.

2.1 NORMA A UTILIZAR

El ensayo de corte directo tiene como norma I.N.V E 154 -13; Ensayo de corte directo en condición consolidada drenada (CD), esta norma tiene como objeto establecer el procedimiento de ensayo para determinar la resistencia al corte de una muestra de suelo consolidada y drenada, empleando el método de corte directo, la prueba se lleva a cabo deformando una muestra a velocidad controlada, cerca de un plano de corte determinado por la configuración del aparato de ensayo¹.

2.2 RESUMEN DEL MÉTODO

El ensayo de corte directo consiste en primera instancia en la preparación de la muestra a analizar, ya sea de muestras inalteradas o fabricadas en el laboratorio, una vez se tenga la muestra de suelo, se ensambla la caja de corte junto con el material, se debe saturar la caja de corte junto con la muestra en su totalidad, se aplica una carga normal para consolidar el espécimen y obtener los esfuerzos normal, enseguida se procede a desplazar la mitad de la caja de corte a una

¹ INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Norma de ensayo para materiales de carretera. Primera edición. Bogotá, 2013. Sección 100 p 1:il. (INV E 154 -13).

velocidad constante de deformación (se corta la muestra). El operario debe medir la fuerza de corte el desplazamiento horizontal y el vertical.

2.3 INCERTIDUMBRE

A la hora de realizar mediciones, se crea cierta duda de los valores obtenidos, esta duda se conoce como incertidumbre.

La incertidumbre de una medición se define como el intervalo estadístico dentro del cual se tiene una probabilidad de que se encuentre el valor verdadero. La incertidumbre es en cierta medida subjetiva, y se debe tomar como la duda que se tiene del resultado de la medición, debido a los errores que se cometen y que no se corrigen².

Existen diversos factores que afectan la exactitud de las medidas o ensayos realizados, entre ellos tenemos:

- Factores humanos
- Instalaciones y condiciones ambientales
- Calibración de los equipos
- Trazabilidad de la medición
- El muestreo
- El manejo de los elementos de ensayo y calibración

Para hacer una estimación más acertada de incertidumbre, existen varios parámetros que ofrecen intervalos de confianza, para esto se debe tener claro los siguientes conceptos:

² WOLFGANG A. SCHMID & LAZOS. Rubén J, MARTÍNEZ Guía para estimar la incertidumbre de la medición 2004 [en línea] disponible en: http://publicaciones.ops.org.ar/publicaciones/cursos_virtuales/OAA/Material/Gu%C3%ADa%20para%20estimar%20incertidumbre.pdf

- **Incertidumbre de una medición:** es un parámetro asociado con el resultado de esa medición, que caracteriza la dispersión de los valores que se podrían atribuir razonablemente al mensurado.
- **Incertidumbre estándar:** es la incertidumbre del resultado de una medición expresado como una desviación estándar.
- **La evaluación tipo A:** es el método de evaluación de la incertidumbre por medio del análisis estadístico de una serie de observaciones.
- **La evaluación tipo B:** es el método de evaluación de la incertidumbre por medios distintos al análisis estadístico de una serie de observaciones.
- **La incertidumbre estándar combinada:** es la incertidumbre estándar del resultado de una medición cuando el resultado se obtiene de los valores de las otras cantidades, y es igual a la raíz cuadrada positiva de una suma de términos, los cuales son las varianzas o covarianzas de estas otras cantidades ponderadas de acuerdo a como el resultado de la medición varía con cambios en estas cantidades.
- **La incertidumbre expandida:** es una cantidad que define un intervalo alrededor del resultado de una medición, y que se espera abarque una fracción grande de la distribución de valores que se podrían atribuir razonablemente al mensurado.
- **Factor de cobertura:** es un factor numérico utilizado como un multiplicador de la incertidumbre estándar combinada para obtener la incertidumbre expandida.
- **El error (de medición):** es el resultado de una medición menos el valor real del mensurado³.

³ MIRANDA M. Javier. Evaluación de la incertidumbre en datos experimentales [en línea] disponible en: http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/eval_incert_11208.pdf

2.3.1 Método para calcular la incertidumbre

2.3.1.1 Evaluación tipo A de la incertidumbre estándar. En la mayor parte de los casos, la mejor estimación del valor esperado μ_q de una cantidad q , y para la cual se han hecho n mediciones independientes q_k es la media aritmética o promedio q :

$$\bar{q} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n q_k \quad (1)$$

Las observaciones individuales q_k difieren en valor debido a variaciones aleatorias. La varianza experimental de las observaciones, que es un estimado de la varianza σ^2 de la distribución de probabilidad de q es:

$$s^2(q_k) = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (q_k - \bar{q})^2 \quad (2)$$

Esta cantidad, junto con su raíz cuadrada positiva $s(q_k)$ (conocida como la **desviación estándar experimental**), caracterizan la variabilidad de los valores observados q_k es decir, su dispersión alrededor de la media q .

Por otro lado, la mejor estimación de la varianza de la media $\sigma^2(q) = \frac{\sigma^2}{n}$ es:

$$s^2(\bar{q}) = \frac{s^2(q_k)}{n} \quad (3)$$

La varianza experimental de la media, junto con su raíz cuadrada positiva $s(q)$, denominada la desviación estándar experimental de la media, cuantifican que tan bien q estima el valor esperado de q , y se puede utilizar como una medida de la incertidumbre de q . En otras palabras, la evaluación tipo A de la **incertidumbre**

estándar de un conjunto de mediciones x_{k_o} , tal como se definió previamente, se logra con la ecuación⁴:

$$u(x) = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (q_k - \bar{q})^2}{n(n-1)}} \quad (4)$$

2.3.2 Fuentes posibles de incertidumbre en el ensayo de corte directo. En la práctica existen numerosas fuentes posibles de incertidumbre a la hora de realizar una medición, estas se conocen como fuentes de incertidumbre asociadas a su magnitud de entrada:

- Preparación de la muestra
- Carga normal aplicada a la muestra

A la hora de realizar los cálculos también existe incertidumbre en dicho proceso:

- Esfuerzo cortante
- Esfuerzo normal
- Angulo de fricción
- Cohesión (dependiendo el tipo de suelo)

Factores humanos a la hora de:

- Desarrollo del ensayo
- Informe de resultados

Precisión y calibración de los aparatos e implementos a usar:

- Máquina de corte directo
- Pesas

⁴ Ibíd.

3. METODOLOGÍA

Para dar cumplimiento a los objetivos del proyecto, se llevó a cabo una metodología conformada por tres fases; primera fase, consta de la clasificación de los materiales, en este proyecto se trabajó con una arena lavada de río a la cual se le realizaron ensayos de granulometría; segunda fase, descripción del ensayo de corte directo; tercera fase, se realizó el análisis de los resultados obtenidos en los ensayos de corte directo, mediante métodos estadísticos y el cálculo de las incertidumbres.

3.1 PRIMERA FASE: CLASIFICACIÓN DE LOS MATERIALES

La muestra de arena seleccionada pertenece al sector de pescadero en el municipio de Piedecuesta, Santander. La muestra fue tomada in situ, con descripción: arena gruesa con poco o nada de finos y una humedad relativamente alta, por lo cual se procede en el laboratorio a un secado en horno, a una temperatura $\pm 110^{\circ}\text{C}$ según norma I.N.V.E 216 - 07. Este ensayo se realizó con el fin de conocer la humedad natural, en porcentaje (%) de la muestra tomada.

En la Figura 1, se puede observar la muestra de arena seleccionada y tamizada por el tamiz número 4, esto con el fin de separar las gravas de la arena.

Ilustración 1. Material tamizado por el tamiz número 4



Los ensayos realizados en el laboratorio para determinar la clasificación de la arena fueron los siguientes:

- Determinación de los tamaños de las partículas de los suelos (I.N.V E 123 -13)

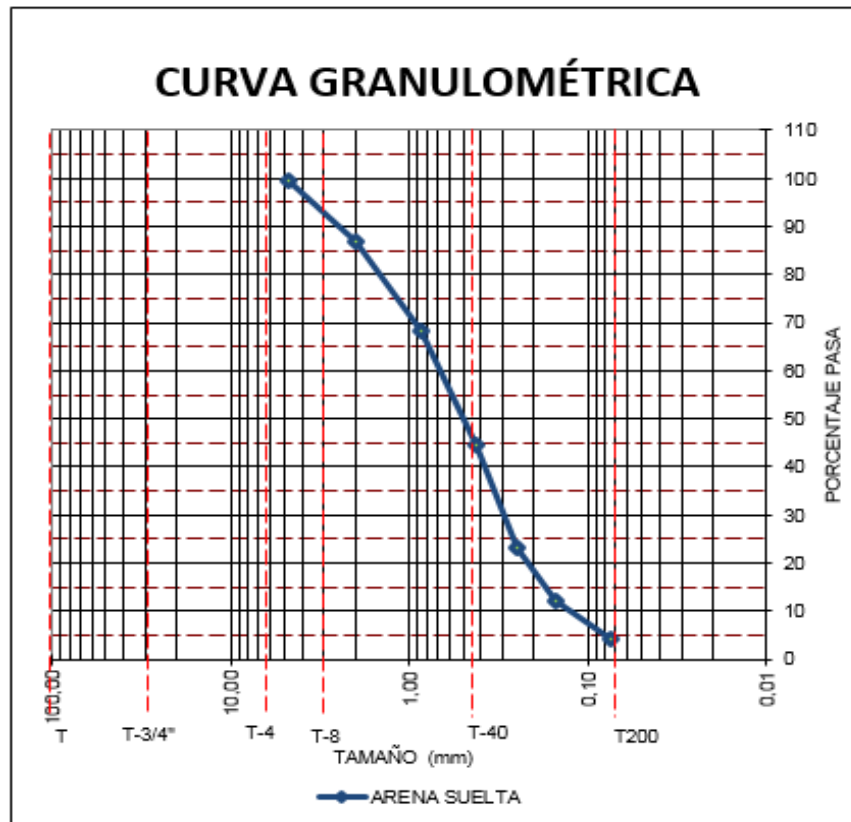
3.1.1 Clasificación del material (arena). Para realizar la clasificación de la arena, recurrimos a la norma I.N.V E 123 – 13; Determinación de los tamaños de las partículas de los suelos, este ensayo tiene como objetivo la determinación cuantitativa de la distribución de tamaños de partículas del suelo.

En la tabla 1, se muestran los resultados finales de la clasificación de la arena, en la figura 2 se graficó el porcentaje que pasa en cada tamiz versus la abertura del tamiz.

Tabla 1. Pesos retenidos en cada tamiz

Tamiz	Abertura [mm]	Peso Retenido [gr]	% Retenido	% Pasa
No. 4	4,75	4,20	0,42	99,58
No. 10	2,00	128,40	12,84	86,74
No. 20	0,85	183,80	18,38	68,36
No. 40	0,425	238,00	23,80	44,56
No. 60	0,25	213,80	21,38	23,18
No. 100	0,15	111,60	11,16	12,02
No. 200	0,075	76,30	7,63	4,39
Fondo		43,90	4,39	
TOTAL		956,1		

Figura 1. Curva granulométrica arena suelta



Una vez se realizó el ensayo de granulometría podemos definir qué tipo de material se va a trabajar, este análisis se realiza con el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos USCS, para dar un resultado acertado se calcularon dos criterios de clasificación, coeficiente de uniformidad (Cu) y coeficiente de curvatura (Cc), cuyos rangos para su medida son: $Cu > 6$ y Cc entre 1 y 3 para una arena.

A continuación se realizó el cálculo de Cu y Cc:

Para el cálculo de dichos coeficientes previamente se calcula los pesos retenidos para diferentes diámetros en la curva denominados D10, D30, D60; estos diámetros corresponden al porcentaje retenido de partículas para un 10%, 30% y 60% del material tamizado.

El coeficiente de uniformidad se define con la siguiente formula:

$$Cu = \frac{D60}{D10} \quad (5)$$

El coeficiente de curvatura se define con la siguiente formula:

$$Cc = \frac{D30^2}{D60 * D10} \quad (6)$$

Donde:

Cu = coeficiente de uniformidad

D10 = diámetro correspondiente al 10% de finos retenidos en la granulometría.

D30 = diámetro correspondiente al 30% de finos retenidos en la granulometría.

D60 = diámetro correspondiente al 60% de finos retenidos en la granulometría.

Para el cálculo de los diámetros mencionados, se realizó una interpolación relacionando los pesos retenidos en cada tamiz con la abertura del tamiz para el rango donde se encontraba cada porcentaje.

Calculo de D10: se tomó el rango dentro del cual se encontraba el 10% de material que pasa y se calculó el diámetro correspondiente.

Tamiz	Abertura [mm]	Peso [gr]	%Retenido	% Pasa
No. 100	0,15	111,60	11,16	12,02
No. 200	0,075	76,30	7,63	4,39

Se hizo la interpolación y se obtuvo D10

$$\frac{12.02 \% - 4.39\%}{0.15 \text{ mm} - 0.075 \text{ mm}} = \frac{10\% - 4.39\%}{D_{10} - 0.075 \text{ mm}}$$

$$D_{10} = 0.13 \text{ mm}$$

De igual manera se realizó el cálculo de D30 y D60, dando como resultado:

$$D_{30} = 0.31 \text{ mm}$$

$$D_{60} = 0.70 \text{ mm}$$

Ya obtenidos los diferentes diámetros se calculó Cu y Cc con las formulas 5 y 6.

$$Cu = \frac{D_{60}}{D_{10}} = \frac{0.70 \text{ mm}}{0.13 \text{ mm}} = \mathbf{1.045}$$

$$Cc = \frac{D_{30}^2}{D_{60} * D_{10}} = \frac{(0.31 \text{ mm})^2}{0.70 \text{ mm} * 0.13 \text{ mm}} = \mathbf{5.385}$$

De acuerdo con los rangos de Cu y Cc mencionados anteriormente, estos valores no cumplen para el material analizado, por tanto su clasificación según USCS, es una arena SP (Arenas mal gradadas).

Tabla 2. Datos obtenidos de la granulometría.

% de GRAVA	0.42 %
% de ARENA	95.19 %
% de FINO	4.39 %
Cu	1.045
Cc	5.385
CLASIFICACION DE SUELO (USCS)	SP

Para dar cumplimiento a uno de los objetivos establecidos, que consiste en comparar los resultados obtenidos en la investigación ANÁLISIS DE LA INCERTIDUMBRE PARA EL ENSAYO DE CORTE DIRECTO Y OBSERVACIÓN DE LOS FACTORES QUE INFLUYEN EN LA CONFIABILIDAD DE LOS RESULTADOS [4], con los obtenidos en esta investigación y con el fin de minimizar variables que generan incertidumbre, fue necesario ajustar la arena utilizada en esta investigación a la granulometría de la arena compacta utilizada en la investigación anteriormente nombrada. En el siguiente cuadro se observa la distribución por tamices de la arena utilizada (arena compacta).

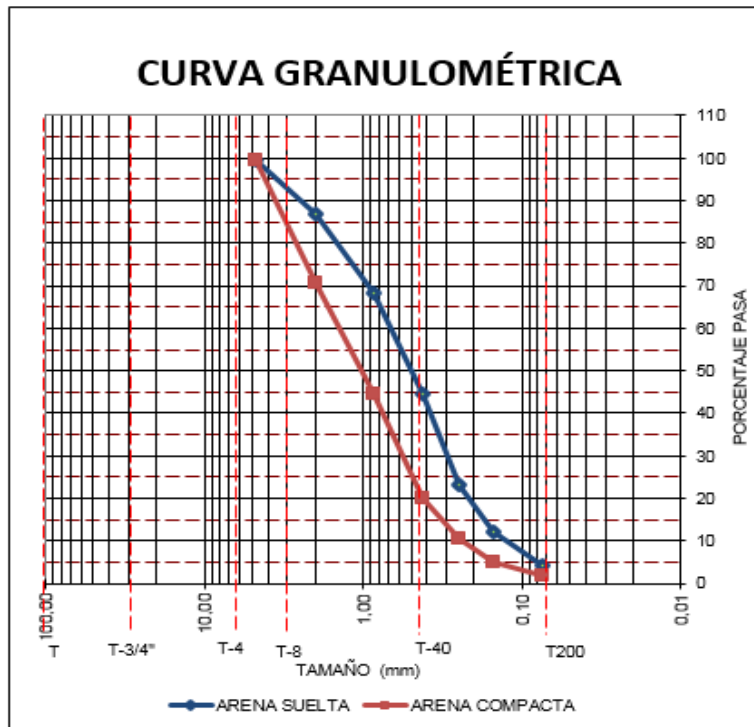
Tabla 3. Peso retenido en cada tamiz del análisis de incertidumbre para el ensayo de corte directo en una arena compacta

Tamiz	Abertura [mm]	Peso Retenido [gr]	% Retenido	% Pasa
No. 4	4,75	5,90	0,59	99,41
No .10	2,00	286,80	28,7	70,73
No. 20	0,85	261,80	26,2	44,55
No. 40	0,43	245,70	24,6	19,98
No. 60	0,25	92,98	9,3	10,68

Tamiz	Abertura [mm]	Peso Retenido [gr]	% Retenido	% Pasa
No. 100	0,15	56,97	5,7	4,98
No. 200	0,075	30,76	3,1	1,91
Fondo		19,09	1,9	
TOTAL		980,9		

En la figura 3 se graficó la granulometría perteneciente a la arena compacta junto con la obtenida de la arena suelta, ya mencionada anteriormente.

Figura 2. Curva granulométrica (Arena compacta, Arena suelta)



Como se logra observar en la figura 3, las curvas granulométricas no coinciden, por este motivo se ajustó la gradación de la arena suelta a la gradación de la arena compacta, logrando obtener la misma distribución por tamices de la arena compacta.

3.2 SEGUNDA FASE: DESCRIPCIÓN DEL ENSAYO DE CORTE DIRECTO

El procedimiento se realizó según la norma INV E - 154 – 13, Ensayo de Corte Directo en Condición Consolidada Drenada (CD), esta norma tiene por objeto establecer el procedimiento de ensayo para determinar la resistencia al corte de una muestra de suelo consolidada y drenada.

3.2.1 Selección del método para verter la arena en la caja de corte directo. De acuerdo con la norma ASTM - D4254 -16, se establece el método con el cual se adiciona la arena en el dispositivo de corte directo⁵.

Método A: verter el material en el molde usando un embudo.

Ilustración 2. Método A



⁵ ASTM D4254-16, American Society for Testing and Materials. "Métodos de prueba estándar para la densidad de índice mínima y el peso unitario de los suelos y el cálculo de la densidad relativa", [en línea] disponible en: https://compass.astm.org/EDIT/html_annot.cgi?D4254+16

Método B: Verter el material en un molde extrayendo un tubo lleno.

Ilustración 3. Método B



Método C: Verter el material mediante la inversión de un cilindro graduado.

Ilustración 4. Método C



Los resultados obtenidos en laboratorio para cada método son los siguientes:

Tabla 4. Resultados Método ASTM - D4254 - 16

Método	Peso 1 [kg]	Peso 2 [kg]	Peso 3 [kg]
A	0.1042	0.1046	0.1026
B	0.1012	0.1006	0.0985
C	0.0990	0.1024	0.0976

Con un molde empleado de diámetro igual a 0,06 m y altura de 0,022 m, se calcula su respectivo volumen:

$$V = \pi * r^2 * h$$

$$V = \pi * (0,03)^2 * 0,022$$

$$V = 6,22 \times 10^{-5} \text{ m}^3$$

Posteriormente calculamos la densidad de la arena para cada muestra:

$$\delta_{1A} = \text{Peso}_{1A} / \text{Volumen}$$

$$\delta_{1A} = 0,1042 \text{ kg} / 6,22 \times 10^{-5} \text{ m}^3$$

$$\delta_{1A} = 1675,15 \text{ kg/m}^3$$

Tabla 5. Densidades de la arena suelta

Método	$\bar{\delta}_1$ [kg/m ³]	$\bar{\delta}_2$ [kg/m ³]	$\bar{\delta}_3$ [kg/m ³]
A	1675.15	1681.58	1649.42
B	1626.92	1617.27	1583.51
C	1591.55	1646.21	1569.04

Posteriormente se calcula la desviación estándar para cada uno de los métodos:

Tabla 6. Desviación estándar de cada método

Método	Desviación
A	17.01
B	22.79
C	39.68

De acuerdo con los resultados obtenidos de la desviación estándar, se optó por el método A, debido a que presenta una dispersión de datos menor.

La preparación de la muestra se realizó directamente en el dispositivo de corte, como se muestra en la ilustración 5, además se evidencia el montaje en el dispositivo de corte en la ilustración 6.

Ilustración 5. Vertimiento de la arena



Ilustración 6. Vertimiento de la arena



3.2.2 Determinación de la velocidad de corte. El espécimen se debe someter a corte a una velocidad de deformación relativamente reducida, para que el exceso de presión de poros sea insignificante en la falla. La determinación de la velocidad de desplazamiento máximo apropiada se determina con la ecuación:

$$R_d = \frac{d_f}{t_f} \quad (7)$$

Dónde: R_d : Velocidad de desplazamiento, mm/min

d_f : Desplazamiento lateral relativo estimado en la falla, mm

t_f : Tiempo total estimado para alcanzar la falla, min

De acuerdo con la norma I.N.V.E 154 – 13, establece que para una arena mal gradada (SP), el tiempo mínimo estipulado para que el espécimen alcance la falla debe ser de 10 minutos, de acuerdo con la tabla número 7, además esta norma establece que para muestras de arena que presenta poco o nada de finos se recomienda utilizar un desplazamiento lateral relativo igual a $d_f = 5$ mm.

Tabla 7. Tiempo mínimo hasta la falla

CLASIFICACIÓN POR EL SISTEMA UNIFICADO (NORMA INV E-181)	TIEMPO MÍNIMO HASTA LA FALLA (t_f)
SW, SP	10 min
SW-SM, SP-SM, SM	60 min
SC, ML, CL, SP-SC	200 min
MH, CH	1440 min

Para un desplazamiento lateral relativo de 5 mm y un tiempo total estimado de falla igual a 10 minutos, se obtuvo la siguiente velocidad de desplazamiento:

$$R_d = \frac{5 \text{ mm}}{10 \text{ min}}$$

$$R_d = 0.5 \text{ mm/min}$$

Posteriormente cada operario realizó 15 ensayos de corte directo a la muestra de arena, cada una de estas se saturó durante 30 minutos y para cada carga estándar de 8 kg, 16 kg y 32 kg se consolidó durante 60 minutos para luego ser falladas a una velocidad constante de desplazamiento igual a 0.5 mm/min.

3.3 TERCERA FASE: ANÁLISIS DE RESULTADOS

Se realizaron los ensayos de corte directo a la arena adaptada según lo mencionado en el numeral 3.1.1, y se obtuvieron los siguientes resultados:

3.3.1 Resultados Operario 1. En la siguiente tabla se observan los resultados finales que obtuvo el operario 1 al realizar quince (15) ensayos de corte directo.

Tabla 8. Resultados Operario 1

#	8 kg		16 kg		32 kg		Ángulo de fricción
	Esfuerzo cortante máximo	Esfuerzo normal máximo	Esfuerzo cortante máximo	Esfuerzo normal máximo	Esfuerzo cortante máximo	Esfuerzo normal máximo	
	kg/cm ²	kg/cm ²	kg/cm ²	kg/cm ²	kg/cm ²	kg/cm ²	°
1	0.4337	0.2867	0.5927	0.5730	0.9102	1.1445	29.06
2	0.4426	0.2867	0.6994	0.5739	0.9641	1.1469	30.36
3	0.3776	0.2863	0.6648	0.5735	0.8943	1.1493	29.68
4	0.4521	0.2859	0.6232	0.5730	0.9121	1.1469	27.92
5	0.3125	0.2873	0.7051	0.5726	0.8190	1.1445	28.14
6	0.4477	0.2865	0.6111	0.5735	0.8751	1.1453	26.22
7	0.4462	0.2867	0.6380	0.5735	0.9328	1.1437	29.27
8	0.3948	0.2871	0.5963	0.5730	0.8947	1.1429	29.92
9	0.4182	0.2872	0.6923	0.5739	0.9419	1.1439	30.40
10	0.4202	0.2873	0.5703	0.5739	0.8649	1.1437	27.43
11	0.4654	0.2853	0.6720	0.5735	0.8982	1.1429	26.09
12	0.4495	0.2865	0.6183	0.5735	0.8869	1.1421	26.83
13	0.4893	0.2857	0.6335	0.5726	0.9607	1.1429	28.96
14	0.3748	0.2869	0.5929	0.5714	0.8780	1.1445	29.85
15	0.4971	0.2861	0.6711	0.5726	0.9665	1.1413	28.58

La variación que se presenta en los ángulos de fricción se debe al cambio de pendiente generada a partir de los esfuerzos cortantes y normales máximos en cada ensayo.

Tabla 9. Análisis estadístico del ángulo de fricción

ANGULO DE FRICCIÓN	
Número de Datos	15
Máximo	30.40
Mínimo	26.09
Rango	4.32
Promedio	28.58
Desviación Estándar	1.43

En el análisis estadístico del primer operario, se presenta un ángulo de fricción máximo de 30.40° y un mínimo de 26.09°, con una desviación estándar de 1.43.

De acuerdo con el autor Braja M. Das la arena suelta presenta un ángulo de fricción entre 27° y 30°⁶, lo cual indica que el promedio de los resultados obtenidos en el laboratorio se encuentra dentro del rango.

Tabla 10. Análisis estadístico carga 8 kg

Carga 8 kg	Esfuerzo cortante máximo	Esfuerzo normal máximo
	kg/cm ²	kg/cm ²
Número de Datos	15	15
Máximo	0.4971	0.2873
Mínimo	0.3125	0.2853
Rango	0.1847	0.0020
Promedio	0.4281	0.2866
Desviación Estándar	0.0478	0.0006

⁶ BRAJA M. Das, Fundamentos de Ingeniería geotécnica, Cuarta edición. Capítulo 7, Página 210 - 213.

Tabla 11. Análisis estadístico carga 16 kg

Carga 16 kg	Esfuerzo cortante máximo	Esfuerzo normal máximo
	kg/cm ²	kg/cm ²
Número de Datos	15	15
Máximo	0.7051	0.5739
Mínimo	0.5703	0.5714
Rango	0.1348	0.0025
Promedio	0.6387	0.5732
Desviación Estándar	0.0430	0.0006

Tabla 12. Análisis estadístico carga 32 kg

Carga 32 kg	Esfuerzo cortante máximo	Esfuerzo normal máximo
	Kg/cm ²	Kg/cm ²
Número de Datos	15	15
Máximo	0.9665	1.1493
Mínimo	0.8190	1.1413
Rango	0.1475	0.0080
Promedio	0.9066	1.1443
Desviación Estándar	0.0412	0.0021

Del análisis estadístico realizado a los quince ensayos a cargo del primer operario, la carga de 8 kg presenta la desviación más alta en comparación con las desviaciones de las cargas de 16 kg y 32 kg.

Además, se realizaron graficas de esfuerzo cortante y deformación para las cargas de 8kg, 16 kg y 32 kg. Ver **ANEXO A**.

3.3.2 Resultados Operario 2. Se realizaron 15 ensayos de corte directo por el operario 2, con la arena ya adaptada. A continuación, se presentan los resultados obtenidos.

Tabla 13. Resultados operario 2

#	8 kg		16 kg		32 kg		Ángulo de fricción
	Esfuerzo cortante máximo	Esfuerzo normal máximo	Esfuerzo cortante máximo	Esfuerzo normal máximo	Esfuerzo cortante máximo	Esfuerzo normal máximo	
	kg/cm ²	kg/cm ²	kg/cm ²	kg/cm ²	kg/cm ²	kg/cm ²	°
16	0,5623	0,2865	0,8548	0,5735	1,0218	1,1453	26,59
17	0,4184	0,2873	0,6227	0,5743	0,8756	1,1413	27,60
18	0,5272	0,2859	0,7754	0,5730	1,0240	1,1477	29,07
19	0,5236	0,2859	0,7051	0,5726	0,9885	1,1461	28,10
20	0,4641	0,2867	0,6751	0,5730	0,9797	1,1421	30,68
21	0,5603	0,2855	0,7554	0,5714	1,0418	1,1437	28,92
22	0,5111	0,2869	0,7575	0,5730	1,0057	1,1453	29,07
23	0,4566	0,2865	0,7365	0,5706	0,9364	1,1437	27,89
24	0,4423	0,2865	0,7324	0,5702	0,9309	1,1413	28,33
25	0,4576	0,2871	0,6568	0,5726	0,9727	1,1485	30,57
26	0,4561	0,2873	0,6003	0,5735	0,9319	1,1469	29,12
27	0,4244	0,2865	0,6344	0,5735	0,9467	1,1453	30,93
28	0,4077	0,2873	0,6035	0,5730	0,8679	1,1453	27,74
29	0,4429	0,2869	0,6268	0,5730	0,9091	1,1453	28,19
30	0,5089	0,2867	0,6951	0,5718	0,9914	1,1453	29,05

Tabla 14. Análisis estadístico del ángulo de fricción

ÁNGULO DE FRICCIÓN	
Número de Datos	15
Máximo	30.93
Mínimo	26.59
Rango	4.34
Promedio	28.79
Desviación Estándar	1.22

En el análisis estadístico del segundo operario, se presenta un ángulo de fricción máximo de 30.93° y un mínimo de 26.59°, con una desviación estándar de 1.22

En el análisis de datos del segundo operario, la desviación estándar del ángulo de fricción es menor en comparación a la desviación calculada en el análisis de datos del primer operario, esta variación se debe posiblemente a factores humanos que se presentan durante la ejecución de los ensayos.

Tabla 15. Análisis estadístico carga 8 kg

Carga 8 kg	Esfuerzo cortante máximo	Esfuerzo normal máximo
	kg/cm ²	kg/cm ²
Número de Datos	15	15
Máximo	0.5623	0.2873
Mínimo	0.4077	0.2855
Rango	0.1547	0.0018
Promedio	0.4776	0.2867
Desviación Estándar	0.0506	0.0005

Tabla 16. Análisis estadístico carga 16 kg

CARGA 16 kg	ESFUERZO CORTANTE MÁXIMO	ESFUERZO NORMAL MÁXIMO
	kg/cm ²	kg/cm ²
Número de Datos	15	15
Máximo	0.8548	0.5743
Mínimo	0.6003	0.5702
Rango	0.2545	0.0040
Promedio	0.6954	0.5726
Desviación Estándar	0.0734	0.0011

Tabla 17. Análisis estadístico carga 32 kg

CARGA 32 kg	ESFUERZO CORTANTE MÁXIMO	ESFUERZO NORMAL MÁXIMO
	kg/cm ²	kg/cm ²
Número de Datos	15	15
Máximo	1.0418	1.1485
Mínimo	0.8679	1.1413
Rango	0.1739	0.0072
Promedio	0.9616	1.1449
Desviación Estándar	0.0532	0.0021

Del análisis estadístico realizado a los quince ensayos a cargo del segundo operario, la carga de 16 kg presenta la desviación más alta en comparación con las desviaciones de las cargas de 8 kg y 32 kg.

Se realizan las respectivas graficas de esfuerzo cortante y deformación para las cargas de 8 kg, 16 kg, 32 kg. Ver **ANEXO B**.

4. ANÁLISIS DE LA INCERTIDUMBRE PRESENTADA EN LOS ENSAYOS DE CORTE DIRECTO

Es importante que al realizar ensayos en el laboratorio, se presenten resultados confiables, para así dar soluciones acertadas al problema en estudio. Al realizar el análisis de los resultados se debe esperar variaciones e incertidumbres mínimas con el fin de dar seguridad.

4.1 CÁLCULO DE LA INCERTIDUMBRE PRESENTADA EN LOS ENSAYOS DE CORTE DIRECTO

Los siguientes cálculos de incertidumbre se hacen según la guía para la expresión de la incertidumbre de medida 2008, de autoría conjunta de las organizaciones miembros de JCGM.

4.1.1 Incertidumbre estándar asociada a las medidas, calculada a partir de los resultados obtenidos de cada operador. Cuando se realizan los ensayos de corte directo surgen errores en la toma de datos, estos errores generan incertidumbre; los ensayos se ejecutaron en condiciones iguales por cada operador en el laboratorio. A continuación, se presenta el resultado de la incertidumbre estándar para cada operario, utilizando la ecuación número (4).

Tabla 18. Resultados incertidumbre estándar operario 1

ÁNGULO DE FRICCIÓN Ø OPERADOR 1		
n (número de datos)	n	15
Media	\bar{q}	28.63
Varianza	s^2	2.09
Desviación estándar	raíz(s^2)	1.45

ÁNGULO DE FRICCIÓN Ø OPERADOR 1		
Varianza experimental de la media	$s^2 / (\bar{q})$	0.14
Incertidumbre estándar	$u(x_i)$	0.37

Tabla 19. Resultados incertidumbre estándar operario 2

ÁNGULO DE FRICCIÓN Ø OPERADOR 2		
n (número de datos)	n	15
Media	\bar{q}	28.79
Varianza	s^2	1.50
Desviación estándar	raíz(s^2)	1.22
Varianza experimental de la media	$s^2 / (\bar{q})$	0.10
Incertidumbre estándar	$u(x_i)$	0.32

En la tabla 18 y 19 se presentan los resultados asociados a la incertidumbre estándar de los ángulos de fricción, obtenidos por cada operador, dando como resultados valores similares; el operario 1 una incertidumbre de 0.37 y el operario 2 una incertidumbre de 0.32.

4.1.2 Cálculo de incertidumbre combinada. Para realizar el cálculo de la incertidumbre combinada, se tuvo en cuenta las magnitudes de los ensayos realizados por los dos operadores, al realizar el análisis de incertidumbre estándar se observó que estos resultados están correlacionados significativamente, de manera que se combinaron entre sí. De esta forma se obtiene la incertidumbre combinada U_c , calculada con la siguiente ecuación:

$$U_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + \dots + u_n^2} \quad (7)$$

Siendo $u_1^2 + u_2^2 + \dots + u_n^2$ la incertidumbre estándar calculada previamente en el numeral 4.1.1 para cada operador.

$$U_c = \sqrt{0.37^2 + 0.32^2} = 0.49$$

El cálculo de la incertidumbre combinada arroja una pequeña variación de los datos correlacionados de ambos operarios.

4.1.3 Cálculo de la incertidumbre expandida. La incertidumbre expandida U indica un intervalo, llamado intervalo de confianza, que representa una fracción “ p ” de los valores que puede probablemente tomar el valor verdadero de medida o mensurado. Para realizar el cálculo de la incertidumbre expandida se multiplica la incertidumbre combinada por un número denominado “factor de cobertura” k_p ⁷.

$$k_p * Uc = U \quad (8)$$

El valor de p es llamado el nivel de confianza y puede ser elegido a conveniencia. En el medio industrial, a menudo se elige el nivel de confianza de manera tal que corresponda a un factor de cobertura como un número entero de desviaciones estándar en una distribución normal. Por ejemplo, $k = 1$ corresponde a $p = 68,27 \%$, $k = 2$ corresponde a $p = 95,45\%$ y $k = 3$ a $p = 99,73 \%$ ⁸.

En esta investigación se tomó una confiabilidad de 95%, con un $k_p = 2$.

En la siguiente tabla se muestra el resultado de la incertidumbre expandida, junto con una recopilación de las demás incertidumbres calculadas.

Tabla 20. Cálculo de incertidumbre expandida

ANÁLISIS DE INCERTIDUMBRE ÁNGULO DE FRICCIÓN Ø			
		OPERARIO 1	OPERARIO 2
n (número de datos)	n	15	15
Media	\bar{q}	28.58	28.79
Varianza	s^2	2.05	1.49
Desviación estándar	raíz(s^2)	1.43	1.22

⁷ MIRANDA M. Javier. Op. Cit.

⁸ *Ibíd.*

ANÁLISIS DE INCERTIDUMBRE ÁNGULO DE FRICCIÓN ϕ			
		OPERARIO 1	OPERARIO 2
Varianza experimental de la media	$s^2/(\bar{q})$	0.14	0.10
Incertidumbre estándar	$u(x_i)$	0.37	0.32
Incertidumbre combinada	U_c	0.486	
Incertidumbre expandida	$U = 2*U_c$	0.970	

En la tabla 20 encontramos el resultado de la incertidumbre expandida con un valor de 0.970 y la incertidumbre combinada con un valor de 0.486, esto nos indica que los resultados de los dos operarios tienen una dispersión baja, dando confiabilidad a los resultados obtenidos.

5. RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE CORTE DIRECTO DE LA ARENA COMPACTA Y ARENA SUELTA

Una vez calculada las incertidumbres de esta investigación, se hizo una comparación de los resultados obtenidos en el análisis de la incertidumbre para el ensayo de corte directo y observación de los factores que influyen en la confiabilidad de los resultados, en la tabla 20, se observa los resultados obtenidos en las dos investigaciones.

Tabla 21. Incertidumbre - Arena Suelta y Arena Compacta

ANÁLISIS DE INCERTIDUMBRE ÁNGULO DE FRICCIÓN ϕ					
		ARENA SUELTA		ARENA COMPACTA	
		Operario 1	Operario 2	Operario 1	Operario 2
Media	\bar{q}	28.58	28.79	39.02	40.56
Varianza	s^2	2.05	1.49	2.26	0.11
Desviación estándar	raíz(s^2)	1.43	1.22	1.50	0.34
Varianza experimental de la media	$s^2/(\bar{q})$	0.14	0.10	0.11	0.01
Incertidumbre estándar	$u(x_i)$	0.37	0.32	0.34	0.08
Incertidumbre combinada	U_c	0.486		0.350	
Incertidumbre expandida	$U=2*U_c$	0.970		0.690	

6. CONCLUSIONES

- De los ensayos de corte directo realizados por los dos operadores, se obtuvieron sus respectivos ángulos de fricción, estos ángulos presentaron una desviación estándar de 1,43 en los ensayos de primer operario y 1,22 para el segundo operario, siendo valores relativamente pequeños considerando que influyeron factores externos, como las vibraciones a causa de otras máquinas ya que se trabajó en horario académico.
- Uno de los factores más importantes que generan incertidumbre a la hora de realizar un ensayo en el laboratorio, es la preparación de la muestra, esto genera incertidumbres muy altas dando como resultados la toma de decisiones erróneas.
- Durante el vertimiento de la arena en la caja de corte, se presentaron fallas ya que la arena no quedaba del todo bien dispersa en toda la caja, esto ocasionaba que, al momento de realizar la falla, la arena se inclinaba dando lecturas de datos erróneas durante el ensayo.
- Del análisis estadístico realizado a los ángulos de fricción, se obtuvieron los siguientes resultados, para el caso de la incertidumbre combinada se obtuvo un resultado igual a 0.486 y 0.970 para la incertidumbre expandida, estos valores fueron calculados con una confiabilidad de 95%, lo cual indica una incertidumbre baja, de acuerdo a esto se puede afirmar que el ensayo de corte directo presenta una alta confiabilidad en sus resultados.
- Los resultados de incertidumbres combinada y expandida obtenidos para la arena compacta, son de 0,35 y 0,69 respectivamente, estos valores son menores en comparación a los presentados en la arena suelta, esta pequeña variación se debe a que la arena suelta no se compacta previamente antes de verterla a la caja de corte, ocasionando que la arena se compacte solo por la acción de la carga normal aplicada, lo cual genera mayor incertidumbre en los resultados.

BIBLIOGRAFIA

ASTM D4254-16, American Society for Testing and Materials. “Métodos de prueba estándar para la densidad de índice mínima y el peso unitario de los suelos y el cálculo de la densidad relativa”, [en línea] disponible en: https://compass.astm.org/EDIT/html_annot.cgi?D4254+16

BRAJA M. Das, Fundamentos de Ingeniería geotécnica, Cuarta edición. Capítulo 7, Página 210 -213.

INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Norma de ensayo para materiales de carretera. Primera edición. Bogotá, 2013. Sección 100 p 1:il. (INV E 154 -13).

JOIN COMITÉ FOR GUIDES IN METROLOGY, Evaluation of measurement data: Guide to the expression of uncertainty in measurement. First edition. Sevres: Editor, 2008.

JUÁREZ BADILLO, E. & RICO RODRÍGUEZ, A. Fundamentos de la Mecánica de Suelos, Tomo I, Limusa, México 2005.

MIRANDA M. Javier. Evaluación de la incertidumbre en datos experimentales [en línea] disponible en: http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/eval_incert_11208.pdf

MONTEALEGRE R. Leandra, SANABRIA B. Deysi, “Análisis de la incertidumbre para el ensayo de corte directo y observación de los factores que influyen en la confiabilidad de los resultados”, Bucaramanga, UIS, 2018 [en línea] disponible en:

http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/pags/cat/popup/pa_detalle_matbib_N.jsp?parametros=183629|28|143

WOLFGANG A. SCHMID & LAZOS. RUBÉN J, MARTÍNEZ Guía para estimar la incertidumbre de la medición 2004 [en línea] disponible en: http://publicaciones.ops.org.ar/publicaciones/cursos_virtuales/OAA/Material/Gu%C3%ADa%20para%20estimar%20incertidumbre.pdf

ANEXOS

Anexo A Gráfica de Resultados Operario 1

Figura 1. Gráfica esfuerzo cortante vs deformación horizontal, carga de 8 kg

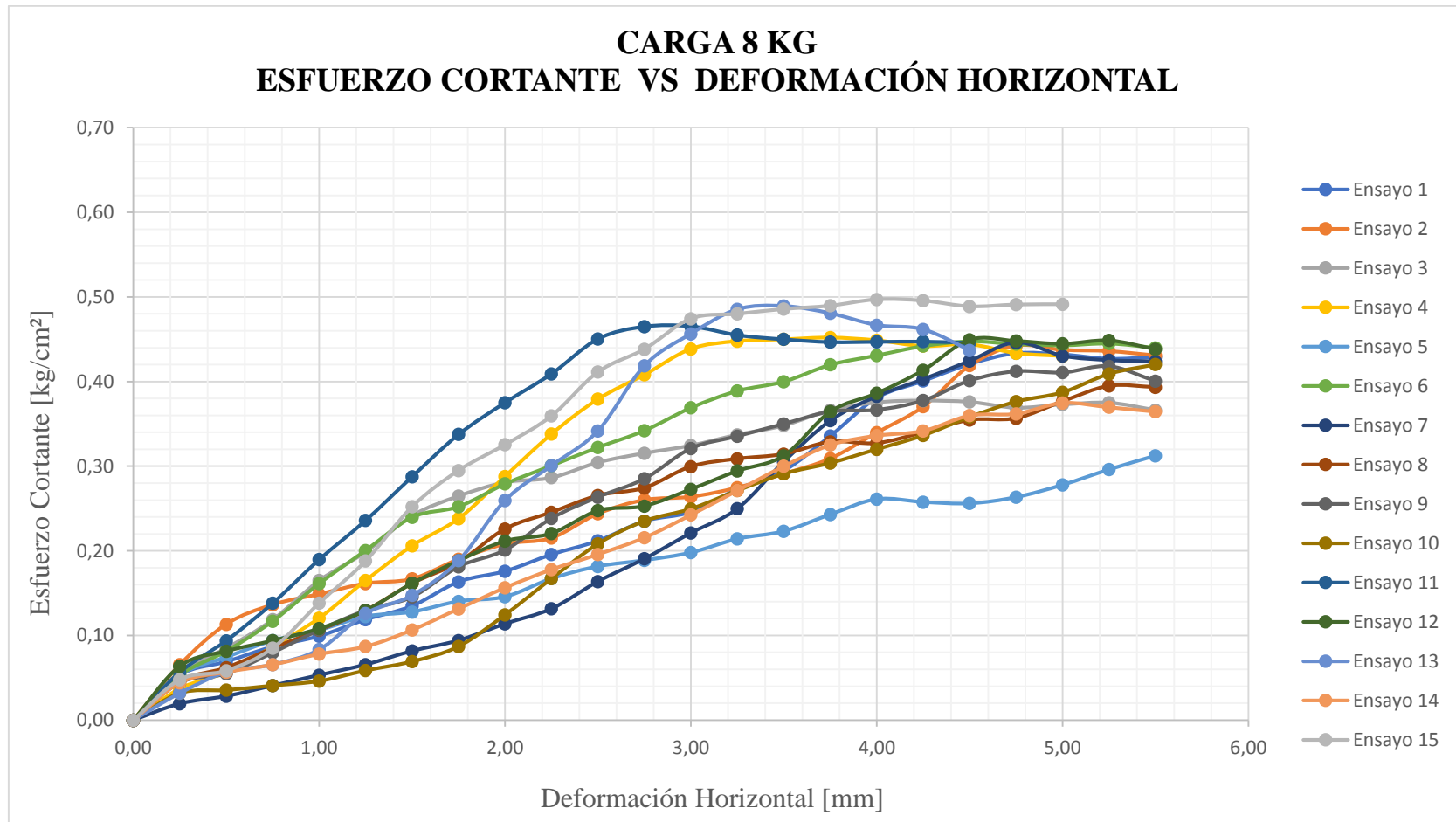


Figura 2. Grafica deformación vertical vs deformación horizontal, carga de 8 kg

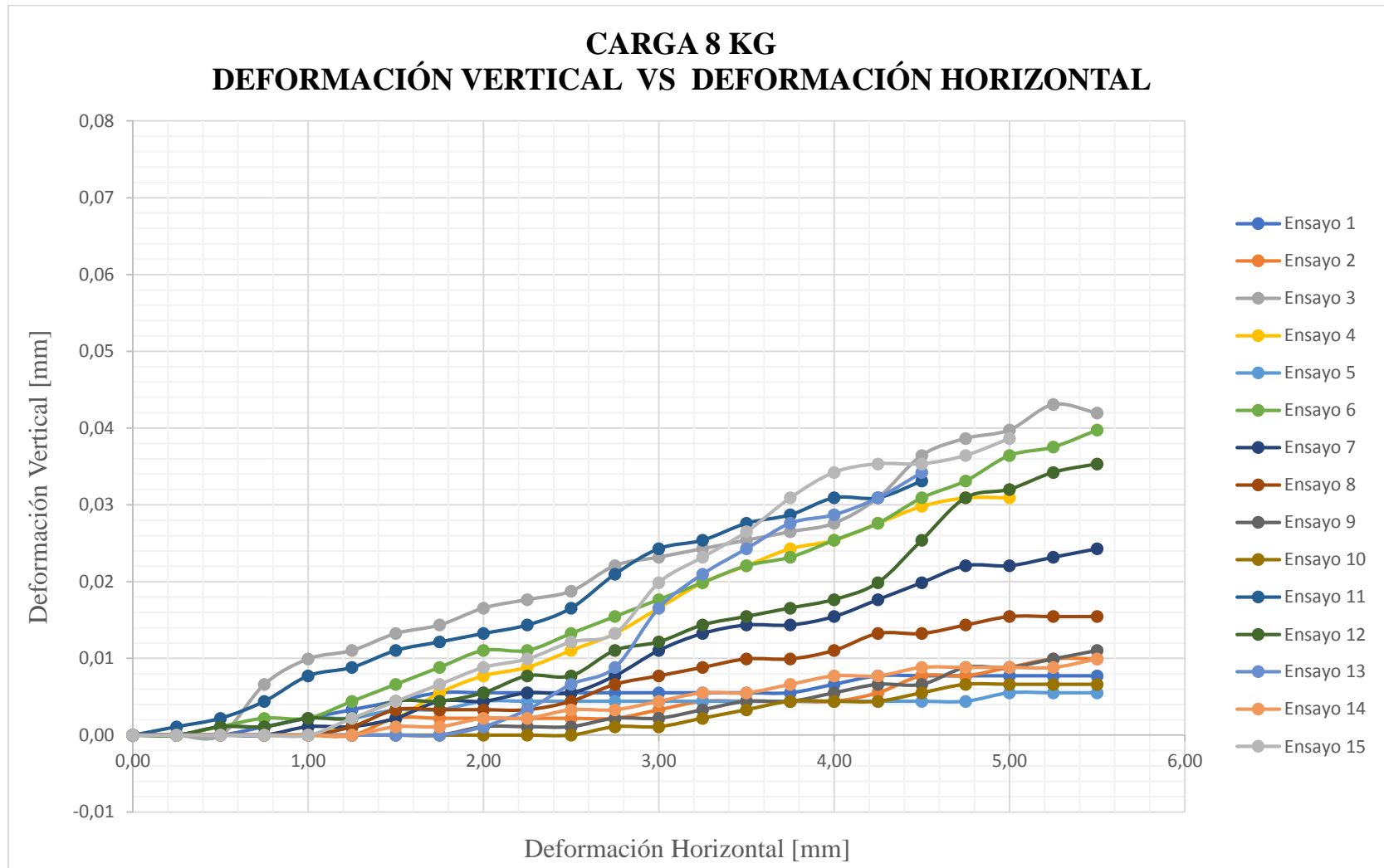


Figura 3. Grafica esfuerzo cortante vs deformación horizontal, carga de 16 kg

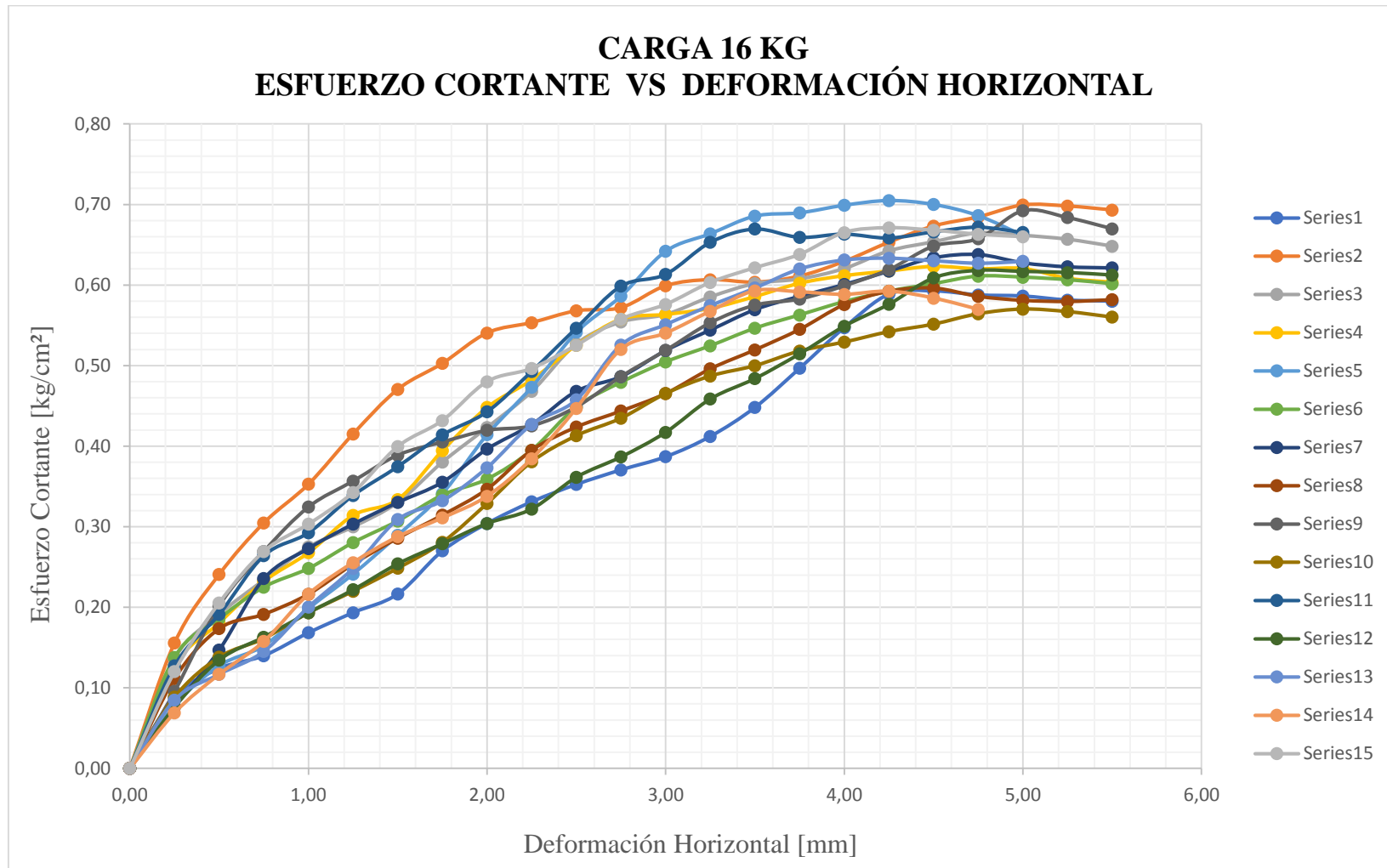


Figura 4. Grafica deformación vertical vs deformación horizontal, carga de 16 kg

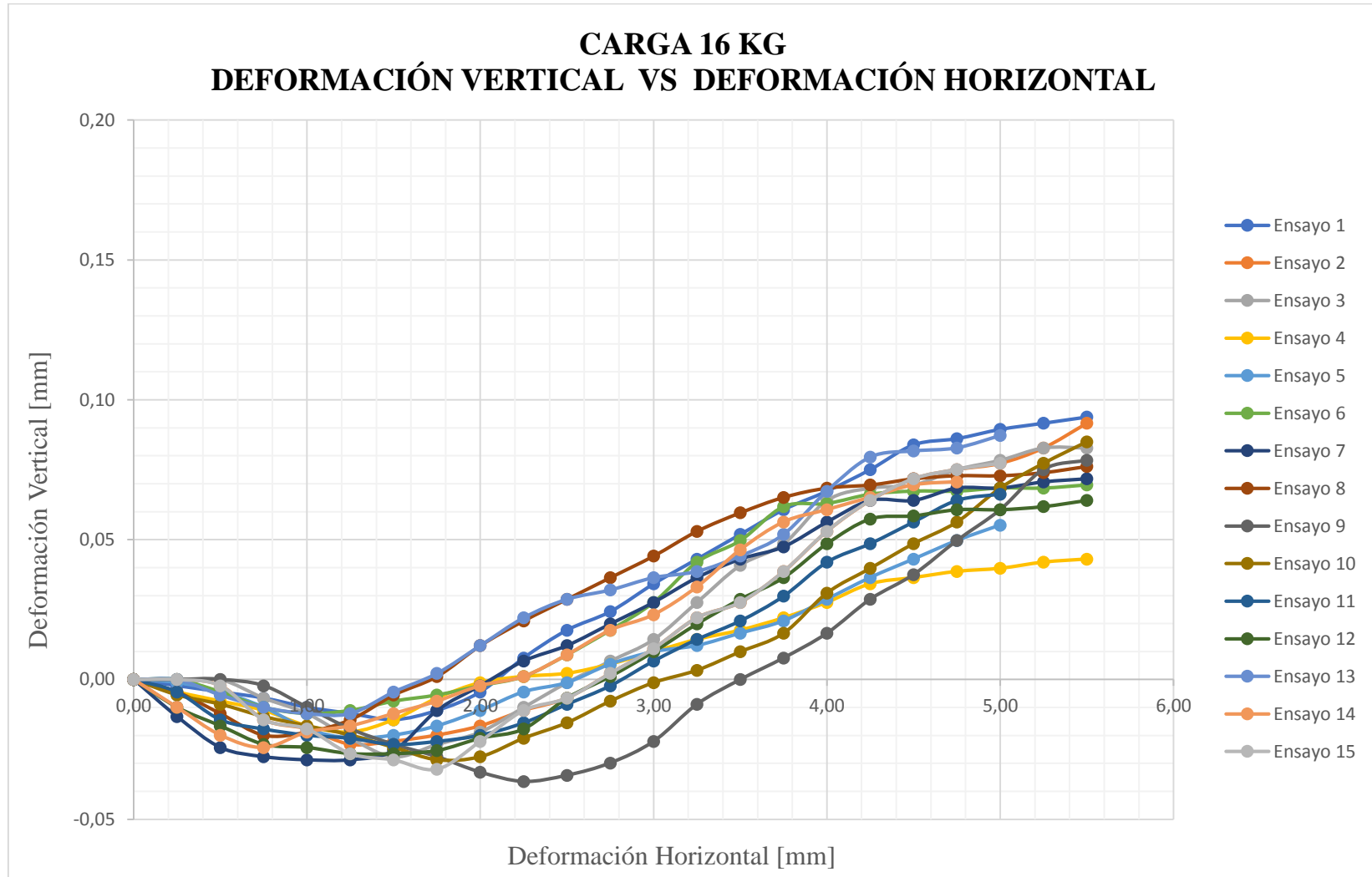


Figura 5. Grafica esfuerzo cortante vs deformación horizontal, carga de 32 kg

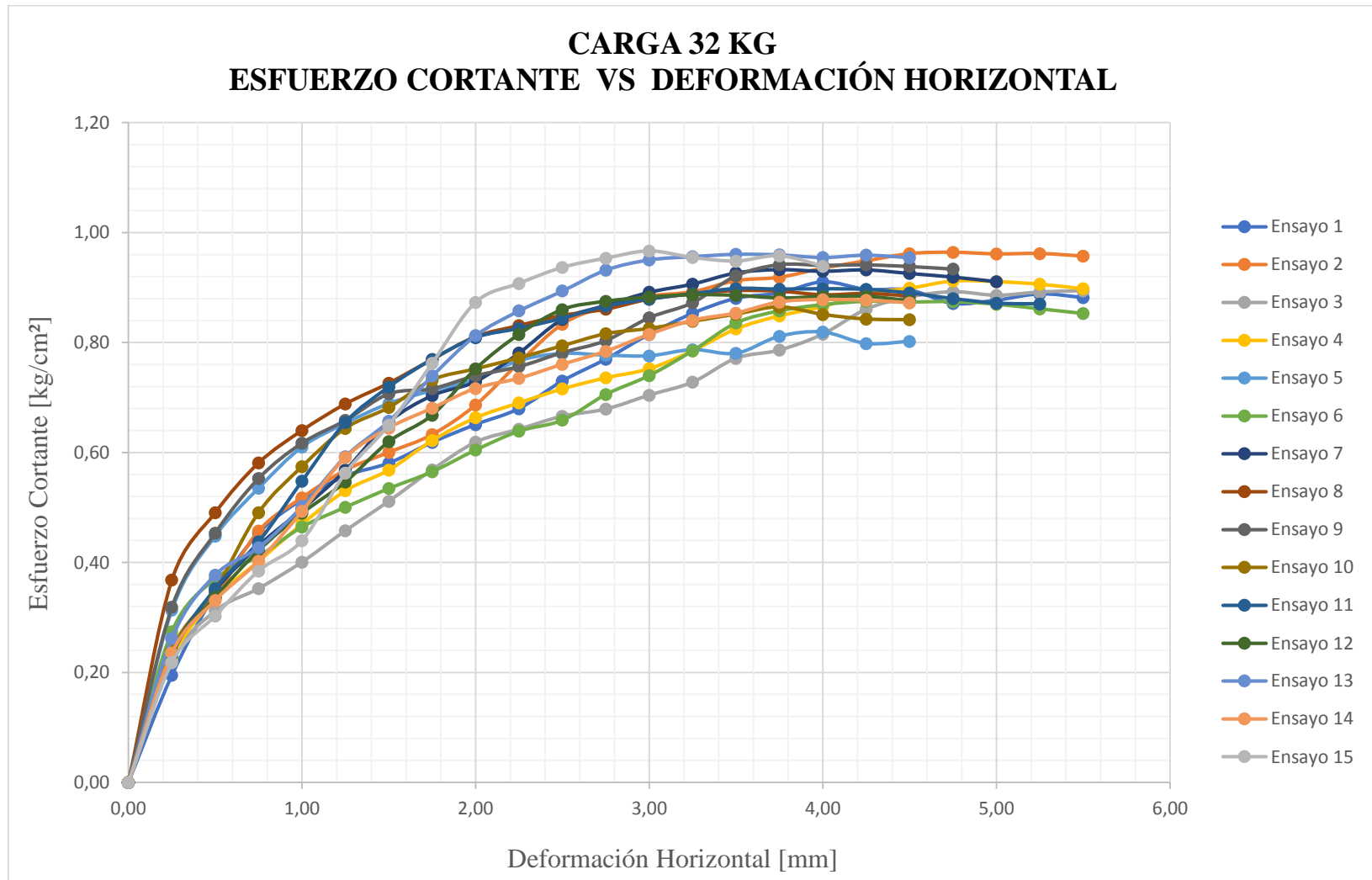
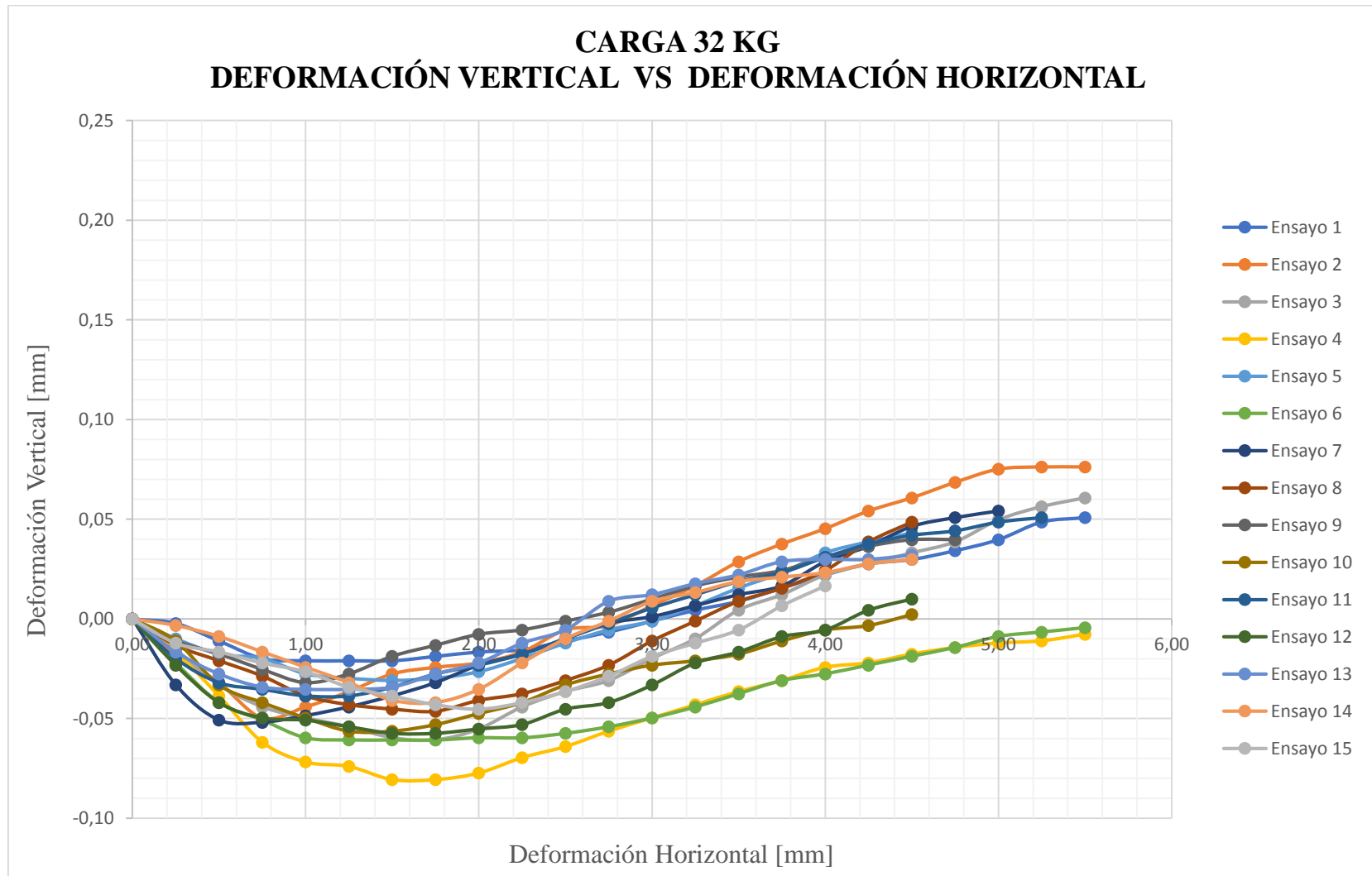


Figura 6. Grafica deformación vertical vs deformación horizontal, carga de 32 kg



Anexos B. Gráfica de Resultados Operario 2

Figura 1. Gráfica esfuerzo cortante vs deformación horizontal, carga de 8 kg

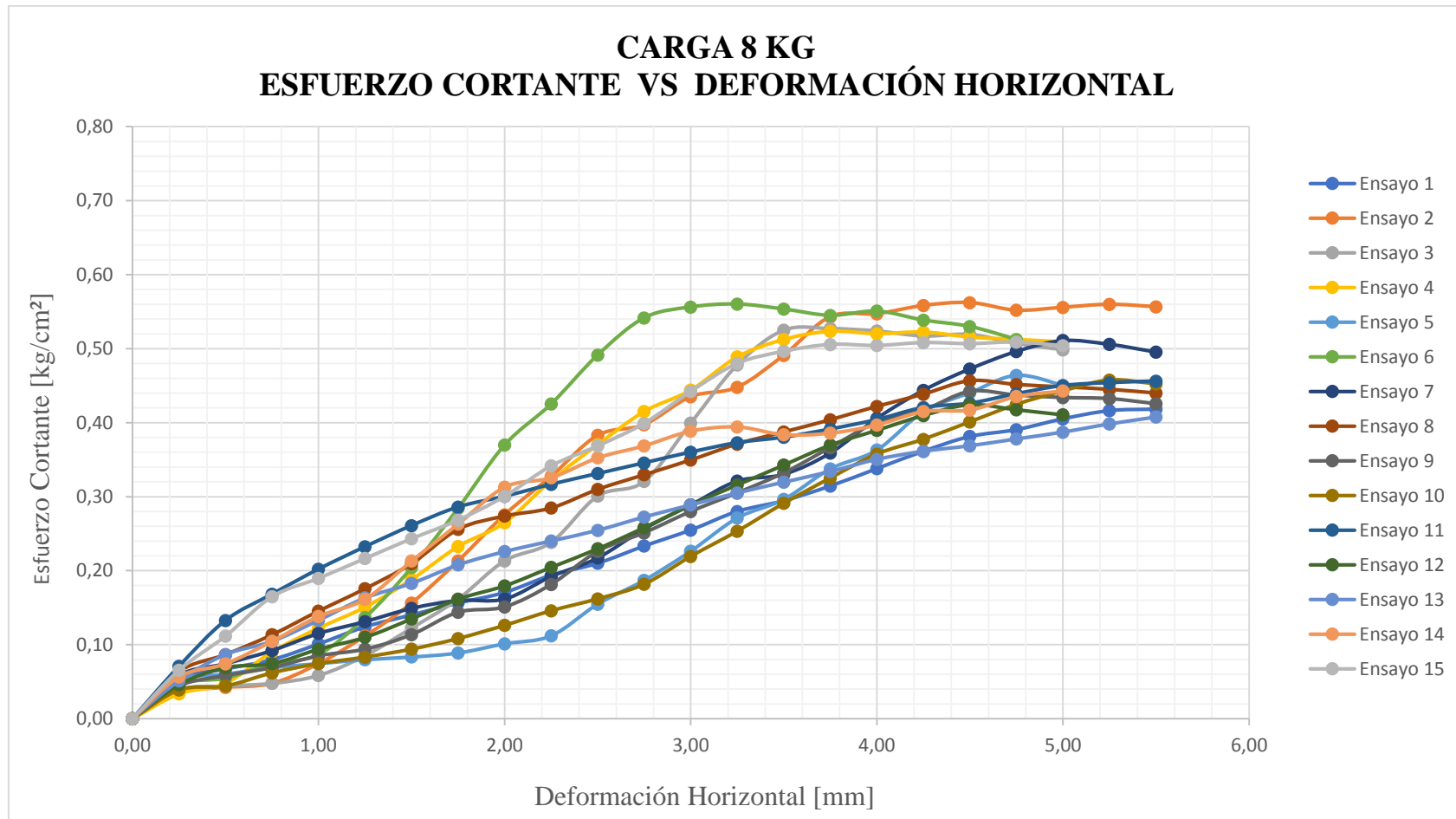


Figura 2. Grafica deformación vertical vs deformación horizontal, carga de 8 kg

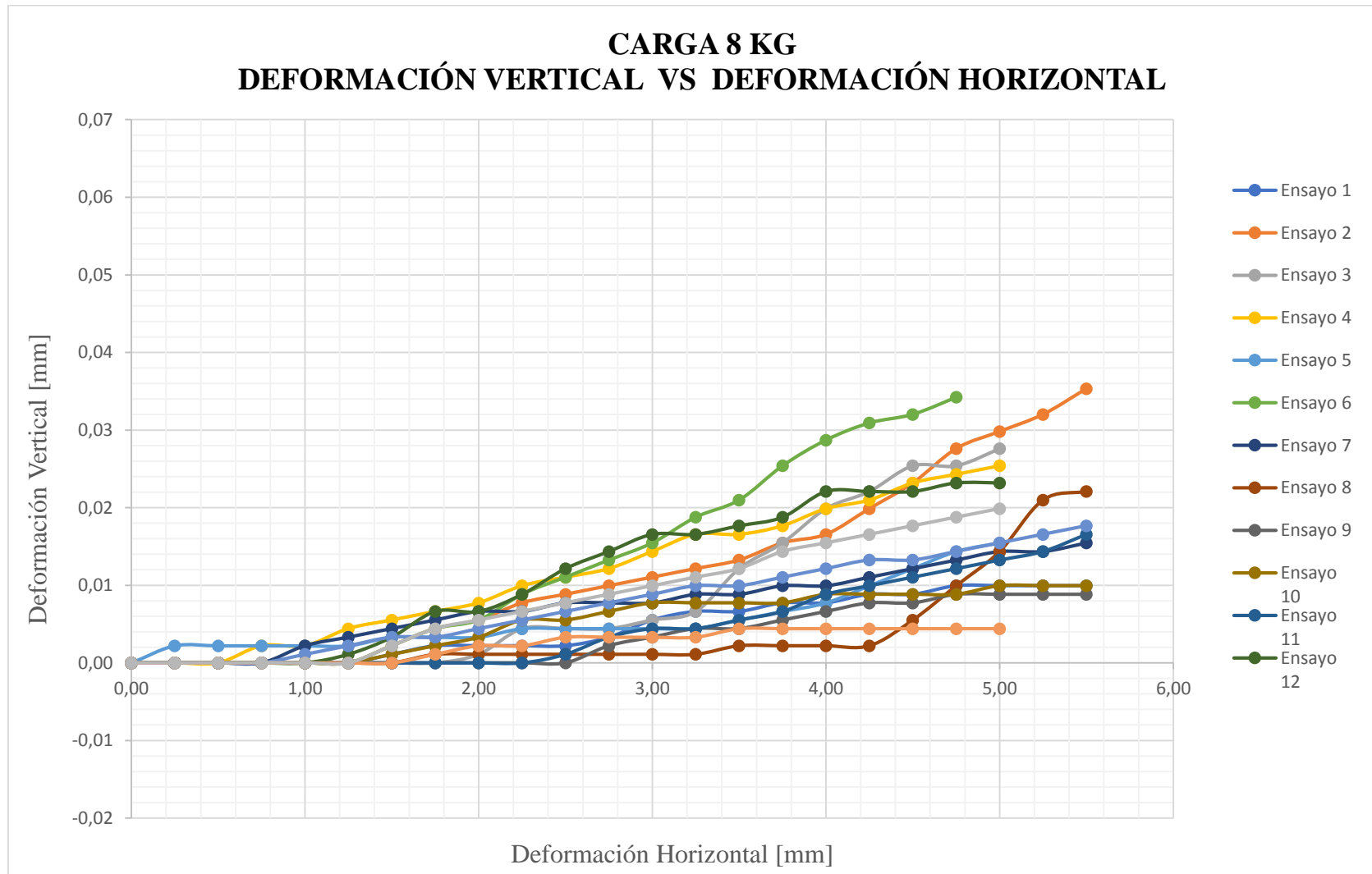


Figura 3. Grafica esfuerzo cortante vs deformación horizontal, carga de 16 kg

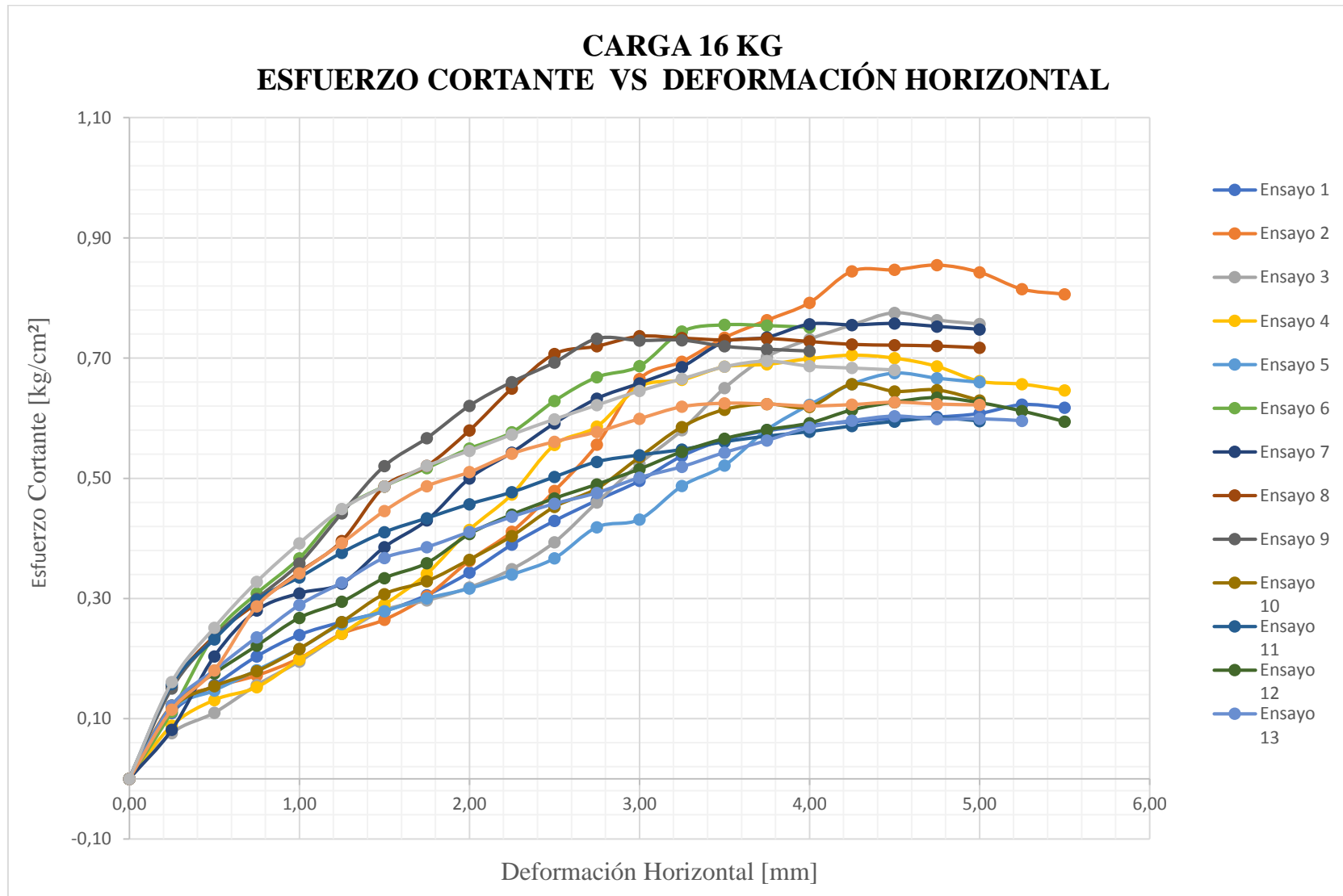


Figura 4. Grafica deformación vertical vs deformación horizontal, carga de 16 kg

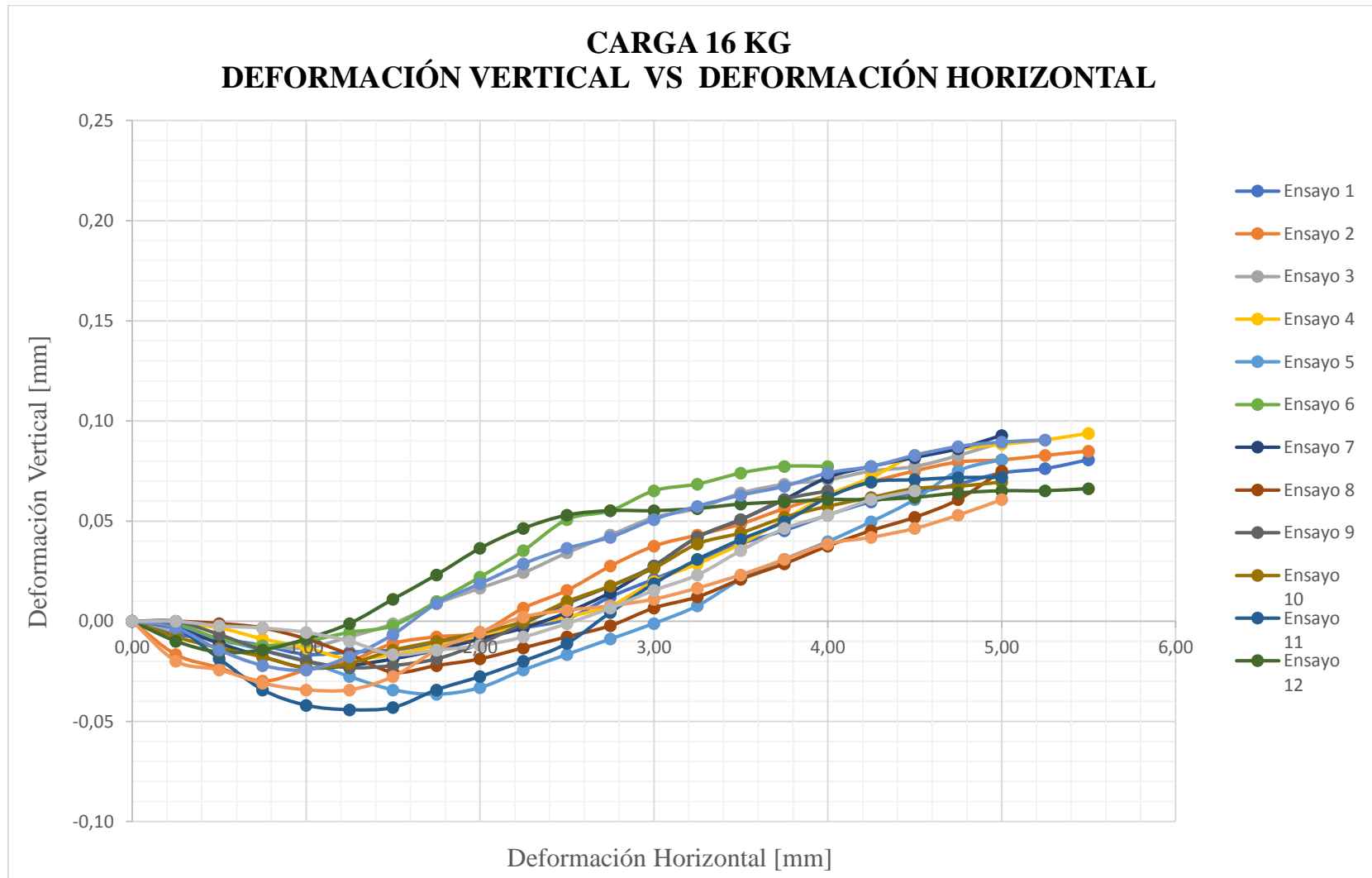


Figura 5. Grafica esfuerzo cortante vs deformación horizontal, carga de 32 kg

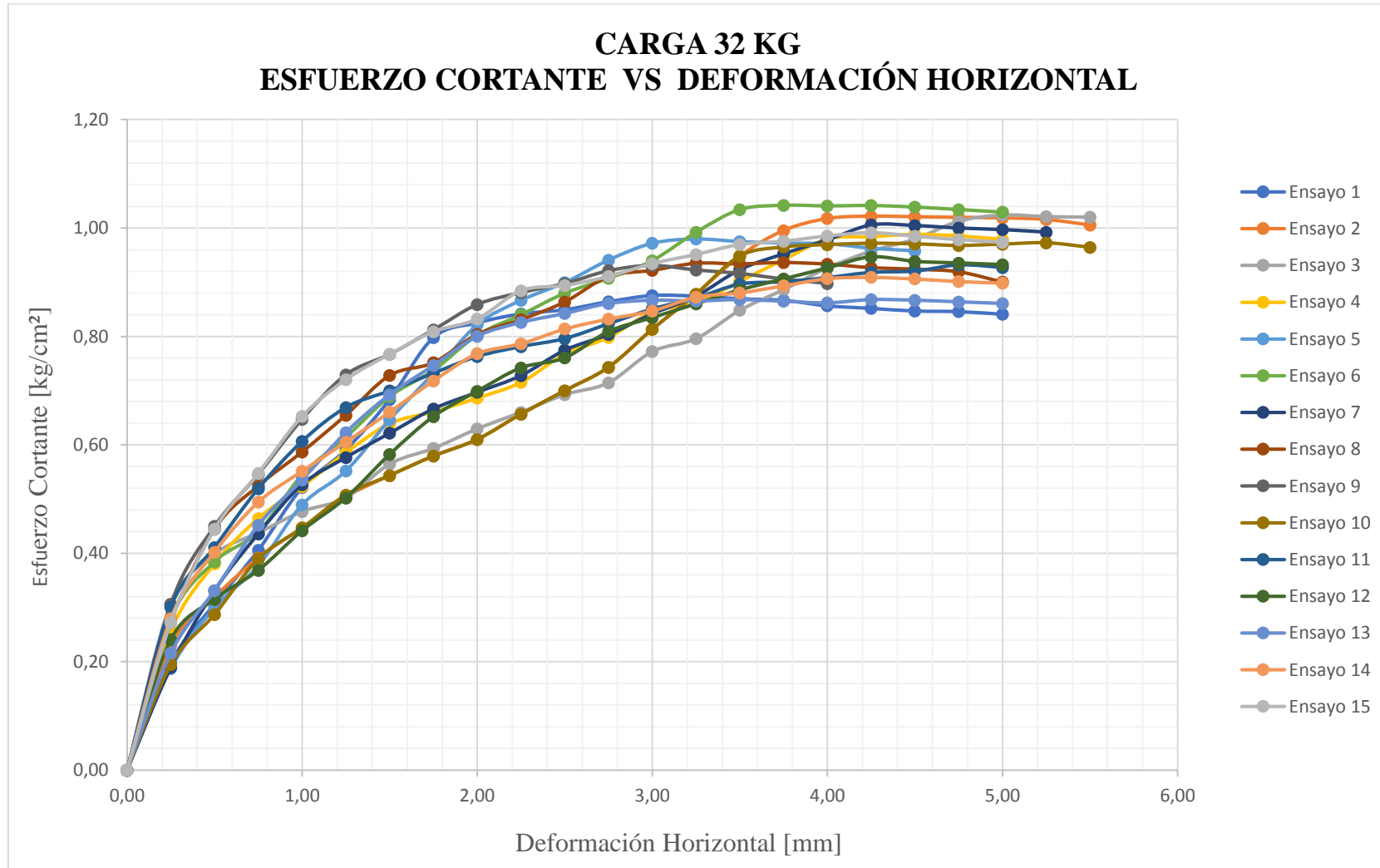


Figura 6. Grafica deformación vertical vs deformación horizontal, carga de 32 kg

